

DOI: 10.20103/j.stxb.202406081329

丁童慧, 陈军飞, 嵇娟, 杨欣泽. 水-能源-粮食纽带关系与生态系统服务耦合研究进展. 生态学报, 2025, 45(6): 3032-3045.

Ding T H, Chen J F, Ji J, Yang X Z. Research progress and prospect of the coupling between water-energy-food nexus and ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 3032-3045.

水-能源-粮食纽带关系与生态系统服务耦合研究进展

丁童慧¹, 陈军飞^{2,3,4,*}, 嵇娟², 杨欣泽⁵

1 河海大学经济与金融学院, 常州 213200

2 河海大学商学院, 南京 211100

3 生态文明建设与流域保护研究院, 南京 210098

4 江苏长江保护与高质量发展研究基地, 南京 210098

5 澳大利亚国立大学商业与经济学院, 堪培拉 ACT 2600

摘要: 开展水-能源-粮食纽带关系 (Water-energy-food nexus, WEF-Nexus) 与生态系统服务耦合研究已成为当前国内外研究的热点和重点话题。在解读 WEF-Nexus、生态系统服务以及二者耦合概念内涵的基础上, 从耦合关系、耦合系统、耦合管控三个维度对 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究进展进行了总结和梳理, 并探讨了目前二者耦合研究存在的不足及未来展望。结果表明, 现有耦合研究主要聚焦 WEF-Nexus 与生态系统服务作用关系和供需关系的分析与探讨、水-能源-粮食-生态耦合系统的构建与评估、耦合系统管控新理念和新技术的提出等。然而, 目前 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究仍处于起步阶段, 尚且缺乏揭示二者交互耦合关系及作用机理的理论体系和技术方法, WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统构建及演化机制分析较欠缺, 面向资源环境决策管理的实践应用较薄弱。因此, 以“耦合关系识别-耦合机理分析-耦合过程与格局刻画-耦合管理应用”为研究脉络, 探索构建了未来 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究框架, 并提出未来研究应更加关注 WEF-Nexus 与生态系统服务互动耦合机理探究、WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统构建及其协同演化机制分析以及面向国土空间管控决策的实践应用, 以期满足生态文明建设和美丽中国建设等国家战略需求。

关键词: 水-能源-粮食纽带关系; 生态系统服务; 人地关系理论; 耦合研究

Research progress and prospect of the coupling between water-energy-food nexus and ecosystem services

DING Tonghui¹, CHEN Junfei^{2,3,4,*}, JI Juan², YANG Xinze⁵

1 School of Economics and Finance, Hohai University, Changzhou 213200, China

2 Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China

3 Institute for Ecological Civilization Construction and Watershed Protection, Nanjing 210098, China

4 Jiangsu Research Base of Yangtze Institute for Conservation and High-quality Development, Nanjing 210098, China

5 College of Business and Economics, The Australia National University, Canberra ACT 2600, Australia

Abstract: Investigating the interlinkages between the water-energy-food nexus (WEF-Nexus) and ecosystem services has emerged as a significant and trending topic worldwide. Drawing on the conceptual understanding of the WEF-Nexus, ecosystem services, and their interplay, this paper reviews the research advancements in the nexus's coupling with ecosystem services across three dimensions: relationship, system, and management. The paper then investigated the deficiencies of the current research on the coupling between the WEF-Nexus and ecosystem services, and discussed the future prospects. The

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071278)

收稿日期: 2024-06-08; **网络出版日期:** 2024-12-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenjunfei@hhu.edu.cn

results showed that the current coupling research mainly focused on analyzing the interactions and supply-demand dynamics between the WEF-Nexus and ecosystem services, developing and assessing water-energy-food-ecology coupling systems, and introducing novel concepts and management strategies for these systems. However, the current research on the coupling between the WEF-Nexus and ecosystem services remains in its nascent phase. There is a lack of theoretical system and technical approaches to reveal the interactive coupling relationship and action mechanism between the WEF-Nexus and ecosystem services. The establishment and mechanism analysis of the WEF-Nexus-ecosystem services coupling system are lacking, and the practical application of this coupling system is weak. Therefore, grounded in the research context of “coupling relationship identification-coupling mechanism analysis-coupling process and pattern characterization-coupling management application”, we constructed a future research framework on the coupling between the WEF-Nexus and ecosystem services. In addition, it was also proposed that the future research should pay more attention to the exploration of the interaction and coupling mechanism between the WEF-Nexus and ecosystem services, the construction of WEF-Nexus-ecosystem services coupling system and its co-evolution mechanism analysis, and the practical application for territorial space management, so as to meet the national strategic requirements of ecological civilization construction and Beautiful China initiative.

