

NHỮNG THÁCH THỨC VÀ CƠ HỘI MỚI TRONG SẢN XUẤT VÀ CUNG CẤP PROTEIN CHO THỨC ĂN CHĂN NUÔI

Nguyễn Văn Quang (Sưu tầm)

Viện Chăn nuôi

Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Quang. Điện thoại: 0989637328. Email: quangvcn@gmail.com

TÓM TẮT

Sự cạnh tranh giữa thức ăn và thực phẩm về tài nguyên môi trường và kinh tế làm tăng mối lo ngại về việc sản xuất và cung cấp protein cho ngành chăn nuôi toàn cầu. Rủi ro đối với an ninh lương thực và thời hạn phát triển bền vững toàn cầu đang đến gần, đồng nghĩa với việc khám phá tiềm năng của nguồn thức ăn protein thay thế là điều bắt buộc. Tuy nhiên, do việc sử dụng thức ăn thay thế trong chăn nuôi vẫn còn ở giai đoạn sơ khai nên điều quan trọng là các rủi ro an toàn thực phẩm trực tiếp hoặc gián tiếp tiềm ẩn phải được đánh giá trước khi triển khai ở quy mô thương mại. Đánh giá này đưa ra một lăng kính tập trung vào các cơ hội và mối đe dọa tiềm ẩn của các giải pháp thay thế đó đối với sự bền vững và an toàn thực phẩm của ngành chăn nuôi toàn cầu. Bốn nguồn protein thay thế tiềm năng cho thức ăn chăn nuôi được xác định và đánh giá là: (1) Cây trồng protein biến đổi gen; (2) Nông nghiệp tế bào; (3) Thực phẩm cũ, thực phẩm thừa và các sản phẩm phụ của công nghiệp; (4) Phụ phẩm động vật và côn trùng.

Thông qua phân tích này, lộ trình chính sách chiến lược và chương trình nghiên cứu được tổng hợp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc hoạch định chính sách ở cấp cao hơn, hỗ trợ các giải pháp địa phương nhằm phát triển bền vững toàn cầu và một tương lai an toàn lương thực. Bốn hướng chính cho việc hoạch định và nghiên cứu chính sách mà đánh giá đề xuất là (i) Tách sản xuất protein từ nhiên liệu hóa thạch; (ii) Phát triển các chiến lược kinh tế bền vững cho các protein thay thế ở cấp địa phương; (iii) Hỗ trợ các giải pháp thức ăn chăn nuôi tuần hoàn; (iv) Tăng cường hơn nữa hệ thống quản lý thức ăn và thực phẩm.

Từ khóa: *Protein, thức ăn chăn nuôi, thách thức, cơ hội.*

MỞ ĐẦU

Tương lai của thức ăn chăn nuôi là mối quan tâm lớn đối với các bên liên quan của ngành nông nghiệp thực phẩm, bao gồm các nhà sản xuất và người tiêu dùng các sản phẩm chăn nuôi cũng như các cơ quan quản lý cần giám sát sự phát triển bền vững của ngành và đảm bảo an toàn thực phẩm (Makkar, 2018; Gurgel, Reilly và Blanc, 2021). Sản xuất thức ăn chăn nuôi là tác nhân lớn nhất gây ra tác động đến môi trường và kinh tế liên quan đến hệ thống chăn nuôi. Người ta dự đoán rằng nhu cầu ngày càng tăng về thực phẩm có nguồn gốc động vật sẽ dẫn đến sản lượng chăn nuôi toàn cầu tăng gấp đôi vào năm 2050 (FAO, 2019). Phần lớn các hệ thống chăn nuôi trên toàn cầu phụ thuộc nhiều vào các nguồn thực vật không bền vững để đáp ứng nhu cầu protein trong dinh dưỡng vật nuôi (FAO, 2018). Sản xuất thức ăn chăn nuôi cạnh tranh trực tiếp về các nguồn lực cần thiết để sản xuất thực phẩm cho con người, đặc biệt do khí hậu thay đổi. Bột đậu nành, hướng dương và hạt cải dầu, những nguồn protein thực vật thông thường phổ biến nhất trong công thức thức ăn, có liên quan trực tiếp đến các tác động tiêu cực bao gồm ô nhiễm khí quyển và hiện tượng nóng lên toàn cầu, axit hóa, phá rừng và suy thoái đất (LEAP, 2017; Andretta và cs., 2021). Những tác động môi trường này gây ra những tác động tiêu cực thứ cấp đáng kể đến việc bảo tồn môi trường sống, đa dạng sinh học động thực vật cũng như sức khỏe cộng đồng (Semper-Pascual và cs., 2019; Adam và cs., 2021).

Xem xét khả năng sinh tồn, hạn chế của hành tinh và sự bất ổn trong các yếu tố kinh tế vĩ mô, địa lý và kinh tế xã hội, việc nghiên cứu các thành phần thức ăn có khả năng phục hồi và bền vững hơn do đó được gọi là nguồn thay thế là rất quan trọng để cải thiện tính bền vững của ngành chăn nuôi và đáp ứng các yêu cầu ngày càng tăng cho cả dinh dưỡng vật nuôi và con người. (Van Huis và Ooninx, 2017; van Hal và cs., 2019; Te Pas và cs., 2021). Khi làm như vậy, điều quan trọng là phải xem xét các tác động tiềm ẩn liên

quan đến các lựa chọn thay thế đó đối với môi trường, kinh tế và xã hội, để đảm bảo tính hiệu quả, khả năng tồn tại và tính bền vững của thức ăn chăn nuôi cũng như đảm bảo an toàn thực phẩm và ngăn ngừa các mối đe dọa đối với sức khỏe con người (Muscat và cs., 2020).

SỰ CẦN THIẾT CHUYỂN ĐỔI NGUYÊN LIỆU THỨC ĂN PROTEIN TRUYỀN THỐNG SANG NGUYÊN LIỆU THAY THẾ

Yếu tố môi trường

Thức ăn chăn nuôi là ngành sử dụng nhiều đất nông nghiệp sẵn có nhất trên toàn cầu với diện tích đất gấp khoảng hai lần so với sản xuất cây lương thực, với việc tăng diện tích trồng đậu nành là động lực chính dẫn đến thay đổi sử dụng đất (Manceron và cs., 2014). Trong khi những tiến bộ công nghệ và phương thức quản lý cải tiến trong chăn nuôi đã thúc đẩy việc giảm sử dụng đất đồng cỏ trong hai thập kỷ qua, thì diện tích đất trồng trọt trên toàn cầu để làm thức ăn chăn nuôi đã cho thấy sự mở rộng ngày càng tăng (Winkler và cs., 2021). Việc mở rộng sản xuất cây làm thức ăn chăn nuôi có liên quan đến việc gia tăng suy thoái đất và các tác động liên quan đến việc sử dụng đất (tức là nạn phá rừng) tại một trong những điểm nóng đa dạng sinh học quan trọng nhất trên toàn cầu (Song và cs., 2021). Mặc dù các chính sách nghiêm ngặt đã được thực hiện để giảm thiểu tác động nghiêm trọng đến môi trường của việc mở rộng canh tác, chẳng hạn như nạn phá rừng (Kastens và cs., 2017), nhưng điều này chỉ có tác dụng hạn chế trong việc giảm cường độ sử dụng tài nguyên bao gồm cả đất đai (Lathuilliere và cs., 2017).

Nhiều tác động liên quan đến việc sử dụng đất được thảo luận có liên quan đến phát thải khí nhà kính (KNK) phát sinh từ sản xuất cây trồng protein (Castanheira và Freire, 2013). Các biện pháp quản lý đất ảnh hưởng đến việc giải phóng CO₂ từ đất vào không khí, do đó việc áp dụng các giải pháp thay thế giúp giảm nhu cầu xáo trộn đất có thể góp phần tích cực vào việc giảm KNK do con người tạo ra (Johnson, 2018). Hơn nữa, việc mở rộng lĩnh vực cây trồng protein trong hai thập kỷ qua đã dẫn đến sự gia tăng việc đốt và phá rừng, góp phần lớn gây ra biến đổi khí hậu và ô nhiễm khí quyển do con người gây ra (Hoang và Kanemoto, 2021). Ngoài nạn phá rừng để làm nương rẫy, việc đốt sinh khối lãng phí trong nông nghiệp từ các loại cây trồng protein thông thường đã làm trầm trọng thêm các vấn đề về khói mù và ô nhiễm hạt trong không khí (Tang và Yap, 2020; Adam và cs., 2021). Do đó, việc chuyển sang các nguồn protein tuần hoàn và không cần đất có tác động tích cực quan trọng giữa việc giảm thiểu các tác động liên quan đến đất đai và cơ hội giảm đáng kể nguy cơ nóng lên toàn cầu và ô nhiễm khí quyển liên quan đến protein trong thức ăn chăn nuôi. Một nguồn KNK khác từ sản xuất cây trồng thông thường có liên quan đến các điểm nóng chính về sử dụng năng lượng và nhiên liệu hóa thạch, đó là hoạt động của máy móc cho các hoạt động trên đồng ruộng (~63% tổng năng lượng sử dụng) và sản xuất phân bón tổng hợp cần thiết, thuốc diệt cỏ và thuốc trừ sâu (~37% tổng năng lượng sử dụng) (Hoffman và cs., 2018).

Liên kết với các tác động liên quan đến sử dụng đất đã đề cập trước đây, cũng là những tác động trực tiếp đến đa dạng sinh học. Sự xáo trộn của hệ sinh thái rừng (tức là nạn phá rừng) do mở rộng canh tác cây trồng, cùng với các ngành công nghiệp khác, là nguyên nhân lớn dẫn đến sự tuyệt chủng của các loài động thực vật bản địa (Semper Pascual và cs., 2019). Các nguồn protein thay thế không cần đất và tuần hoàn có thể mang lại nhiều cơ hội cần thiết cho việc bảo tồn đa dạng sinh học, đặc biệt là khi họ ở đó được triển khai ở những khu vực được coi là điểm nóng về đa dạng sinh học (Lima và cs., 2019; Paiva và

cs., 2020). Tuy nhiên, điều quan trọng là việc chuyển sang các giải pháp như vậy không để lại đất bị bỏ hoang và suy thoái. Đất bị thoái hóa không thể hỗ trợ sự kế thừa của thực vật với tầng đất hữu cơ lành mạnh (tức là mùn) và đủ chất dinh dưỡng và điều này có thể có tác động bất lợi đến sự đa dạng của các loài thực vật. Tác động thứ yếu của suy thoái đất là hệ sinh thái rừng bị phân mảnh và do đó, nếu các loại cây trồng protein thông thường được thay thế thì việc duy trì các mảnh đất cho phép các loài và dòng gen nên được xem xét (Pacheco và cs., 2018).

Hơn nữa, việc sử dụng một lượng lớn phân bón tổng hợp nitơ và photpho (urê và di-amoni photphat) và phân hữu cơ để sản xuất cây trồng protein thông thường là nguyên nhân chính gây ra tác động axit hóa và liên quan đến thức ăn chăn nuôi, cả hai đối với các hệ sinh thái trên cạn và dưới nước (FAO, 2016a; Zortea, Maciel và Passuello, 2018).

Cuối cùng, nông nghiệp là nguyên nhân lớn nhất gây ra căng thẳng về nước trên toàn cầu, với khoảng 57% nước trong sản xuất cây trồng thông thường trên toàn cầu là không bền vững (Mekonnen và Hoekstra, 2020). Cây có dầu (đậu nành, hạt cải dầu, hướng dương) là nguồn cung cấp protein chính trong khẩu phần chăn nuôi cần trung bình 2400 m³ nước cho mỗi tấn sản phẩm; loại cây trồng có nhu cầu nước cao thứ hai, sau các loại đậu (đậu, đậu Hà Lan, đậu lăng) (Mekonnen và Hoekstra, 2011).

Yếu tố kinh tế

Chi phí sản xuất và cung cấp cây trồng protein thông thường bao gồm các khoản đầu tư tài chính lớn liên quan đến đầu vào trực tiếp cần thiết, bao gồm vật liệu trồng trọt (hạt giống), phân bón và nước tưới trưởng cũng như các sản phẩm bảo vệ thực vật (thuốc trừ sâu, thuốc diệt cỏ). Các chi phí lớn cũng phát sinh do đầu vào lao động, tiêu thụ nhiên liệu cho các hoạt động tại trang trại (làm đất, phun thuốc) và đất (tiền thuê) (FAO, 2016b). Vận chuyển số lượng lớn các sản phẩm cây trồng qua khoảng cách xa và sử dụng nhiều phương tiện vận tải khác nhau (tàu, máy bay) là một nguồn chi phí đáng kể khác. Trong trường hợp đậu tương đến từ Brazil, một nhà cung cấp lớn trên toàn cầu, chi phí hậu cần cao hơn do cơ sở hạ tầng kém kết nối khu vực sản xuất với các trung tâm xuất khẩu, ngay cả khi các tuyến đường thay thế được khám phá (Oliveira và cs., 2020). Hơn nữa, do sự phụ thuộc của sản xuất cây trồng protein thông thường vào nhiên liệu hóa thạch (tức là dầu, xăng), sự biến động về giá của các đầu vào đó thường có thể gây ra sự tăng giá đột biến và gián đoạn trong việc cung cấp thức ăn chăn nuôi protein quan trọng (Taghizadeh-Hesary, Rasoulinezhad và Yoshino, 2019).

An toàn thực phẩm và các yếu tố xã hội

Hệ thống sản xuất và chế biến thức ăn truyền thống khiến các thành phần protein bị nhiễm bản sinh học và hóa học ở mức độ cao và xuyên suốt các giai đoạn khác nhau, chẳng hạn như thuốc trừ sâu trong quá trình sản xuất và nhiễm nấm khi bảo quản và vận chuyển. Một loại ô nhiễm đặc biệt đáng lo ngại là do độc tố nấm mốc gây ra. Những chất này có thể gây ung thư, ức chế miễn dịch, gây đột biến và gây quái thai đối với sức khỏe động vật và con người (Kabede và cs., 2020). Aflatoxin, một loại độc tố nấm mốc tự nhiên do nấm *Aspergillus flavus* tạo ra, được biết đến là phân tử gây ung thư gan mạnh nhất trong tự nhiên và có thể gây chậm phát triển, khó thở, mất cân bằng nội tiết tố, các bệnh sinh sản và thậm chí dẫn đến tử vong (Conte và cs., 2020; Mahato và cs., 2021). Các hạt có dầu bao gồm đậu nành, hạt cải dầu và hạt hướng dương phải chịu các điều kiện căng thẳng như nắng nóng kéo dài, hạn hán, hư hỏng do côn trùng và hư hỏng hoặc ẩm ướt trong quá trình vận chuyển/bảo quản rất dễ bị nhiễm *A. flavus*, xuất hiện dưới

dạng màu vàng-xanh hoặc xanh xám mốc trên hạt. Nếu những hạt giống này sau đó được sử dụng làm thức ăn chăn nuôi, chúng sẽ gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đối với sức khỏe động vật do nồng độ aflatoxin tăng lên. Thông qua các sản phẩm chăn nuôi như thịt, sữa và trứng, con người có được tiếp xúc với aflatoxin. Những chất gây ô nhiễm này tồn tại dai dẳng và thậm chí có thể được tìm thấy trong sữa mẹ dưới dạng các chất chuyển hóa khác, đe dọa sự phát triển khỏe mạnh của trẻ sơ sinh (Alshannaq và cs., 2018). Do đó, điều quan trọng là phải khám phá các giải pháp cho phép các kiểu gen có khả năng phục hồi cao hơn cũng như chuỗi sản xuất và cung ứng ngắn hơn để tránh rủi ro ô nhiễm. Hơn nữa, đa dạng hóa sản xuất cây trồng với việc áp dụng các loại thức ăn giàu protein thay thế có thể mang lại nhiều cơ hội phát triển xã hội hơn vì nó sẽ làm tăng quy mô và giá trị kinh tế tổng thể của ngành sản xuất thức ăn chăn nuôi (hiện tại là 62% cây ngũ cốc ở Châu Âu, 88% đậu nành, và 53% đậu được sử dụng làm thức ăn chăn nuôi) (FAOSTAT, 2021).

CÁC LỰA CHỌN PROTEIN THAY THẾ TỪ NGUỒN ĐỊA PHƯƠNG, KHÔNG CẦN ĐẤT VÀ TUẦN HOÀN NHƯ MỘT GIẢI PHÁP TIỀM NĂNG

Rất nhiều nghiên cứu đã tập trung vào giá trị dinh dưỡng, khả năng tiêu hóa và sử dụng thức ăn protein thay thế cho vật nuôi. Protein thay thế từ các nguồn địa phương, không cần đất và tuần hoàn có thể thay thế đầy đủ các thành phần thức ăn thông thường từ góc độ dinh dưỡng, mặc dù đậu nành vẫn được coi là một trong những loại thức ăn protein cân bằng nhất để tăng trưởng động vật tối ưu (Gasco và cs., 2019; Luciano và cs., 2020). Ngoài ra, những nguồn protein thay thế như vậy có thể đưa ra giải pháp nhằm giải quyết các vấn đề quan trọng về tính bền vững của sản xuất thức ăn chăn nuôi thông thường.

Nhóm đầu tiên đại diện cho protein có nguồn gốc từ thực vật từ các loại cây trồng thay thế (cây họ đậu biến đổi gen/công nghệ gen - GM/GE) hoặc các phương pháp trồng cây thay thế (thủy canh). Nhóm thứ hai bao gồm các phương pháp chiết xuất protein hàng loạt ở cấp độ vi mô (sinh vật nấm, vi khuẩn, vi tảo). Nhóm thứ ba đại diện cho các dòng nông nghiệp tuần hoàn sử dụng chất thải và phụ phẩm của ngành nông nghiệp và các ngành công nghiệp khác (sản xuất bia, nhà máy lọc sinh học). Cuối cùng, nhóm thứ tư bao gồm protein động vật đã qua chế biến (PAP) từ các sản phẩm phụ của chăn nuôi hoặc từ nuôi côn trùng.

CÂY TRỒNG BIẾN ĐỔI GEN/CÔNG NGHỆ GEN VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP CANH THÁC THAY THẾ

Cây trồng biến đổi gen/công nghệ gen (GM/GE) đã được đưa vào sản xuất thức ăn chăn nuôi thương mại trong hơn 30 năm. Người ta ước tính rằng 70 đến 90% sinh khối cây trồng GM/GE, bao gồm đậu nành GM, được chăn nuôi trên toàn cầu tiêu thụ (Van Eenennaam và Young, 2014). Các loại cây trồng GM/GE phổ biến nhất được sử dụng làm thức ăn chăn nuôi làm nguồn protein hoặc năng lượng là đậu nành, ngô và khoai tây. Những thành phần thức ăn này chiếm tới 10%, 30% và 50% khẩu phần ăn điển hình của các loài vật nuôi khác nhau (lợn, gia cầm, gia súc) (Flacowsky, Chesson và Aulrich, 2007). Cây trồng protein biến đổi gen có thể giảm thời gian sinh sản và tăng cường khả năng kháng sâu bệnh, cỏ dại và bệnh cây, điều này cũng có nghĩa là sản xuất hiệu quả hơn và nguyên liệu thức ăn chăn nuôi ít tốn kém hơn (Eriksson và cs., 2018; Gocht và cs., 2021).

Các cây họ đậu trồng tại địa phương như đậu Fava, đậu Lupin, đậu Hà Lan và việc trồng bèo tấm đã tạo cơ hội thay thế các loại cây trồng cung cấp protein thông thường (đậu

nành) bằng các nguồn protein ít gây hại đáng kể cho môi trường. Các tác động môi trường như suy thoái đất, cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch và tiềm năng nóng lên toàn cầu (Watson và cs., 2017; Sherasia và cs., 2018; Sosta và cs., 2019). Ngoài các loại đậu và bèo tấm, các nguồn protein chất lượng cao có nguồn gốc thực vật thay thế đầy hứa hẹn khác làm thức ăn chăn nuôi là tảo và rong biển (*macroalgae*), cũng có thể cung cấp cho vật nuôi nhiều loại vitamin, khoáng chất và axit béo (Costa và cs., 2021, Duarte, Bruhn và Krause-Jensen, 2021). Các phương pháp thủy canh tiên tiến nhất (thức ăn thủy canh từ hạt ngũ cốc) có thể mở ra những lợi ích bổ sung cho sự bền vững chủ yếu bằng cách giảm lượng protein trên đất liền và sự phụ thuộc đầu vào tổng hợp (phân bón) (Bartelme và cs., 2018).

Tác động môi trường

Suy thoái đất, thay đổi sử dụng đất và các tác động liên quan đến đất đai

Cây trồng protein GM/GE có khả năng chống chịu tốt hơn với khí hậu khắc nghiệt và có thể giúp đẩy nhanh quá trình chuyển dịch sản xuất cây trồng protein sang các khu vực (Alig và Ahearn, 2017). Mặc dù không có nhiều nghiên cứu điều tra một cách định lượng về tác động trực tiếp của cây trồng GM/GE đối với sự thay đổi việc sử dụng đất, nhưng bằng chứng cho thấy có khả năng xảy ra những hậu quả tiêu cực ngoài ý muốn do sự dịch chuyển của các loại protein được trồng tại địa phương và các tác động dây chuyền đối với việc sử dụng đất (Eriksson và cs., 2018). Việc đưa thêm protein từ canh tác không cần đất vào thức ăn chăn nuôi, chẳng hạn như tảo nước ngọt và tảo biển (rong biển), mang đến một cơ hội khác trong việc giảm thiểu tác động liên quan đến đất đai (Øverland, Mydland và Skrede, 2019; Koesling và cs., 2021).

Một vấn đề cần được xem xét cẩn thận khi đánh giá các nguồn protein thay thế, đặc biệt là canh tác không cần đất, là vấn đề suy thoái đất, phần lớn là do đất liên quan đến sản xuất cây trồng bị bỏ hoang (Winkler và cs., 2021). Tránh xa protein được trồng mà không có kế hoạch sử dụng đất thay thế bền vững hoặc các hành động bảo tồn (trồng lại rừng) có thể dẫn đến diện tích đất rộng lớn bị bỏ hoang và quản lý sai. Điều này, kết hợp với những tác động của biến đổi khí hậu như nhiệt độ ngày càng tăng và tần suất hạn hán khắc nghiệt, có thể gây áp lực lên bề mặt đất và đặc biệt là carbon hữu cơ trong đất (Olsson và cs., 2019). Hơn nữa, các biện pháp quản lý đất cụ thể (làm đất, giảm làm đất) cần được xem xét khi thực hiện các giải pháp thay thế biến đổi gen/công nghệ gen và cây trồng tại địa phương, bởi vì những biện pháp này có thể có tác động lớn đến quá trình cô lập carbon trong đất và do đó chất lượng đất (Johnson, 2018).

Phát thải khí nhà kính, ô nhiễm không khí và cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch

Cây trồng protein GM/GE có khả năng chống chịu với bệnh tật, điều kiện đất đai kém và nguồn dinh dưỡng sẵn có, có thể giúp giảm sản xuất và sử dụng hóa chất đầu vào, giảm thiểu hơn nữa những tác động như vậy. Giảm lượng phun thuốc trên đồng ruộng và các yêu cầu về làm đất (tức là chuẩn bị đất cho canh tác và kiểm soát cỏ dại) có thể giúp giảm mức sử dụng nhiên liệu hóa thạch hàng tỷ lít mỗi năm và giảm đáng kể lượng khí nhà kính liên quan (Brookes và Barfoot, 2020). Thủy canh và nuôi trồng thủy sản có thể đưa ra một giải pháp thay thế khác để giúp giảm thiểu khí thải nhà kính và sự cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch, vì chúng là phương pháp canh tác không cần đất và hầu hết các tác động liên quan đến năng lượng của chúng đều liên quan đến việc sử dụng điện (tức là để chiếu sáng, nhà kính và sưởi ấm nước), có thể được tạo ra thông qua các nguồn tái tạo. Mặc dù các phương pháp canh tác thay thế như vậy có thể được thực hiện ở quy mô lớn bằng

cách sử dụng năng lượng có nguồn gốc từ nhiên liệu hóa thạch và vẫn làm giảm một số tác động đến môi trường (sử dụng đất, rửa trôi chất dinh dưỡng từ phân bón), việc tìm nguồn năng lượng tái tạo sẽ cải thiện đáng kể tiềm năng giảm thiểu ô nhiễm và khả năng tồn tại về mặt kinh tế. Việc sử dụng phân bón cũng ở mức tối thiểu với các phương pháp canh tác này và chiếm ít hơn 2% khả năng suy giảm phi sinh học của chúng (Chen và cs., 2020). Một cách khác để cải thiện lượng khí thải carbon trong ngành chăn nuôi và hiệu quả năng lượng là thu thập protein làm thức ăn chăn nuôi từ cây trồng được trồng tại địa phương vì việc sử dụng chuỗi cung ứng ngắn hơn về mặt địa lý có thể giúp giảm lượng khí thải và nhu cầu năng lượng cho vận chuyển và đóng gói (Taelman và cs., 2015).

