



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Environmental Sustainability—Perspective

用跨学科网络组织化研究框架解释食物-能源-水的纽带关系

庄杰^{a,b,c,*}, Frank E. Löffler^{a,b,d,e,f}, Gary S. Saylor^{a,b,d}

^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 Microbiology, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA

^e Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA

^f Biosciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 January 2021

Revised 7 July 2021

Accepted 10 August 2021

Available online 22 October 2021

关键词

食物

能源

水

利益相关者

政策

环境可持续性

摘要

城市化、人口增长以及食物-能源-水 (food-energy-water, FEW) 的加速消耗给经济、环境和社会 (economic, environmental, and social, ESS) 的可持续性发展带来了前所未有的挑战。当今世界正加速从自然生态系统向管理生态系统过渡, 因此了解 FEW 系统对实现联合国可持续发展目标 (sustainable development goal, SDG) 的潜在影响很有必要。由于 FEW 系统及相关网络具备复杂性和新兴行为, 人们无法通过单一学科研究对其做出全面理解或有效预测, 这是现存的主要障碍。本文提出了一个组织化研究框架, 推动自上而下、跨学科地量化 FEW 系统和 ESS 系统间的相互关系。相关方法包括改善跨部门、跨尺度的协调互动, 扩展和多样化供应链网络, 革新技术促进资源的有效利用。这一框架可以指导战略解决方案的制定, 削弱地区或国家内部不同部门对 FEW 资源的竞争, 并在实施可持续发展议程时最大限度减少 FEW 资源及其可用性分配不等的现象。

©2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

就气候变化和人口动态引发的问题、趋势进行探讨交流, 特别是从环境、社会经济方面探讨其对全球可持续性的影响, 是联合国可持续发展目标的主要目标之一[1–2]。这种沟通的有效性依赖于强大的跨学科研究协作网络[3–4]。为此, 研究者已经提出了几种概念框架用于跨学科指导, 还开发了用于评估食物-能源-水 (FEW) 三者间关系的分析工具[5–8], 自下而上 (即从结果到机制) 的方法

是主要研究方法, 因为经济、环境和社会 (EES) 问题造成的影响还没有得到充分或明确的定义。自下而上的方法固然非常重要, 但对于发展跨学科的研究协作网络, 有效促进经济、环境和社会系统 (EES 系统) 与 FEW 系统间的“双赢”互动, 采用自上而下的方法 (即从机制到结果) 研究 FEW 纽带关系 (FEW nexus) 也是非常必要的。自上而下的思维可以促进从地方到全球各种研究机会的融合, 并在日益严峻的气候变化和人口急剧增长的双重压力之下, 确保 FEW 系统的可持续性[9]。

* Corresponding author.

E-mail address: E-mail address: corresponding author:jzhuang@utk.edu (J. Zhuang).

2095-8099/© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering*, 2022, 11(4): 95–100.

引用本文: Jie Zhuang, Frank E. Löffler, Gary S. Saylor. Creating a Research Enterprise Framework for Transdisciplinary Networking to Address the Food-Energy-Water Nexus. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.017>

在全球尺度上，此类跨学科网络研究应当把初始阶段的重点放在对全球FEW系统有巨大影响且在FEW实践、需求和挑战方面存在差异的国家（如美国和中国）[10]。这些国家拥有独特的社会经济影响力，可以通过国家内部和国家之间的跨学科对话来确定问题、提出解决方案。例如，人口密度较低但FEW资源丰富的国家（如美国、澳大利亚）接受并率先应用新型技术（如人工智能），在最大化粮食生产效率的同时把环境足迹降到最低[11-12]。上述做法有可能为地方或区域提供通用的FEW资源保护方案。然而，一些人口密度高且FEW资源有限的国家（如中国和印度）当前仍在奋力设计FEW资源安全方案，并且面临着更多的FEW资源纠纷[13]。这种地区和国家之间的FEW资源供应和消费的不平等分配，最终会破坏全球FEW系统的稳定，导致联合国可持续发展目标无法全部实现。

