

Views & Comments

食物-能源-水纽带关系研究能否与农业创新保持同步?

庄杰^{a,b,c}, Tom Gill^{d,e}, Frank E. Löffler^{a,b,f,g,h}, 金明洲ⁱ, Gary S. Saylor^{a,b,f}^a Department of Biosystems Engineering and Soil Science, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA^b Center for Environmental Biotechnology, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA^c Institute for a Secure and Sustainable Environment, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA^d Department of Agricultural Leadership, Education and Communications, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA^e Smith Center for International Agriculture, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA^f Department of Microbiology, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA^g Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA^h Biosciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USAⁱ Department of Industrial and Systems Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA

1. 绪论

食物-能源-水 (FEW) 系统在满足社会需求方面的相互联系已得到广泛认可[1]。同样, 人们对于农业生产、制造业、人类消费的水和能源资源的竞争性或协同性分配也有了深入认识, 对其经济影响也可以进行预测[2]。但是对于 FEW 关系在农业实践操作变化和相关技术创新方面对后代的影响, 人们的认识和理解还远远不够[3-4]。此外, 新兴技术驱动的资源重新分配和决策对 FEW 系统的跨尺度效应和反馈效应在很大程度上是未知的。例如, 在环境和人口变化下, 智能技术的农业经济反馈是如何影响农业生产的 FEW 关系的? 为无动力水坝和抽水蓄能水力发电提供动力的必要水资源分配如何影响农业生产和市政供水维护? 太阳能和风能发电场是如何影响农业和农村经济的土地使用的? 反过来, 产生的太阳能和风能如何帮助降低地下水开采或海水淡化的成本?

在国际上, 如何在依赖同一河流系统的邻国 (如东南亚的湄公河) 之间实现 FEW 资源的农业利益平等, 一直是一个挑战[5-10]。显而易见的是, FEW 关系的复杂和广泛的影响要求人们对供应链进行重组; 然而, 部门重组和资

源利用的重新平衡所需要的速度给农业 FEW 系统有效适应当地和全球的新兴技术造成了压力。部门重组的过渡阶段对发达社会和发展中社会都是一个特别的挑战, 前者在可用性、丰度和质量方面都习惯于多样化的 FEW 资源, 后者则由于人口的快速增长和对环境变化的适应能力较低而遭受 FEW 匮乏之苦。遗憾的是, 随着越来越多的变量和相互关系 (如人工智能技术和去全球化) 的实现, 目前的 FEW 模型未能将 FEW 系统的异质响应要素从地方到区域再到全球范围连接起来。当不断变化的环境条件, 以及不可预测的经济、社会和政治后果被纳入农村地区的 FEW 关系框架时, 这些问题就会变得更加具有挑战性[11]。本文强调了新兴农业技术带来的越来越多的挑战, 确定了相关的知识差距, 并讨论了技术权衡问题。随着新兴技术在粮食生产中的应用, 文本建议采用系统方法来促进我们对农业 FEW 关系的理解。

2. 日益复杂的挑战

农业活动对环境有重大影响。例如, 农业生产直接导

致了34%的全球温室气体（GHG）排放，消耗了全球约70%的淡水[12–13]。为农业灌溉而密集抽取地下水，会使含水层枯竭，区域水供应恶化。此外，由于过量使用合成肥料、污泥和杀虫剂，农业仍然是水污染的主要来源。另一方面，到2050年，农业产量将需要增加约70%，才能为年均增长6450万的人口提供足够的食物[14]。由于土地、水和能源资源的退化以及来自非农业用途（如能源和工业部门）的竞争日益激烈，这一目标受到进一步挑战。据预测，到2030年，全球水和能源的利用率将分别下降40%和50% [15–18]。环境变化，能源、劳动力和农用化学品成本的上升，以及供应链的中断将使这些问题变得更加严重[19–21]。幸运的是，技术创新，如精准农业和自动化，可以弥补其中的一些问题[22]。然而，由于新兴技术固有的可持续性权衡，其缓解程度和意外后果尚不清楚。

