

## Views &amp; 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<sup>a,b,c</sup>, Tom Gill<sup>d,e</sup>, Frank E. Löffler<sup>a,b,f,g,h</sup>, 金明洲<sup>i</sup>, Gary S. Sayler<sup>a,b,f</sup><sup>a</sup> Department of Biosystems Engineering and Soil Science, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA<sup>b</sup> Center for Environmental Biotechnology, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA<sup>c</sup> Institute for a Secure and Sustainable Environment, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA<sup>d</sup> Department of Agricultural Leadership, Education and Communications, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA<sup>e</sup> Smith Center for International Agriculture, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA<sup>f</sup> Department of Microbiology, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA<sup>g</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA<sup>h</sup> Biosciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA<sup>i</sup> Department of Industrial and Systems Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA

## 1. 绪论

食物-能源-水 (FEW) 三个系统之间的相互联系在满足社会和经济需求方面已得到广泛认可[1]。人们对于农业生产、工业生产和生活消费在水和能源资源方面的竞争关系和协同分配也有了深入认识, 并能够对 FEW 的经济影响进行预测[2]。但是关于 FEW 关系对未来农业生产实践过程和创新技术应用方面的影响, 还没有得到人们的重视和理解[3–4]。同时, 新兴技术驱动的水和能源资源重新分配和优化决策对 FEW 三个系统在不同尺度上的耦合以及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将如何影响农业生产的 FEW 关系? 无动力水坝和抽水蓄能水力发电所需的水资源会如何影响日常农业生产和市政供水? 太阳能和风能发电场最终会如何影响粮食生产和农村经济所需的土地利用? 同时, 产生的太阳能和风能能否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

是一个挑战性问题[5–10]。FEW 纽带关系的复杂性和长远影响力要求人们对供应链进行重组; 然而, 管理部门重组和资源利用的重新平衡远滞后于农业 FEW 纽带关系的变化和从当地到全球的新兴农业技术革新的速度。管理部门的重组对发达社会和发展中社会都是一个特别的挑战, 发达社会在 FEW 资源的数量、质量和再利用方面都有较好选择, 发展中社会则由于人口的快速增长和对环境变化的低适应力而面临 FEW 资源的逐渐匮乏。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) 的介入, 目前的 FEW 模型还未能将 FEW 系统对这些变量和关系的非均匀响应机制在从地方到区域再到全球的跨尺度上连接起来。当不断变化的环境条件以及不可预测的经济、社会和政治影响被纳入 FEW 关系框架时, 预测 FEW 的纽带关系及其结果就会变得更具有挑战性[11]。本文强调了新兴农业技术革新对 FEW 关系的诸多挑战, 提出了一系列重要的科学问题, 讨论了跨学科和跨部门的权衡策略, 并建议采用系统方法理解新兴技术对农业 FEW 纽带关系的影响。

## 2. 综合挑战

农业生产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%的淡水资源[12–13]。抽取地下水进行农业灌溉造成地下含水层枯竭和区域水供应恶化。此外，由于过量使用化学合成肥料、污泥、杀草剂和杀虫剂，农业仍然是水污染的主要来源。到2050年，全球农业产量需要增加约70%，以便为每年平均6450万的人口增长提供足够的食物[14]。由于土地和水资源的退化以及来自非农业用途（如能源和工业部门）对自然资源的竞争日益激烈，这一食物供应目标受到进一步挑战。据预测，到2030年，全球有效水和能源资源将分别短缺40%和50% [15–18]。环境变化以及能源、劳动力和农用化学品成本的上升，加之供应链的中断将使这些水和能源问题变得更加严重[19–21]。幸运的是，技术创新，如精准农业和自动化，可以缓解一部分问题[22]。但是由于新兴技术固有的可持续性利弊，其缓解潜力和结果尚不清楚。

## 3. 技术权衡

新兴技术可以在农业应对各种限制和竞争威胁（例如，水、能源、土地和劳动力资源的成本上升）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性农业。尖端技术（如远程通信、人工智能、先进的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局面[23]。这些先进技术将使农场更盈利、高效、安全和环保。例如，现代机械设备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，通过精准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损害。同时，这些技术的应用也引发了人们的各种担忧，例如，现代机械的高维护成本，投资和学习使用这些技术的困难，以及无人驾驶农业机械的事故责任问题。此外，使用这些机械可能某一天会使农民或其后代失去对自己命运和生计的掌控。基于新兴技术的农业设备主要有利于有投资能力的大农场主，而不利于仍然依赖于传统方法的小农场主。鉴于发展中国家80%的粮食是由小农户生产的，新兴技术在发展中国家的应用有可能会扩大大农场主和小农场主之间的社会与经济差距，也有可能扩大发达国家和发展中国家之间的农业经济差距。因此，在采用新兴技术之前，必须与政策制定者和投资者合作，制定一个包容各相关方利益的、基于