FEW资源供应链有利有弊，而规模可扩展的跨学科网络研究可以加快对其进行评估、协调和平衡，缩小地区和国家间FEW资源生产和消费不平等的差距。该网络如果足够稳固，应该在识别风险、推荐解决方案、培养利益相关者了解国际间的FEW交换对相关地区和国家EES可持续性的长期影响方面发挥关键作用。新机制具备的预测能力得益于跨学科方法的两个优势。首先，跨学科性打破了学科之间的界限，使人们能够自上而下地看待无序的问题。这种方法有利于系统地识别冲突的阈值障碍（如城市化与生态系统的恢复、食物需求与水资源、能源供应与社会福利）。其次，跨学科研究方法把孤立的理论和技术连接或集成起来，开发出具有跨学科性、创新性的解决方案。这些解决方案可以加强不同系统之间的机制互动，同时处理多个问题（例如，农业废物用于能源生产，富营养水用于作物灌溉）。然而，目前尚未形成可以指导跨学科网络研究的理论框架，因此无法对FEW系统和EES系统间的嵌入式关系进行更深入的了解，更无法预测到子系统应用新技术时会引发何种动态反馈效应。本文提出的组织框架将FEW系统研究看作一个集合了代表EES系统大部分研究人员、利益相关者（包括政策制定者）和公众的联合事业。

2. 研究纽带关系的跨学科网络

2.1. 组织化研究框架

跨学科研究工作应当精准识别研究对象系统，探讨当前已开发出来和投入实施的模型，从不同尺度（地方、区域和全球）描述该系统[14]。在广阔的研究环境中，例

如，涉及社会经济系统，并在一个以解决现实世界问题为目标的启发式基础研究框架下，识别FEW系统的组成部分以及潜在的相互作用[15]。例如，系统级别的科学问题如何为单个研究人员提供探索途径？这类研究是如何帮助人们形成对FEW纽带关系的总体愿景和理解？提出的科技努力是如何帮助研究界和利益相关者加深对问题、潜在解决方案的理解，以及对不同尺度和不同背景下实施的新方法的理解？为了回答这些问题，我们需要建立一个网络视角，可以直观地认识到FEW系统在生产到消费过程中的各种相互关系并对其进行优先排序。帮助建立关系模型的7个指导性问题是很有用的[15]，它遵照利益相关者的需求和利益，帮助定制模型、分析各种FEW情景。权衡分析依赖于对整个系统的完整或平衡的理解[5]。因此，本研究从研究的组织框架角度考察FEW纽带关系。术语“组织化研究”（research enterprise）是一项大尺度、协作性的工作，旨在利用跨学科整合方法把研究活动融合到一个涉及利益相关者、政策制定者和非研究组织的集中化商业模式中。图1展示的复杂系统网络，突出了环境对FEW系统各个组成部分的关键影响，以及系统的反馈对环境、社会（即人类）行为、政策和技术的的影响。这些组成部分与驱动生态系统变化的全球性因素（如温室气体排放）[16]和全球人口的迅速增长（即到2050年人口将增加约20亿）[17]有着不可分割的联系。图1描述的框架和下文的细节解释对不可预见的特性和事件提出了预测，这需要组织全球范围的网络研究。组织化研究努力的目的是了解FEW系统关系对可持续发展的影响，重点是基于实验人员、技术人员和行为科学家的各种投入和付出，开发系统化建模和计算技术。

2.2. 经济系统

FEW纽带关系嵌入了经济系统中，涉及从生产、加工、运输、储存到消费的各个环节。生产不局限在食物生产这一方面，它实际上代表了所有FEW元素。大约30%的能源和70%的淡水用于食物生产，至少有40%的能源用于水的提取、输送和处理，25%~45%的水用于能源生产[1,9]。在这种情况下，食物要素主要代表商品农业、畜牧业生产、奶牛养殖、地被植物栽培、水产养殖和渔业等，既包括人类消费，也包括非人类消费。事实上，食物不仅限于生物量来源中的可食用部分，它还包括用于能源生产的生物质和生产商用化学品的生物原料[4]。能源生产包括化石能源和核能、从废物流中获得的可再生能源以及从人类和动物劳动中获取的能源。在能源和水消耗方面，每一类能源都有其生产成本负担。FEW系统里的水