Các tác động liên quan đến nitơ và phốt pho

Cây trồng GM/GE có khả năng chống chịu tốt hơn với các điều kiện thời tiết khắc nghiệt, tình trạng khan hiếm nước và chất dinh dưỡng cùng nhiều vấn đề khác. Với những kiểu gen nâng cao này, họ có thể cung cấp protein cho ngành chăn nuôi quanh năm với nhu cầu phân bón tổng hợp giảm (Paul, Nuccio và Basu, 2018).

Việc cắt giảm hơn nữa có thể đạt được bằng việc áp dụng nuôi trồng tảo và rong biển để sản xuất protein. Ngoài thực tế là các giải pháp thay thế này không sử dụng phân bón tổng hợp, chúng hấp thụ một lượng rất lớn carbon, nitơ và phốt pho từ các hệ sinh thái nước ngọt và đại dương, mặt khác có thể dẫn đến tác động đáng kể đến hiện tượng axit hóa và phú dưỡng trong nước (Zheng và cs., 2019; Gao và cs., 2021). Hầu hết các lựa chọn thay thế được thảo luận ở đây đều có khả năng làm giảm đáng kể nhu cầu về những đầu vào đó và do đó, giảm thiểu các tác động môi trường có liên quan và giảm chi phí kinh tế. Mặc dù có nhiều cơ hội để giảm thiểu tác động liên quan đến nitơ và phốt pho của thức ăn chăn nuôi, nhưng vẫn có một số rủi ro liên quan và tiềm ẩn cần được xem xét. Protein từ đậu nành là sự lựa chọn rất phổ biến trong chăn nuôi vì nó rất cân bằng và dễ tiêu hóa. Việc thay thế đậu nành bằng thức ăn giàu protein thay thế có thể dẫn đến thay đổi thành phần phân và nước tiểu, thông qua lượng N và P khác nhau được bài tiết, do đó có thể dẫn đến nồng độ nitơ cao hơn trên đồng ruộng khi áp dụng chúng trong sản xuất cây trồng (Trabue và cs., 2021).

Tác động đến chất lượng nước và cạn kiệt nguồn nước

Cây trồng GM/GE, nhờ khả năng kháng bệnh của chúng, có thể mang lại năng suất cây trồng protein dồi dào, lành mạnh quanh năm mà không làm quá tải nguồn nước sẵn có với các đầu vào tổng hợp và hóa học (Paul, Nuccio và Basu, 2018; Dinar, Tiêu và Huynh, 2019). Giảm việc sử dụng phân bón, thuốc trừ sâu và thuốc trừ sâu có thể giúp cải thiện chất lượng sinh thái của nước và ngăn ngừa tổn thất đa dạng sinh học do khả năng rò rỉ các hóa chất đó trong các vùng nước ngọt và hệ sinh thái ven biển (Kumar và cs., 2020). Tuy nhiên, nghiên cứu gần đây cũng nhấn mạnh tác động ngược tiềm tàng và mối đe dọa của các chuỗi gen chuyển được chuyển sang cỏ dại, tạo ra các loại siêu cỏ kháng thuốc diệt cỏ. Điều này có thể dẫn đến sự gia tăng tổng thể việc sử dụng thuốc diệt cỏ, điều này cần được xem xét đặc biệt liên quan đến an toàn nguồn nước (Tsatsakis và cs., 2017).

Các giải pháp thay thế canh tác không dùng đất như thủy canh cũng có thể giúp cải thiện hiệu quả sử dụng nước khi so sánh với sản xuất cây trồng truyền thống, đặc biệt là khi khai thác tài nguyên nước thải. Tuy nhiên, sự hấp thụ các kim loại độc hại và các chất gây ô nhiễm khác của cây trồng là mối quan tâm lớn cần được xem xét khi nước thải được sử dụng cho mục đích trồng trọt (Cifuentes Torres và cs., 2021). Nuôi rong biển có thể cải thiện cuộc sống dưới nước bằng cách tạo điều kiện phát triển các môi trường sống phức tạp, kích thích đa dạng sinh

học, cung cấp chất hữu cơ trong và ngoài ranh giới môi trường sống của chúng, đồng thời chuyển đổi một lượng lớn carbon thành thức ăn và năng lượng có hàm lượng carbon thấp (Duarte, Bruhn và Krause-Jensen, 2021).

Tuy nhiên, nó cũng có thể là nguyên nhân gây ra những thay đổi tiêu cực về môi trường cần được nghiên cứu thêm và cân nhắc cẩn thận khi lập kế hoạch nuôi trồng rong biển quy mô lớn. Ví dụ, nó tạo ra sự cạnh tranh về ánh sáng và chất dinh dưỡng giữa các loài trồng trọt và hoang dã (quần xã sinh vật phù du), ô nhiễm từ vật liệu nhân tạo làm cơ sở hạ tầng nông nghiệp, xáo trộn tiếng ồn đối với động vật do hoạt động của tàu thuyền trong khu vực tăng lên và có thể làm thay đổi đáng kể địa mạo của vùng ven biển hệ sinh thái. Điều này là do sự hấp thụ động năng từ sóng, tạo ra vi khí hậu thậm chí có thể vượt ra ngoài ranh giới canh tác (Campbell và cs., 2019). Việc sử dụng protein trồng tại địa phương có thể mang đến cơ hội giảm hơn nữa lượng nước thải trong thức ăn chăn nuôi, đặc biệt nếu nó thay thế protein nhập khẩu được trồng ở những khu vực có nguy cơ cao về khan hiếm nước (Santos và Naval, 2020).

Tác động đến đa dạng sinh học

Sử dụng cây trồng GM/GE có thể thúc đẩy những thay đổi đối với đa dạng sinh học nông nghiệp, ví dụ như làm giảm sự đa dạng của hạt cỏ dại tới 36% (Andow, 2003) thông qua các cơ chế chuyển gen và tính trạng sang các loài hoang dã, không có mục tiêu, sự xâm lấn và tính cỏ dại (Tsatsakis và cs., 2017). Hơn nữa, nông dân có xu hướng sử dụng các hóa chất mạnh hơn khi cây trồng GM/GE kháng thuốc diệt cỏ và thuốc trừ sâu mở rộng vượt quá ranh giới thuần hóa (tức là cỏ dại), dẫn đến mất đa dạng sinh học của các loài trên cạn và dưới nước ở các cánh đồng và vùng nước gần đó (Schütte và cs., 2017). Những tác động như vậy có thể thảm khốc đến mức tỷ lệ tử vong gần như hoàn toàn (96% - 100%) đã được báo cáo là tác động tiềm ẩn của thuốc diệt cỏ hóa học cụ thể đối với đa dạng sinh học nước ngọt ở Bắc Mỹ (Relyea, 2005).

Tác động đến kinh tế

Kinh tế sản xuất và cung ứng

Cây trồng GM/GE có thể giúp giảm đáng kể chi phí phân bón, nước, thuốc trừ sâu và thuốc diệt cỏ, đồng thời tăng năng suất (Kumar và cs., 2020). Với tiềm năng được trồng ở phạm vi địa lý rộng hơn so với cây trồng thông thường, chúng có thể giúp giảm chi phí vận chuyển nếu được sản xuất gần thị trường tiếp nhận hoặc tới các trung tâm vận chuyển hơn. Việc chuyển sang sử dụng các nguồn protein thay thế được trồng tại địa phương nhiều hơn cũng có thể giúp giảm nhiên liệu cho việc vận chuyển và các chi phí liên quan, đồng thời nuôi trồng thường ít tốn kém hơn so với các nguồn protein truyền thống như đậu nành (Lo, Kasapis và Farahnaky, 2021). Ngay cả trong các kịch bản mà nhiên liệu vận tải có thể phụ thuộc vào các nguồn tái tạo (tức là ethanol sinh học), điều quan trọng cần lưu ý là nhu cầu có thể tiếp tục đẩy giá nguyên liệu sinh học lên cao, bao gồm các nguồn protein thông thường có giá trị cho ngành chăn nuôi như đậu nành và hạt cải dầu (Popp và cs., 2016; O'Malley và Searle, 2021). Điều này càng nhấn mạnh sự cần thiết phải kết hợp nhiều nguồn protein thay thế hơn để duy trì sự ổn định của thị trường và nguồn thức ăn sẵn có trên toàn cầu.

Các tài liệu còn mâu thuẫn về khả năng kinh tế của việc trồng rong biển như một giải pháp thay thế cho việc tìm nguồn cung cấp protein cho thức ăn chăn nuôi, cho thấy đây là một giải pháp tốt khi được thực hiện ở các nước nghèo, đặc biệt là khi công nghệ chế biến sau thu hoạch trở nên tốt hơn và giá cả phải chăng hơn (Duarte, Bruhn và Krause-Jensen,

2021), nhưng không phải là một ngành hiệu quả về mặt chi phí khi triển khai ở các nước phía Bắc chủ yếu do chi phí lao động tăng so với miền Nam toàn cầu (van den Burg và cs., 2016; Emblemvåg và cs., 2020).

Tính kinh tế của các nguồn protein thay thế ở quy mô lớn là mối quan tâm lớn đối với việc áp dụng chúng, vì cho đến nay chỉ có một số hệ thống sản xuất và cung cấp protein thay thế được thử nghiệm và khai thác thương mại (cây trồng protein biến đổi gen/công nghệ). Các phương pháp thủy canh chủ yếu được thực hiện ở quy mô nhỏ, ví dụ như để cung cấp thức ăn cho các trang trại chăn nuôi gia súc đơn lẻ hoặc trong các hệ thống đô thị để cung cấp rau ăn lá, nơi chúng tạo ra lợi nhuận cao (Girma và Gebremariam, 2018; Greenfeld và cs., 2019). Mặc dù có rất ít nghiên cứu được thực hiện để đánh giá hiệu quả kinh tế của họ ở cấp độ ngành, nhưng có thể có lợi ích kinh tế thông qua các hệ thống sản xuất tổng hợp và đồng sản xuất cây trồng protein và bột cá, đồng thời làm giảm áp lực từ nhu cầu về các nguyên liệu đó cho cả thức ăn chăn nuôi và thức ăn cho con người (Goddek và cs., 2015; Palm và cs., 2018).

Sự vững chắc trước những bất ổn kinh tế và các sự kiện cực đoan

Trong số các giải pháp thay thế được thảo luận ở đây, có những phương pháp sản xuất tiêu thụ ít năng lượng hơn so với các hệ thống cây trồng protein thông thường và phụ thuộc nhiều hơn vào điện, có thể lấy từ năng lượng tái tạo, thay vì nhiên liệu hóa thạch cho nhu cầu của họ. Chúng bao gồm trồng trọt thủy canh, nuôi tảo và rong biển, nuôi côn trùng, tìm nguồn cung cấp protein từ vi sinh vật, và từ các dòng chất thải và phụ phẩm công nghiệp. Điện cho các hệ thống này có thể được lấy từ nhiều nguồn tái tạo khác nhau, ví dụ như từ khí sinh học và năng lượng mặt trời, gió và thủy triều, những nguồn năng lượng này nhanh chóng trở nên rẻ hơn năng lượng từ nhiên liệu hóa thạch. Các giải pháp địa phương về tìm nguồn cung ứng năng lượng có thể nâng cao hơn nữa sự hiểu biết và kiểm soát của các cơ quan chính phủ đối với các đầu vào và khí thải có liên quan liên quan đến lĩnh vực nông nghiệp-thực phẩm. Do đó, khi xem xét sự phụ thuộc giữa giá nhiên liệu hóa thạch và nguyên liệu thức ăn chăn nuôi cũng như lợi ích gia tăng của năng lượng tái tạo tại địa phương, những nguồn protein thay thế như vậy có thể đưa ra các giải pháp linh hoạt cho tương lai của thức ăn chăn nuôi, đặc biệt khi các nhà hoạch định chính sách tiếp tục hỗ trợ sự phát triển và đa dạng của nguồn năng lượng tái tạo. lĩnh vực năng lượng (Punzi, 2019).

Trong hai năm qua, đại dịch Covid-19 đã buộc phải hạn chế nghiêm ngặt đối với thương mại toàn cầu và gây ra cú sốc lớn cho nền kinh tế ngành chăn nuôi do không thể tiếp cận được các nguyên liệu thức ăn chăn nuôi thông thường và các nguồn lực cần thiết khác (Lioutas và Charatsari, 2021; Rzymiski và cs., 2021). Các nguồn protein địa phương, chẳng hạn như từ các hệ thống canh tác cây nhà lá vườn được thảo luận ở đây, có thể giúp giảm thiểu một số tác động kinh tế này. Hơn nữa, đại dịch đã nâng cao nhận thức về việc đầu tư vào phát triển công nghệ tự động hóa và thúc đẩy những tiến bộ trong thực hành điều trị nhằm loại bỏ nguy cơ mầm bệnh và phát tán bệnh tật (Henry, 2020). Như đã thảo luận ở trên, nhiều giải pháp thay thế được trình bày ở đây có thể được hưởng lợi rất nhiều từ những phát triển như vậy, điều này có khả năng cho phép họ tiến tới sản xuất thương mại quy mô lớn. Ngoài các tác động liên quan đến Covid-19, những bất ổn xung quanh động lực thương mại toàn cầu và các đối tác thương mại trong tương lai đòi hỏi các nguồn protein có khả năng phục hồi trước những biến động trong chính sách xuất nhập khẩu và không phụ thuộc vào tài nguyên nhập khẩu, bao gồm cả năng lượng nhập khẩu (Taghizadeh-Hesary và cs., 2019; Choi và cs., 2021; Yao và cs., 2021). Xung đột ở

Ukraine đã dẫn đến giá lúa mì và ngô ở châu Âu cao kỷ lục, cũng như giá bột hướng dương, thành phần protein chính trong khẩu phần chăn nuôi, tăng mạnh (IFIP, 2022). Hơn nữa, sự sẵn có của phân bón hóa học và thuốc trừ sâu dự kiến sẽ trở nên rất hạn chế vì Ukraine và Nga là những nhà xuất khẩu lớn những đầu vào này, trong khi giá của chúng đã tăng gấp đôi và dự kiến sẽ tiếp tục tăng (Schiffing và Kanellos, 2022). Việc tăng cường áp dụng cây trồng biến đổi gen/biến đổi gen, nuôi trồng vi tảo và rong biển cũng như protein từ dòng chất thải có thể giúp giảm thiểu sự phụ thuộc của ngành sản xuất thức ăn chăn nuôi vào các đầu vào đó, đặc biệt nếu chúng đi kèm với sự chuyển đổi từ nhiên liệu hóa thạch sang nguồn năng lượng tái tạo tại địa phương. năng lượng. Việc đa dạng hóa nguồn protein có thể giúp tránh trường hợp các nhà sản xuất thức ăn chăn nuôi chuyển sang các loại cây trồng mang lại lợi nhuận khác (ví dụ: cây năng lượng cho nhiên liệu sinh học) trong thời kỳ khủng hoảng như vậy, từ đó dẫn đến ngành chăn nuôi phát triển mạnh mẽ hơn (USDA, 2022).

Tác động xã hội

Việc hoạch định chính sách trong lĩnh vực nông nghiệp thực phẩm thường bỏ qua trụ cột xã hội về tính bền vững và coi đây là mức độ ưu tiên thấp hơn so với các cân nhắc về môi trường và kinh tế. Tuy nhiên, như phần này thảo luận về từng loại thức ăn protein thay thế, việc sản xuất và sử dụng chúng có thể có ý nghĩa xã hội quan trọng đối với sức khỏe và phúc lợi động vật, an toàn thực phẩm và sức khỏe cộng đồng cũng như phát triển xã hội.

Giá trị dinh dưỡng và tăng trưởng của vật nuôi

Cây trồng protein GM/GE (Đậu nành Mon87701) có thể cải thiện đặc tính dinh dưỡng của thành phần thông thường, do đó có khả năng cải thiện sự phát triển của động vật mà không ảnh hưởng đến sức khỏe động vật và con người (Buzoianu và cs., 2013; EFSA, 2020). Các nghiên cứu đã phát hiện ra rằng đậu nành GM/GE có thể chứa từ 48% - 63% protein thô, so với hàm lượng protein trung bình 20% - 55% có thể thu được từ cây đậu nành thông thường (Edwards và cs., 2000; Sauvant và cs., 2004; Giraldo và cs., 2019). Điều này cho thấy cơ hội ở chỗ số lượng nhỏ cây đậu nành GM/GE có thể thay thế đậu nành thông thường và đáp ứng các yêu cầu liên quan về protein của vật nuôi. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng việc đưa rong biển (tảo vĩ mô) làm nguồn protein trong khẩu phần ăn của gia cầm có thể cải thiện hiệu suất tăng trưởng, tỷ lệ đẻ và chất lượng sản phẩm (Coudert và cs., 2020). Tuy nhiên, hàm lượng protein rong biển có thể rất khác nhau, tùy thuộc vào loài nuôi (*Palmaria palmata*, *Porphyra* sp.) trong khoảng 3% - 47% (Morais và cs., 2020). Hàm lượng protein thô từ các loại đậu và bèo tấm trồng tại nhà cũng có thể tương đương với thức ăn protein thông thường, dao động trong khoảng 20% - 45% (Sosta và cs., 2019; 2021).

Sức khỏe và phúc lợi động vật

Các kiểu gen kháng bệnh của cây trồng GM/GE có thể giúp giảm thiểu tổn thất về giá trị dinh dưỡng và quan trọng hơn là khả năng nhiễm nấm và vi khuẩn do hư hỏng hoặc thối rữa trong điều kiện vận chuyển và/hoặc bảo quản kém. Sử dụng cây trồng protein địa phương có thể mang lại một lựa chọn khác để giảm thiểu ô nhiễm nấm và vi khuẩn do vận chuyển và/hoặc bảo quản thức ăn, đặc biệt khi những nguyên liệu thay thế này được nhập khẩu từ các quốc gia khác nhau và khoảng cách rất dài (đậu nành). Việc vận chuyển thức ăn chăn nuôi bị ô nhiễm trên một quãng đường dài làm tăng đáng kể nguy cơ lây truyền mầm bệnh, bao gồm độc tố nấm và vi rút. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng đây là

con đường lây truyền chính các bệnh ở động vật như Sốt lợn châu Phi và Bệnh lở mồm long móng trên khắp các quốc gia và thậm chí cả các châu lục (Becton và cs., 2022). Những căn bệnh này, mặc dù không lây nhiễm và gây hại cho con người, nhưng có thể gây suy giảm nghiêm trọng cho sự phát triển của động vật, từ đó dẫn đến năng suất của ngành kém hơn đáng kể (Becton và cs., 2022).

Phát triển xã hội

Cây protein trồng tại địa phương có thể kích thích tăng trưởng kinh tế và xã hội ở các cộng đồng nông thôn, giảm thiểu tác động tiêu cực của quá trình đô thị hóa (Swain và Teufel, 2017) và các hộ sản xuất nhỏ, nhà sản xuất địa phương có thể có được vai trò trung tâm hơn trong lĩnh vực nông nghiệp.

Việc giới thiệu các công nghệ và thực hành mới cần thiết cho việc thương mại hóa các nguồn protein thay thế có thể thúc đẩy chia sẻ và hợp tác kiến thức liên ngành cũng như cơ hội giáo dục khi nhu cầu về lao động chuyên môn hóa hơn tại trang trại có thể tăng lên (Marinoudi và cs., 2019). An toàn lao động tại trang trại có thể được cải thiện đáng kể thông qua các phương pháp sản xuất giúp giảm thiểu việc sử dụng hóa chất nông nghiệp độc hại (thuốc trừ sâu, thuốc diệt cỏ, phân bón hóa học) và dựa vào công nghệ tự động (Elahi và cs., 2019). Thông qua việc tăng hiệu quả, giảm rủi ro tại trang trại và giảm nhu cầu lao động chân tay nặng nhọc, chuỗi sản xuất protein thay thế có thể góp phần cải thiện tổng thể phúc lợi của người lao động và đại diện giới trong ngành chăn nuôi.

Hơn nữa, các nguồn protein thay thế được trình bày trong phần này có khả năng giảm thiểu tác động tiêu cực lớn đến hệ sinh thái trên cạn và dưới nước cũng như đa dạng sinh học, và do đó bảo tồn các dịch vụ hệ sinh thái, trước hết là cải thiện phúc lợi và chất lượng cuộc sống của con người, cũng như tăng trưởng nông nghiệp toàn cầu (Rukundo và cs., 2018). Điều này đặc biệt quan trọng khi xem xét mức độ thiệt hại đối với một số hệ sinh thái có giá trị và chịu áp lực lớn nhất hành tinh như rừng nhiệt đới Cerrado của Brazil, rừng nhiệt đới Amazon và Borneo, những nơi có dịch vụ được đánh giá cao trên toàn cầu (Flach và cs., 2021). Như đã thảo luận trước đây, việc chuyển sang trồng cây protein địa phương, trồng cây GM/GE hoặc áp dụng nhiều hơn các phương pháp canh tác không cần đất được trình bày ở đây, có thể giúp giảm áp lực và góp phần bảo tồn các hệ sinh thái quan trọng như vậy (Weindl và cs., 2020).

Nhận thức và chấp nhận của người tiêu dùng

Nhận thức của người tiêu dùng luôn là mối quan tâm lớn và là rào cản đối với việc áp dụng các protein thay thế cho cả tiêu dùng của con người và thức ăn chăn nuôi. Mặc dù người tiêu dùng thịt và người chăn nuôi dường như tích cực về các lựa chọn thay thế như cây trồng GM/GE, côn trùng, tảo và thức ăn nuôi trong phòng thí nghiệm được sử dụng trong chăn nuôi nhưng vẫn còn nhiều điều cần khám phá về điểm bùng phát trong việc chấp nhận và các yếu tố cụ thể ảnh hưởng đến nó (Verbeke và cs., 2015; Onwezen và cs., 2019). Việc cung cấp thông tin đầy đủ và đáng tin cậy về sản phẩm tại điểm bán là rất quan trọng để tạo dựng niềm tin với người tiêu dùng và tạo điều kiện cho họ làm quen và chấp nhận thức ăn thay thế (Altmann và cs., 2022; Khaemba và cs., 2022). Các vấn đề về ghi nhãn sai cần phải được kiểm soát và tránh, đặc biệt khi các thành phần protein GM/GE được một số người tiêu dùng cho là có vấn đề về an toàn (Montgomery và cs., 2020). Gian lận thức ăn và thực phẩm đe dọa sự tin tưởng và chấp nhận của khách hàng cũng như an ninh lương thực vì chúng thường loại trừ thông tin quan trọng về các nguồn ô nhiễm nấm, vi khuẩn hoặc hóa chất tiềm ẩn. Tuy nhiên, các nghiên cứu khác đã chỉ ra

rằng việc để công chúng tiếp xúc quá mức với các quy trình đánh giá rủi ro đối với các quy trình và công nghệ sinh học hiện đại có liên quan (chuyển gen) có thể góp phần gây ra cảm giác nghi ngờ và sợ hãi về việc sử dụng an toàn thức ăn GM/GE cho vật nuôi (Giraldo và cs., 2019).

An toàn thực phẩm

Việc sử dụng cây trồng protein GM/GE làm thức ăn chăn nuôi có thể gây ra những tác động tiêu cực ngoài ý muốn đối với sức khỏe con người. Sự an toàn của hầu hết các loại thức ăn chứa protein chuyển gen đã được đánh giá trong bối cảnh “sử dụng trực tiếp làm thực phẩm cho con người” vì chúng cũng có thể được con người tiêu thụ (đậu nành, cải dầu). Tuy nhiên, cần nhiều nghiên cứu hơn để hiểu, theo dõi và điều chỉnh các rủi ro về độc tính và dị ứng của thức ăn chăn nuôi GM/GE đối với con người thông qua việc tiếp xúc gián tiếp khi tiêu thụ các sản phẩm chăn nuôi (Giraldo và cs., 2019). Một tác động tiêu cực ngoài ý muốn là sự chuyển gen theo chiều ngang từ thực phẩm protein GM/GE, sự hiện diện của gen này đã được báo cáo trong đường tiêu hóa của con người; điều này không loại trừ khả năng lây truyền sang người thông qua các sản phẩm thịt chăn nuôi. Tuy nhiên, số lượng được ghi nhận là tương đối nhỏ (tức là tối đa ~4% DNA chuyển gen) và các nghiên cứu cho thấy rằng độ pH thấp trong dạ dày động vật có thể làm suy giảm phần lớn pH trước khi số lượng lớn đến tay con người (Netherwood và cs., 2004; Dona và Arvanitoyannis, 2009; Korwin-Kossakowska và cs., 2020). Một mối đe dọa tiềm tàng khác đối với sức khỏe con người có thể phát sinh gián tiếp thông qua việc lạm dụng glyphosate (thuốc diệt cỏ) mà nhiều nông dân làm để chống lại tình trạng cỏ dại của cây trồng biến đổi gen kháng thuốc diệt cỏ; glyphosate tích lũy trong mô thực vật và hệ thống rễ thúc đẩy sự phát triển và sản xuất độc tố nấm mốc của nấm *Fusarium* có thể đến con người thông qua các con đường được mô tả ở trên (Diaz-Llano và Smith, 2006).