3. 技术权衡

新兴技术可以在农业应对各种限制和应对涉及水、能源、土地和劳动力资源的生存竞争威胁方面发挥核心作用。遥感和全球定位系统技术已经彻底改变了商品农业。尖端技术（如远程通信、人工智能、先进传感器技术和实时航空成像）、自主机械农业平台及其机具的快速发展，有望催生机械化农业的新领域[23]。一方面，这些先进技术将使农场更具盈利性、高效、安全和环保。例如，现代机器可以减少对劳动力需求和化石能源的使用，促进在线交易和电子化，通过简化供应来减少水和农用化学品的消耗，并减少对生态系统健康的影响。另一方面，这些技术的应用引发了人们对该领域的关注，如现代机械的高维护成本、对投资和学习使用这些技术的需求以及无人驾驶农业机械的责任问题。此外，使用这种机器可能会使农民失去对自己命运和生计的掌控。越来越多地使用基于现代技术的农业设备，主要使从事大规模生产的农场主受益，因为他们有能力投资，而小农场主仍然依赖于传统方法。值得注意的是，发展中国家80%的粮食是由小农户生产的。因此，新技术有可能会扩大大农场主与小农场主之间的差距，也有可能扩大发达国家与发展中国家之间的差距。因此，在采用新兴技术之前，必须制定一个关系框架，以确保农场主、部门和国家之间的资源管理平衡，以及政策制定者和投资者的包容性参与[24]。

新兴技术会影响社会三个区域的FEW关系：农村区域（人口密度和FEW消耗都很低）、农业生产区域（人口

密度低，但能源和水消耗高）以及城市区域（人口密度和FEW消耗都很高）[25]。代表着集中式动物饲养场（CAFO）的农村和农业区域大部分是重叠的，负责生态系统服务和粮食生产。随着现代技术越来越多地应用于农业，城市区域将发展成为CHAFO (concentrated human-animal feeding operation)。这一趋势意味着农业区域将扩展到城市区域。如果是这样，人们必须解决一些问题以避免任何意外的后果。例如，目前的水资源、老化的基础设施和能源消耗能否支持CHAFO的可持续性？技术密集型的FEW系统是否会变得如此非人性化，以至于从经济和知识的角度来看，一旦人们的工作被一个习惯于无人技术的社会所淘汰，他们几乎不可能再回到农业中去？城市农业是否会作为一种有意义的替代型生活方式出现，如果是的话，这种技术驱动的新FEW模式在CHAFO [26]中会产生什么社会后果？新兴技术能否使现代社会以可持续的方式实施城市农业，并使区域性的FEW关系受益？新兴技术将如何影响农民的商业决策和FEW产品的全球贸易？解决这些问题不仅有助于获得政治团体的支持，改善三个地区的法律、法规、税收和基础设施，而且有助于了解个别新兴技术在确保21世纪农业FEW系统的社会经济可持续性方面的潜在作用。这些将有助于发展跨学科的技术体系，将孤立技术的有利功能以互补的方式纳入跨学科的解决方案之中。

4. 研究差距

从粮食生产、水资源消耗和能源建模的角度来看，FEW系统各组成部分之间的相互关联性和反馈机制已得到公认。然而，现有的FEW关系模型似乎缺乏必要的深度和分辨率，无法评估和预测新兴技术在地方到全球范围内对农业发展的复杂影响。部分原因是在目前的范式中并没有明确考虑技术创新。例如，数字农业技术为进一步优化水和能源资源的管理、提高粮食生产率和利润率、减少环境影响，并最终重塑农业FEW关系提供了新的方法[23,27]。

另一个导致FEW关系模型不确定的因素是资源治理，这与政治密切相关。例如，新兴技术可以提高资源利用效率，但同时会在FEW需求、社会经济效益和政治成功方面产生新的联系[28–29]。随着新技术的已知和未知后果的出现，对农业FEW关系的研究范围将逐步扩大。如图1所示，本文确定了24个关键的研究主题、挑战和机遇[23–24,28,30–49]。