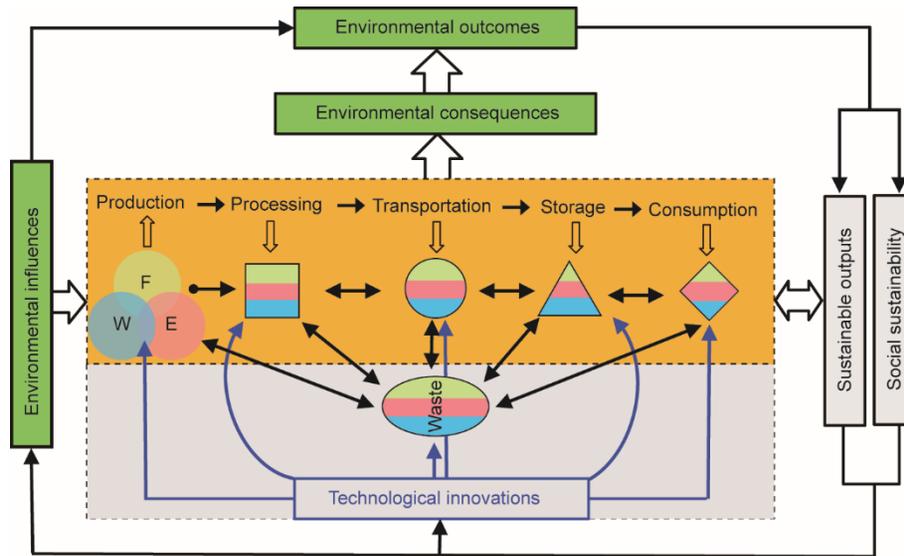


图1. 优先考虑FEW系统与环境（绿色）、经济（黄色）和社会（灰色）间互动关系的研究企业框架。矢量代表可量化的物质、信息和能量流。经济系统中的三色图形说明了与供应链各个阶段相关的FEW关系的差异。

要素代表了所有水资源，包括地表水、地下水、土壤水、再生水、海水以及食物和能源生产过程中产生的废水。这些水的来源和用途可以相互关联，而最重要的是根据当地、区域和国家的需求，找到平衡方法[18]。

食物加工的形式和相关的水消耗的形式是多种多样的，从农产品清洗到更复杂的碾磨、酿造、烘焙和屠宰加工。加工处理可以在现场或非现场（如家庭）进行，并可能会产生能源成本。几乎所有的能源类型，包括电力，都需要一定程度的处理加工，这可能涉及升压和降压变压器、光伏整流器、石油精炼及气体净化等。能源加工处理包括本地加工或远程加工。根据最终用途的不同，水资源通常需要经过处理才能达到特定用途的质量标准。例如，半导体制造商和巧克力糖果行业需要无颗粒或无菌工艺用水。然而，灌溉和畜牧用水不受监管，导致水资源质量参差不齐、质量低下。

为了匹配供需时空分布不均的情况，需要大规模、长期储存原料。为了保障产品质量，通常需要进行湿度控制和熏蒸[19]。常规办法有：建设青贮壕储存未加工的原料（如谷物）或已加工的材料，建设配送中心冷藏、冷冻储存库。将空气控制技术应用于水果、蔬菜的长期储存或者定向成熟。短期零售储存使用添加剂（如抗氧化剂和催熟剂）也是常见的做法。根据冷藏条件和食物类型，消费者存储食物的时间范围可从几个小时到几周、几个月不等。

运输贯穿了FEW产品供应链的所有阶段。在美国，食物从农场到达餐桌要经过大约2400 km。长途运输中每1 kcal (1 kcal=4.184×10³ J) 食物能量要消耗大约10 kcal 化石燃料能源[20]。因此，通过增加本地食物供应，缩短

食物里程，对于减少食物系统的碳足迹非常重要。2020年，美国运输人员与货物消耗的能源约占全国能源消耗总量的26%，其中石油约占美国运输部门能源消耗总量的90% [21]。严重依赖化石燃料导致温室气体排放量大幅上升，同时，也刺激了人们发展和采用环保交通方式。例如，2020年，90%的国际贸易由水路运输，二氧化碳排放量是空运的1/50。近年来，随着越来越多的国家制定了更严格的空气质量标准和减排目标，电动汽车的需求迅速增加。因此，FEW供应链未来可能会受到快速发展的电动汽车市场的冲击。