Bên cạnh việc sử dụng các nguồn protein có khả năng phục hồi tốt hơn đối với các chất gây ô nhiễm sinh học, việc giảm thiểu sự bùng phát độc tố nấm mốc bắt đầu bằng các biện pháp quản lý tốt như làm sạch ngũ cốc/hạt giống kỹ lưỡng, loại bỏ các hạt và mảnh vụn bị hư hỏng cũng như vệ sinh thiết bị xử lý và bảo quản (Ráduly và cs., 2021). Tuy nhiên, xét đến áp lực của biến đổi khí hậu và các vấn đề vận chuyển/lưu trữ không thể tránh khỏi (xung đột Ukraine-Nga) có thể ảnh hưởng lớn đến sự phát triển và phân phối các chất gây ô nhiễm cũng như những rủi ro mà chúng gây ra đối với thức ăn chăn nuôi và an toàn thực phẩm, điều quan trọng là chúng ta phải áp dụng nhiều biện pháp kiểm soát. các cơ chế bao gồm các nguồn protein thay thế được trồng nhiều hơn ở địa phương (Magnoli và cs., 2019).

Cuối cùng, nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng không có bằng chứng nào cho thấy rằng cây trồng protein GM/GE khiến con người tiếp xúc với các chất gây dị ứng mới hoặc chúng gây dị ứng nhiều hơn so với các loại cây trồng thông thường (Dunn và cs., 2017). Ngược lại, một số nghiên cứu đề xuất rằng thức ăn và thực phẩm GM/GE thậm chí có thể làm giảm sự biểu hiện của protein dẫn đến phản ứng dị ứng, do đó phù hợp hơn cho con người tiêu dùng từ góc độ này (Dubois và cs., 2015). Nhìn chung, cần có nhiều nghiên cứu hơn để đánh giá chính xác nguy cơ xảy ra các phản ứng dị ứng nghiêm trọng do thức ăn chăn nuôi gây ra; Ví dụ, thức ăn protein từ đậu fava có thể trở thành chất gây dị ứng mạnh đến mức nào đối với những người bị thiếu G6PD? Việc đưa rong biển vào thức ăn cũng có thể dẫn đến phản ứng dị ứng, tương tự như những phản ứng do không dung nạp phụ gia thực phẩm chiết xuất từ rong biển (carrageenan từ rong biển đỏ) (Santo và cs., 2020).

Ý nghĩa pháp lý

Trong khi mức độ phổ biến của các nguyên liệu thức ăn protein GM/GE đã tăng lên đáng kể trong hai thập kỷ qua, việc kết hợp chúng ở quy mô thương mại trong thức ăn chăn nuôi đòi hỏi phải có các quy trình ghi nhãn và đánh giá an toàn kỹ lưỡng. Cơ quan quản lý của Hoa Kỳ và Canada thực hiện so sánh với các đối tác thông thường thông qua thử nghiệm khoa học để đánh giá độ an toàn của sản phẩm GM/GE, trong khi luật pháp ở EU tập trung nhiều hơn vào việc kiểm soát và chứng nhận quá trình sửa đổi. Tuy nhiên, trong mọi trường hợp, điều quan trọng là hệ thống điều hòa phải biết các gen thực tế đang được chuyển sang cây trồng làm thức ăn chăn nuôi và hiểu được những thay đổi tiềm ẩn trong chức năng của nó (ví dụ: sản xuất protein/enzym mới có khả năng gây dị ứng) (Giraldo và cs., 2019). Bên cạnh thức ăn giàu protein GM/GE, các quy trình dán nhãn và truy xuất nguồn gốc cũng rất quan trọng đối với việc sử dụng các loại đậu và rong biển trồng tại nhà, đặc biệt khi xem xét nguy cơ tiềm ẩn về dị ứng và không dung nạp.

NÔNG NGHIỆP TẾ BÀO

Tương tự như tảo và rong biển, vi tảo rất giàu axit béo và carotenoids quan trọng đối với vật nuôi từ các loài thủy sản (cá hồi, tôm) đến gia cầm, lợn và con người tiêu thụ nó chủ yếu dưới dạng thực phẩm bổ sung (Jones và cs., 2020). Protein từ nấm (protein nấm men) từ lâu đã được sử dụng cả trong thức ăn chăn nuôi và thực phẩm cho con người và nghiên cứu hiện tại tập trung vào các cách tối ưu hóa quá trình sản xuất chúng. Một lĩnh vực nghiên cứu đặc biệt thú vị xem xét tiềm năng sử dụng chất thải thực phẩm động vật và nông nghiệp (cá, trái cây) làm chất nền để sản xuất protein từ nấm, từ đó nâng cấp chất thải thành các sản phẩm có giá trị cao đồng thời bổ sung cho ngành chăn nuôi các nguồn protein quan trọng (Tropea và cs., 2022).

Protein vi khuẩn là một giải pháp thay thế nổi tiếng khác cho thức ăn chăn nuôi, có thể được hưởng lợi từ những phát triển tiếp theo trong việc nâng cấp chất thải hoặc chất nền phụ phẩm, đặc biệt là trong việc giảm chi phí sản xuất để có thể cạnh tranh với thức ăn thông thường ít tốn kém hơn (Puyol và cs., 2017; Ritala và cs., 2017).

Protein tế bào thường được tạo ra thông qua khả năng vi sinh vật chuyển đổi các chất nền cacbon hữu cơ và vô cơ thành protein có giá trị và các chất dinh dưỡng khác hoặc thông qua việc sử dụng công nghệ GM/GE (tức là kỹ thuật sinh học) để chiết xuất các đại phân tử như vậy từ nuôi cấy tế bào lên men (Quorn, thịt đậu nành trồng).

Ý nghĩa môi trường

Suy thoái đất, thay đổi sử dụng đất và các tác động liên quan đến đất đai

Sản xuất thức ăn protein từ các nguồn tế bào không phụ thuộc vào đất canh tác và do đó đưa ra một giải pháp hiệu quả để cải thiện hiệu quả sử dụng tài nguyên tổng thể của ngành chăn nuôi và giảm thiểu các tác động liên quan đến việc sử dụng đất (Nyyssölä và cs., 2022).

Phát thải khí nhà kính, ô nhiễm không khí và cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch

Nông nghiệp tế bào phụ thuộc ít hơn vào nhiên liệu hóa thạch so với sản xuất cây trồng protein thông thường và hiện đang hoạt động bằng hỗn hợp nhiên liệu, chủ yếu bao gồm khí tự nhiên, than và điện từ các nguồn tái tạo; một nghiên cứu sử dụng phương pháp sản xuất pin quy mô lớn của Hoa Kỳ làm ví dụ điển hình cho thấy tỷ lệ pha trộn nhiên liệu lần lượt là 43%: 33%: 16% (Mattick, 2018). Do đó, việc thay thế thức ăn chứa protein từ cây trồng bằng protein tế bào có thể giúp giảm sự cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch và phát thải

khí nhà kính liên quan vào khí quyển. Khả năng giảm thiểu những tác động như vậy có thể tăng lên bằng cách cho phép sử dụng bổ sung các nguồn năng lượng tái tạo cho các ca làm việc trong nông nghiệp tế bào, đặc biệt vì các hoạt động chính và yêu cầu năng lượng của nó là để sưởi ấm, chiếu sáng nhân tạo và điều chỉnh tự động hóa chúng (Mattick, 2018). Protein của vi khuẩn và nấm (methanotrophs và nấm men tương ứng) có thể làm giảm phát thải khí nhà kính và cải thiện hơn nữa hiệu quả sử dụng tài nguyên của thức ăn chăn nuôi thông qua việc sử dụng chất thải và chất thải công nghiệp làm nguyên liệu thô, ví dụ như phát thải CH₄ và CO₂ từ hoạt động khoan dầu (Nyyssölä và cs., 2022). Cuối cùng, do quá trình sản xuất protein tế bào có thể diễn ra ở khu vực thành thị và gần các cơ sở chế biến/sản xuất thức ăn chăn nuôi cũng như các trung tâm phân phối nên nó có thể giảm lượng khí thải GHG vào khí quyển và việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch liên quan đến yêu cầu vận chuyển.

Tác động liên quan đến nitơ và phốt pho

Không giống như cây trồng thông thường, nông nghiệp tế bào không cần phân bón tổng hợp để cung cấp các chất dinh dưỡng cần thiết cho quá trình sản xuất protein. Thay vào đó, các vi sinh vật cố định đạm có thể tái chế nitơ phản ứng có sẵn trên đất và các chất hữu cơ/vô cơ hoặc cố định nitơ trong khí quyển (Helliwell và Burton, 2021; Nyyssölä và cs., 2022). Các quá trình này giúp giảm lượng nitơ và phốt pho dư thừa có khả năng dẫn đến axit hóa và phú dưỡng các hệ sinh thái trên cạn và dưới nước.

Tác động tới chất lượng nước và cạn kiệt nguồn nước

Lượng nước trong quá trình sản xuất protein từ vi sinh vật có thể khác nhau rất nhiều tùy thuộc vào loại chất nền được sử dụng và địa điểm sản xuất. Trong trường hợp nông nghiệp tế bào sử dụng thức ăn có nguồn gốc thực vật (đường), tổng lượng nước tiêu thụ (bao gồm các yêu cầu về điều hòa khí hậu, sưởi ấm và làm mát cơ sở vật chất) có thể so sánh với sản lượng cây trồng thông thường (Behm và cs., 2022). Mặt khác, nông nghiệp tế bào tạo ra ít nước thải hơn đáng kể so với cây trồng protein thông thường và do đó nó không đe dọa đến chất lượng nước.

Hơn nữa, nó có thể sử dụng nhiều dòng nước như nước ngọt, nước biển và nước thải tái chế, giúp giảm thêm áp lực lên nguồn nước sẵn có (Nyyssölä và cs., 2022). Tuy nhiên, để đánh giá tốt nhất hiệu quả của chiến lược cải thiện chất lượng nước này, các phương pháp thay thế để tái chế chất thải thực phẩm cũng cần được xem xét (Puyol và cs., 2017).

Tác động đến đa dạng sinh học

Nông nghiệp tế bào góp phần bảo tồn đa dạng sinh học và bảo tồn các khu vực điểm nóng đa dạng sinh học trên hành tinh bằng cách giảm nhu cầu về đất để sản xuất thức ăn protein và do đó giảm thiểu tác động liên quan của nạn phá rừng và phân mảnh/mất môi trường sống. Tuy nhiên, một điều quan trọng cần cân nhắc ở đây là khả năng bị bỏ rơi đột ngột cảnh quan nông nghiệp do chuyển sang nông nghiệp tế bào có thể dẫn đến mất đa dạng sinh học đồng cỏ và phân mảnh môi trường sống nếu đất đai bị quản lý sai (Helliwell và Burton, 2021; Moritz và cs., 2022).

Ý nghĩa kinh tế

Kinh tế sản xuất và cung ứng cũng như khả năng phục hồi trước các hiện tượng cực đoan

Mặc dù cần nhiều nghiên cứu hơn để định lượng chi phí liên quan đến việc sản xuất thức ăn protein từ nông nghiệp tế bào, đặc biệt là trong các tình huống sản xuất khác nhau (ví dụ: các chất nền khác nhau), các nghiên cứu đã xem xét tính kinh tế của các hệ thống sản

xuất thịt nuôi cấy và nhận thấy rằng chúng có thể so sánh được với hệ thống chăn nuôi và trồng trọt thông thường (Bapat và cs., 2021; Eibl và cs., 2021). Những tiến bộ trong công nghệ sinh học có thể giúp vượt qua những thách thức liên quan đến đầu tư vốn lớn cần thiết cho sản xuất (ví dụ: mua thiết bị liên quan đến sản xuất), xử lý chất thải để tăng cường an toàn sinh học và tìm nguồn lao động chuyên môn cần thiết (Odegard và Sinke, 2021). Những phát triển như vậy sẽ làm cho protein tế bào trở nên cạnh tranh hơn trên thị trường thức ăn chăn nuôi và giúp giải quyết những bất ổn của thị trường hiện tại liên quan đến việc các nhà sản xuất thức ăn chăn nuôi và chăn nuôi sẵn sàng chuyển khỏi các nguồn protein thông thường (Saavoss, 2019).

Yêu cầu về nhiên liệu hóa thạch tương đối thấp của nông nghiệp tế bào và khả năng của vi sinh vật trong việc chuyển đổi nhiều dòng chất thải thành các sản phẩm có giá trị tạo ra những con đường kinh tế tuần hoàn mới giúp nâng cao khả năng phục hồi của ngành sản xuất thức ăn chăn nuôi trước những biến động của giá nhiên liệu và giá cả các mặt hàng nông sản có liên quan (thức ăn có nguồn gốc từ thực vật). Nếu năng lượng tái tạo ngày càng rẻ hơn có sẵn cho nông nghiệp tế bào (điện từ năng lượng mặt trời), thì hiệu quả kinh tế của nó ở quy mô lớn có thể được cải thiện hơn nữa (Eibl và cs., 2021; Helliwell và Burton, 2021; Nyssölä và cs., 2022).

Xem xét sự không chắc chắn và bất ổn trong giá nhiên liệu và chính sách thương mại toàn cầu, khả năng nông nghiệp di động diễn ra ở khu vực thành thị và gần các trung tâm phân phối có thể giảm đáng kể chi phí liên quan đến vận chuyển và tăng cường an ninh thức ăn và tính sẵn có trong các hệ thống sản xuất chăn nuôi địa phương. Cuối cùng, nông nghiệp di động cho phép kiểm soát tốt hơn mức độ và chất lượng sản xuất, do đó mang lại sự đại diện nhất quán cao hơn trên thị trường và an ninh tài chính (Gasteratos, 2019).

Tác động xã hội

Giá trị dinh dưỡng và tăng trưởng của vật nuôi

Từ góc độ dinh dưỡng, protein từ nguồn nông nghiệp tế bào có thể so sánh được với mức protein từ các nguồn thông thường. Cụ thể, hàm lượng protein thô từ nấm (*Saccharomyces cerevisiae*), vi khuẩn (*Arthrospira plantensis*) và vi tảo (*Chlorella Vulgaris*) có thể dao động từ 33% đến 47%, 51% đến 81% và 7% đến 7%. tương ứng là 59% (Pignolet và cs., 2013; Glencross và cs., 2020). Nghiên cứu đã chỉ ra rằng thành phần axit amin và thành phần dinh dưỡng của bột protein tế bào đã được thử nghiệm trong công thức thức ăn chăn nuôi và cá không dẫn đến sự khác biệt đáng kể về thành phần cơ thể và sự tăng trưởng của động vật (Hardy và cs., 2018; Jones và cs., 2020).

Sức khỏe và phúc lợi động vật

Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng nông nghiệp tế bào có thể có tác động tích cực đến sức khỏe và phúc lợi động vật. Sự kiểm soát mà nông nghiệp tế bào đưa ra đối với chất lượng thức ăn được sản xuất (tức là kỹ thuật GM/GE cho phép sản xuất các loại protein cụ thể) có thể cung cấp chất dinh dưỡng cân bằng để tăng trưởng động vật và chất lượng thịt tối ưu (giảm chất béo không cần thiết) (Mattick, 2018). Hơn nữa, quá trình sản xuất protein tế bào thường diễn ra trong điều kiện vệ sinh trong môi trường được kiểm soát (cơ sở giống như phòng thí nghiệm), do đó làm giảm nguy cơ ô nhiễm sinh học tiềm ẩn (độc tố nấm mốc) có thể đe dọa sức khỏe động vật. Tuy nhiên, rủi ro an toàn bao gồm ô nhiễm sinh học và hóa học có thể phát sinh nếu chất nền (phụ phẩm cây trồng) và cơ sở vật chất (bể lên men) bị ô nhiễm trong quá trình sản xuất hoặc nếu sản phẩm bị ô nhiễm khi xử lý và chế biến sau sản xuất (Teng và cs., 2021). Những rủi ro này trở nên đặc biệt liên quan

khi không có công nghệ cần thiết để giám sát và phát hiện các quần thể vi sinh vật không mong muốn, chất độc và các chất ô nhiễm hóa học (nhựa nano), đặc biệt nếu chất thải được sử dụng cho sản xuất.

Cuối cùng, việc vật nuôi chấp nhận những loại thức ăn mới như vậy có thể là một vấn đề đối với phúc lợi động vật. Ví dụ, các đặc điểm của thức ăn mới như độ ngon miệng hoặc kết cấu so với thức ăn giàu protein thông thường có thể khiến vật nuôi tiêu thụ số lượng ít hơn và do đó cũng gây nguy cơ cho sức khỏe và sự tăng trưởng tốt của vật nuôi (Mainardes và DeVries, 2016). Tuy nhiên, những điều chỉnh nhỏ trong thực tiễn quản lý (chiến lược cho ăn xã hội, thích ứng dần dần) có thể giúp tăng đáng kể sự sẵn sàng của vật nuôi trong việc tiêu thụ các nguyên liệu thức ăn thay thế (Mainardes và DeVries, 2016).

Phát triển xã hội

Một số cơ hội phát triển xã hội có thể nảy sinh cùng với sự phát triển của thị trường nông nghiệp tế bào. Các hệ thống sản xuất protein mới có thể được đặt gần các nguồn chất thải và sản phẩm phụ công nghiệp, từ đó thiết lập chuỗi từ chất thải thành sản phẩm hiệu quả và cải thiện đáng kể việc xử lý chất thải (Williams, 2021). Các cơ sở sản xuất protein tế bào đặt tại khu vực thành thị có thể giúp xây dựng các hệ thống chăn nuôi địa phương có khả năng phục hồi tốt hơn và tiết kiệm tài nguyên hơn, không phụ thuộc vào việc vận chuyển nguyên liệu trên quãng đường dài và góp phần phát triển nền kinh tế địa phương. Các yêu cầu của nông nghiệp tế bào đối với lao động chuyên môn và các nguồn năng lượng tái tạo có thể khuyến khích hơn nữa tăng trưởng kinh tế và xã hội ở mức độ thấp hơn cộng đồng nông thôn phát triển.

Nhận thức và chấp nhận của người tiêu dùng

Sự chấp nhận của người tiêu dùng không được coi là mối đe dọa nghiêm trọng đối với khả năng tiếp thị và khả năng kinh tế của thức ăn protein tế bào, vì nông nghiệp tế bào đã trở thành một hoạt động phổ biến trong ngành công nghiệp thực phẩm trong hai thập kỷ qua. Người tiêu dùng đã tiếp xúc đáng kể với các loại thực phẩm phát sinh từ quá trình nông nghiệp tế bào, đặc biệt được sử dụng trong chế độ ăn chay và thuần chay, điều này sẽ cho phép kết hợp suôn sẻ các lựa chọn thay thế đó vào thức ăn chăn nuôi (Teng và cs., 2021; Zollman Thomas và Bryant, 2021).

Những rủi ro tiềm ẩn liên quan đến sự sẵn lòng của người tiêu dùng để thử các sản phẩm chăn nuôi được nuôi bằng protein tế bào có thể phát sinh khi chất thải hoặc kỹ thuật công nghệ sinh học GM/GE được sử dụng mà không được một bộ phận công chúng hiểu rõ hoặc tin cậy. Giáo dục thêm cho người tiêu dùng về lợi ích tổng thể về môi trường, kinh tế và xã hội của giải pháp thay thế này, về những nhận thức sai lầm về các vấn đề an toàn thực phẩm liên quan và tuân thủ các quy trình ghi nhãn minh bạch có thể giúp nâng cao tỷ lệ chấp nhận và chấp nhận của người tiêu dùng.

An toàn thực phẩm

Như đã thảo luận về sức khỏe và phúc lợi động vật ở trên, mối lo ngại lớn về an toàn thực phẩm nảy sinh khi quá trình sản xuất protein của tế bào sử dụng chất thải chưa được xử lý kỹ lưỡng. Những thực hành như vậy gây ra nguy cơ cho một số chất gây ô nhiễm sinh học (bao gồm vi rút, vi khuẩn hoặc nấm) và hóa học (bao gồm vi nhựa, kim loại nặng, phân tử tổng hợp) xâm nhập vào cơ thể con người thông qua tích lũy sinh học. Mặc dù nghiên cứu hiện tại liên tục phát hiện ra thông tin mới nhưng vẫn còn nhiều điều không

chắc chắn xung quanh cơ chế chính xác mà các chất gây ô nhiễm đó được kích hoạt và các vấn đề cụ thể mà chúng có thể gây ra cho con người.

Một mối lo ngại khác về an toàn thực phẩm liên quan đến protein tổng hợp có thể dẫn đến việc đưa các chất gây dị ứng vào chuỗi thức ăn của con người tương tự như các nguồn protein thông thường, do đó dẫn đến các phản ứng dị ứng và không dung nạp tiềm ẩn khi tiêu thụ các sản phẩm chăn nuôi (Kuhad và cs., 1997).

Ý nghĩa pháp lý

Phải có sẵn một hệ thống quản lý nghiêm ngặt để giải quyết các vấn đề liên quan đến an toàn, đặc biệt khi chất thải và kỹ thuật GM/GE được sử dụng để sản xuất protein tế bào. Việc phát hiện sớm và chính xác các chất ô nhiễm sinh học và hóa học cũng như giám sát các biện pháp thực hành vệ sinh tốt là rất quan trọng để đảm bảo an toàn thức ăn và thực phẩm. Cần phát triển các chiến lược giám sát dự đoán, chẳng hạn như lấy mẫu ngẫu nhiên và kiểm tra kỹ lưỡng chuỗi sản xuất, cũng như các chính sách ghi nhãn nghiêm ngặt để ngăn ngừa các sự cố gian lận thức ăn và thực phẩm, có thể gia tăng khi chất lượng và khả năng chi trả của protein tế bào được cải thiện và thị trường mở rộng.

THỰC PHẨM CŨ, CHẤT THẢI THỰC PHẨM, PHỤ PHẨM CÔNG NGHIỆP VÀ DÒNG CHẤT THẢI

Cung cấp trực tiếp cho vật nuôi chất đạm không ăn được của con người từ chất thải thực phẩm là một chủ đề nghiên cứu chính khác như một giải pháp tiềm năng cho tính bền vững của thức ăn chăn nuôi mà không ảnh hưởng đến lượng lương thực sẵn có, vì khoảng 30% đất canh tác toàn cầu sản xuất ra thực phẩm mà sau đó người ta không dùng đến (FAO, 2013; Tonini và cs., 2018).

Việc đánh giá phân biệt giữa chất thải thực phẩm và thực phẩm cũ. Cái trước đề cập đến nguyên liệu ăn được bị loại bỏ do lựa chọn hoặc do các sự kiện như đổ tràn và hư hỏng trong quá trình sản xuất và chế biến, trong khi cái sau đề cập đến thực phẩm hoặc thành phần thực phẩm không đến tay các nhà bán lẻ và người tiêu dùng (do không đáp ứng chất lượng, tiêu chuẩn). Điều quan trọng cần lưu ý là chất thải thực phẩm có thể chứa một số chất không ăn được chủ yếu do cặn bao bì (Tavill, 2020).

Nhiều nghiên cứu đã điều tra thành phần dinh dưỡng của chất thải thực phẩm phổ biến trên toàn cầu, tác động của các phương pháp xử lý chất thải đến hiệu quả của chất thải thực phẩm làm thức ăn và những tác động tiềm tàng đối với hiệu suất chăn nuôi của một số loài (Dou, Toth and Westendorf và cs., 2018; Luciano và cs., 2020). Bằng chứng cho thấy rằng chất thải thực phẩm từ cả khách sạn và hộ gia đình đều có tiềm năng thay thế thức ăn chứa protein, trong khi thực phẩm trước đây từ tiệm bánh và bánh kẹo có thể được sử dụng làm nguồn protein trong khẩu phần ăn của vật nuôi (Pinotti và cs., 2021; Rajeh và cs., 2021). Nhiều nhà bán lẻ lớn ở Châu Âu và Vương quốc Anh, bao gồm Tesco, Arla Foods và Coca Cola, đã bắt đầu đầu tư vào quy trình phân loại rác thải để sử dụng an toàn thực phẩm dư thừa làm thức ăn chăn nuôi (WRAP, 2016). Tuy nhiên, những hành động như vậy đã bị trì hoãn do các mối đe dọa nghiêm trọng về an ninh lương thực, bao gồm cả đại dịch Covid-19, khiến các nhà bán lẻ, nhà hàng, khách sạn và quán ăn tự phục vụ phải hoạt động với công suất rất thấp, do đó tạo ra lượng chất thải thực phẩm hạn chế.