图1. 农业FEW关系议程中的研究差距。

5. 系统方法

由于环境变化带来的不可避免的后果和人类需求的迅速增加，无论是人口增长还是消费增加，科学技术面临的挑战是：①在多尺度上推进对FEW关系动态性质的系统理解和预测；②开发改善、管理和控制农业FEW产出的技术，以满足社会需求，同时减少环境影响，改善或至少保持生态系统服务。为了解决这些挑战，使农业能够适应新兴技术的应用，人们需要努力建立跨学科的研究网络并进行跨部门的示范。这些工作应强调消除或重新划定目前界定（而且往往是隔离的）特定学科研究和政府机构作用的界限。在此，本文建议遵循一种系统方法，可以在地方到全球范围内整合不同学科和部门。子系统可以有一个可扩展的分辨率方案，即在系统边界内对固有过程采用高分辨率，而在系统边界外对外在影响则采用较低的分辨率。全球性或区域性的信息可能对当地农业问题的预测分析是必要的，但没有必要在所有尺度上都有相同的分辨率。在全球范围内，模型复杂度高，数据不足，计算能力

有限，可能会造成模型的过度拟合，从而损害预测能力。例如，综合评估模型（如全球变化分析模型）主要通过经济模型连接能源、经济、农业、土地利用和气候系统。随着模型和变量的增加，综合评估模型的稳健性会降低，预测精度也会降低。在这种情况下，全球敏感性分析可以帮助减少参数的数量，但由于参数的相关性/分布性和计算的复杂性，有时仍然是不切实际的。因此，有必要在具体的FEW问题的地方到全球范围内开发分辨率层次模型。为了实现这一目标，综合模型应该具有更强的可扩展性，并具有强大的连接，同时能够捕捉到地方和全球模型之间的主要动态。随着特定局部问题的数据增多，模型可以得到更好的校准，同时避免在全球尺度上的过度拟合。

系统方法能够整合广泛的数据、模型、服务、技术和管理。在此，本文提出了一个概念性的方法，将众多学科孤立的系统（如土壤、作物、水文、经济、能源和机械）重组为五个主要的跨学科系统：分布式数据网络、系统建模、智能治理、融合技术和分散式服务（图2）。