消费，包括人类消费和动物消费，代表了FEW产品的最终用途。动物消费包括牲畜、家禽、水产养殖饲料和宠物食品。FEW产品的消费还包括如工业原料和生物燃料等相互竞争的非人类需求。然而，在工业化国家（如美国）供人类消费的食物中，有三分之一被浪费[22]。消费在FEW流量中占有很大足迹，也是导致区域和全球层面EES发展失衡的主要力量[4,23]。例如，1995—2015年期间，亚太国家内部的区域贸易加剧了该地区的经济和环境的不平等[23]。高收入国家把环境负担（如用水量）转移到低收入国家的同时获取了经济利益。

2.3. 环境系统

FEW纽带关系与环境系统有着稳固的反馈互动关系，具体表现在环境影响、环境后果和环境效果三个方面。环境影响主要是由人口增长和气候变化引起的。例如，人口增长给FEW系统的安全和可持续性带来了巨大压力，需要把更多的边际土地变成耕地[24]。全球气温上升和极端

气候事件频率上升的纵向影响更增加了这种压力[13]。这些影响正改变着生态过程、生态功能和生态机制（如动植物病虫害、有毒有害植物种类以及病原体的程度和范围）[25–26]。为了保持农业生产率和盈利能力，农民采取了应对措施，如增加营养改良剂、农药、抗生素和激素的使用量。然而，农用化学品对动植物群落、土壤健康与肥力具有毒副作用。这些措施可能会造成一系列环境后果，如降低FEW系统提供商品和服务的能力，降低水质，增加温室气体（如甲烷和一氧化二氮）的排放量。由这些环境后果导致的反馈影响又会进一步加剧气候变暖和水资源短缺。与此类反馈回路相关的科学知识仍处于发展过程，因此FEW系统和环境系统间的相互作用无法被预测，也不能被政策制定者理解，同时也很难向主要利益相关者、生产者和公众传达。这种不确定性正在引发各种环境效果，包括社会经济变化、土地利用模式的改变、FEW资源的强化开发（如城市农业）[7]。然而，这些变化的程度取决于难以预测的社会经济因素[27,33]，如消费者的适应性行为和FEW消费选择的改变[25,28]。

2.4. 社会系统

社会行为对FEW纽带关系有巨大影响，也影响着废物管理、技术创新、可持续产出和社会福利的可持续性。废物的产生和消耗贯穿于FEW系统的全部要素。大多数食物的生产和加工、能源生产以及某些特定水源的生产过程（如海水淡化过程）都会产生废水流。事实上，不管是液体能源的生产、加工和运输，还是燃烧化石燃料的能源工厂（如煤灰和洗涤剂废物流）、核设施（如热水排放），都会产生大量废水。食品废物因产品类型和在供应链的分布状况不同而有很大差异。例如，谷物在田间的损失不成比例，而蔬菜主要在零售或个体经济中损失严重[29]。

技术创新开发了许多新型加工方法和新产品，例如，利用藻类生产氢气和碳氢化合物，通过电合成捕获二氧化碳和合成燃料，改良耐胁迫（如耐干旱）植物，开发更高效的肉类生产方法及其替代方法。废弃材料的回收利用和再生的优点已在FEW系统全部要素中得以显示。由于当前的技术发展（如人工智能），建筑环境中的粮食生产能力将大大促进城市农业的增长[30]，同样，这些技术也会促进环境恶劣、污染严重地区的农业生产，例如，纳米集成技术可以大大提高废水处理、海水淡化和太阳能电池发电的效率，从而在不利的环境条件下也可以生产粮食。其他技术（如基因编辑技术和数字技术）在加强FEW纽带关系方面也有很大的潜力，例如，最小化不利的自然条件（疾病传播和极端气候事件）给作物带来的负面影响，减