Dư lượng cây trồng, phụ phẩm nông-công nghiệp và cây nông lâm kết hợp (chè, sắn, dâu tằm, mesquite) cũng mang lại cơ hội cung cấp nguồn protein để sử dụng trong thức ăn

chăn nuôi. Những nguồn này đề cập đến các sản phẩm phụ mà con người không ăn được, chẳng hạn như lá cây và các sản phẩm phụ (chất cô đặc protein từ lá) có nguồn gốc từ nông lâm kết hợp và chế biến cây trồng sau thu hoạch và có thể được sử dụng làm nguồn protein, năng lượng và chất xơ cho chăn nuôi (Tallentire và cs., 2018; Li và cs., 2019; Salami và cs., 2019). Ngũ cốc sấy khô có chất hòa tan trong máy chung cất (DDGS), một sản phẩm phụ của ngành công nghiệp nhiên liệu sinh học, là một trong những ví dụ phổ biến nhất được sử dụng để thay thế đậu nành và ngô trong công thức khẩu phần ăn cho gia súc và cá (Makkar, 2018). Do tiềm năng sử dụng các sản phẩm phụ như thức ăn chăn nuôi, sự phối hợp và tích hợp giữa các nhà máy lọc sinh học và hệ thống chăn nuôi đã được khám phá để giải quyết các vấn đề về đất đai sẵn có và phân phối lại áp lực môi trường liên quan đến hai ngành công nghiệp (de Souza, Junqueira và Cavalett, 2021).

Dòng chất thải thực phẩm nông nghiệp mang lại nhiều cơ hội tìm nguồn cung cấp protein cho thức ăn chăn nuôi, đồng thời giải quyết một loạt vấn đề ô nhiễm môi trường. Bằng cách sử dụng các công nghệ sinh học mới, tỷ lệ thu hồi nitơ gần 100% đã được báo cáo từ chất thải và nước thải cho đến protein vi sinh vật để tạo ra protein tế bào, cho thấy tiềm năng của nền kinh tế tuần hoàn dựa trên sinh học trong nông nghiệp (Puyol và cs., 2017). Nghiên cứu gần đây cũng đã khám phá tiềm năng của chất thải từ chăn nuôi (chất lỏng) và các nhà máy lọc sinh học (chất tiêu hóa kỵ khí) để giúp phát triển bền vững, giảm thiểu việc sử dụng nước cho canh tác và đất được sử dụng để xử lý chất thải dư thừa (Stadtlander và cs., 2019; Sosta và cs., 2020).

Ý nghĩa môi trường

Suy thoái đất, thay đổi sử dụng đất và các tác động liên quan đến đất đai

Việc tạo ra protein từ thực phẩm cũ, chất thải thực phẩm và các sản phẩm phụ của ngành có thể giúp giảm thiểu dấu chân sử dụng đất của ngành chăn nuôi toàn cầu, vì nó giảm bớt áp lực từ đất đai lẽ ra được sử dụng để sản xuất cây trồng thức ăn chăn nuôi. Việc đưa chất thải thực phẩm và công nghiệp vào thức ăn chăn nuôi có thể làm giảm đáng kể yêu cầu về bãi chôn lấp và giảm áp lực chung lên hệ thống xử lý chất thải (Tonini và cs., 2018). Đất dành cho sản xuất cây trồng, ngũ cốc và trái cây nói riêng có thể được sử dụng để đáp ứng nhu cầu chăn thả của động vật nhai lại, bên cạnh việc giảm nhu cầu về đất trồng trọt (Schader và cs., 2015; Salami và cs., 2019).

Phát thải khí nhà kính, ô nhiễm không khí và cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch

Việc xử lý dòng chất thải như các sản phẩm phụ có giá trị giúp giảm đáng kể dấu chân môi trường tổng thể của các ngành công nghiệp tạo ra chúng - ví dụ như tiệm bánh, khách sạn và nhà hàng, sản xuất cây trồng, nhà máy bia, nhiên liệu sinh học, v.v. Điều này là do việc phân bổ khí thải và chất ô nhiễm được tạo ra thông qua sản xuất, bao gồm phát thải khí nhà kính và tác động đến nguồn tài nguyên sẵn có, sẽ thay đổi từ quy trình phân bổ “chỉ sản phẩm chính chịu trách nhiệm” sang “phát thải được phân bổ cho sản phẩm chính và các sản phẩm phụ có giá trị”. Việc kết hợp các nguồn protein không cần đất như vậy vào thức ăn chăn nuôi sẽ giải phóng đất và tài nguyên cho các loại cây trồng protein thông thường như đậu tương, có thể được sử dụng trực tiếp cho con người hoặc cho các ngành công nghiệp khác (làm nguyên liệu cho nhiên liệu sinh học), nói chung là giảm tác động đến môi trường trong sản xuất thức ăn chăn nuôi. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng sử dụng chất thải thực phẩm làm thức ăn chăn nuôi là chiến lược xử lý hiệu quả nhất từ góc độ môi trường, khi so sánh với việc sử dụng chất thải thực phẩm làm nguyên liệu cho quá trình tiêu hóa kỵ khí (tức là năng lượng sinh học) và làm phân trộn (tức là phân bón hữu

cơ) (Vandermeersch và cs., 2014; Salemdeeb và cs., 2017; Dou, Toth và Westendorf và cs., 2018).

Với những giải pháp thay thế này, điều quan trọng là mọi phương pháp tiên xử lý cần thiết cho các mục đích sử dụng tiềm năng khác nhau đối với dòng chất thải đó đều phải được xem xét vì tác động môi trường và yêu cầu tài nguyên của chúng có thể thay đổi đáng kể.

Tác động liên quan đến nitơ và phốt pho

Việc sử dụng thực phẩm cũ và chất thải thực phẩm để tạo nguồn protein tạo ra cơ hội giảm tác động của quá trình axit hóa và phú dưỡng, ngay cả khi so sánh với các phương pháp khai thác tiềm năng khác (phân hủy kỵ khí để sản xuất năng lượng, ủ phân làm phân bón hữu cơ) (Salemdeeb và cs., 2017). Sản xuất thức ăn từ chất thải thực phẩm không phụ thuộc vào phân bón tổng hợp và các đầu vào hóa học khác, do đó làm giảm áp lực lên các vùng nước ngọt và nước biển do rửa trôi chất dinh dưỡng và hóa học. Hơn nữa, nó tạo ra một con đường tái chế các chất dinh dưỡng mà lẽ ra sẽ được lắng đọng vào đất và hệ sinh thái dưới nước thông qua việc xử lý chất thải.

Tác động tới chất lượng nước và cạn kiệt nguồn nước

Những cải thiện lớn về hiệu quả sử dụng nước trong thức ăn chăn nuôi có thể đạt được thông qua việc tìm nguồn protein từ chất thải thực phẩm và chất thải công nghiệp, đồng thời và thông qua cùng một quá trình loại bỏ các chất gây ô nhiễm không mong muốn khỏi các vùng nước ngọt và nước biển (Dou, Toth và Westendorf và cs., 2018). Việc thay thế thức ăn chăn nuôi thông thường bằng nhiên liệu sinh học, nông lâm kết hợp và các sản phẩm phụ từ thực vật có thể giúp giảm lượng nước thải của các chuỗi sản xuất này nói chung, miễn là nhu cầu ngày càng tăng đối với các sản phẩm phụ đó không thúc đẩy tăng trưởng tổng thể về sản xuất (Mekonnen và Hoekstra, 2020).

Tác động đến đa dạng sinh học

Các tác động đa dạng sinh học liên quan đến việc xử lý chất thải thực phẩm nhỏ hơn nhiều so với những tác động liên quan đến việc sản xuất thực phẩm cuối cùng bị lãng phí (FAO, 2013). Do đó, sử dụng chất thải thực phẩm làm thức ăn mang lại lợi ích lớn hơn cho việc bảo tồn đa dạng sinh học một cách gián tiếp, chia sẻ gánh nặng môi trường liên quan đến sản xuất thực phẩm như một sản phẩm phụ có giá trị (tức là phân bổ lại các tác động môi trường). Tác động trực tiếp, tích cực đến đa dạng sinh học là do việc chuyển đổi chất thải thực phẩm thành thức ăn chăn nuôi không cần thêm đất hoặc đầu vào tổng hợp và hóa học so với nông nghiệp thông thường, giúp bảo tồn chất lượng môi trường sống tốt và giảm sự phân mảnh môi trường sống.

Ý nghĩa kinh tế

Kinh tế sản xuất và cung ứng cũng như khả năng phục hồi trước các hiện tượng cực đoan

Các dòng nông nghiệp tuần hoàn để tìm nguồn cung cấp protein, chẳng hạn như thức ăn có nguồn gốc từ chất thải thực phẩm và thực phẩm cũ, cũng có thể giúp ngành chăn nuôi tránh được chi phí lớn liên quan đến sản xuất cây trồng protein thông thường. Điều kiện quan trọng để các giải pháp thay thế này khả thi và tiết kiệm chi phí là xử lý chất thải thực phẩm đúng cách trước khi sử dụng làm thức ăn chăn nuôi, nhằm giảm nguy cơ bùng phát mầm bệnh và dịch bệnh có thể dẫn đến hậu quả kinh tế nghiêm trọng cho ngành chăn nuôi (Dou, Toth và Westendorf và cs., 2018). Việc đảm bảo các tiêu chuẩn vệ sinh cao thông qua việc thu gom rác thải kịp thời, xử lý nhiệt kỹ lưỡng, vận chuyển và xử lý

thích hợp sẽ phát sinh những chi phí cần được tính đến khi đánh giá tính khả thi của các chiến lược cho ăn như vậy (Pinotti và cs., 2020; Rajeh và cs., 2021). Khi so sánh các khả năng sử dụng chất thải thực phẩm, cụ thể là xử lý nó để sản xuất năng lượng (tức là tiêu hóa kỵ khí) hoặc xử lý nó để sản xuất thức ăn chăn nuôi (tức là xử lý vệ sinh/nhiệt), thì chi phí sau phải chịu gấp đôi (Martinez-Sanchez và cs., 2016). Tuy nhiên, lợi ích tài chính mà ngành chăn nuôi thu được khi giảm sản xuất thức ăn chăn nuôi theo cách này nhìn chung lớn hơn chi phí và khiến nó trở thành một giải pháp thay thế khả thi (Martinez-Sanchez và cs., 2016; Pinotti và cs., 2021). Những tiến bộ hơn nữa trong công nghệ sinh học để xử lý chất thải có thể làm tăng hiệu quả chi phí của các giải pháp thay thế nông nghiệp tuần hoàn (protein từ chất thải thực phẩm, côn trùng nuôi trên chất thải) và dòng protein nông nghiệp tế bào (protein vi khuẩn được sản xuất từ chất thải), từ đó cho phép thực hiện dễ dàng hơn ở quy mô lớn (Ritala và cs., 2017; Jones và cs., 2020).

Tác động xã hội

Giá trị dinh dưỡng và tăng trưởng của vật nuôi

Chất thải thực phẩm có thể là nguồn cung cấp axit amin, khoáng chất, axit béo và vitamin cần thiết cho sự phát triển của động vật (Rajeh và cs., 2021). Tuy nhiên, không có bằng chứng rõ ràng rằng nó có thể cải thiện đáng kể hiệu suất của động vật. Tài liệu cho thấy chất thải thực phẩm không ảnh hưởng đến chất lượng thịt, trong khi một số nghiên cứu cho thấy nó thậm chí có thể cải thiện chất lượng thịt (Dou và cs., 2018).

Sức khỏe và phúc lợi động vật

Chất thải thực phẩm và thực phẩm cũ cần phải được xử lý rất cẩn thận bằng xử lý nhiệt (ví dụ: xử lý thủy nhiệt ở 110°C trong một giờ) trước khi cho động vật ăn, vì chúng có thể chứa vi rút và vi khuẩn có thể gây ra các bệnh nghiêm trọng cho động vật như dịch tả lợn và bệnh lở mồm long móng. Ngay cả khi chất thải thực phẩm, thực phẩm trước đây và dòng chất thải công nghiệp an toàn từ góc độ vi sinh học (khỏi các chất gây ô nhiễm vi sinh vật và nấm), chúng vẫn có thể chứa hàm lượng dư lượng hóa chất cao từ bao bì (nhựa) và quá trình chế biến (kim loại nặng, thuốc trừ sâu) gây hại cho vật nuôi (Pinotti và cs., 2019). Một số loại thực phẩm và chất thải thực phẩm trước đây có thể chứa nồng độ cao các chất chuyển hóa thứ cấp hoặc chất độc, ví dụ như cặn sô cô la có thể chứa nhiều theobromine. Vì lý do này, mức độ đưa chúng vào thức ăn chăn nuôi cần phải được xem xét cẩn thận.

Mặc dù tài liệu cho thấy rằng cặn bao bì còn sót lại trong thực phẩm cũ và chất thải thực phẩm thường không đáng kể (tức là dưới 0,1 g trên 100 g), điều quan trọng cần lưu ý là các loại vật liệu khác nhau có thể biểu hiện điện trở rất khác nhau. Ví dụ, polyethylene và polypropylene là hai loại nhựa đóng gói phổ biến, có điểm nóng chảy khác nhau ở ~120°C và ~240°C

Phát triển xã hội

Tái chế chất thải thực phẩm và dòng chất thải thông qua thức ăn chăn nuôi tạo ra nhiều cơ hội phát triển xã hội, thúc đẩy tăng trưởng của cộng đồng địa phương, thúc đẩy đổi mới công nghệ sinh học và tạo việc làm cho lao động chuyên môn (Ủy ban Châu Âu, 2015). Việc áp dụng các giải pháp thay thế tuần hoàn giúp cải thiện dịch vụ hệ sinh thái, nâng cao chất lượng hệ sinh thái, bảo tồn môi trường sống cho động vật hoang dã và giảm áp lực từ thâm canh nông nghiệp để sản xuất cây trồng thông thường, giúp cải thiện chất lượng cuộc sống tổng thể, đặc biệt là cho cộng đồng nông thôn (Popescu, 2019; Zhu và

cs., 2019; Jagtap và cs., 2021).

Nhận thức và chấp nhận của người tiêu dùng

Bằng chứng cho thấy người tiêu dùng các sản phẩm chăn nuôi hiện đang mâu thuẫn về tính phù hợp và an toàn vì thức ăn chăn nuôi từ chất thải thực phẩm, thực phẩm trước đây và dòng chất thải công nghiệp cũng như côn trùng được nuôi trên những dòng chất thải đó. Một mặt, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng người tiêu dùng hiểu được lợi ích và đánh giá cao cảm giác “làm tốt” bằng cách tạo ra các chất dinh dưỡng có giá trị đồng thời giảm chất thải và cải thiện hiệu quả kinh tế và môi trường của các hệ thống chăn nuôi toàn cầu (tức là khái niệm “Thức ăn sinh thái”) (Saito và cs., 2009; Borrello và cs., 2017; Bhatt và cs., 2018). Mặt khác, khả năng chất thải thực phẩm có thể bị ô nhiễm bởi các mầm bệnh gây ra các đợt bùng phát dịch bệnh gần đây như Covid-19 và Dịch tả lợn châu Phi, làm dấy lên vấn đề mất lòng tin vào tiêu chuẩn vệ sinh trong cơ sở chăn nuôi và khiến người chăn nuôi và người tiêu dùng không khuyến khích ủng hộ. áp dụng giải pháp thay thế tuần hoàn này (Mens và cs., 2021; Jayathilake và cs., 2022).

An toàn thực phẩm

Như đã thảo luận trong các chương trước, vi nhựa tìm thấy trong rác thải thực phẩm có thể xâm nhập vào cơ thể con người và gây ra những mối đe dọa nghiêm trọng như nhiễm độc gen, viêm nhiễm và chết tế bào. Bên cạnh con đường con người tiếp xúc với vi hạt nhựa thông qua việc ăn phải các sản phẩm chăn nuôi bị ô nhiễm, các nghiên cứu đã xác định được một con đường gián tiếp khác và thậm chí còn mạnh mẽ hơn. Cụ thể, nghiên cứu đã chỉ ra rằng vi nhựa được tiêu hóa, tức là vi nhựa được cho vật nuôi ăn thông qua thức ăn thừa và sau đó được bài tiết sau khi tiêu hóa, đã thay đổi các đặc tính giúp tăng khả năng hấp phụ của nó. Điều này có nghĩa là một khi được thải vào nước thải hoặc chất thải thông qua quá trình xử lý phân, nó có thể trở thành thức ăn ngẫu nhiên cho nhiều nhóm sinh vật hơn (ví dụ: cá, côn trùng) và cuối cùng đến tay con người thông qua một số con đường tích lũy sinh học (Krasucka và cs., 2022).

Một nguy cơ quan trọng đối với an ninh lương thực phát sinh do khả năng một số chất gây dị ứng tiếp cận thực phẩm của con người thông qua việc sử dụng chất thải thực phẩm làm thức ăn cho protein động vật. Điều quan trọng cần lưu ý là chất thải từ nhà hàng, hộ gia đình, nhà bán lẻ, quán ăn tự phục vụ, tiệm bánh và bánh kẹo thường chứa phần lớn trong số 14 chất gây dị ứng chính – gluten, sữa, cá và protein trứng, cũng như dấu vết của các loại hạt, lạc và đậu phộng (ACAF, 2009; Testa và cs., 2017; Bingemann và cs., 2019). Ngoài các chất gây dị ứng, chất thải thực phẩm có thể chứa nhiều chất phụ gia và thành phần chế biến khác nhau, chẳng hạn như chất làm ngọt nhân tạo (aspartame), chất điều vị (bột ngọt), phụ gia màu nhân tạo và các chất khác, có thể tiếp cận con người thông qua tích lũy sinh học trong mô vật nuôi. Những chất hóa học này có liên quan đến những tác động có hại đối với con người, bao gồm các phản ứng dị ứng về đường hô hấp và da, thậm chí là ung thư dạ dày và ruột (Gultekin và cs., 2020; Rinninella và cs., 2020).

Ý nghĩa pháp lý

Việc sử dụng an toàn chất thải thực phẩm và dòng chất thải làm thức ăn chăn nuôi là một thách thức lớn đối với các hệ thống quản lý của ngành chăn nuôi toàn cầu. Tương tự như trường hợp nông nghiệp tế bào, điều quan trọng là các quy trình đánh giá an toàn sử dụng công nghệ sinh học tiên tiến để phát hiện sớm và chính xác các chất gây ô nhiễm sinh học và hóa học trong chất thải thực phẩm. Cần có các phương pháp phát hiện và xử lý nhạy cảm để đảm bảo thực hiện an toàn các phương pháp thay thế đó, như các nghiên cứu đã

báo cáo nồng độ kim loại nặng và thuốc trừ sâu trong chất thải thực phẩm vượt quá giới hạn cho phép trong các nguồn protein thông thường (Dou và cs., 2018). Có thể cần phải thiết lập các tiêu chuẩn và chương trình chứng nhận các kỹ thuật và thực hành xử lý cũng như các loại chất thải phù hợp để chuyển đổi thành thức ăn chăn nuôi để tránh các mối đe dọa an toàn thực phẩm có liên quan (Westendorf, 2000). Các hoạt động chế biến và cho ăn không được giám sát và không được kiểm soát có thể dẫn đến bùng phát dịch bệnh lớn với những hậu quả nghiêm trọng đối với sự phát triển của ngành chăn nuôi, như bệnh lở mồm long móng năm 2001 ở Vương quốc Anh (Mens và cs., 2021). Những sự cố như vậy càng góp phần tạo ra cảm giác mất lòng tin của người tiêu dùng và thiếu niềm tin vào việc các cơ quan quản lý có thể đảm bảo sự an toàn của thức ăn mới và các sản phẩm chăn nuôi.

PHỤ PHẨM TỪ ĐỘNG VẬT VÀ CÔN TRÙNG

Các nguồn protein từ động vật đã được sử dụng chủ yếu để khắc phục một số nhược điểm của thức ăn từ thực vật như hàm lượng protein tương đối thấp và sự hiện diện của một số yếu tố phản dinh dưỡng làm giảm lượng dinh dưỡng sẵn có và giải quyết các vấn đề bền vững chính như sử dụng đất và toàn cầu hóa. tiềm năng nóng lên (Lasekan, Bakar và Hashim, 2013; DiGiacomo và Leury, 2019). Trong khi protein động vật đã qua chế biến (PAP) có nguồn gốc từ cá (tức là bột cá) là thành phần thức ăn phổ biến cho nhiều loài vật nuôi, thì ở nhiều quốc gia, luật pháp lại cấm sử dụng PAP từ các loài khác (PAP gia cầm) để ngăn ngừa khả năng bùng phát dịch bệnh. như dịch bệnh não xốp truyền nhiễm ở bò/bệnh não xốp lây truyền (BSE/TSE) vào những năm 1980 (Lecrenier và cs., 2020; Woodgate và Wilkinson, 2021). Những tiến bộ trong công nghệ kết xuất PAP cũng như các quy trình kiểm soát và quản lý có thể dẫn đến việc dỡ bỏ các lệnh cấm như vậy, như đã xảy ra gần đây tại Liên minh Châu Âu (EU) (Ủy ban EU, 2021). EU hiện cho phép sử dụng PAP của lợn trong khẩu phần ăn của gia cầm và ngược lại, trong khi PAP của côn trùng có thể được sử dụng trong cả hai chế độ này. Tuy nhiên, PAP của động vật nhai lại vẫn bị cấm để ngăn chặn sự bùng phát TSE tái diễn, ngoại trừ sữa, collagen và gelatine chỉ có thể được sử dụng cho động vật không nhai lại (Ricci và cs., 2018).

Côn trùng cũng ngày càng trở nên phổ biến cả dưới dạng thức ăn tiềm năng và thực phẩm cho con người, với bữa ăn từ côn trùng thường chứa từ 50 - 82% protein thô cũng như các chất dinh dưỡng quan trọng khác (canxi, sắt) (Madau và cs., 2020). Là chất phân hủy tự nhiên, côn trùng có thể được nuôi trong nhiều loại chất nền khác nhau, từ nguyên liệu thô đến chất thải, do đó chuyển đổi chất nền không mong muốn thành nguồn protein chất lượng cao và chất béo lành mạnh. Cho đến nay, bột protein côn trùng, chủ yếu từ năm loài đã được khám phá và khai thác thương mại trong thức ăn cho chim và vật nuôi, trong khi việc đưa chúng vào lĩnh vực thức ăn chăn nuôi là chủ đề nghiên cứu sâu hơn (Manceron và cs., 2014; Kim và cs., 2019; van Huis và cs., 2021).

Tác động môi trường

Suy thoái đất, thay đổi sử dụng đất và các tác động liên quan đến đất đai

Theo cách tiếp cận tuần hoàn, việc sử dụng PAP ở lợn, gia cầm và động vật nhai lại trong thức ăn chăn nuôi có thể giúp đạt được những lợi ích môi trường tổng thể tương tự như những lợi ích đã được thảo luận đối với protein thu được từ chất thải thực phẩm và chất thải công nghiệp cũng như protein tế bào được nuôi dưỡng từ chất thải. Tuy nhiên, việc sản xuất protein côn trùng làm thức ăn chăn nuôi ở quy mô thương mại có những tương tác phức tạp hơn một chút với môi trường (Madau và cs., 2020; van Huis và cs., 2021).

Nuôi côn trùng có khả năng làm giảm nhu cầu sử dụng đất để sản xuất protein, chẳng hạn như lên tới 98% khi so sánh với hỗn hợp protein đậu nành-bột cá (van Huis và Oonincx, 2017). Tuy nhiên, cần lưu ý rằng các trang trại côn trùng (tức là cơ sở vật chất) không phải là đơn vị không có đất và do đó không được dự kiến trước tác động đến việc sử dụng đất cũng có thể liên quan đến việc nuôi côn trùng khi lĩnh vực này mở rộng, tức là với sự dịch chuyển của các hoạt động nông nghiệp khác hoặc thúc đẩy thay đổi sử dụng đất ở các khu vực thành thị (Doi và Mulia, 2021).