分布式数据网络连接了来自多个来源的数据，特别是

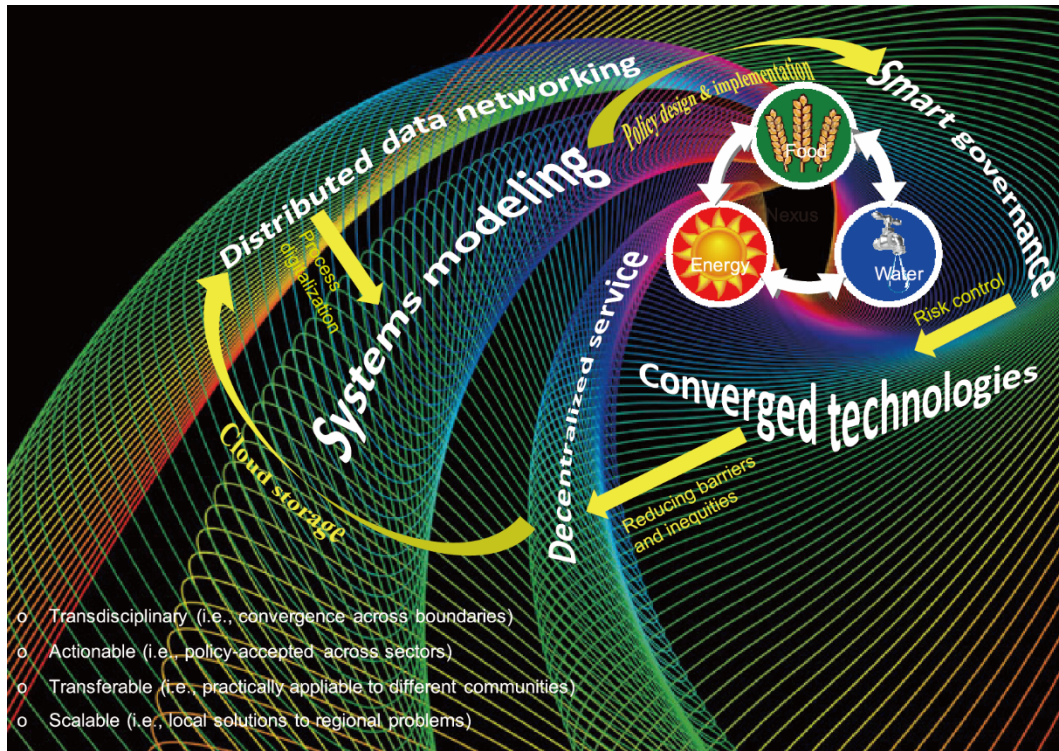


图2. 处理与农业FEW关系相关的网络化互动的系统方法的框架和特点。

来自不同学科或部门的数据，可以安全地访问比单一或集中式站点所能提供的更多的FEW数据。该网络提供的数据可以为多种规模的特定FEW问题定制不同的分辨率，从而支持可扩展的模型范式。数据联网工作要想获得技术认可，并通过各种社会政治体制下的政府机构为决策提供信息，就必须同时得到广泛的利益相关者（包括代表各种价值观和行为方式的文化和学术界公众）的参与。这项工作有望通过跨尺度分析、预测、可视化、共享和查询来确定复杂系统的反馈互动。

系统建模提倡采用以学科为中心的建模方法，在地方、区域和全球范围内整体分析和预测技术驱动的农业FEW关系的过程和影响。建模必须超越参数化和优化，通过模型反馈分析，重新调整系统建模过程。这种努力不仅可以为决策者了解新兴技术权衡的信息，而且可以确定和整合地方解决方案，以解决区域和全球范围内的问题。

智能治理是利用创新技术，以动态的方式支持决策和提高资源效率，同时将风险降到最低的过程。它为公民和政府为FEW资源利用方面的透明沟通和合作创造了平台。因此，智能治理不仅改善了公共服务，也改善了民主进程。

融合技术是将独立的技术整合为系统级的工程解决方案，以解决困难、复杂的问题。这一跨学科系统考虑了各种技术在FEW问题相互交织的链条上的链接、融合、互

补和协同作用。这项工作减少了任何有限的、不全面的方法所带来的反作用，同时促进了以较低的成本有效地提供实际的解决方案。

分散式服务侧重于辐射通常由集中式设施和（或）不公平分配的资源提供的功能和服务。由于农业和非农业部门的更广泛参与，决策权在各FEW利益相关者（如生产者、加工者和经销商）之间高度分散，但他们的需求应通过资源、人口、生产和消费的高密度与低密度地区之间的远程连接来协调。分散式服务也可以促进跨尺度和跨部门的公私合作，加速农民、投资者和政策制定者对FEW融合技术的接受。

Acknowledgements

This work was supported by the US National Science Foundation (CBET-2021956).