少化学肥料的使用量，以及增加生态系统服务价值[31]。

FEW系统的可持续产出包括营养丰富、种类繁多的食物及必要的能源和饮用水，而不会损害关键的生态系统服务（如清洁空气）或侵犯社会群体的文化遗产[32]。同时，FEW资源必须在不侵犯国家主权的情况下满足能源需求和水需求，然而这一政治问题尚未得到解决。为了改善人类对环境和生态系统健康造成的现有负面影响，有必要从可持续发展的角度看待FEW系统[33–34]。从自然生态系统的角度来看，“以满足人类需求为目的的粮食生产永远不可能是真正可持续的”这一观点存在争议。因此，针对该问题，FEW纽带关系解决方案必须确保生态系统的功能和服务在地方、区域和全球层面都得到维护。为了做到这一点，实施不同多尺度和规模的工程干预非常关键[18]。这些干预措施会提高科学认识，能够在短期内提供工程解决方案，并推动自然生态系统向具有低FEW足迹的管理生态系统（如城市农业）过渡。传统环保主义者可能无法接受这种发展方向，因此，这可能会引发一场论战以确定“低足迹”的含义。关注政策制定者如何在国际层面上平衡利益相关者的利益，并最终在全球范围内提供解决FEW纽带关系的解决方案，将是一件非常令人感兴趣的事情。

社会可持续性决定了FEW纽带关系解决方案的前途命运。科学家、政策制定者和普通民众都必须理解且认同FEW倡议[13,35]，才能做出真正的改变。我们希望能够从公众参与及其外展服务活动中获悉公众需求，了解公众关心的问题，进而对国际研究界专家的发现和建议提供有效补充和支持。如果广大民众不能理解，即便是最好的模型也不会产出任何结果。国际FEW议程需要得到全球范围（既包括地理层面，又包括社会层面）的认可。此外，为了获得成功，该议程必须涉及社会各阶层，不排除任何利益相关群体[36]。

3. FEW组织化研究的可扩展性

FEW系统和ESS系统间的相互作用构成了网络，该网络的层次结构如图1所示。该框架为一些方法提供了一般性指导，如有逻辑地识别知识缺口，从管理效率角度界定部门间关系，以及从跨学科角度确定FEW纽带关系的优先次序。应用该框架时，需要考虑到不同尺度的差异、交互和权衡，例如，从地方到国家再到国际，维持人口所需的可用FEW资源的数量和质量都存在差异。这种差异与食物的农业生产相关，但与经济、行为和政治因素的相关性更大。农业需要的能源和水资源的竞争，以及各国之

间不平衡的粮食和能源贸易，加剧了这种差异[27]。在短时间内，作为循环经济核心的废物最少化、资源回收和再利用会在改善FEW资源可用性的不平等方面发挥更重要的作用。当然，在社会学和行为学意义上接受什么是合适的FEW产品是缩小差距的先决条件[27]。简单的消费者偏好，如喜欢无瑕疵产品胜过瑕疵品，接受或拒绝转基因食品，喜好可追溯和可认证的食品胜过传统供应的食品，可能完全被不同的营销方式（如全球供应链中的利基市场）、生产方法（如使用已处理水）和（或）政治理由驱动。

可持续发展的成本取决于从地方到国际不同尺度上获取和竞争FEW资源的情况（图2）[33]。在较小的尺度上，FEW资源的可及性是有限的。这种限制可能因当地水资源和土地资源的高度开发、部门间的竞争、废物积累和供应链过短而恶化。在此类ESS系统里，FEW资源的可及性低，一般来说，其应对挑战（如气候变化和经济萧条）的适应力也不高，最终会导致可持续发展的成本增加。例如，处于极度干旱地区的卡塔尔提高食物的自给自足程度需要消耗大量的水和能源。最近一项评估指出[5]，自给自足程度每增加25%，其用水量便会增加82%，地下水开采需要增加82%的能源使用量，粮食生产需要增加97%的能源使用量，土地资源需要增加153%。显然，粮食生产对当地水资源和能源资源的依赖是不可持续的。采用新技术（如滴灌技术和节水技术）可能有助于降低成本，另一个解决方案是改善贸易战略，增加粮食进口量并采用多样化进口形式。相比之下，在更大的尺度上，通过供应链更容易对FEW资源及其供应进行协调。补充性供应不仅有助于避免过度消耗当地的FEW资源和产品，还能提高FEW系统对压力源的适应能力。因此，扩大FEW网络的尺度可以降低可持续发展的成本。为了进一步说明