Key Words: water-energy-food nexus; ecosystem services; human-land relationship theory; coupling research

生态系统能够为人类生产生活提供各种生态产品和服务,这将有助于提升人类福祉^[1]。生态系统通过提供一系列如淡水资源供应、粮食生产、碳储存、土壤肥力维持等关键生态产品和服务,支持和保障了区域水、能源、粮食的生产、利用和管理等过程的正常运行^[2]。然而,在全球城镇化、人口增长和气候变化等多重因素影响下,人类对水、能源和粮食的需求不断增加,加剧了三者之间的竞争矛盾,而这种竞争也通过排放温室气体、破坏生态承载力等方式对当地生态系统产生影响^[3]。另一方面,快速城镇化发展也显著改变了区域生态系统的结构和功能,造成了区域生态系统退化^[4-5],进而影响了区域生态系统提供与水、能源和粮食相关的生态产品和服务的能力,区域生态系统退化与资源需求提升之间的矛盾日益激化。在此背景下,党的二十大报告指出“必须牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,加快推进各类资源集约节约利用,深入推进生态系统保护和修复工作”。因此,如何寻求自然资源与生态系统的科学协调发展道路,不断改善城市化进程中日益严峻的资源短缺与生态退化问题,既符合我国生态文明建设的国家战略需求,也符合可持续发展的时代主题。

2011年德国波恩会议首次将水、能源和粮食三者之间相互依存、紧密交织的作用关系总结为一种纽带关系,即水-能源-粮食纽带关系(Water-energy-food nexus, WEF-Nexus)^[6],自此掀起了WEF-Nexus的研究热潮^[7-10]。国内外学者围绕WEF-Nexus的概念内涵^[11]、理论框架^[12]、系统安全^[13]、协同效率^[14]和优化路径^[15]等方面开展了一系列研究,并对WEF-Nexus系统的弹性^[16]、可持续性^[17]和协调性^[18]进行了整体评估。生态系统服务是生态系统功能或过程为人类直接或间接提供的各种生态产品和服务^[19],其既是连结自然生态系统与人类社会系统的桥梁和纽带^[20],也是提升人类福祉的重要基础^[21]。自千年生态系统评估以来,学者们在生态系统服务的量化测度^[22-23]、权衡/协同^[24-25]、供需流动^[26-27]、实践应用^[28-29]等方面取得了丰富的研究成果。随着WEF-Nexus与生态系统服务研究的不断深入,学者们开始关注二者交互作用关系的探析^[30-31],主要包括生态系统服务对WEF-Nexus内资源要素供给及其可持续的影响^[32]、WEF-Nexus的发展状况对生态系统服务的反馈^[33]以及将生态系统纳入WEF-Nexus研究框架以评估水-能源-粮食-生态耦合系统协调特征^[34-35]等。然而,现有针对WEF-Nexus与生态系统服务相互作用关系的研究仍较为浅显,缺乏对二者耦合作用机理、耦合时空格局及作用过程的直接测度。随着快速城镇化和工业化过程中WEF-Nexus与生态系统服务失调现象频发,如何尝试以“耦合”为方法论探寻WEF-Nexus与生态系统服务的动态关系,推动二者协调可持续发展,成为当前研究的重点和前沿问题。

基于此,本文在系统回顾 WEF-Nexus、生态系统服务以及二者耦合概念内涵的基础上,从耦合关系、耦合系统、耦合管控三个维度对 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究进行重点梳理,归纳凝练出二者耦合研究的核心问题及不足,由此提出基于人地关系理论的 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究新思路,并探讨下一步研究方向,以期为解决区域生态系统退化与人类需求增长之间的矛盾、实现区域自然资源与生态环境协调可持续发展战略提供理论参考。

1 概念溯源

1.1 WEF-Nexus

纽带关系概念起源于 1983 年联合国大学发起的“能源-粮食纽带关系计划”^[36],其指的是不同子系统的相互关联性。纽带关系研究旨在从整体角度探究复杂系统内不同子系统之间反馈循环、权衡协同的关联关系,从而寻求跨部门协作方式管理两个或多个子系统的相互关系^[37]。早期纽带关系研究主要集中在水-能源、水-粮食以及能源-粮食等两两资源子系统的关联分析上^[38],如 Scott 研究了墨西哥水与电力的关联关系^[39]。水、能源和粮食是提升人类福祉、促进社会经济可持续发展的重要资源,三者在生产、消费与管理等过程中存在错综复杂的关联关系。2008 年世界经济论坛正式承认了水、能源和粮食关联关系的重要性^[40]。2011 年德国波恩会议正式提出了 WEF-Nexus,旨在解决水、能源和粮食之间权衡取舍和潜在冲突问题,从而应对全球水、能源和粮食安全挑战^[6]。