Phát thải khí nhà kính, ô nhiễm không khí và cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch

Việc nuôi số lượng lớn côn trùng để làm thức ăn chăn nuôi nhìn chung tạo ra ít khí thải nhà kính hơn so với các nguồn protein thông thường (bột cá, đậu nành). Tuy nhiên, nó đòi hỏi lượng năng lượng cao hơn, chủ yếu để điều hòa khí hậu trong nhà, một điều kiện quan trọng để côn trùng phát triển tối ưu vì chúng là loài côn trùng biến nhiệt (van Huis và Oonincx, 2017; van Zanten và cs., 2015). Mặc dù yêu cầu năng lượng cao, việc nuôi côn trùng không phụ thuộc nhiều vào nhiên liệu hóa thạch vì hoạt động canh tác điển hình của nó liên quan đến việc sử dụng điện. Do đó, có khả năng đáp ứng các yêu cầu này thông qua nguồn năng lượng tái tạo và do đó giảm hơn nữa lượng khí thải carbon trong thức ăn chăn nuôi nói chung (Wang và Shelomi, 2017). Điều quan trọng cần lưu ý là việc nuôi côn trùng vẫn còn ở giai đoạn sơ khai và còn rất nhiều cơ hội để cải thiện hiệu quả tài nguyên, đặc biệt là xem xét khả năng nuôi côn trùng trên nhiều loại chất nền bao gồm nhiều chất thải khác nhau (Bosch và cs., 2019).

Tác động liên quan đến nitơ và phốt pho

Ngoài ra, việc nuôi côn trùng trên phân do vật nuôi thải ra (tức là phương pháp tiếp cận tuần hoàn) có khả năng làm giảm hơn nữa tổng nồng độ nitơ trong đất nông nghiệp lên tới 62% (Elahi và cs., 2022). Nghiên cứu sâu hơn nên khám phá sự phối hợp và lợi ích tiềm năng từ việc sử dụng các dòng chất thải công nghiệp khác nhau (chất thải thực phẩm) để xác định các chiến lược nuôi côn trùng tối ưu tùy thuộc vào các chính sách môi trường nông nghiệp cụ thể của khu vực; ví dụ, chất thải hữu cơ từ vật nuôi và hộ gia đình có thể được chuyển sang nuôi côn trùng để giúp giảm nồng độ tổng thể của nitơ và phốt pho ở các vùng dễ bị tổn thương được chỉ định (Vùng dễ bị tổn thương bởi Nitơ, Vùng dễ bị tổn thương bởi Phốt pho) giảm thiểu tác động của quá trình axit hóa và phú dưỡng (Huygens và cs., 2020).

Tác động tới chất lượng nước và cạn kiệt nguồn nước

Mặc dù côn trùng phụ thuộc nhiều vào nước để phát triển, nhưng nhu cầu nước tổng thể để nuôi côn trùng hàng loạt vẫn thấp hơn đáng kể so với sản xuất cây trồng protein thông thường (Wang và Shelomi, 2017). Lợi ích của việc nuôi côn trùng đối với sự cạn kiệt tài nguyên nước và chất lượng nước có thể còn lớn hơn nếu bùn và chất thải từ nước thải được coi là chất nền để nuôi (tức là tái chế nước thải thành protein có giá trị). Trong những kịch bản như vậy, điều quan trọng cần lưu ý là các cách sử dụng nước thải thay thế và lợi ích của chúng có thể khác nhau tùy theo khu vực địa lý. Ví dụ: nước thải có thể được sử dụng để sản xuất năng lượng, tưới tiêu trong nông nghiệp thông thường hoặc sinh hoạt (tắm, giặt) và mục đích sử dụng ngoài sinh hoạt (chữa cháy, bể bơi), tất cả đều có thể được ưu tiên khác nhau tùy thuộc vào mức độ căng thẳng về nước của các quốc gia (Zhao và cs., 2019; Malone và Newton, 2020).

Tác động đến đa dạng sinh học

Như đã thảo luận về các giải pháp thay thế nông nghiệp tế bào và tuần hoàn ở trên, việc áp dụng các chiến lược sản xuất protein không cần đất như protein từ PAP động vật và côn trùng có thể có một số tác động tích cực gián tiếp đến việc bảo tồn đa dạng sinh học toàn cầu, chủ yếu thông qua việc giảm thiểu các tác động mất môi trường sống, phân mảnh và suy thoái do các hoạt động truyền thống gây ra. sản xuất cây trồng (Jansson và Berggren, 2015). Tuy nhiên, điều quan trọng cần lưu ý là các cơ sở chăn nuôi đại trà được quản lý kém có thể gây ra rủi ro cho việc di dời các loài địa phương, tức là thông qua việc trộn lẫn không kiểm soát được các quần thể côn trùng nuôi và côn trùng hoang dã (Jansson và Berggren, 2015; van Huis và cs., 2021).

Ý nghĩa kinh tế

Kinh tế sản xuất và cung ứng cũng như khả năng phục hồi trước các hiện tượng cực đoan

Tính khả thi về mặt kinh tế của việc nuôi côn trùng hàng loạt là chủ đề tranh luận và xung đột trong các tài liệu gần đây. Do yêu cầu cao về năng lượng, giá tương đối thấp của các nguồn protein thông thường cạnh tranh và những thách thức về khả năng tiếp thị côn trùng làm thức ăn cho hệ thống chăn nuôi ở châu Âu và các nước phương Tây, việc nuôi côn trùng vẫn chưa được khai thác rộng rãi ở quy mô công nghiệp (Arru và cs., 2019). Mặt khác, nuôi côn trùng có thể giúp tránh các chi phí liên quan đến đầu vào tổng hợp và hóa học (tức là không cần phân bón), sử dụng nhiên liệu hóa thạch (tức là phụ thuộc nhiều hơn vào năng lượng tái tạo), vận chuyển (tức là các cơ sở trang trại côn trùng có thể được đặt tại hoặc gần thành thị) và lao động (DiGiacomo và Leury, 2019; WWF, 2021). Ngoài ra, việc xem xét khả năng côn trùng được nuôi dưỡng trong chất thải công nghiệp (tức là mô hình kinh doanh tuần hoàn) càng làm tăng thêm hiệu quả chi phí tiềm năng thông qua việc giảm giá xử lý chất thải của các ngành công nghiệp liên quan (Chia và cs., 2019; Madau và cs., 2020). Sự phối hợp tiềm năng đa dạng này với các ngành công nghiệp khác cho thấy rằng nuôi côn trùng có thể là một hệ thống sản xuất protein linh hoạt, mạnh mẽ trước những thay đổi về tính sẵn có và giá cả của chất nền/đầu vào nuôi trồng. Hơn nữa, khả năng phục hồi của nó có thể được tăng cường nhờ sự phát triển trong lĩnh vực năng lượng tái tạo có thể cho phép cung cấp điện liên tục và ít tốn kém hơn từ các nguồn tái tạo (DiGiacomo và Leury, 2019; WWF, 2021; van Huis và cs., 2021).

Tác động xã hội

Giá trị dinh dưỡng và tăng trưởng của vật nuôi

Côn trùng là loài phân hủy tự nhiên và có khả năng chuyển đổi năng lượng có trong chất hữu cơ thành protein ăn được ở nồng độ cao với tỷ lệ từ 35% đến 82% (DiGiacomo và Leury, 2019; WWF, 2021). Ngoài ra, bột côn trùng còn cung cấp cho vật nuôi các hợp chất và chất dinh dưỡng có hoạt tính sinh học quan trọng, chẳng hạn như sắt, kẽm, peptide kháng khuẩn, chitin và axit lauric có thể cải thiện sức khỏe đường ruột và thúc đẩy tăng trưởng (Gasco và cs., 2018; Madau và cs., 2020). Mặc dù có bằng chứng chỉ ra rằng côn trùng là nguồn cung cấp protein chất lượng cao tuyệt vời cho vật nuôi, nhưng điều quan trọng cần lưu ý là giá trị dinh dưỡng của chúng có thể khác nhau giữa các loài côn trùng và tùy thuộc vào chất nền mà chúng được nuôi (Oonincx và Finke, 2021; Pinotti và Ottoboni, 2021; WWF, 2021).

Sức khỏe và phúc lợi động vật

Mặc dù PAP ở lợn, gia cầm và động vật nhai lại là nguồn protein tốt và các chất dinh

đưỡng có lợi giúp thúc đẩy sự phát triển của động vật và sức khỏe đường ruột, nhưng cách chúng được kết hợp vào thức ăn chăn nuôi cần được xem xét cẩn thận. Các chiến lược cho ăn chéo dường như rất quan trọng nhằm giảm thiểu rủi ro nhiễm virus có thể gây suy giảm đáng kể đối với sức khỏe và phúc lợi động vật hoặc đối với các bệnh nghiêm trọng do prion gây ra như BSE/TSE.

Như đã thảo luận trong các Chương trước (tức là sản xuất protein từ nông nghiệp tế bào và chất thải thực phẩm), việc sử dụng chất thải để nuôi côn trùng hàng loạt có thể gây ra những mối đe dọa quan trọng đối với sức khỏe và phúc lợi của chúng, chẳng hạn như sự tích tụ kim loại nặng, thuốc trừ sâu, vi nhựa và các chất gây ô nhiễm khác. Có thể làm giảm sự phát triển của côn trùng và tăng tỷ lệ tử vong (Schrögel và Wätjen, 2019). Một vấn đề quan trọng cần xem xét liên quan đến vấn đề này là sự mơ hồ xung quanh việc phân loại côn trùng được nuôi làm thức ăn hoặc vật nuôi. Điều thứ hai có thể yêu cầu phải tuân thủ các tiêu chuẩn nghiêm ngặt trong ngành nuôi côn trùng để đảm bảo sức khỏe và phúc lợi của côn trùng. Hơn nữa, côn trùng mang chất gây ô nhiễm sinh học và hóa học sau đó được đưa vào nuôi cá/động vật có vỏ hoặc vật nuôi, và các chất gây ô nhiễm đến mô của chúng, nơi chúng gây ra nhiều biến chứng khác nhau như tắc nghẽn đường ruột, làm giảm sự thèm ăn và tăng trưởng của động vật.

Phát triển xã hội

Bên cạnh việc nâng cao phúc lợi của con người bằng việc tái chế các sản phẩm phụ và chất thải động vật được sử dụng để nuôi côn trùng, những giải pháp thay thế như vậy còn mang lại những cơ hội lớn cho tăng trưởng kinh tế xã hội. Do có nhiều loài côn trùng phù hợp cho động vật tiêu thụ nên có thể có các giải pháp nuôi côn trùng được sản xuất tại địa phương, ổn định, kinh tế, cho phép các hộ chăn nuôi quy mô nhỏ trên toàn cầu có thể tự cung tự cấp và tránh chi phí lớn liên quan đến việc mua nguyên liệu thức ăn protein thông thường (Chia và cs., 2019). Hơn nữa, vì nuôi côn trùng mới bắt đầu phát triển và xem xét các yêu cầu về năng lượng, xử lý hợp vệ sinh chất thải và phát hiện các chất gây ô nhiễm cực nhỏ, nên nó có thể là động lực lớn cho những đổi mới trong công nghệ sinh học, hệ thống và chính sách đánh giá quy định và an toàn của vật nuôi. ngành và mối quan hệ tổng thể giữa thực phẩm-năng lượng-nước (Ojha và cs., 2021; Sindermann và cs., 2021).

Nhận thức và chấp nhận của người tiêu dùng

Cùng với pháp luật, sự chấp nhận và thái độ của người tiêu dùng đối với việc sử dụng thức ăn protein từ côn trùng và phụ phẩm động vật là những rào cản quan trọng nhất đối với việc mở rộng quy mô của những loại thức ăn này các lựa chọn thay thế. Có những lo ngại lớn về mức độ mà các yếu tố tôn giáo và văn hóa sẽ ảnh hưởng đến sự chấp nhận của người tiêu dùng đối với vật nuôi được nuôi bằng PAP động vật và côn trùng, điều này có thể hạn chế đáng kể các thị trường sẵn có. Những lo ngại như vậy chủ yếu liên quan đến việc sử dụng PAP từ lợn hoặc thịt bò bị coi là bị cấm trong một số tôn giáo và văn hóa. Những thành kiến (sự ghê tởm) phát sinh do thiếu hiểu biết và thông tin sai lệch về văn hóa-xã hội góp phần đáng kể vào việc khiến các bên liên quan không tin tưởng vào việc áp dụng thành công và an toàn các protein thay thế trong thức ăn chăn nuôi. Tuy nhiên, vẫn còn những lỗ hổng trong nghiên cứu và cần nhiều nỗ lực hơn để tìm hiểu xem liệu các giải pháp thay thế nông nghiệp tuần hoàn và côn trùng có được chấp nhận hơn khi được sử dụng làm thức ăn thay vì thực phẩm hay không (van Huis và cs., 2021). Ở nhiều nền văn hóa, bao gồm cả thế giới phương Tây, côn trùng được nuôi để làm thức ăn chăn nuôi được coi là vật nuôi và do đó, người tiêu dùng yêu cầu hệ thống nuôi côn trùng phải

tuân thủ các tiêu chuẩn cao về phúc lợi động vật. Các yêu cầu của nhà bán lẻ và tiêu chuẩn chứng nhận chăn nuôi có thể gây thêm áp lực lên tốc độ tăng trưởng và tỷ lệ sử dụng các loại thức ăn giàu protein đó, yêu cầu đảm bảo an toàn để ngăn chặn các vấn đề về an toàn thực phẩm và dán nhãn sai (van Huis và cs., 2021; WWF, 2021).

An toàn thực phẩm

Việc tái đưa PAP từ lợn, gia cầm và động vật nhai lại vào thức ăn chăn nuôi làm tăng một số lo ngại nghiêm trọng về an toàn sinh học, chủ yếu liên quan đến kinh nghiệm trước đây về các đợt bùng phát dịch bệnh ở người như dịch BSE/TSE vào những năm 1980 (Woodgate và Wilkinson, 2021). Để giảm thiểu những rủi ro như vậy, các sản phẩm phụ của động vật và PAP phải được cho ăn chéo các loài một cách nghiêm ngặt (PAP của lợn với gia cầm và ngược lại). Các nhà sản xuất thức ăn chăn nuôi sử dụng PAP từ nhiều loài nên xem xét cẩn thận các nguy cơ lây nhiễm chéo tiềm ẩn và tránh trộn và xay các loại thức ăn đó bằng cùng một cơ sở (Lecrenier và cs., 2020; Woodgate và Wilkinson, 2021).

Một rủi ro lớn khác về an toàn thực phẩm phát sinh với việc nuôi côn trùng hàng loạt, chúng cũng có thể là vật truyền bệnh và dẫn đến ô nhiễm mầm bệnh đe dọa động vật và cuối cùng là sức khỏe con người (van Huis và cs., 2021). Khi được nuôi bằng phân gia súc, côn trùng có thể mang dư lượng thuốc thú y, hormone và các chất gây ô nhiễm sinh học (vi khuẩn có DNA chuyển gen, độc tố nấm mốc). Khi được nuôi trên chất thải sản xuất cây trồng và cây trồng, chúng có thể tiếp xúc với thuốc trừ sâu, thuốc diệt cỏ và độc tố nấm mốc. Ngoài ra, có nguy cơ kim loại nặng, nhựa vi mô và nano tích tụ vào côn trùng thông qua chất thải (Truzzi và cs., 2020). Các con đường tích lũy sinh học như “thức ăn chăn nuôi của vật nuôi của phân bón của côn trùng nuôi của vật nuôi của con người” gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đối với sức khỏe con người và an toàn thực phẩm nói chung. Ngoài việc gây suy giảm hiệu suất và phúc lợi của động vật như đã thảo luận ở trên, các chất gây ô nhiễm có thể xâm nhập vào chuỗi thức ăn của con người thông qua việc tiêu thụ sản phẩm chăn nuôi và gây ra những ảnh hưởng nghiêm trọng như phản ứng viêm, rối loạn hệ vi sinh vật đường ruột và ảnh hưởng đến sự hấp thụ chất dinh dưỡng, thậm chí cả tình trạng viêm mãn tính làm tăng nguy cơ mắc bệnh ung thư (Smith và cs., 2018; Prata và cs., 2020). Mức độ tích lũy sinh học khác nhau giữa các loài côn trùng nuôi khác nhau, giai đoạn tăng trưởng của chúng khi tiếp xúc với chất gây ô nhiễm và loại chất gây ô nhiễm sinh học, hạt kim loại hoặc nhựa (van der FelsKlerx và cs., 2018; Meyer và cs., 2021). Cho đến nay, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng nồng độ của cả chất gây ô nhiễm sinh học và hóa học giảm đáng kể khi côn trùng đến tuổi trưởng thành (BfR, 2019; Schrögel và Wätjen, 2019). Tuy nhiên, cần nhiều nghiên cứu hơn để hiểu các con đường cụ thể của các chất gây ô nhiễm khác nhau và định lượng tích lũy sinh học ở mỗi bước quan trọng của các con đường này cho đến khi con người tiêu dùng (các giai đoạn phát triển của côn trùng, đường tiêu hóa của động vật, thịt gia súc, sữa, trứng) để có thông tin chính xác hơn. chiến lược phòng ngừa và hệ thống quản lý (van der FelsKlerx và cs., 2018). Cho đến nay, một số chiến lược giảm thiểu đã được thiết lập để giải quyết nguy cơ ô nhiễm sinh học và đặc biệt là loại bỏ mầm bệnh ở giai đoạn sản xuất PAP. “Bước tiêu diệt” là một chiến lược được sử dụng phổ biến trong an toàn thực phẩm, bao gồm việc tiêu diệt mầm bệnh bằng cách xử lý nhiệt theo thời gian.

Các phương pháp xử lý nhiệt phổ biến bao gồm thanh trùng, đông lạnh và đun nóng/nấu ăn. Mặc dù các chiến lược này có hiệu quả cao nhưng cần phải nâng cao hiểu biết của chúng ta về con đường và quá trình tích lũy sinh học có thể làm thay đổi tính chất lý hóa đặc tính của cả chất gây ô nhiễm sinh học và hóa học để giảm thiểu hơn nữa những rủi ro

đối với các mối nguy thực phẩm.

Khác lớn lao đồ ăn sự an toàn rủi ro phát sinh với các khối nuôi dưỡng của côn trùng, cái mà có thể mà còn là vectơ truyền bệnh và dẫn đến ô nhiễm mầm bệnh đe dọa động vật và cuối cùng là sức khỏe con người (van Huis và cs., 2021). Khi được nuôi bằng phân gia súc, côn trùng có thể mang dư lượng thuốc thú y, hormone và các chất gây ô nhiễm sinh học (vi khuẩn có DNA chuyển gen, độc tố nấm mốc). Khi được nuôi trên chất thải sản xuất cây trồng và cây trồng, chúng có thể tiếp xúc với thuốc trừ sâu, thuốc diệt cỏ và độc tố nấm mốc. Ngoài ra, có nguy cơ kim loại nặng, nhựa vi mô và nano tích tụ vào côn trùng thông qua chất thải (Truzzi và cs., 2020). Các con đường tích lũy sinh học như “thức ăn chăn nuôi của vật nuôi của phân bón của côn trùng nuôi của vật nuôi của con người” gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đối với sức khỏe con người và an toàn thực phẩm nói chung. Ngoài việc gây suy giảm hiệu suất và phúc lợi của động vật như đã thảo luận ở trên, các chất gây ô nhiễm có thể xâm nhập vào chuỗi thức ăn của con người thông qua việc tiêu thụ sản phẩm chăn nuôi và gây ra những ảnh hưởng nghiêm trọng như phản ứng viêm, rối loạn hệ vi sinh vật đường ruột và ảnh hưởng đến sự hấp thụ chất dinh dưỡng, thậm chí cả tình trạng viêm mãn tính làm tăng nguy cơ mắc bệnh ung thư (Smith và cs., 2018; Prata và cs., 2020). Mức độ tích lũy sinh học khác nhau giữa các loài côn trùng nuôi khác nhau, giai đoạn tăng trưởng của chúng khi tiếp xúc với chất gây ô nhiễm và loại chất gây ô nhiễm sinh học, hạt kim loại hoặc nhựa (van der FelsKlerx và cs., 2018; Meyer và cs., 2021). Cho đến nay, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng nồng độ của cả chất gây ô nhiễm sinh học và hóa học giảm đáng kể khi côn trùng đến tuổi trưởng thành (BfR, 2019; Schrögel và Wätjen, 2019). Tuy nhiên, cần nhiều nghiên cứu hơn để hiểu các con đường cụ thể của các chất gây ô nhiễm khác nhau và định lượng tích lũy sinh học ở mỗi bước quan trọng của các con đường này cho đến khi con người tiêu thụ (các giai đoạn phát triển của côn trùng, đường tiêu hóa của động vật, thịt gia súc, sữa, trứng) để có thông tin chính xác hơn. chiến lược phòng ngừa và hệ thống quản lý (van der FelsKlerx và cs., 2018). Cho đến nay, một số chiến lược giảm thiểu đã được thiết lập để giải quyết nguy cơ ô nhiễm sinh học và đặc biệt là loại bỏ mầm bệnh ở giai đoạn sản xuất PAP. “Bước tiêu diệt” là một chiến lược được sử dụng phổ biến trong an toàn thực phẩm, bao gồm việc tiêu diệt mầm bệnh bằng cách xử lý nhiệt theo thời gian.

Các phương pháp xử lý nhiệt phổ biến bao gồm thanh trùng, đông lạnh và đun nóng/nấu ăn. Mặc dù các chiến lược này có hiệu quả cao nhưng cần phải nâng cao hiểu biết của chúng ta về con đường và quá trình tích lũy sinh học có thể làm thay đổi tính chất lý hóa đặc tính của cả chất gây ô nhiễm sinh học và hóa học để giảm thiểu hơn nữa những rủi ro đối với các mối nguy thực phẩm.

Cuối cùng, các chất gây dị ứng được đưa vào vật nuôi và con người từ côn trùng có thể gây ra rủi ro nghiêm trọng cho an toàn thực phẩm. Các nghiên cứu đã điều tra khả năng phản ứng chéo giữa côn trùng ăn được và côn trùng “nuôi” và phát hiện ra rằng tropomyosin là một chất gây dị ứng phản ứng chéo. Họ đã nghiên cứu thêm các phương pháp điều trị tiềm năng để giảm khả năng gây dị ứng của côn trùng ăn được và kết luận rằng khả năng phản ứng của globulin miễn dịch có khả năng chống lại các quá trình nhiệt và tiêu hóa bằng enzym.

Do đó, bằng chứng cho thấy những cá nhân dị ứng với côn trùng “nuôi” và những người tham gia nuôi côn trùng nên được coi là nhóm có nguy cơ cao liên quan đến việc họ tiếp xúc với các sản phẩm chăn nuôi được nuôi bằng côn trùng hoặc côn trùng ăn được (Ribeiro và cs., 2021).

Ý nghĩa pháp lý

Các hệ thống đánh giá quy định và an toàn nên sử dụng các công nghệ và thực hành công nghệ sinh học tiên tiến nhất để phát hiện PAP (xét nghiệm miễn dịch đặc hiệu và phương pháp phản ứng chuỗi polymerase, kính hiển vi hồng ngoại) và thường xuyên đánh giá lại mức độ phổ biến của các dạng BSE/TSE cổ điển và không điển hình (BIOHAZ, 2011).

Để đảm bảo nuôi côn trùng hàng loạt an toàn để làm thức ăn chăn nuôi, cần phải đánh giá an toàn kỹ lưỡng và giám sát chặt chẽ các thực hành chăn nuôi, đồng thời cần khám phá các kiểu gen kháng mầm bệnh bằng nghiên cứu trong tương lai (hiểu biết về virome trong để nuôi thương mại) (de Miranda và cs., 2021).

Ý nghĩa môi trường

Nuôi côn trùng mang lại cơ hội chống lại áp lực môi trường quan trọng. Nó không dựa vào diện tích đất rộng lớn và đầu vào nhiên liệu hóa thạch ở mức độ tương tự như sản xuất cây trồng protein thông thường.

Nó có thể được thực hiện ở nhiều điều kiện và địa điểm khí hậu khác nhau, giúp giảm áp lực lên đất đai và chất lượng đất, đồng thời giữ các tác động liên quan đến khí hậu ở mức tối thiểu thông qua việc sử dụng các nguồn tài nguyên tái tạo.

Ở quy mô lớn hơn, nó trở thành một hoạt động đòi hỏi rất nhiều năng lượng và do đó nó chủ yếu dựa vào năng lượng tái tạo hơn là nhiên liệu hóa thạch.

Bằng chứng sơ bộ chỉ ra tác động thấp hơn đáng kể so với sản xuất cây trồng protein thông thường đối với đa dạng sinh học, chất lượng nước, axit hóa và hiện tượng phú dưỡng.