过量的水需求已经影响到全球主要人口中心，一些国家（如孟加拉国）研究了限制高耗水作物在干旱地区生产的方案，这样可以为其他关键用途节省水资源，同时不会影响该国家实现农业自给自足的目标[37]。还有一些国家（如中国）将其FEW网络扩大到全球范围，进口高耗水食品（如谷物）、石油和天然气，为其他部门节省当地水资源[4]。这种选择表明全球社会有能力适应当前的人口结构，并通过区域或世界贸易伙伴关系战略性地转移气候变化的影响。全球化在发达国家和发展中国家中都带来了积极的经济改善，全球化让发达国家从全世界获取资源，也减少了发展中国家对非耕地土地的开发并扩大了自然造林的规模[38]。然而，全球可持续性具有巨大的不确定性，并与每个国家的FEW资源可及性息息相关[39]，发展中国家和发达国家之间对FEW产品的净储蓄贸易对于实现联合国可持续发展目标尤为关键。因此，在应用时，FEW的组织化研究应从战略和战术上充分考虑与尺度相关的不确定性，如进口低水足迹的食物和能源，以及采用低能源足迹的水源用于食物生产[4,40]。如图2所示，通过减少消耗、平衡各部门的管理、发展循环经济和扩大供应链网络来有效利用资源，是增加FEW资源的可用性并降低可持续发展成本的关键。有充分的资料显示，减少原材料和能源消耗可以减少废物（如塑料）的产生，循环经济则是后备计划，用于回收FEW生产的废物[14]。利用以政策为基础的协调方法，跨部门管理FEW资源，可以极大地提高FEW生产的效率，同时加强自然资源保护，例如，埃塞俄比亚、埃及和尼泊尔已经建立了新的部级政府机构，以协调农业中的水和能源的使用[8]。通过FEW产品贸易的区域化和全球化来扩展供应链，是发展资源节约型社会的一种低成本方法[32,38,40]。