目前,国内外学者主要基于联系论、方法论和系统论三个维度解读了 WEF-Nexus 的概念内涵^[41]。联系论维度通过揭示水、能源和粮食不同部门的相互关联关系来把握 WEF-Nexus 的整体特征,如《亚太地区水-能源-粮食纽带关系报告》阐述了水、能源和粮食在时空尺度上具有紧密关联关系^[42];Cai 等^[43]分别从物理、生物、化学等相互关联过程、资源生产过程中的投入产出关系、制度、市场和基础设施主导的相互作用等方面阐述了水、能源和粮食相互作用、相互关联过程。方法论维度将 WEF-Nexus 视为用于描述和量化水、能源和粮食相互关联、权衡/协同作用关系的一种分析方法^[44],如 Jones-Crank^[45]将 WEF-Nexus 定义为一种提高整体系统可持续性的综合治理方法,并分析了如何将 WEF-Nexus 协同治理应用于新加坡可持续性研究。系统论维度认为 WEF-Nexus 是由水、能源和粮食子系统构成的耦合系统,任何子系统发生变化都有可能引起其他子系统变化^[46-47],如 Foran^[48]定性分析了 WEF-Nexus 耦合系统的复杂特性以及区域特征,并在此基础上制定了加强区域 WEF-Nexus 可持续管理的政策措施。

总的来说,水、能源和粮食子系统中物质流、能量流和信息流的投入产出关系错综复杂地交织在一起,构成了对可持续发展至关重要的 WEF-Nexus 耦合系统^[49]。因此,通过对耦合系统内资源要素进行优化配置,能够最大限度地提高资源利用效率、保障资源供给安全、推动水、能源和粮食三者之间的协同演化,从而促进 WEF-Nexus 的可持续高质量发展。

1.2 生态系统服务

生态系统服务概念最早由 Westman^[50]提出,之后 Ehrlich 和 Mooney^[51]使用生态系统服务概念来指代物种的灭绝及其将对人类福祉产生的影响,随后 Daily^[52]和 Costanza 等^[19]进一步推动了生态系统服务研究的发展。其中,Daily^[52]明确了生态系统服务的具体研究内容,而 Costanza 等^[19]在全球范围内测算了生态系统服务的价值量。Costanza 等^[19]将生态系统服务定义为生态系统形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用,是人类直接或间接从生态系统中获得的产品或惠益^[52]。千年生态系统评估将生态系统服务定义为功能正常的生态系统对人类福祉做出的直接和间接贡献,并从功能角度将生态系统服务分为供应服务、调节服务、支持服务和文化服务四类^[53]。

自《千年生态系统评估报告》发布以来,生态系统服务供给成为衡量生态系统质量和健康的关键指标之一,其研究在过去二十年里得到迅速发展^[54]。生态系统服务供给是指在某一时间某一区域内自然生态系统为人类社会系统提供各种生态产品和服务的能力或潜力,由生态系统质量和数量决定,并受外部因素和人类

管理活动的影响^[55-56]。随着人口增长和城镇化发展对自然资本的影响加剧,生态系统服务需求研究逐渐受到关注。生态系统和生物多样性经济学指出,人类利益相关者的社会经济活动产生了对生态系统服务的巨大需求,如水资源、原材料和食物等的需求。目前,关于生态系统服务需求的概念解读主要有三种,第一种认为需求是指在某一时间某一区域内人类使用或消耗的所有生态产品和服务,由个人和群体的社会经济活动决定^[57];第二种认为需求是指人类社会对生态系统服务特定属性的偏好水平^[58];第三种认为需求是指某一地区已经消费的或希望获得的生态产品和服务的总和^[59]。

总的来说,自然生态系统为人类社会系统提供了重要的生态产品和服务,对提升人类生计、健康和生存等一系列福祉至关重要。然而,随着资源消耗增长、环境污染严重和气候变化加剧等,人类从自然生态系统中获得的生态产品和服务逐渐减少。因此,生态系统服务作为连接自然生态系统与人类社会系统的桥梁,其有效管理是人类福祉得到满足的重要保障,也是实现可持续发展目标的重要基础。