FEW纽带关系的政策或规则框架，以确保农场主、管理部门和国家之间的资源管理平衡[24]。

新兴技术会影响三个社会区域的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）；以及都市区域（人口密度和FEW消耗都很高）[25]。农村和农业区域是动物饲养集中区（CAFO），在相当程度上具有重叠的生态系统服务和粮食生产功能。随着现代技术越来越多地应用于食物生产，都市区域有望发展成为人类生活和动物饲养的共集区（CHAFO）。这一趋势意味着农业活动将从农村和农业区域扩展到都市区域，并可能造成预期之外的一定后果。例如，退化的水资源、老化的基础设施和高能源消耗能否支持CHAFO的可持续性？技术密集型的FEW系统是否会变得无人化，以至于从经济和社会的角度来看，一旦农业生产者的工作被一个采纳无人技术的社会所淘汰，他们就几乎不可能再回到农业领域中去？都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，这种工程技术驱动的新FEW模式在CHAFO中会产生什么社会后果[26]？新兴技术能否使现代社会以可持续的方式实施都市农业生产，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和改善农村、农业和都市三个地区的法律、法规、税收和基础设施，而且有助于明确各种新兴技术在确保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，将单一技术的优势功能以互补的方式纳入跨部门的解决方案之中。

## 4. 科学问题

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关系模型似乎缺乏所需的深度和分辨率，无法有效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，这与法规和政策密切相关。新兴技术可以提高资源利用效率，但也会重塑FEW需求、社会经济和政治成功三者之间的关系[28–29]。因此，随着新兴技术的已知和未

知影响的出现，对农业FEW关系的研究范围需要逐步扩大。如图1所示，本文提出了24个关键的研究问题[23–24,28,30–49]。

## 5. 系统方法

由于环境变化带来的不可避免的后果和人类对FEW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关系演变的系统理解和预测；②开发提高农业FEW产出的技术，同时满足社会需求、减少环境污染、改善生态服务。为了应对这些挑战和扩大新兴技术的农业应用，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。这些工作应考虑如何消除或重新划定学科之间的研究边界和部门之间的职能边界。在此，本文建议一种系统方法，可以在地方到全球范围内整合不同学科和部门。该系统的子系统可以有一个可扩展的分辨率方案，即在子系统内部对具体问题的

过程采用高分辨率，而在子系统之间对外在影响则采用较低分辨率。全球或区域数据或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。在全球尺度上，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，从而降低预测有效性。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、农业、土地利用和气候系统。随着子模型数量和变量的增加，综合评估模型的稳健性和预测精度会降低。在这种情况下，全球敏感性分析有助于减少参数，但由于参数之间的相关性和计算的复杂性，这种分析有时仍然是不切实际的。因此，有必要在具体的FEW问题上开发从地方到全球尺度的分辨率层次模型。为了实现这一目标，综合模型应该具有更强的尺度扩展性和模型融合功能，同时能够捕捉到不同尺度模型之间的主要关系及其影响。随着针对具体问题的研究数据的不断增加，综合模型可以得到更好的校准，并避免在全球尺度上的过度拟合。



图1. 农业FEW关系议程中的研究差距。



系统方法能够整合广泛的数据、模型、服务功能、技术路径和管理策略。在此，本文提出将单个的学科系统（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、技术融合和分散式服务（图2）。

分布式数据网络能够连接不同学科或部门的多源数据，在保障数据安全的基础上，获取比单一或集中式站点更多的FEW数据。该网络提供的数据可以为不同尺度上的具体FEW问题确定有效的分辨率，从而支持FEW模型的可扩展性。数据联网工作要想获得技术认可，并得到各种社会政治体制下的管理决策支持，就必须包含不同价值观和行为方式的利益相关者的参与，这项工作有望通过跨尺度分析、预测、可视化、共享、查询和互动反馈等相结合来推进。