Compliance with ethics guidelines

Jie Zhuang, Tom Gill, Frank E. Löffler, Mingzhou Jin, and Gary S. Sayler declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] D'Odorico P, Davis KF, Rosa L, Carr JA, Chiarelli D, Dell'Angelo J, et al. The global food–energy–water nexus. *Rev Geophys* 2018;56(3):456–531.
- [2] Simpson GB, Jewitt GPW. The development of the water–energy–food nexus as a framework for achieving resource security: a review. *Front Environ Sci* 2019;7:8.
- [3] King A. Technology: the future of agriculture. *Nature* 2017;544(7651):S21–3.
- [4] De Martinis D, Rybicki EP, Colonna N, Benvenuto E, Llorente B. Editorial: next generation agriculture: understanding plant life for food, health and energy. *Front Plant Sci* 2020;11:1238.
- [5] Ziv G, Baran E, Nam S, Rodríguez-Iturbe I, Levin SA. Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin. *Proc Natl Acad Sci USA* 2012;109(15):5609–14.
- [6] Petersen-Perlman JD, Veilleux JC, Wolf AT. International water conflict and cooperation challenges and opportunities. *Water Int* 2017;42(2):105–20.
- [7] Barbarossa V, Schmitt RJP, Huijbregts MAJ, Zarfl C, King H, Schipper AM. Impacts of current and future large dams on the geographic range connectivity of freshwater fish worldwide. *Proc Natl Acad Sci USA* 2020;117(7):3648–55.
- [8] Grünwald R, Feng Y, Wang W. Reconceptualization of the transboundary water interaction nexus (TWINS): approaches, opportunities and challenges. *Water Int* 2020;45(5):458–78.
- [9] Turhan Y. The hydro-political dilemma in Africa water geopolitics: the case of the Nile River basin. *Afr Secur Rev* 2021;30(1):66–85.
- [10] Wang K, Liu J, Xia J, Wang Z, Meng Y, Chen H, et al. Understanding the impacts of climate change and socio-economic development through food–energy–water nexus: a case study of Mekong River delta. *Resour Conserv Recycling* 2021;167:105390.
- [11] Zhuang J, Sun H, Saylor G, Kline KL, Dale VH, Jin M, et al. Food–energy–water crises in the United States and China: commonalities and asynchronous experiences support integration of global efforts. *Environ Sci Technol* 2021;55(3):1446–55.
- [12] Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, Monforti-Ferrario F, Tubiello FN, Leip A. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat Food* 2021;2(3):198–209.
- [13] United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). The United Nations world water development report 2022: groundwater: making the invisible visible. Report. Paris: UNESCO; 2022 Mar 21.
- [14] United Nations, Department of Economic and Social Affairs (UNDESA). World population prospects 2019: highlights. Report. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs (UNDESA); 2019 Jun 17.
- [15] Sustainable Development Solutions Network (SDSN). (2013). Solutions for sustainable agriculture and food systems. Technical report for the post-2015 development agenda. Report. Paris: SDSN; 2013 Sep 18.
- [16] United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). The United Nations world water development report 2014: water and energy Report. Paris: UNESCO; 2014 Mar 21.
- [17] The U. S. Energy Information Administration (EIA). International energy outlook 2019. Report. Washington, DC: The US Energy Information Administration; 2019 Nov.
- [18] D'Odorico P, Chiarelli DD, Rosa L, Bini A, Zilberman D, Rulli MC. The global value of water in agriculture. *Proc Natl Acad Sci USA* 2020;117(36):21985–93.
- [19] Pastor AV, Palazzo A, Havlik P, Biemans H, Wada Y, Obersteiner M, et al. The global nexus of food–trade–water sustaining environmental flows by 2050. *Nat Sustain* 2019;2(6):499–507.
- [20] Vora N, Fath BD, Khanna V. A systems approach to assess trade dependencies in US food–energy–water nexus. *Environ Sci Technol* 2019;53(18):10941–50.
- [21] Laborde D, Martin W, Swinnen J, Vos R. COVID-19 risks to global food security. *Science* 2020;369(6503):500–2.
- [22] Gliessman S. A vision for future food and agriculture systems. *Agroecol Sustain Food Syst* 2020;44(2):137–8.
- [23] Miao R, Khanna M. Harnessing advances in agricultural technologies to optimize resource utilization in the food–energy–water nexus. *Annu Rev Resour Econ* 2020;12(1):65–85.
- [24] Payet-Burin R, Kromann M, Pereira-Cardenal S, Strzepek KM, Bauer-Gottwein P. Nexus vs silo investment planning under uncertainty. *Front Water* 2021;3:672382.
- [25] Zhao P, Zhang M. The impact of urbanization on energy consumption: a 30-year review in China. *Urban Clim* 2018;24:940–53.