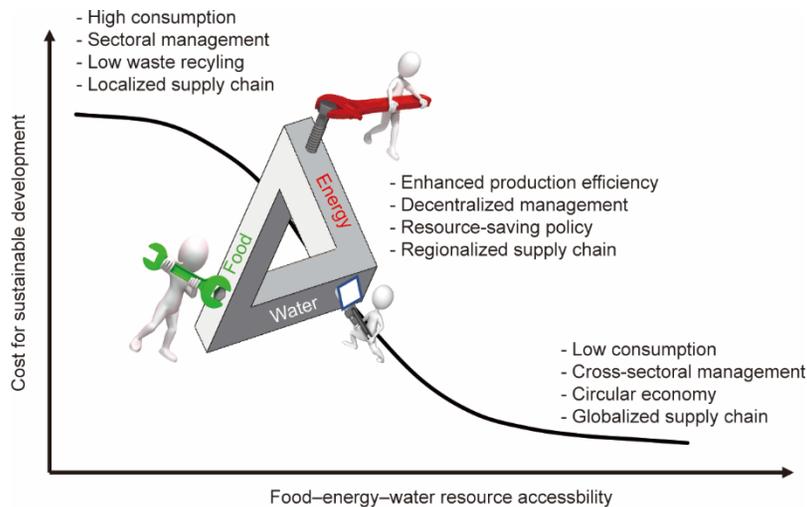


图2. 食物-能源-水资源可及性与可持续发展成本之间的关系及其在不同层次上的相关影响因素。

4. 结论

FEW 元素和相互作用贯穿了整个 ESS 系统。这种复杂性对明确界定 FEW-ESS 的关系及其模拟模型提出了挑战。本文提出的组织化研究框架试图定义 EES 系统和 FEW 系统组成部分之间的相互关系，并重点强调对二者关系起支配作用的系统内和系统间的反馈。EES 系统包括经济过程（生产–加工–运输–储存–消费）、环境变化（影响–后果–效果）和社会动机（技术–产出–可持续），并与 FEW 资源的生产和消费交织在一起。从网络视角（即系统与系统之间的联系）看，在社会经济适应日益增长的粮食需求和气候变化的背景下，组织化努力优先发展共享的战略愿景，以应对从地方到全球范围内 FEW 组带的不可预测性。随着已知的及未知环境后果的出现，跨学科网络组织化研究努力被认为具有扩大 FEW 研究任务和相关活动，并对其进行优先排序的作用（例如，基于废物的粮食生产和人工环境中的农业），此外，组织化努力还可以减少不同社区在 FEW 安全方面的差异（如全球与当地采购的食品），并加速所有利益相关者（包括公众）对 FEW 纽带关系政策的接受。

Acknowledgements

This work was supported by the US National Science Foundation (CBET-1739474 and CBET-2021956). The authors are grateful for the constructive comments of anonymous reviewers.

Compliance with ethics guidelines

Jie Zhuang, Frank E. Löffler, and Gary S. Saylor declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Bleischwitz R, Spataru C, VanDeveer SD, Obersteiner M, van der Voet E, Johnson C, et al. Resource nexus perspectives towards the United Nations sustainable development goals. *Nat Sustain* 2018;1(12):737–43.
- [2] Young OR, Guttman D, Qi Ye, Bachus K, Belis D, Cheng H, et al. Institutionalized governance processes: comparing environmental problem solving in China and the United States. *Glob Environ Change* 2015;31:163–73.
- [3] Ghodsvali M, Krishnamurthy S, de Vries B. Review of transdisciplinary approaches to food-water-energy nexus: a guide towards sustainable development. *Environ Sci Policy* 2019;101:266–78.
- [4] 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.
- [5] Daher BT, Mohtar RH. Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water Intl* 2015;40(5–6):748–71.
- [6] Mohtar RH, Lawford R. Present and future of the water-energy-food nexus and the role of the community of practice. *J Environ Stud Sci* 2016;6(1):192–9.
- [7] 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.
- [8] Rasul G, Neupane N. Improving policy coordination across the water, energy, and food, sectors in South Asia: a framework. *Front Sustain Food Syst* 2021;5:602475.
- [9] Mohtar RH. An Integrated Sustainability Index for Effective Water Policy. In: Initiative TWEFW, editor. *Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus*. Washington: Island Press; 2011. p. 217–9.
- [10] Mahlknecht J, González-Bravo R, Loge FJ. Water–energy–food security: a nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy* 2020;194:116824.
- [11] Jha K, Doshi A, Patel P, Shah M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artif Intell Agric* 2019;2:1–12.
- [12] Jung J, Maeda M, Chang A, Bhandari M, Ashapure A, Landivar-Bowles J. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. *Curr Opin Biotechnol* 2021;70:15–22.
- [13] Rasul G, Sharma B. The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change. *Clim Policy* 2016;16(6):682–702.
- [14] Albrecht TR, Crotoof A, Scott CA. The water-energy-food nexus: a systematic review of methods for nexus assessment. *Environ Res Lett* 2018;13(4):043002.
- [15] Daher BT, Mohtar RH, Lee SH, Assi A. Modeling the water-energy-food nexus: a 7-question guideline. In: Salam PA, Shrestha S, Pandey VP, Anal AK, editors. *Water-Energy-Food Nexus: Principles and Practices*. Washington D.C.: Wiley; 2017. p. 57–66.
- [16] Anser MK, Yousaf Z, Usman B, Nassani AA, Qazi Abro MM, Zaman K. Management of water, energy, and food resources: go for green policies. *J Cleaner Prod* 2020;251:119662.
- [17] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects: Data Booklet*. ST/ESA/SER.A/424. 2019.
- [18] Scanlon BR, Ruddell BL, Reed PM, Hook RI, Zheng C, Tidwell VC, et al. The food–energy–water nexus: transforming science for society. *Water Resour Res* 2017;53(5):3550–6.
- [19] Zhang S, Zheng M, Zhai H, Ma P, Lyu Y, Hu Y, et al. Effects of hexanal fumigation on fungal spoilage and grain quality of stored wheat. *Grain Oil Sci Technol* 2021;4(1):10–7.
- [20] Schnell SM. Food miles, local eating, and community supported agriculture: putting local food in its place. *Agric Hum Values* 2013;30(4):615–28.
- [21] U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, Independent Statistics & Analysis. (April 2021). *Use of Energy Explained: Energy Use for Transportation*. Retrieved from <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation.php>.
- [22] Shepon A, Eshel G, Noor E, Milo R. The opportunity cost of animal-based diets exceeds all food losses. *Proc Natl Acad Sci USA* 2018;115(15):3804–9.
- [23] Yang L, Wang Y, Wang R, Klemes JJ, de Almeida CMVB, Jin M, et al. Environmental-social-economic footprints of consumption and trade in the Asia-Pacific region. *Nat Commun* 2020;11:4490.
- [24] Schröder P, Beckers B, Daniels S, Gnädinger F, Maestri E, Marmiroli N, et al. Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe—A vision how to mobilize marginal lands. *Sci Total Environ* 2018;616–617:1101–23.
- [25] Wong BBM, Candolin U. Behavioral responses to changing environments. *Behav Ecol* 2015;26(3):665–73.
- [26] Yan Y, Wang YC, Feng CC, Wan PH, Chang KT. Potential distributional changes of invasive crop pest species associated with global climate change. *Appl Geogr* 2017;82:83–92.
- [27] Olawuyi D. Sustainable development and the water-energy-food nexus: legal challenges and emerging solutions. *Environ Sci Policy* 2020;103:1–9.
- [28] Kibler KM, Reinhart D, Hawkins C, Motlagh AM, Wright J. Food waste and the food–energy–water nexus: a review of food waste management alternatives. *Waste Manage* 2018;74:52–62.
- [29] De Laurentiis V, Corrado S, Sala S. Quantifying household waste of fresh fruit