Ý nghĩa kinh tế

Chi phí khởi động và vận hành cao khiến việc khai thác nuôi côn trùng ở quy mô công nghiệp trở nên khó khăn.

Việc thiếu hỗ trợ tài chính của chính phủ, đầu tư tư nhân và sự cạnh tranh về nguồn lực với các ngành công nghiệp được trợ cấp tạo ra những điều kiện dưới mức tối ưu cho sự phát triển của hệ thống sản xuất này, đặc biệt khi không có thị trường ổn định.

Có thể cần phải tiêu chuẩn hóa và đảm bảo các tiêu chuẩn sản xuất cũng như giới hạn sử dụng để khuyến khích các nhà bán lẻ hỗ trợ người chăn nuôi sử dụng bột côn trùng.

Tác động xã hội

Côn trùng có thể được nuôi trên chất nền thải, do đó nâng cấp chúng thành chất béo và protein lành mạnh.

Việc tăng thêm giá trị cho rác thải sẽ thúc đẩy ý thức mạnh mẽ về việc quan tâm đến môi trường.

Quá trình sản xuất của họ ít phụ thuộc vào lao động thủ công hơn so với các nguồn protein thông thường và mang lại cơ hội thúc đẩy đổi mới thông qua tự động hóa các hoạt động nông nghiệp. Có mối đe dọa rằng côn trùng có thể là vật truyền bệnh, đặc biệt nếu được nuôi bằng chất thải và việc sử dụng protein được chế biến từ côn trùng có thể dẫn đến bùng phát dịch bệnh.

Cần có quy định nghiêm ngặt về chất thải, chế biến côn trùng và chiến lược cho ăn để giảm thiểu rủi ro về thức ăn và an toàn thực phẩm do côn trùng là vật truyền bệnh.

Hiểu rõ hơn quan điểm của các bên liên quan đến nông nghiệp thực phẩm về nuôi côn trùng là điều bắt buộc để chống lại những thành kiến, thông tin sai lệch và hướng tới các giải pháp đàng bực.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU VÀ XÂY DỰNG CHÍNH SÁCH TRONG TƯƠNG LAI

Ý nghĩa và đánh giá sự đánh đổi tính bền vững

Tính bền vững của sản xuất thức ăn chăn nuôi vốn là một khái niệm phức tạp liên quan đến việc quản lý đất đai và tài nguyên sẵn có, xem xét việc sử dụng tối ưu chúng cho nhiều mục tiêu (Nyström và cs., 2019). REA xác định sự đánh đổi về tính bền vững là các tình huống trong đó việc đạt được hiệu quả hoạt động tốt ở một trong những mục tiêu này phải trả giá bằng việc thực hiện mục tiêu khác. Sự đánh đổi để phát triển bền vững có thể được tìm thấy ở tất cả các cấp độ phân cấp khác nhau của ngành, từ cây trồng protein, trang trại và kinh doanh nông nghiệp, đến cảnh quan và thị trường. Ví dụ, chuyên sang canh tác không có đất (ví dụ: thủy canh, nuôi trồng thủy sản) hoặc chuyển phần lớn hoạt động sản xuất thức ăn protein sang miền Bắc bán cầu có thể giảm bớt áp lực môi trường ở miền Nam bán cầu và giải phóng đất đai, tuy nhiên, nó có thể làm trầm trọng thêm tình trạng nghèo đói và sự loại trừ xã hội ở các vùng nông thôn phía Nam. cộng đồng. Việc áp dụng các giải pháp thay thế nông nghiệp tuần hoàn (ví dụ: thức ăn protein từ thực phẩm cũ, chất thải thực phẩm, phụ phẩm) có thể làm giảm đáng kể tác động môi trường của thức ăn chăn nuôi nhưng cũng có thể dẫn đến những bất ổn lớn trên thị trường nông sản thực phẩm toàn cầu, bộc lộ những rủi ro mới đối với thực phẩm an ninh, và thậm chí dẫn đến các tiểu hệ thống sản xuất và thị trường dành riêng cho các sản phẩm phụ có thể tạo ra những tác động tiếp theo. Nhìn chung, làm thế nào chúng ta có thể đảm bảo rằng khoảng cách kinh tế xã hội do việc áp dụng thức ăn protein thay thế tạo ra sẽ không được lấp đầy bằng các hoạt động không bền vững có khả năng dẫn đến những tác động tiêu cực thậm chí còn lớn hơn so với những gì sản xuất thức ăn protein thông thường tạo ra?

Sự đánh đổi như vậy trở nên đặc biệt nổi bật khi các mục tiêu của các bên liên quan xung đột với nhau và khi có những hạn chế về nguồn lực sẵn có để đạt được các mục tiêu của ngành (hạn chế về kinh tế, các vấn đề về quỹ đất sẵn có) (Patterson và cs., 2017). Sự đánh đổi giữa các trụ cột bền vững và xuyên suốt là vấn đề phổ biến trong quá trình ra quyết định về nguồn thức ăn protein thay thế trong tương lai. REA đề xuất rằng cả ba trụ cột bền vững đều được coi là như nhau, để cho phép các bên liên quan trong ngành chăn nuôi bao gồm các nhà hoạch định chính sách, quản lý trang trại và nhà nghiên cứu xác định và đánh giá những thỏa thuận chính để thương mại hóa bền vững các loại thức ăn protein thay thế.

Để đánh giá những sự đánh đổi như vậy, các bên liên quan cần áp dụng cách tiếp cận toàn diện khi đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống nông sản thực phẩm (Green và cs., 2020). Các mô hình mô phỏng và đánh giá vòng đời tối ưu hóa (LCA) và phân tích quyết định đa tiêu chí (MCDA) đánh giá định lượng các tác động bền vững liên quan đến các đầu vào và đầu ra khác nhau của sản xuất thức ăn protein thay thế. Tuy nhiên, do hầu hết các lựa chọn thay thế này chưa được áp dụng ở quy mô thương mại, tổ hợp và trong các hệ thống chăn nuôi đa dạng, nên nghiên cứu thực nghiệm sẽ tạo ra các bộ dữ liệu chi tiết hơn để giảm bớt sự không chắc chắn và nâng cao hiểu biết về các kịch bản protein vật nuôi. Hơn nữa, không có bộ kịch bản tham khảo nào để mô tả một loạt tương lai kinh tế xã hội hợp lý cho ngành nông nghiệp-thực phẩm, không giống như những gì cộng đồng mô hình khí hậu toàn cầu đã thiết lập, điều này khiến việc dự đoán thậm chí còn khó khăn

hơn (Rosenzweig và cs., 2016). Một hạn chế cố hữu khác của các mô hình này là các bên liên quan đến nông nghiệp thực phẩm thường không hành xử có thể dự đoán được và phù hợp với tính hợp lý về kinh tế, xã hội hoặc môi trường. Ví dụ, nông dân có thể không nhất thiết phải đầu tư số vốn lớn vào công nghệ xanh (phân hủy kỵ khí) ngay cả khi các dự báo cho thấy lợi tức đầu tư tăng lên và hiệu quả môi trường được cải thiện (Klapwijk, và cs., 2014). Các phương pháp tiếp cận có sự tham gia (lập bản đồ nhận thức tương tác), phỏng vấn và nhóm tập trung có thể giúp hiểu rõ hơn về hành vi, kiến thức và nhận thức của các bên liên quan, cung cấp thông tin quan trọng cho việc triển khai nguồn cấp dữ liệu protein thay thế. Bất kể sự phát triển trong đánh giá đánh đổi định lượng, kết quả cuối cùng việc giải thích kết quả đầu ra thường được giao cho các bên liên quan và do đó, điều bắt buộc là nhu cầu, mối quan tâm và lợi ích được đảm bảo của họ phải được hiểu rõ để đảm bảo rằng các giải pháp bền vững được hiện thực hóa (Brick và cs., 2018; Journeault và cs., 2021). Mục tiêu của các bên liên quan thường thay đổi theo thời gian và tùy theo địa lý để xác định sự đánh đổi nào phù hợp hơn, điều này cần được xem xét khi hướng tới tương lai của thức ăn chăn nuôi (Kanter và cs., 2018).

Các mối đe dọa mới xuất hiện trong và ngoài tầm nhìn 5 năm

Các bên liên quan trong ngành chăn nuôi cần xem xét một số mối đe dọa mới nổi. Xem xét các tài liệu khoa học và tài liệu xám gần đây, REA xác định các mối đe dọa kinh tế xã hội đáng kể trong ngắn hạn trước mắt và trung hạn (từ nay đến 5 năm tới), do cuộc khủng hoảng năng lượng toàn cầu đang diễn ra và sự biến động ngày càng tăng của nhiên liệu và nông nghiệp. giá hàng hóa gây bất ổn trong thương mại toàn cầu. Xung đột Ukraine-Nga đã ngăn chặn nguồn cung bột hướng dương từ một trong những nhà sản xuất lớn nhất thế giới (Ukraine) và đã đóng băng các khoản đầu tư lớn của châu Âu nhằm hỗ trợ sản xuất đậu nành của Ukraine thay thế hàng nhập khẩu không bền vững. Những diễn biến địa chính trị gần đây khác như Brexit đã làm trầm trọng thêm cảm giác bất an và mất lòng tin của các bên liên quan trong lĩnh vực nông nghiệp, cũng như tạo ra mối lo ngại và bất ổn đối với các đối tác thương mại trong tương lai, nguồn cung lao động, chính sách nhập khẩu/thuế quan, các chương trình môi trường nông nghiệp và các yêu cầu mới để nhận được hỗ trợ. thông qua trợ cấp (Grant, 2016; Swinbank, 2017; Thường, 2018). Xung đột chính trị đã gây ra sự chậm trễ đáng kể trong giao dịch thức ăn chăn nuôi protein (sự chậm trễ tại các cảng của Ukraine do xung đột Ukraine-Nga), do đó làm tăng nguy cơ ô nhiễm sinh học (aflatoxin) do điều kiện bảo quản và vận chuyển kém (Zupaniec và cs., 2021). Các đợt bùng phát dịch bệnh tiềm ẩn đe dọa an ninh lương thực và thức ăn chăn nuôi cũng cần được xem xét khi đưa lại PAP vào thức ăn chăn nuôi ở Châu Âu.

Trong khoảng thời gian dài hơn (trên 5 năm), dự kiến sẽ có những tác động liên quan đến khí hậu đến sản xuất thức ăn chăn nuôi protein toàn cầu. Các mối đe dọa được dự đoán trước bao gồm suy giảm năng suất và thành phần dinh dưỡng kém hơn trong thức ăn protein thông thường, do các hiện tượng khí hậu khắc nghiệt và gây tổn hại (hạn hán, sương giá, mưa đá) và suy thoái đất, tức là tầng đất hữu cơ kém do hoạt động nông nghiệp cường độ cao và hạn hán kéo dài. Cuối cùng, các tương tác giữa biến đổi khí hậu và chất gây ô nhiễm, chẳng hạn như sự gia tăng ô nhiễm độc tố nấm mốc do độ ẩm của thành phần thức ăn tăng lên, được cho là sẽ dẫn đến sự bùng phát gia tăng các chất gây ô nhiễm sinh học và sự thay đổi trong con đường tích lũy sinh học (Alava và cs., 2017).

Lộ trình nghiên cứu và thảo luận trong tương lai

Giống như bất kỳ đánh giá bằng chứng sâu rộng nào khác, báo cáo này thừa nhận những

hạn chế cụ thể làm nổi bật các hướng tiềm năng cho nghiên cứu và thảo luận trong tương lai. REA nắm bắt được hầu hết các tác động về môi trường, kinh tế và xã hội có liên quan ngay đến FSA và Vương quốc Anh nhưng cũng rất quan trọng đối với sự phát triển bền vững toàn cầu của ngành thức ăn chăn nuôi. Nó tập trung vào các giải pháp thức ăn protein thay thế hoàn thiện nhất, có uy tín và được khám phá kỹ lưỡng vì những giải pháp này đã được xác định thông qua các tài liệu khoa học, báo cáo của chính phủ và ý kiến chuyên gia. Tuy nhiên, họ thừa nhận rằng có thể có những lựa chọn thay thế tiềm năng khác ít được biết đến hơn, hiện đang được phát triển hoặc chưa được công nhận mà REA không xem xét chủ yếu do những hạn chế về dữ liệu và thông tin liên quan. Những hạn chế như vậy khiến cho việc thảo luận về tính phù hợp của các lựa chọn thay thế tiềm năng ở quy mô thương mại trở nên đặc biệt khó khăn. Hơn nữa, REA nhận thấy rằng khi xem xét những tiến bộ nhanh chóng trong lĩnh vực năng lượng và công nghệ sinh học cũng như những bất ổn trong phát triển kinh tế vĩ mô và địa chính trị, những tác động bổ sung về tính bền vững có thể nảy sinh khi triển khai các giải pháp này ở quy mô công nghiệp trong tương lai.

Một hạn chế quan trọng khác cần xem xét là báo cáo này tập trung đặc biệt vào việc sử dụng các nguồn protein thay thế làm nguyên liệu thức ăn chăn nuôi; tuy nhiên, có thể có những ý nghĩa quan trọng đối với khả năng tồn tại về mặt kinh tế và tính bền vững tổng thể của chúng mà có thể được khám phá thông qua cách tiếp cận toàn diện hơn, xem xét các tương tác cụ thể của chúng với chuỗi thức ăn của con người. Báo cáo cũng thừa nhận rằng mặc dù đã xác định được những đánh đổi quan trọng về tính bền vững trong việc triển khai các protein thay thế ở quy mô thương mại, nhưng cần có nghiên cứu sâu hơn để hiểu rõ hơn và đánh giá định lượng chúng theo các quy mô không gian và thời gian khác nhau.

Những khuyến nghị chính cho việc hoạch định chính sách

REA tổng hợp bốn hướng rộng rãi để hoạch định chính sách và nghiên cứu có thể cho phép đóng góp tiềm năng của thức ăn protein thay thế vào các mục tiêu phát triển bền vững toàn cầu (UNDESA, 2022). Việc tách sản xuất protein khỏi nhiên liệu hóa thạch phải là trọng tâm đầu tiên của các chính sách và hành động trong lĩnh vực thức ăn chăn nuôi. Việc thay thế dầu diesel và khí đốt bằng năng lượng từ các nguồn tài nguyên tái tạo có thể làm giảm lượng khí thải carbon của ngành chăn nuôi nói chung. Giá năng lượng tái tạo cần được điều tiết để đảm bảo sự ổn định của thị trường thức ăn chăn nuôi, đồng thời các nhà sản xuất và sản xuất thức ăn chăn nuôi phải tiếp cận được năng lượng từ nhiều nguồn tái tạo (năng lượng mặt trời, gió, địa nhiệt) để có nguồn cung dồi dào và không bị gián đoạn. Điều này có thể cho phép áp dụng bền vững và khai thác toàn bộ tiềm năng của thức ăn protein thay thế đòi hỏi lượng năng lượng lớn để chế biến thức ăn (bột côn trùng, chất thải thực phẩm, thức ăn cũ).

Phát triển các chiến lược kinh tế bền vững cho các protein thay thế ở cấp địa phương có thể giúp giảm bớt áp lực lớn về môi trường, đặc biệt là từ các khu vực gặp phải vấn đề phá rừng, suy thoái đất và nguồn đất sẵn có, đồng thời cũng là một phần lớn lượng khí thải carbon liên quan đến vận chuyển kiếm ăn trên quãng đường dài. Giá thức ăn chăn nuôi trong nước có thể tăng do chi phí lao động và đầu vào khác cao hơn, nhưng thị trường cần được điều tiết để đảm bảo rằng mức tăng đó không vượt quá lợi ích kinh tế từ thuế nhập khẩu và chi phí vận chuyển tránh được. Các giải pháp địa phương có thể cần được hỗ trợ tài chính để tránh người chăn nuôi chuyển sang sử dụng các giải pháp thay thế nhập khẩu ít tốn kém hơn. Trong khi sự tăng trưởng kinh tế của thị trường thức ăn

chăn nuôi địa phương ở miền Bắc có thể dẫn đến sự phát triển kinh tế xã hội tổng thể của các cộng đồng nông thôn, có thể có tác động ngược lại, làm suy thoái các khu vực ở miền Nam sẽ mất sản lượng (Cerrado của Brazil) chính sách cần xem xét.

Hỗ trợ các giải pháp thức ăn chăn nuôi tuần hoàn như protein từ chất thải thực phẩm, thực phẩm cũ, phụ phẩm động vật và phụ phẩm công nghiệp, có thể giúp giảm tác động liên quan đến đất đai, chi phí kinh tế trong sản xuất cây trồng và giải quyết lãng phí thực phẩm. Điều này đòi hỏi phải giải quyết những trở ngại chính về khả năng chấp nhận của khách hàng và nhà sản xuất thông qua sự tham gia hiệu quả hơn của các bên liên quan, hiểu rõ mối quan tâm của họ và làm rõ những thông tin sai lệch và thành kiến có liên quan. Giáo dục và hỗ trợ lao động tại trang trại, người chăn nuôi và người tiêu dùng về các vấn đề liên quan đến thức ăn chăn nuôi và an ninh lương thực có thể phát sinh từ việc áp dụng các giải pháp thay thế tuần hoàn có thể tạo điều kiện thuận lợi cho việc hấp thu các nguồn protein thay thế bền vững này.

Tăng cường hơn nữa hệ thống quản lý thực phẩm và thức ăn chăn nuôi bằng nghiên cứu về các phương pháp giám sát và phát hiện sớm hơn đối với các rủi ro về thức ăn và an ninh lương thực. Điều này là bắt buộc để cho phép áp dụng an toàn các lựa chọn thay thế như protein tế bào và côn trùng được nuôi trên chất thải, chất thải thực phẩm và thực phẩm cũ làm nguồn protein và protein động vật đã qua chế biến. Các mối đe dọa an ninh lương thực và thức ăn chăn nuôi mới nổi, như tác động của biến đổi khí hậu và điều kiện bảo quản/vận chuyển đối với sự nở hoa của chất gây ô nhiễm sinh học cần được xem xét xuyên suốt.

Những khuyến nghị này không loại trừ lẫn nhau và đề xuất lộ trình cũng như chương trình nghiên cứu hướng tới sản xuất thức ăn chăn nuôi bền vững hơn và đạt được một số mục tiêu phát triển bền vững toàn cầu. Cần có hành động ngay lập tức trong những năm tới nhằm định hình lại thị trường thức ăn chăn nuôi toàn cầu nhằm tăng cường khả năng phục hồi trước những bất ổn về kinh tế vĩ mô và địa chính trị (chiến tranh ở Ukraine, khủng hoảng năng lượng, các hạn chế của Covid-19). Cần nghiên cứu thêm về các tương tác tiềm năng giữa các giải pháp thức ăn bền vững và sự đánh đổi trong và giữa các trụ cột bền vững để xác định tác động đến các bên liên quan trên quy mô không gian và thời gian. Cần áp dụng các chính sách dự đoán trước để bù đắp những tổn thất thông qua những đánh đổi như vậy và mở rộng tương lai của ngành chăn nuôi ngoài khoảng thời gian được đề xuất bởi chương trình nghị sự bền vững hiện tại (tức là năm 2030 như trong SDG của Liên hợp quốc). Nghiên cứu mới nên áp dụng nhiều phương pháp tiếp cận xuyên ngành và đồng thiết kế hơn để lập bản đồ sức mạnh và tiềm năng của các bên liên quan nhằm tạo ra các giải pháp bền vững cho ngành thức ăn chăn nuôi và hiểu rõ hơn về sự phức tạp của những tác động kinh tế xã hội ít được hiểu rõ hơn. Ngoài ra, nghiên cứu trong tương lai nên điều tra xem khả năng đáp ứng của đất đai để sản xuất bất kỳ nguồn protein thay thế nào, bao gồm cả những nguồn được thảo luận ở đây, thay đổi như thế nào theo các kịch bản nhu cầu khác nhau (Shah và Wu, 2019).

KẾT LUẬN

Sự cạnh tranh giữa thức ăn và thực phẩm về tài nguyên môi trường và kinh tế làm tăng mối lo ngại về việc sản xuất và cung cấp protein cho ngành chăn nuôi toàn cầu. Rủi ro đối với an ninh lương thực và thời hạn phát triển bền vững toàn cầu đang đến gần, đồng nghĩa với việc khám phá tiềm năng của nguồn thức ăn protein thay thế là điều bắt buộc.

Bốn nguồn protein thay thế tiềm năng cho thức ăn chăn nuôi được xác định và đánh giá

là: (1) Cây trồng protein biến đổi gen; (2) Nông nghiệp tế bào; (3) Thực phẩm cũ, thực phẩm thừa và các sản phẩm phụ của công nghiệp; (4) Phụ phẩm động vật và côn trùng.

Tuy nhiên, do việc sử dụng thức ăn thay thế trong chăn nuôi vẫn còn ở giai đoạn sơ khai nên điều quan trọng là các rủi ro an toàn thực phẩm trực tiếp hoặc gián tiếp tiềm ẩn phải được đánh giá trước khi triển khai ở quy mô thương mại. Đánh giá này đưa ra một lăng kính tập trung vào các cơ hội và mối đe dọa tiềm ẩn của các giải pháp thay thế đó đối với sự bền vững và an toàn thực phẩm của ngành chăn nuôi toàn cầu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Adam, M. G., Tran, P. T., Bolan, N., and Balasubramanian, R. 2021. Biomass burning-derived airborne particulate matter in Southeast Asia: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124760. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124760>
- Advisory Committee on Animal Feedstuffs (ACAF). 2009. Potential for carry-over of allergens from animal feed into derived animal products. Available at: https://acaf.food.gov.uk/sites/default/files/mnt/drupal_data/sources/files/multimedia/pdfs/committee/acaf0904.p Accessed on 20 March 2022
- Andow, D. A. 2003. UK farm-scale evaluations of transgenic herbicide-tolerant crops. *Nature Biotechnology*, 21(12), 1453-1454.
- Andretta, I., Hickmann, F. M., Remus, A., Franceschi, C. H., Mariani, A. B., Orso, C., Kipper, M., Létourneau-Montminy, M. P., and Pomar, C. 2021. Environmental Impacts of Pig and Poultry Production: Insights From a Systematic Review. *Frontiers in Veterinary Science*, 1232. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.750733>
- Alshannaq, A. F., Gibbons, J. G., Lee, M. K., Han, K. H., Hong, S. B., and Yu, J. H. 2018. Controlling aflatoxin contamination and propagation of *Aspergillus flavus* by a soy-fermenting *Aspergillus oryzae* strain. *Scientific Reports*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35246-1>
- Alava, J. J., Cheung, W. W., Ross, P. S., and Sumaila, U. R. 2017. Climate change–contaminant interactions in marine food webs: Toward a conceptual framework. *Global Change Biology*, 23(10), 3984-4001. <https://doi.org/10.1111/gcb.13667>
- Alig, R. J., and Ahearn, M. C. 2017. Effects of policy and technological change on land use. In *Economics of Rural Land-use Change* (pp. 43-56). Routledge. eBook ISBN: 9781315257020
- Altmann, B. A., Anders, S., Risius, A., and Mörlein, D. 2022. Information effects on consumer preferences for alternative animal feedstuffs. *Food Policy*, 106, 102192. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102192>
- Arru, B., Furesi, R., Gasco, L., Madau, F. A., and Pulina, P. 2019. The introduction of insect meal into fish diet: The first economic analysis on European sea bass farming. *Sustainability*, 11(6), 1697. <https://doi.org/10.3390/su11061697>
- Atzori, G., Nissim, W. G., Caparrotta, S., Santantoni, F., and Masi, E. 2019. Seawater and water footprint in different cropping systems: a chicory (*Cichorium intybus* L.) case study. *Agricultural Water Management*, 211, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.040>
- Bartelme, R. P., Oyserman, B. O., Blom, J. E., Sepulveda-Villet, O. J., and Newton, R. J. 2018. Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics.
- Bapat, S., Koranne, V., Shakelly, N., Huang, A., Sealy, M., Sutherland, J. W., Rajurkar, K. P., and Malshe, A. P. 2021. Cellular agriculture: An outlook on smart and resilient food agriculture manufacturing. *ASTM Smart and Sustainable Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1520/SSMS20210020>
- Becton, L., Davis, P., Sundberg, P., and Wilkinson, L. 2022. Feed safety collaborations: Experiences, progress and challenges. *Transboundary and Emerging Diseases*, 69(1), 182-188. <https://doi.org/10.1111/tbed.14297>
- Behm, K., Nappa, M., Aro, N., Welman, A., Ledgard, S., Suomalainen, M., and Hill, J. 2022. Comparison of carbon footprint and water scarcity footprint of milk protein produced by cellular agriculture and the dairy industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 1017- 1034. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02087-0>