- [26] McDougall R, Kristiansen P, Rader R. Small-scale urban agriculture results in high yields but requires judicious management of inputs to achieve sustainability. *Proc Natl Acad Sci USA* 2019;116(1):129–34.
- [27] Basso B, Antle J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nat Sustain* 2020;3(4):254–6.
- [28] Wiegleb V, Bruns A. What is driving the water – energy – food nexus? Discourses, knowledge, and politics of an emerging resource governance concept. *Front Environ Sci* 2018;6:128.
- [29] Schwindenhammer S, Gonglach D. SDG implementation through technology? Governing food – water – technology nexus challenges in urban agriculture. *Politics Gov* 2021;9(1):176–86.
- [30] Popp A, Calvin K, Fujimori S, Havlik P, Humpenöder F, Stehfest E, et al. Landuse futures in the shared socio-economic pathways. *Glob Environ Change* 2017;42:331–45.
- [31] Vinca A, Riahi K, Rowe A, Djilali N. Climate – land – energy – water nexus models across scales: progress, gaps and best accessibility practices. *Front Environ Sci* 2021;9:691523.
- [32] Fernando Y, Tseng ML, Aziz N, Ikhsan RB, Wahyuni-TD IS. Waste-to-energy supply chain management on circular economy capability: an empirical study. *Sustainable Prod Consumption* 2022;31(1):26–38.
- [33] Barron-Gafford GA, Pavao-Zuckerman MA, Minor RL, Sutter LF, Barnett-Moreno I, Blackett DT, et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nat Sustain* 2019;2(9):848–55.
- [34] Yin C, Pereira P, Hua T, Liu Y, Zhu J, Zhao W. Recover the food–energy–water nexus from COVID-19 under Sustainable Development Goals acceleration actions. *Sci Total Environ* 2022;817:153013.
- [35] Lawford RG. A design for a data and information service to address the knowledge needs of the water–energy–food (W–E–F) nexus and strategies to facilitate its implementation. *Front Environ Sci* 2019;7:56.
- [36] Diaz S, Zafra-Calvo N, Purvis A, Verburg PH, Obura D, Leadley P, et al. Set ambitious goals for biodiversity and sustainability. *Science* 2020;370(6515):411–3.
- [37] Vera I, Wicke B, Lamers P, Cowie A, Repo A, Heukels B, et al. Land use for bioenergy: synergies and tradeoffs between sustainable development goals. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;161(80):112409.
- [38] Lee SH, Choi JY, Hur SO, Taniguchi M, Masuhara N, Kim KS, et al. Foodcentric interlinkages in agricultural food – energy – water nexus under climate change and irrigation management. *Resour Conserv Recycling* 2020;163:105099.
- [39] Carvalho PN, Finger DC, Masi F, Cipolletta G, Oral HV, Tóth A, et al. Naturebased solutions addressing the water–energy–food nexus: review of theoretical concepts and urban case studies. *J Clean Prod* 2022;338:130652.
- [40] McCarthy B, Anex R, Wang Y, Kendall AD, Ancil A, Haacker EMK, et al. Trends in water use, energy consumption, and carbon emissions from irrigation: role of shifting technologies and energy sources. *Environ Sci Technol* 2020;54(23):15329–37.
- [41] Muscat A, de Olde EM, Ripoll-Bosch R, Van Zanten HHE, Metz TAP, Termeer CJAM, et al. Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nat Food* 2021;2(8):561–6.
- [42] Bielicki JM, Beetstra MA, Kast JB, Wang Y, Tang S. Stakeholder perspectives on sustainability in the food–energy–water nexus. *Front Environ Sci* 2019;7:7.
- [43] World Economic Forum. Net-zero challenges: the supply chain opportunity. Report. Geneva: World Economic Forum; 2021 Jan.
- [44] Tapia JFD, Samsati S, Doliente SS, Martinez-Hernandez E, Wan Ab Karim WAB, Lim KL, et al. Design of biomass value chains that are synergistic with the food – energy – water nexus: strategies and opportunities. *Food Bioprod Process* 2019;116:171–85.
- [45] Bazzana D, Zaitchik B, Gilioli G. Impact of water and energy infrastructure on local well-being: an agent-based analysis of the water – energy – food nexus. *Struct Change Econ Dyn* 2020;55:165–76.
- [46] Weitz N, Strambo C, Kemp-Benedict E, Nilsson M. Closing the governance gaps in the water–energy–food nexus: insights from integrative governance. *Glob Environ Change* 2017;45:165–73.
- [47] Pahl-Wostl C. Governance of the water – energy – food security nexus: a multilevel coordination challenge. *Environ Sci Policy* 2019;92:356–67.
- [48] Paim MA, Salas P, Lindner S, Pollitt H, Mercure JF, Edwards NR, et al. Mainstreaming the water–energy–food nexus through nationally determined contributions (NDCs): the case of Brazil. *Clim Policy* 2020;20(2):163–78.
- [49] Wolfe ML, Richard TL. 21st century engineering for on-farm food–energy–water systems. *Curr Opin Chem Eng* 2017;18:69–76.