- and vegetables in the EU. *Waste Manage* 2018;77:238–51.
- [30] Zhong T, Si Z, Shi L, Ma L, Liu S. Impact of state-led food localization on suburban districts' farmland use transformation: greenhouse farming expansion in Nanjing city region. China. *Landsc Urban Plan* 2020;202:103872.
- [31] Heeb L, Jenner E, Cock MJW. Climate-smart pest management: building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *J Pest Sci* 2019;92(3):951–69.
- [32] Deng HM, Wang C, Cai WJ, Liu Y, Zhang LX. Managing the water-energy-food nexus in China by adjusting critical final demands and supply chains: an input-output analysis. *Sci Total Environ* 2020;720:137635.
- [33] 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.
- [34] Slorach PC, Jeswani HK, Cuéllar-Franca R, Azapagic A. Environmental sustainability in the food-energy-water-health nexus: a new methodology and an application to food waste in a circular economy. *Waste Manage* 2020;113:359–68.
- [35] van Gevelt T. The water-energy-food nexus: bridging the science–policy divide. *Curr Opin Environ Sci Health* 2020;13:6–10.
- [36] Liebenguth J. Conceptions of security in global environmental disclosures: exploring the water-energy-food security nexus. *Crit Stud Secur* 2020;8(3):189–202.
- [37] Akanda MAI. Seasonal and regional limits to growth of water-intensive crop farming in Bangladesh. *Sustain Water Resour Manag* 2019;5(2):817–30.
- [38] Nathaniel SP, Nwulu N, Bekun F. resourceNatural, globalization, urbanization, capitalhuman, and environmental degradation in Latin American and Caribbean countries. *Environ Sci Pollut Res* 2021;28(5):6207–21.
- [39] Yu L, Xiao Y, Zeng XT, Li YP, Fan YR. Planning water-energy-food nexus system management under multi-level and uncertainty. *J Clean Prod* 2020;251:119658.
- [40] Shtull-Trauring E, Bernstein N. Virtual water flows and water-footprint of agricultural crop production, import and export: A case study for Israel. *Sci Total Environ* 2018;622-623:1438–47.