- Bingemann, T. A., Santos, C. B., Russell, A. F., and Anagnostou, A. 2019. Lupin: An emerging food allergen in the United States. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 122(1), 8-10. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2018.09.467>
- Bhatt, S., Lee, J., Deutsch, J., Ayaz, H., Fulton, B., and Suri, R. 2018. From food waste to value-added surplus products (VASP): Consumer acceptance of a novel food product category. *Journal of Consumer Behaviour*, 17(1), 57-63. <https://doi.org/10.1002/cb.1689>
- Bosch, G., Van Zanten, H. H. E., Zamprognia, A., Veenenbos, M., Meijer, N. P., Van der Fels-Klerx, H. J., and Van Loon, J. J. A. 2019. Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: legislation, efficiency and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 222, 355- 363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.270>
- Borrello, M., Caracciolo, F., Lombardi, A., Pascucci, S., and Cembalo, L. 2017. Consumers' perspective on circular economy strategy for reducing food waste. *Sustainability*, 9(1), 141. <https://doi.org/10.3390/su9010141>
- Brick, C., Freeman, A. L., Wooding, S., Skylark, W. J., Marteau, T. M., and Spiegelhalter, D. J. 2018. Winners and losers: communicating the potential impacts of policies. *Palgrave Communications*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0121-9>
- Brookes, G., and Barfoot, P. 2020. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996–2018. Available at: <https://www.pgeconomics.co.uk/pdf/globalimpactfinalreportJuly2020.pdf>. Accessed on 15 December 2021
- Buzoianu, S. G., Walsh, M. C., Rea, M. C., Cassidy, J. P., Ryan, T. P., Ross, R. P., Gardiner, G. E., and Lawlor, P. G. 2013. Transgenerational effects of feeding genetically modified maize to nulliparous sows and offspring on offspring growth and health. *Journal of Animal Science*, 91(1), 318-330. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5360>
- Campbell, I., Macleod, A., Sahlmann, C., Neves, L., Funderud, J., Øverland, M., Hughes, A. D., and Stanley, M. 2019. The environmental risks associated with the development of seaweed farming in Europe-prioritizing key knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*, 6, 107. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00107>
- Castanheira, É. G., and Freire, F. 2013. Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems. *Journal of Cleaner Production*, 54, 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.026>
- Chang, W. W. 2018. Brexit and its economic consequences. *The world economy*, 41(9), 2349- 2373. <https://doi.org/10.1111/twec.12685>
- Chen, P., Zhu, G., Kim, H. J., Brown, P. B., and Huang, J. Y. 2020. Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122888>
- Chia, S. Y., Tanga, C. M., van Loon, J. J., and Dicke, M. 2019. Insects for sustainable animal feed: Inclusive business models involving smallholder farmers. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 41, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.09.003>
- Choi, H. S., Jansson, T., Matthews, A., and Mittenzwei, K. 2021. European agriculture after Brexit: does anyone benefit from the divorces. *Journal of Agricultural Economics*, 72(1), 3-24. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12396>
- Cifuentes-Torres, L., Mendoza-Espinosa, L. G., Correas-Reyes, G., and Daesslé, L. W. 2021. Hydroponics with wastewater: a review of trends and opportunities. *Water and Environment Journal*, 35(1), 166-180. <https://doi.org/10.1111/wej.12617>
- Conte, G., Fontanelli, M., Galli, F., Cotrozzi, L., Pagni, L., and Pellegrini, E. 2020. Mycotoxins in feed and food and the role of ozone in their detoxification and degradation: An update. *Toxins*, 12(8), 486. <https://doi.org/10.3390/toxins12080486>
- Cordeiro, M. R., Rotz, A., Kroebel, R., Beauchemin, K. A., Hunt, D., Bittman, S., Koenig, K. M., and McKenzie, D. B. 2019. Prospects of forage production in northern regions under climate and land-use changes: a case-study of a dairy farm in Newfoundland, Canada. *Agronomy*, 9(1), 31.

<https://doi.org/10.3390/agronomy9010031>

- Costa, M., Cardoso, C., Afonso, C., Bandarra, N. M., and Prates, J. A. 2021. Current knowledge and future perspectives of the use of seaweeds for livestock production and meat quality: a systematic review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 105(6), 1075-1102. <https://doi.org/10.1111/jpn.13509>
- Coudert, E., Baéza, E., and Berri, C. 2020. Use of algae in poultry production: A review. *World's Poultry Science Journal*, 76(4), 767-786. <https://doi.org/10.1080/00439339.2020.1830012>
- 'Commission Regulation (EU) 2021/1372. (17 August 2021). Amending Annex IV to Regulation (EC) No 999/2001 of the European Parliament and of the Council as regards the prohibition to feed non-ruminant farmed animals, other than fur animals, with protein derived from animal.' *Official Journal L295(64)*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/oj/direct-access.html>. Accessed on 15 December 2021
- Diaz-Llano, G., and Smith, T. K. 2006. Effects of feeding grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins with and without a polymeric glucomannan mycotoxin adsorbent on reproductive performance and serum chemistry of pregnant gilts. *Journal of Animal Science*, 84(9), 2361-2366. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-213>
- DiGiacomo, K., and Leury, B. J. 2019. Insect meal: a future source of protein feed for pigs?. *Animal*, 13(12), 3022-3030. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001873>
- Dinar, A., Tieu, A., and Huynh, H. 2019. Water scarcity impacts on global food production. *Global Food Security*, 23, 212-226. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.07.007>
- Doi, H., and Mulia, R. N. 2021. Future Land Use for Insect Meat Production Among Countries: A Global Classification. *Frontiers in Nutrition*, 8, 661056. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.661056>
- Dona, A., and Arvanitoyannis, I. S. 2009. Health risks of genetically modified foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(2), 164-175. <https://doi.org/10.1080/10408390701855993>
- Dou, Z., Toth, J. D., and Westendorf, M. L. 2018. Food waste for livestock feeding: Feasibility, safety, and sustainability implications. *Global food security*, 17, 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.12.003>
- de Miranda, J. R., Granberg, F., Onorati, P., Jansson, A., and Berggren, Å. 2021. Virus prospecting in crickets—Discovery and strain divergence of a novel iflavivirus in wild and cultivated *Acheta domesticus*. *Viruses*, 13(3), 364. <https://doi.org/10.3390/v13030364>
- de Souza, N. R. D., Junqueira, T. L., and Cavalett, O. 2021. Opportunities and challenges for bioenergy-livestock integrated systems in Brazil. *Industrial Crops and Products*, 173, 114091. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114091>
- Duarte, C. M., Bruhn, A., and Krause-Jensen, D. 2021. A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets. *Nature Sustainability*, 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00773->
- Dunn, E. S., Vicini, J. L., Glenn, K. C., Fleischer, D. M., and Greenhawt, M. J. 2017. The allergenicity of genetically modified foods from genetically engineered crops: A narrative and systematic review. *Annals of Allergy and Asthma Immunology*, 119(3), 2124-222.e3.
- Dubois, A. E., Pagliarani, G., Brouwer, R. M., Kollen, B. J., Dragsted, L. O., Eriksen, F. D., Callesen, O., Gilissen, L. J. W. J., Krens, F. A., Visser, R. G. F., Smulders, M. J. M., Vlieg-Boerstra, B. J., Flokstra-de Blok, B. J., and Van De Weg, W. E. 2015. First successful reduction of clinical allergenicity of food by genetic modification: Mal d 1?silenced apples cause fewer allergy symptoms than the wild?type cultivar. *Allergy*, 70(11), 1406-1412. <https://doi.org/10.1111/all.12684>
- Edwards 3rd, H. M., Douglas, M. W., Parsons, C. M., and Baker, D. H. 2000. Protein and energy evaluation of soybean meals processed from genetically modified high-protein soybeans. *Poultry Science*, 79(4), 525-527. <https://doi.org/10.1093/ps/79.4.525>
- EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), Naegeli, H., Bresson, J. L., Dalmay, T., Dewhurst, I. C., Epstein, M. M., Firbank, L. G., Guerche, P., Hejatko, J., Moreno, F. J., Mullins, E., Nogué, F., Rostoks, N., Serrano, J. J. S., Savoini, G., Veromann, E., and Veronesi, F. 2020. Assessment of genetically modified soybean SYHT 0H2 for food and feed uses, import and processing, under Regulation (EC) No 1829/2003 (application EFSA?GMO?DE?2012?111). *E FSA Journal*, 18(1), e05946.

- Eibl, R., Senn, Y., Gubser, G., Jossen, V., van den Bos, C., and Eibl, D. 2021. Cellular agriculture: Opportunities and challenges. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 51-73. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-063020-123940>
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ). 2011. Scientific Opinion on the revision of the quantitative risk assessment (QRA) of the BSE risk posed by processed animal proteins (PAPs). *EFSA Journal*, 9(1), 1947. Available at <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2011.1947>
- Elahi, E., Weijun, C., Zhang, H., and Abid, M. 2019. Use of artificial neural networks to rescue agrochemical-based health hazards: A resource optimisation method for cleaner crop production. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117900>
- Elahi, U., Xu, C., Wang, J., Lin, J., Wu, S., Zhang, H., and Qi, G. 2022. Insect meal as a feed ingredient for poultry. *Animal Bioscience*, 35(2), 332-346. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0435>
- Emblemsvåg, J., Kvalsheim, N. P., Halfdanarson, J., Koesling, M., Nystrand, B. T., Sunde, J., and Rebours, C. 2020. Strategic considerations for establishing a large-scale seaweed industry based on fish feed application: a Norwegian case study. *Journal of Applied Phycology*, 32(6), 4159-4169. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02234-w>
- Eriksson, M., Ghosh, R., Hansson, E., Basnet, S., and Lagerkvist, C. J. 2018. Environmental consequences of introducing genetically modified soy feed in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 176, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.113>
- European Commission. 2015a. Closing the Loop-An EU Action Plan for the Circular Economy. Brussels: European Commission. Available at <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
- FAO. 2013. Edible insects: Future prospects for food and feed security. Available at: <https://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>. Accessed on 10 February 2022
- Flachowsky, G., Chesson, A., and Aulrich, K. 2005. Animal nutrition with feeds from genetically modified plants. *Archives of Animal Nutrition*, 59(1), 1-40. <https://doi.org/10.1080/17450390512331342368>
- Flach, R., Abrahão, G., Bryant, B., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Ramos, F. M., Valin, H., Obersteiner, M., and Cohn, A. S. 2021. Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming. *World Development*, 146, 105582. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105582>
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2016a. Environmental performance of animal feeds supply chains: Guidelines for assessment. *Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership*. FAO, Rome, Italy
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2016b. Handbook on agricultural cost of production statistics: Guidelines for data collection, compilation and dissemination. FAO, Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization Statistics Division (FAOSTAT). 2021. Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>. Accessed on 1 March 2022.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2013. Food wastage footprint: Impacts on natural resources: Summary report. FAO. Available at <https://www.fao.org/3/i3347e/i3347e.pdf>
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2017. Animal Production and Health Division and the Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership (LEAP). Available at: <http://www.fao.org/partnerships/leap/en/>. Accessed on 15 December 2021
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2018. World Livestock: Transforming the livestock sector through the Sustainable Development Goals. Rome. 222 pp. <https://doi.org/10.4060/ca1201en>
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2019. Global Food Outlook November 2019 / FAO forecast. Available at: <http://www.fao.org/news/story/en/item/1247138/icode/>. Accessed on 15 December 2021.
- Frontiers in Microbiology*, 9, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008>
- Gao, G., Gao, L., Jiang, M., Jian, A., and He, L. 2021. The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication. *Environmental Research Letters*, 17(1), 014018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3fd9>

- Gasco, L., Biasato, I., Dabbou, S., Schiavone, A., and Gai, F. 2019. Animals fed insect-based diets: State-of-the-art on digestibility, performance and product quality. *Animals*, 9(4), 170. <https://doi.org/10.3390/ani9040170>
- Gasteratos, K. 2019. 90 Reasons to consider cellular agriculture. Available at <https://dash.harvard.edu/handle/1/38573490>
- Gasco, L., Finke, M., and Van Huis, A. 2018. Can diets containing insects promote animal health?. *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(1), 1-4. <https://doi.org/10.3920/JIFF2018.x001>
- German Federal Institute for Risk Assessment (BfR), National Reference Laboratory for Animal protein in Feed, NRLSAP, Garino, C., Zagon, J., and Braeuning, A. 2019. Insects in food and feed—allergenicity risk assessment and analytical detection. *EFSA Journal*, 17, e170907. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.e170907>
- Giraldo, P. A., Shinozuka, H., Spangenberg, G. C., Cogan, N. O., and Smith, K. F. 2019. Safety assessment of genetically modified feed: is there any difference from food?. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01592>
- Girma, F., and Gebremariam, B. 2018. Review on hydroponic feed value to livestock production. *Journal of Scientific and Innovative Research*, 7(4), 106-109.
- Glencross, B. D., Huyben, D., and Schrama, J. W. 2020. The application of single-cell ingredients in aquaculture feeds—a review. *Fishes*, 5(3), 22. <https://doi.org/10.3390/fishes5030022>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., and Thorarinsdottir, R. 2015. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Gocht, A., Consmüller, N., Thom, F., and Grethe, H. 2021. Economic and environmental consequences of the ECJ genome editing judgment in agriculture. *Agronomy*, 11(6), 1212. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061212>
- Grant, W. 2016. The challenges facing UK farmers from Brexit. *EuroChoices*, 15(2), 11-16. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12127>
- Green, A., Nemecek, T., Chaudhary, A., and Mathys, A. 2020. Assessing nutritional, health, and environmental sustainability dimensions of agri-food production. *Global Food Security*, 26, 100406. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100406>
- Greenfeld, A., Becker, N., McIlwain, J., Fotedar, R., and Bornman, J. F. 2019. Economically viable aquaponics? Identifying the gap between potential and current uncertainties. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 848-862. <https://doi.org/10.1111/raq.12269>
- Gultekin, F., Oner, M. E., Savas, H. B., and Dogan, B. 2020. Food additives and microbiota. *Northern clinics of Istanbul*, 7(2), 192. <https://doi.org/10.14744/nci.2019.92499>
- Gurgel, A. C., Reilly, J., and Blanc, E. 2021. Challenges in simulating economic effects of climate change on global agricultural markets. *Climatic Change*, 166 (3), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03119-8>
- Hardy, R. W., Patro, B., PujolsBaxley, C., Marx, C. J., and Feinberg, L. 2018. Partial replacement of soybean meal with *Methylobacterium extorquens* single-cell protein in feeds for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *Aquaculture Research*, 49(6), 2218-2224. <https://doi.org/10.1111/are.13678>
- Helliwell, R., and Burton, R. J. 2021. The promised land? Exploring the future visions and narrative silences of cellular agriculture in news and industry media. *Journal of Rural Studies*, 84, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.04.002>
- Henry, R. 2020. Innovations in agriculture and food supply in response to the COVID-19 pandemic. *Molecular Plant*, 13(8), 1095. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.07.011>
- Hoang, N. T., and Kanemoto, K. 2021. Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests. *Nature Ecology and Evolution*, 5(6), 845-853. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01417-z>
- Hoffman, E., Cavigelli, M. A., Camargo, G., Ryan, M., Ackroyd, V. J., Richard, T. L., and Mirsky, S. 2018.

- Energy use and greenhouse gas emissions in organic and conventional grain crop production: accounting for nutrient inflows. *Agricultural Systems*, 162, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.021>
- Huygens, D., Orveillon, G., Lugato, E., Tavazzi, S., Comero, S., Jones, A., Gawlik, B., and Saveyn, H. 2020. Technical proposals for the safe use of processed manure above the threshold established for Nitrate Vulnerable Zones by the Nitrates Directive (91/676/EEC). Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Institute Du Porc (IFIP). 2022. Crise Russo-Ukrainienne : impacts sur les marchés des matières premières pour les filières animales. Available at: <https://ifip.asso.fr/crise-russo-ukrainienne-impacts-sur-les-marches-des-matieres-premieres-pour-les-filieres-animales/>. Accessed on 1 March 2022.
- Jagtap, S., Garcia-Garcia, G., Duong, L., Swainson, M., and Martindale, W. 2021. Codesign of food system and circular economy approaches for the development of livestock feeds from insect larvae. *Foods*, 10(8), 1701. <https://doi.org/10.3390/foods10081701>
- Jansson, A., and Berggren, Å. 2015. Insects as food-something for the future? A report from Future Agriculture. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) Available at https://pub.epsilon.slu.se/12935/7/jansson_a_berggren_a_151230.pdf
- Jayathilake, N., Aheeyar, M., and Drechsel, P. 2022. Food Waste to Livestock Feed: Prospects and Challenges for Swine Farming in Peri-urban Sri Lanka. *Circular Economy and Sustainability*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00168-8>
- Johnson, M. G. 2018. The role of soil management in sequestering soil carbon. In *Soil Management and Greenhouse Effect* (pp. 351-364). CRC Press.
- Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., and Tracy, B. P. 2020. Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.12.026>
- Journeault, M., Perron, A., and Vallières, L. 2021. The collaborative roles of stakeholders in supporting the adoption of sustainability in SMEs. *Journal of Environmental Management*, 287, 112349. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112349>
- Kanter, D. R., Musumba, M., Wood, S. L., Palm, C., Antle, J., Balvanera, P., Dale, V. H., Havlik, P., Kline, K. L., Scholes, R. J., Thornton, P., Titttonell, P., and Andelman, S. 2018. Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. *Agricultural Systems*, 163, 73-<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.010>
- Kastens, J. H., Brown, J. C., Coutinho, A. C., Bishop, C. R., and Esquerdo, J. C. D. 2017. Soy moratorium impacts on soybean and deforestation dynamics in Mato Grosso, Brazil. *PloS one*, 12 (4), e0176168. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176168>
- Kebede, H., Liu, X., Jin, J., and Xing, F. 2020. Current status of major mycotoxins contamination in food and feed in Africa. *Food Control*, 110, 106975. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106975>
- Khaemba, C. N., Kidoido, M. M., Owuor, G., and Tanga, C. M. 2022. Consumers' perception towards eggs from laying hens fed commercial black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal- based feeds. *Poultry Science*, 101(3), 101645. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101645>
- Kim, S. W., Less, J. F., Wang, L., Yan, T., Kiron, V., Kaushik, S. J., and Lei, X. G. 2019. Meeting global feed protein demand: challenge, opportunity, and strategy. *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 221-243. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-030117-014838>
- Klapwijk, C. J., Van Wijk, M. T., Rosenstock, T. S., van Asten, P. J., Thornton, P. K., and Giller, K.E. 2014. Analysis of trade-offs in agricultural systems: current status and way forward. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.012>
- Koesling, M., Kvadsheim, N. P., Halfdanarson, J., Emblemståg, J., and Rebours, C. 2021. Environmental impacts of protein-production from farmed seaweed: comparison of possible scenarios in Norway. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127301>
- Korwin-Kossakowska, A., Gralak, B., Faliszewska, G., and Karpiniak, E. 2020. The influence of GMO feed on ecosystem stability of the gastrointestinal tract in different species-a review. *Animal Science Papers and*

Reports, 38(3).

- Krasucka, P., Bogusz, A., Baranowska-Wójcik, E., Czech, B., Szwajgier, D., Rek, M., Ok, Y. S., and Oleszczuk, P. 2022. Digestion of plastics using in vitro human gastrointestinal tract and their potential to adsorb emerging organic pollutants. *Science of The Total Environment*, 843, 157108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157108>
- Kuhad, R. C., Singh, A., Tripathi, K. K., Saxena, R. K., and Eriksson, K. E. L. 1997. Microorganisms as an alternative source of protein. *Nutrition reviews*, 55(3), 65-75. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1997.tb01599.x>
- Kumar, K., Gambhir, G., Dass, A., Tripathi, A. K., Singh, A., Jha, A. K., Yadava, P., Choudhary, M., and Rakshit, S. 2020. Genetically modified crops: current status and future prospects. *Planta*, 251(91). <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03372-8>
- Lasekan, A., Bakar, F. A., and Hashim, D. 2013. Potential of chicken by-products as sources of useful biological resources. *Waste Management*, 33(3), 552-565. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.001>
- Lathuilliere, M. J., Miranda, E. J., Bulle, C., Couto, E. G., and Johnson, M. S. 2017. Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 149, 680-689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.120>
- Lecrenier, M. C., Veys, P., Fumiesre, O., Berben, G., Saegerman, C., and Baeten, V. 2020. Official feed control linked to the detection of animal byproducts: Past, present, and future. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(31), 8093-8103. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02718>
- Li, Y., Zhang, G. N., Xu, H. J., Zhou, S., Dou, X. J., Lin, C., Xing-Yi, Z., Hong-Bo, Z., and Zhang, Y.G. 2019. Effects of replacing alfalfa hay with *Moringa oleifera* leaves and peduncles on intake, digestibility, and rumen fermentation in dairy cows. *Livestock Science*, 220, 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.005>
- Lima, M., da Silva Junior, C. A., Rausch, L., Gibbs, H. K., and Johann, J. A. 2019. Demystifying sustainable soy in Brazil. *Land Use Policy*, 82, 349-352. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.016>
- Lioutas, E. D., and Charatsari, C. 2021. Enhancing the ability of agriculture to cope with major crises or disasters: What the experience of COVID-19 teaches us. *Agricultural Systems*, 187, 103023. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103023>
- Lo, B., Kasapis, S., and Farahnaky, A. 2021. Lupin protein: Isolation and techno-functional properties, a review. *Food Hydrocolloids*, 112, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106318>
- Luciano, A., Tretola, M., Ottoboni, M., Baldi, A., Cattaneo, D., and Pinotti, L. 2020. Potentials and challenges of former food products (food leftover) as alternative feed ingredients. *Animals*, 10(1), 125. <https://doi.org/10.3390/ani10010125>
- Mainardes, G. A., and DeVries, T. J. 2016. Effect of social feeding environment on the feeding behaviour of dairy cows and their willingness to consume a novel feed. *Applied Animal Behaviour Science*, 185, 23-29. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2016.10.002>
- Magnoli, A. P., Poloni, V. L., and Cavaglieri, L. 2019. Impact of mycotoxin contamination in the animal feed industry. *Current Opinion in Food Science*, 29, 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.08.009>
- Mahato, D. K., Devi, S., Pandhi, S., Sharma, B., Maurya, K. K., Mishra, S., Dhawan, K., Selvakumar, R., Kamle, M., Mishra, A. K., and Kumar, P. 2021. Occurrence, impact on agriculture, human health, and management strategies of zearalenone in food and feed: A review. *Toxins*, 13(2), 92. <https://doi.org/10.3390/toxins13020092>
- Makkar, H. P., Tran, G., Heuzé, V., and Ankers, P. 2014. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2014.07.008>
- Makkar, H. P. S. 2018. Feed demand landscape and implications of food-not feed strategy for food security and climate change. *Animal*, 12(8), 1744-1754. <https://doi.org/10.1017/S175173111700324X>
- Mattick, C. S. 2018. Cellular agriculture: the coming revolution in food production. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 74(1), 32-35. <https://doi.org/10.1080/00963402.2017.1413059>
- Mekonnen, M. M., and Hoekstra, A. Y. 2020. Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in*

- Water Resources, 143, 103679. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103679>
- Mekonnen, M. M., and Hoekstra, A. Y. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Madau, F. A., Arru, B., Furesi, R., and Pulina, P. 2020. Insect farming for feed and food production from a circular business model perspective. *Sustainability*, 12(13), 5418. <https://doi.org/10.3390/su12135418>
- Manceron, S., Ben Ari, T., and Dumas, P. 2014. Feeding proteins to livestock: Global land use and food vs. feed competition. *Oilseeds and fats, Crops and Lipids*, 21(4), D408. <https://doi.org/10.1051/ocl/2014020>
- Malone, T. C., and Newton, A. 2020. The globalization of cultural eutrophication in the coastal ocean: causes and consequences. *Frontiers in Marine Science*, 7, 670. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00670>
- Marinoudi, V., Sørensen, C. G., Pearson, S., and Bochtis, D. 2019. Robotics and labour in agriculture. A context consideration. *Biosystems Engineering*, 184, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.013>
- Mens, A., Cone, J., van den Borne, B., and Bosch, G. 2021. Capacities of animals to make agri- food systems more circular (No. 1323). Wageningen Livestock Research. Public Report 1323. Available at <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/548324>
- Meyer, A. M., Meijer, N., Hoek-Van den Hil, E. F., and Van der Fels-Klerx, H. J. 2021. Chemical food safety hazards of insects reared for food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7 (5), 823-831. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0085>
- Montgomery, H., Haughey, S. A., and Elliott, C. T. 2020. Recent food safety and fraud issues within the dairy supply chain (2015–2019). *Global Food Security*, 26, 100447. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100447>
- Morais, T., Inácio, A., Coutinho, T., Ministro, M., Cotas, J., Pereira, L., and Bahcevandziev, K. 2020. Seaweed potential in the animal feed: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 559. <https://doi.org/10.3390/jmse8080559>
- Moritz, J., Tuomisto, H. L., and Rynänen, T. 2022. The transformative innovation potential of cellular agriculture: Political and policy stakeholders' perceptions of cultured meat in Germany. *Journal of Rural Studies*, 89, 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.11.018>
- Muscat, A., de Olde, E. M., de Boer, I. J., and Ripoll-Bosch, R. 2020. The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. *Global Food Security*, 25, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100330>
- Netherwood, T., Martín-Orúe, S. M., O'Donnell, A. G., Gockling, S., Graham, J., Mathers, J. C., and Gilbert, H. J. 2004. Assessing the survival of transgenic plant DNA in the human gastrointestinal tract. *Nature Biotechnology*, 22(2), 204-209. <https://doi.org/10.1038/nbt934>
- Nyyssölä, A., Suhonen, A., Ritala, A., and Oksman-Caldentey, K. M. 2022. The role of single cell protein in cellular agriculture. *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102686. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102686>
- Nyström, M., Jouffray, J. B., Norström, A. V., Crona, B., Søgaard Jørgensen, P., Carpenter, S. R., Bodin, Ö., Galaz, V., and Folke, C. 2019. Anatomy and resilience of the global production ecosystem. *Nature*, 575(7781), 98-108. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1712-3>
- Odegard, I., and Sinke, P. 2021. LCA of cultivated meat. Future projections for different scenarios. CE Delft, February, 22-55. Available at <https://cedelft.eu/publications/tea-of-cultivated-meat/>
- O'Malley, J., and Searle, S. 2021. "The Impact of the US Renewable Fuel Standard on Food and Feed Prices". Technical report, International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/RFS-and-feed-prices-jan2021.pdf>
- Ojha, S., Bußler, S., Psarianos, M., Rossi, G., and Schlüter, O. K. 2021. Edible insect processing pathways and implementation of emerging technologies. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 877-900. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0121>
- Oliveira, A. L. R. D., Filassi, M., Lopes, B. F. R., and Marsola, K. B. 2020. Logistical transportation routes optimization for Brazilian soybean: an application of the origin-destination matrix. *Ciência Rural*, 51.