系统建模提倡采用以学科为中心的建模方法，在地方、区域和全球尺度上整体分析和预测新兴技术驱动的农业FEW关系的过程和影响。建模必须超越参数定量化和优化的基本目标，通过模型反馈分析，达到重新调整系统建模过程的目的。这种努力不仅可以让决策者了解新兴技术的利弊，而且可以确定和整合小尺度地方解决方案，以解决大尺度区域和全球问题。

智能治理是利用创新技术，以动态方式支持决策和提高FEW资源利用效率，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提供了平台。因此，智能治理不仅能改善公共服务，也能推进民主进程。

技术融合是将众多单一技术整合为系统水平上的能够解决复杂性问题的工程方案。这种跨学科的系统化途径考虑了沿着FEW网络的链条和在交织点上各种技术的链接、融合、互补和协同潜力。该途径能够减少局部的、非系统方法所带来的负面作用，同时制定高效、低成本的解决方案。

分散式服务侧重于扩展通常由集中式设施或不公平分配的资源提供的功能和服务。新兴技术促进了农业和非农业部门的广泛参与，但决策权在各FEW利益相关者（如生产者、加工者和经销商）之间高度分散，因此，有必要建立分散式服务体系，加速生产者、投资者和政策制定者对FEW融合技术的理解和接受，并促进跨地区和跨部门的公私合作，例如，通过资源、人口、生产和消费的高密度和低密度地区之间的远程关联来协调FEW供需关系。

## Acknowledgements

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

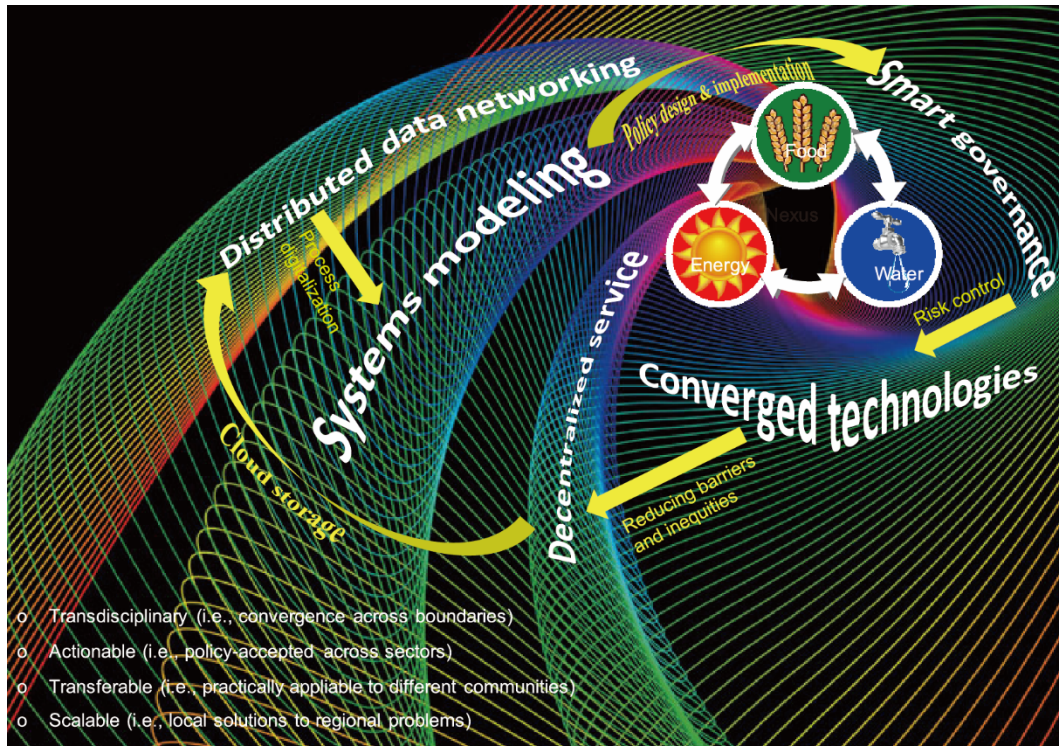


图2. 处理与农业FEW关系相关的网络化互动的系统方法的框架和特点。

## Compliance with ethics guidelines

Jie Zhuang, Tom Gill, Frank E. Löffler, Mingzhou Jin, and Gary S. Saylor 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, Anctil 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, Metze 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.