<http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190786>

- Olsson, L., Barbosa, H., Bhadwal, S., Cowie, A., Delusca, K., Flores-Renteria, D., Hermans, K., Jobbagy, E., Kurz, W., Li, D., Sonwa, D. J., Stringer, L. 2019. Land Degradation. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (Shukla, P. R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., and Malley, J. (eds.))
- Onwezen, M. C., Van den Puttelaar, J., Verain, M. C. D., and Veldkamp, T. 2019. Consumer acceptance of insects as food and feed: The relevance of affective factors. *Food Quality and Preference*, 77, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.04.011>
- Oonincx, D. G. A. B., and Finke, M. D. 2021. Nutritional value of insects and ways to manipulate their composition. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 639-659. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0050>
- Øverland, M., Mydland, L. T., and Skrede, A. 2019. Marine macroalgae as sources of protein and bioactive compounds in feed for monogastric animals. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(1), 13-24. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9143>
- Pacheco, F. A. L., Fernandes, L. F. S., Junior, R. F. V., Valera, C. A., and Pissarra, T. C. T. 2018. Land degradation: Multiple environmental consequences and routes to neutrality. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 5, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>
- Paiva, P. F. P. R., de Lourdes Pinheiro Ruivo, M., da Silva Júnior, O. M., de Nazaré Martins Maciel, M., Braga, T. G. M., de Andrade, M. M. N., dos Santos Junior, P. C., da Rocha, E. S., de Freitas, T. P. M., da Silva Leite, T. V., Gama, L. H. O. M., de Sousa Santos, L., da Silva, M. G., Silva, E. R. R., and Ferreira, B. M. 2020. Deforestation in protect areas in the Amazon: a threat to biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 29(1), 19-38. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01867-9>
- Pignolet, O., Jubeau, S., Vaca-Garcia, C., and Michaud, P. 2013. Highly valuable microalgae: biochemical and topological aspects. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 40(8), 781-796. <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1281-7>
- Pinotti, L., Luciano, A., Ottoboni, M., Manoni, M., Ferrari, L., Marchis, D., and Tretola, M. 2021. Recycling food leftovers in feed as opportunity to increase the sustainability of livestock production. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126290>
- Popescu, M. F. 2019. Is Circular Economy Going to Reduce Waste and Create Jobs in the European Union?. *Economic and Social Development: Book of Proceedings*, 398-406.
- Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., and Krömer, J. O. 2017. Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology*, 7, 2106. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Jijakli, M. H., and Kotzen, B. 2018. Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International*, 26(3), 813-842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Patterson, J., Schulz, K., Vervoort, J., Van Der Hel, S., Widerberg, O., Adler, C., Hurlbert, M., Anderton, K., Sethi, M., and Barau, A. 2017. Exploring the governance and politics of transformations towards sustainability. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 24, 1- 16 <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.09.001>
- Paul, M. J., Nuccio, M. L., and Basu, S. S. 2018. Are GM crops for yield and resilience possible?. *Trends in Plant Science*, 23(1), 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.007>
- Pinotti, L., and Ottoboni, M. 2021. Substrate as insect feed for bio-mass production. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 585-596. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0110>
- Pinotti, L., Giromini, C., Ottoboni, M., Tretola, M., and Marchis, D. 2019. Insects and former foodstuffs for upgrading food waste biomasses/streams to feed ingredients for farm animals. *Animal*, 13(7), 1365-1375. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003622>
- Punzi, M. T. 2019. The impact of energy price uncertainty on macroeconomic variables. *Energy Policy*, 129,

- 1306-1319. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.015>
- Popp, J., Harangi-Rákos, M., Gabnai, Z., Balogh, P., Antal, G., and Bai, A. 2016. Biofuels and their co-products as livestock feed: global economic and environmental implications. *Molecules*, 21(3), 285. <https://doi.org/10.3390/molecules21030285>
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., and Rocha-Santos, T. 2020. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Rajeh, C., Saoud, I. P., Kharroubi, S., Naalbandian, S., and Abiad, M. G. 2021. Food loss and food waste recovery as animal feed: a systematic review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01102-6>
- Ráduly, Z., Price, R. G., Dockrell, M. E., Csernoch, L., and Pócsi, I. 2021. Urinary Biomarkers of Mycotoxin Induced Nephrotoxicity—Current Status and Expected Future Trends. *Toxins*, 13(12), 848. <https://doi.org/10.3390/toxins13120848>
- Relyea, R. A. 2005. The impact of insecticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities. *Ecological applications*, 15(2), 618–627. <https://doi.org/10.1890/03-5342>
- Rosenzweig, C. E., Antle, J., and Elliott, J. 2015. Assessing impacts of climate change on food security worldwide. *Eos*, 97. <https://doi.org/10.1029/2016EO047387>
- Rinninella, E., Cintoni, M., Raoul, P., Gasbarrini, A., and Mele, M. C. 2020. Food additives, gut microbiota, and irritable Bowel syndrome: A hidden track. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 8816. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238816>
- Ribeiro, J. C., Sousa-Pinto, B., Fonseca, J., Fonseca, S. C., and Cunha, L. M. 2021. Edible insects and food safety: allergy. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 833-847. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0065>
- Ricci, A., Allende, A., Bolton, D., Chemaly, M., Davies, R., Escámez, P. S. F., Gironés, R., Herman, L., Koutsoumanis, K., Lindqvist, R., Nørrung, B., Robertson, L., Ru, G., Sanaa, M., Skandamis, P., Snary, E., Speybroeck, N., Ter Kuile, B., Threlfall, J., Wahlström, H., Adkin, A., Greiner, M., Marchis, D., Prado, M., Da Silva Felicio, T., Ortiz-Pelaez, A., and Simmons, M. (2018). Updated quantitative risk assessment (QRA) of the BSE risk posed by processed animal protein (PAP). *EFSA Journal*, 16(7), e05314. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5314>
- Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., and Wiebe, M. G. 2017. Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2009. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009>
- Rukundo, E., Liu, S., Dong, Y., Rutebuka, E., Asamoah, E. F., Xu, J., and Wu, X. 2018. Spatio-temporal dynamics of critical ecosystem services in response to agricultural expansion in Rwanda, East Africa. *Ecological Indicators*, 89, 696-705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.032>
- Rzymiski, P., Kulus, M., Jankowski, M., Dompe, C., Bryl, R., Petite, J. N., Kempisty, B., and Mozdziak, P. 2021. COVID-19 pandemic is a call to search for alternative protein sources as food and feed: A review of possibilities. *Nutrients*, 13(1), 150. <https://doi.org/10.3390/nu13010150>
- Saavoss, M. 2019. How might cellular agriculture impact the livestock, dairy, and poultry industries?. *Choices*, 34(1), 1-6. <https://www.jstor.org/stable/26758666>
- Salami, S. A., Luciano, G., O'Grady, M. N., Biondi, L., Newbold, C. J., Kerry, J. P., and Priolo, A. 2019. Sustainability of feeding plant by-products: A review of the implications for ruminant meat production. *Animal Feed Science and Technology*, 251, 37-55. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.02.006>
- Salemdeeb, R., Zu Ermgassen, E. K., Kim, M. H., Balmford, A., and Al-Tabbaa, A. 2017. Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: a comparative analysis of food waste management options. *Journal of Cleaner Production*, 140, 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.049>
- Saito, Y., Saito, H., and Sembokuya, Y. 2009. Consumer evaluations of pork from hogs raised on recycled food waste. *Agricultural Information Research*, 18(3), 152-161. <https://doi.org/10.3173/air.18.152>
- Santo, R. E., Kim, B. F., Goldman, S. E., Dutkiewicz, J., Biehl, E., Bloem, M. W., Neff, R. A., and Nachman, K.

- E. 2020. Considering plant-based meat substitutes and cell-based meats: a public health and food systems perspective. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 134. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00134>
- Santos, J. F. S., and Naval, L. P. 2020. Spatial and temporal dynamics of water footprint for soybean production in areas of recent agricultural expansion of the Brazilian savannah (Cerrado). *Journal of Cleaner Production*, 251, 119482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119482>
- Sauvant, D., Perez, J. M., and Tran, G. (Eds.). 2004. *Tables of composition and nutritional value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses and fish*. Wageningen Academic Publishers.
- Schader, C., Muller, A., Scialabba, N. E. H., Hecht, J., Isensee, A., Erb, K. H., Smith, P., Makkar, H. P. S., Klocke, P., Leiber, F., Schwegler, P., Stolze, M., and Niggli, U. 2015. Impacts of feeding less food-competing feedstuffs to livestock on global food system sustainability. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(113), 20150891. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0891>
- Schiffing, S., and Valantasis Kanellos, N. 2022. Five essential commodities that will be hit by war in Ukraine. *The Conversation*. <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/16422>
- Schrögel, P., and Wätjen, W. 2019. Insects for food and feed-safety aspects related to mycotoxins and metals. *Foods*, 8(8), 288. <https://doi.org/10.3390/foods8080288>
- Schütte, G., Eckerstorfer, M., Rastelli, V., Reichenbecher, W., Restrepo-Vassalli, S., Ruohonen-Lehto, M., Wuest Saucy, A. G., and Mertens, M. 2017. Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environmental Sciences Europe*, 29(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0100-y>
- Semper-Pascual, A., Decarre, J., Baumann, M., Busso, J. M., Camino, M., Gómez-Valencia, B., and Kuemmerle, T. 2019. Biodiversity loss in deforestation frontiers: linking occupancy modelling and physiological stress indicators to understand local extinctions. *Biological Conservation*, 236, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.050>
- Shah, F., and Wu, W. 2019. Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments. *Sustainability*, 11(5), 1485. <https://doi.org/10.3390/su11051485>
- Sherasia, P. L., Garg, M. R., and Bhandari, B. M. 2018. *Pulses and their by-products as animal feed*. United Nations. Rome. 222 pp. ISBN: 978-92-5-109915-5
- Sindermann, D., Heidhues, J., Kirchner, S., Stadermann, N., and Köhl, A. 2021. Industrial processing technologies for insect larvae. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 857-875. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0103>
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., and Neff, R. A. 2018. Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375-386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>
- Song, X. P., Hansen, M. C., Potapov, P., Adusei, B., Pickering, J., Adami, M., Lima, A., Zalles, V., Stehman, S. V., Di Bella, C. M., Conde, M. C., Copati, E. J., Fernandes, L. B., Hernandez-Serna, A., Jantz, S. M., Pickens, A. H., Turubanova, S., and Tyukavina, A. 2021. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. *Nature Sustainability*, 4 (9), 784-792. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z>
- Sosta, M., Rekiel, A., and Batorska, M. 2019. Use of duckweed (*Lemna L.*) in sustainable livestock production and aquaculture—a review. *Annals of Animal Science*, 19(2), 257-271. <https://doi.org/10.2478/aoas-2018-0048>
- Sosta, M., Rekiel, A., Wiscek, J., Batorska, M., and Puppel, K. 2021. Alternative protein sources vs. GM soybean meal as feedstuff for pigs—meat quality and health-promoting indicators. *Animals*, 11(1), 177. <https://doi.org/10.3390/ani11010177>
- Sosta, M., Sozicki, A., Szymasska, M., Sosulski, T., Szara, E., W?s, A., van Puijssen, G. W. P., and Cornelissen, R. L. 2020. Duckweed from a Biorefinery System: Nutrient Recovery Efficiency and Forage Value. *Energies*, 13(20), 5261. <https://doi.org/10.3390/en13205261>
- Stadtlander, T., Förster, S., Rosskothén, D., and Leiber, F. 2019. Slurry-grown duckweed (*Spirodela polyrhiza*) as a means to recycle nitrogen into feed for rainbow trout fry. *Journal of Cleaner Production*, 228, 86-

93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.196>
- Stephens, N., and Ellis, M. 2020. Cellular agriculture in the UK: a review. Wellcome Open Research, 5. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.15685.2>
- Swinbank, A. 2017. World trade rules and the policy options for British agriculture post-Brexit. Briefing paper, 7, 12.
- Swain, B. B., and Teufel, N. 2017. The impact of urbanisation on crop–livestock farming system: a comparative case study of India and Bangladesh. *Journal of Social and Economic Development*, 19(1), 161-180. <https://doi.org/10.1007/s40847-017-0038-y>
- Taelman, S. E., De Meester, S., Van Dijk, W., Da Silva, V., and Dewulf, J. 2015. Environmental sustainability analysis of a protein-rich livestock feed ingredient in The Netherlands: Microalgae production versus soybean import. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.013>
- Tallentire, C. W., Mackenzie, S. G., and Kyriazakis, I. 2018. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future?. *Journal of Cleaner Production*, 187, 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.212>
- Tavill, G. 2020. Industry challenges and approaches to food waste. *Physiology and behavior*, 223, 112993. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.112993>
- Tang, K. H. D., and Yap, P. S. 2020. A Systematic Review of Slash-and-Burn Agriculture as an Obstacle to Future-Proofing Climate Change. In *Proceedings of The International Conference on Climate Change (Vol. 4, No. 1)*. <https://doi.org/10.17501/2513258X.2020.4101>
- Teng, T. S., Chin, Y. L., Chai, K. F., and Chen, W. N. 2021. Fermentation for future food systems: Precision fermentation can complement the scope and applications of traditional fermentation. *EMBO reports*, 22(5), e52680. <https://doi.org/10.15252/embr.202152680>
- Te Pas, M. F., Veldkamp, T., de Haas, Y., Bannink, A., and Ellen, E. D. 2021. Adaptation of livestock to new diets using feed components without competition with human edible protein sources—a review of the possibilities and recommendations. *Animals*, 11(8), 2293. <https://doi.org/10.3390/ani11082293>
- Tonini, D., Albizzati, P. F., and Astrup, T. F. 2018. Environmental impacts of food waste: Learnings and challenges from a case study on UK. *Waste Management*, 76, 744-766. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.032>
- Tsatsakis, A. M., Nawaz, M. A., Kouretas, D., Balias, G., Savolainen, K., Tutelyan, V. A., Golokhvast, K. S., Lee, J. D., Yang, S. H., and Chung, G. 2017. Environmental impacts of genetically modified plants: a review. *Environmental Research*, 156, 818-833. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.011>
- Tropea, A., Ferracane, A., Albergamo, A., Potorti, A. G., Lo Turco, V., and Di Bella, G. 2022. Single cell protein production through multi food-waste substrate fermentation. *Fermentation*, 8 (3), 91. <https://doi.org/10.3390/fermentation8030091>
- Taghizadeh-Hesary, F., Rasoulinezhad, E., and Yoshino, N. 2019. Energy and food security: Linkages through price volatility. *Energy Policy*, 128, 796-806. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.043>
- Testa, M., Stillo, M., Maffei, G., Andriolo, V., Gardois, P., and Zotti, C. M. 2017. Ugly but tasty: A systematic review of possible human and animal health risks related to entomophagy. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(17), 3747-3759. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1162766>
- Trabue, S. L., Kerr, B. J., Scoggin, K. D., Andersen, D., and Van Weelden, M. 2021. Swine diets impact manure characteristics and gas emissions: Part II protein source. *Science of The Total Environment*, 763, 144207.
- Truzzi, C., Annibaldi, A., Girolametti, F., Giovannini, L., Riolo, P., Ruschioni, S., Olivotto, I., and Illuminati, S. 2020. A chemically safe way to produce insect biomass for possible application in feed and food production. *International journal of environmental research and public health*, 17(6), 2121. <https://doi.org/10.3390/ijerph17062121>
- United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (USDA). 2022. Grain and Feed Update. Available at: <https://www.fas.usda.gov/>. Accessed on 1 March 2022.

- United Nations Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development (UNDESA). 2022. The 17 Sustainable Development Goals. Available at: <https://sdgs.un.org/goals>. Accessed on 10 February 2022
- van den Burg, S. W., van Duijn, A. P., Bartelings, H., van Krimpen, M. M., and Poelman, M. 2016. The economic feasibility of seaweed production in the North Sea. *Aquaculture Economics and Management*, 20(3), 235-252. <https://doi.org/10.1080/13657305.2016.1177859>
- Vandermeersch, T., Alvarenga, R. A. F., Ragaert, P., and Dewulf, J. 2014. Environmental sustainability assessment of food waste valorization options. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.008>
- van Zanten, H. H., Mollenhorst, H., Oonincx, D. G., Bikker, P., Meerburg, B. G., and de Boer, I. J. 2015. From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed. *Journal of Cleaner Production*, 102, 362-369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.106>
- van der FelssKlerx, H. J., Camenzuli, L., Belluco, S., Meijer, N., and Ricci, A. 2018. Food safety issues related to uses of insects for feeds and foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(5), 1172-1183. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12385>
- van Eenennaam, A. L., and Young, A. E. 2014. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations. *Journal of Animal Science*, 92(10), 4255-4278. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8124>
- van Hal, O., Weijenbergh, A. A. A., De Boer, I. J. M., and Van Zanten, H. H. E. 2019. Accounting for feed-food competition in environmental impact assessment: Towards a resource efficient food- system. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118241>
- van Huis, A., and Oonincx, D. G. 2017. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0452-8>
- van Huis, A., Rumpold, B. A., Van der Fels-Klerx, H. J., and Tomberlin, J. K. 2021. Advancing edible insects as food and feed in a circular economy. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 935-948. <https://doi.org/10.3920/JIFF2021.x005>
- Verbeke, W., Spranghers, T., De Clercq, P., De Smet, S., Sas, B., and Eeckhout, M. 2015. Insects in animal feed: Acceptance and its determinants among farmers, agriculture sector stakeholders and citizens. *Animal Feed Science and Technology*, 204, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.04.001>
- Watson, C. A., Reckling, M., Preissel, S., Bachinger, J., Bergkvist, G., Kuhlman, T., Lindström, K., Nemecek, T., Topp, C. F. E., Vanhatalo, A., Zander, P., Murphy-Bokern, D., and Stoddard, F. L. 2017. Grain legume production and use in European agricultural systems. *Advances in Agronomy*, 144, 235-303. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.003>
- Williams, R. A. 2021. Opportunities and challenges for the introduction of new food proteins. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 75-91. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-061220-012838>
- WRAP. 2016. Using surplus food in animal feed. Available at: <https://wrap.org.uk/resources/tool/using-surplus-food-animal-feed>. Accessed on 1 March 2022.
- Wang, Y. S., and Shelomi, M. 2017. Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food. *Foods*, 6(10), 91. <https://doi.org/10.3390/foods6100091>
- Westendorf, M. L. (Ed.). 2000. *Food waste to animal feed* (1st ed.). Ames: Iowa State University Press
- Weindl, I., Ost, M., Wiedmer, P., Schreiner, M., Neugart, S., Klopsch, R., Kühnhold, H., Kloas, W., Henkel, I. M., Schlüter, O., Bußler, S., Bellingrath-Kimura, S. D., Ma, H., Grune, T., Rolinski, S., and Klaus, S. 2020. Sustainable food protein supply reconciling human and ecosystem health: A Leibniz Position. *Global Food Security*, 25, 100367. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100367>
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., and Herold, M. 2021. Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
- Woodgate, S. L., and Wilkinson, R. G. 2021. The role of rendering in relation to the bovine spongiform encephalopathy epidemic, the development of EU animal by-product legislation and the reintroduction of rendered products into animal feeds. *Annals of Applied Biology*, 178(3), 430- 441.

<https://doi.org/10.1111/aab.12676>

- WWF. 2021. The future of feed: a WWF roadmap to accelerating insect protein in UK feeds. Available at: https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2021-06/The_future_of_feed_July_2021.pdf. Accessed on 15 December 2021
- Yao, G., Zhang, X., Davidson, E. A., and Taheripour, F. 2021. The increasing global environmental consequences of a weakening US–China crop trade relationship. *Nature Food*, 2(8), 578-586. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00338-1>
- Zhao, X., Liao, X., Chen, B., Tillotson, M. R., Guo, W., and Li, Y. 2019. Accounting global grey water footprint from both consumption and production perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 225, 963-971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.037>
- Zheng, Y., Jin, R., Zhang, X., Wang, Q., and Wu, J. 2019. The considerable environmental benefits of seaweed aquaculture in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(4), 1203-1221. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01685-z>
- Zhu, Q., Jia, R., and Lin, X. 2019. Building sustainable circular agriculture in China: economic viability and entrepreneurship. *Management Decision*, 57(4), 1108-1122. <https://doi.org/10.1108/MD-06-2018-0639>
- Zollman Thomas, O., and Bryant, C. 2021. Don't Have a Cow, Man: Consumer Acceptance of Animal-Free Dairy Products in Five Countries. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 223. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.678491>
- Zortea, R. B., Maciel, V. G., and Passuello, A. 2018. Sustainability assessment of soybean production in Southern Brazil: A life cycle approach. *Sustainable Production and Consumption*, 13, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.11.002>
- Zupanec, M., Schafft, H. A., Lindemann, A. K., Pieper, R., and Mader, A. 2021. Critical factors for food safety in global commodity flows with a focus on logistics—A case study on Mycotoxin contamination of agri-bulk commodities. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 14(4), 545-563. <http://doi.org/10.31387/oscm0470323>

ABSTRACT

New challenges and opportunities in the production and supply of protein for animal feed

Competition between feed and food for environmental and economic resources raises concerns about the production and supply of protein to the global livestock industry. Risks to food security and the looming global sustainability deadline mean it is imperative to explore the potential of alternative protein feed sources. However, because the use of alternative feeds in livestock production is still in its infancy, it is important that potential direct or indirect food safety risks are assessed before implementation at scale. commercial tissue. This review provides a focused lens on the opportunities and potential threats of such alternatives to the sustainability and food safety of the global livestock industry. Four potential alternative protein sources for animal feed were identified and evaluated: (1) Genetically modified protein crops; (2) Cellular agriculture; (3) Old food, leftover food and industrial by-products; (4) Animal by-products and insects.

Through this analysis, strategic policy roadmaps and research agendas are synthesized to facilitate higher-level policy making, supporting local solutions for global sustainable development. demand and a food secure future. The four main directions for policy planning and research that the review suggests are (i) Decoupling protein production from fossil fuels; (ii) Develop sustainable economic strategies for alternative proteins at the local level; (iii) Support for circular animal feed solutions; (iv) Further strengthen the feed and food management system.

Keywords: *Protein, animal feed, challenges, opportunities.*

Ngày nhận bài: 25/12/2023

Ngày chấp nhận đăng: 29/02/2024