1.3 WEF-Nexus 与生态系统服务的耦合

WEF-Nexus 是由水、能源和粮食相互影响、相互作用而成,其被认为是推动人类社会系统可持续发展的有效概念工具^[12]。生态系统在应对区域生态安全挑战以及制定可持续的和有战略性的区域规划方面发挥至关重要的作用^[60],而生态系统服务是生态系统功能或过程所提供的各种对提升人类福祉有益的生态产品和服务。已有研究指出,WEF-Nexus 内资源要素的生产、开发和利用等过程需要生态系统服务提供支持^[61],如淡水资源供给服务和其他生态系统服务是能源开发和粮食生产的重要投入要素。另一方面,与 WEF-Nexus 生产、利用与管理等过程相关的人类活动产生了对相关生态系统服务的需求^[30],如工业用水、农业用水和生活用水等过程产生了产水服务需求,能源消耗所产生的碳排放产生了固碳服务需求,粮食消耗产生了粮食生产服务和土壤保持服务需求等。由此可见,WEF-Nexus 与生态系统服务之间具有紧密交互的耦合作用特征,WEF-Nexus 内资源要素是生态系统提供的重要生态产品,而与 WEF-Nexus 相关的人类活动将对生态系统服务的稳定供应产生影响^[62]。因此,如何开展 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究以促进区域自然资源和生态环境协调可持续发展是亟待探讨的重要话题。

总的来说,当前 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究偏向于某一方面(如单一的 WEF-Nexus 或是生态系统服务评估研究),忽视了二者耦合研究的广度和深度,且在实践应用上存在短板,如在与国土空间规划决策的结合上。因此,亟需厘清 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究发展脉络,探析现有研究不足,并展望未来研究趋势。

2 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究进展

本文从耦合关系、耦合系统、耦合管控三个维度对现有 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究成果进行了梳理和总结,尝试厘清近年来 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究的主要内容、思路和发展趋势。

2.1 耦合关系研究

2.1.1 WEF 耦合关系研究

“耦合”起源于物理学领域,其指的是两个或多个子系统以不同方式交互作用而彼此影响的现象^[63]。WEF 耦合是指水、能源和粮食子系统相互依赖、相互影响的交互作用关系^[64],如水力发电、火电冷却和煤炭开采等能源生产过程,以及化石燃料的提取、精炼和加工等过程依赖于水资源供给,全球约 15%的取水量用于能源生产^[65];水资源的提取、分配和再利用等过程依赖于能源消耗,全球约 8%的能源产量用于水资源开发利用等^[66];粮食的全生命周期需消耗全球约 30%的能源产量和 70%的取水量^[67-68]。因此,水、能源和粮食三者之间存在显著的耦合关系特征,WEF-Nexus 系统内任意子系统状态发生改变,都有可能对其他子系统产生级联效应,进而对耦合系统整体性能产生影响^[69]。

近年来,WEF 耦合成为研究的热点话题。一是关于 WEF 耦合关系的识别,如 Bazilian 等^[70]描述了水、能源和粮食子系统的相互作用关系,并从能源角度解释了 WEF 耦合关系;Terrapon-Pfaff 等^[71]采用关联评估方

法分析了可再生能源应用与水和粮食之间的耦合关系,结果表明可持续能源项目与粮食和水部门之间存在复杂的联系;Faber 等^[72]辨识了水、能源和粮食三者之间的潜在权衡/协同耦合关系。二是关于 WEF 耦合系统的评估,如 Cheng 等^[18]以可持续发展目标为基础评估了 WEF-Nexus 系统在国家层面上的耦合和协调程度;Wang 等^[73]采用耦合协调度模型和脱钩模型分析了 WEF-Nexus 耦合系统的协调发展水平。三是关于 WEF 耦合系统的仿真预测,如李桂君等^[74]采用系统动力学模型对北京市 WEF-Nexus 耦合系统进行仿真模拟,并预测了水、能源和粮食的变化趋势;孙才志等^[75]通过构建系统动力学模型模拟仿真了西南四省水、能源消耗量以及粮食、水电生产量,并预测了四种情景下 WEF-Nexus 耦合系统的发展趋势。

在 WEF 耦合研究基础上,学界开始分析水、能源、粮食与土地和碳排放之间的相互耦合关系。土地是承载水、能源、粮食及其活动的重要基础^[76],而不同土地利用类型上所开展的社会经济活动和工业过程等会产生大量碳排放,从而对区域生态系统产生影响^[77]。近年来,许多学者探究了土地利用与水-能源-粮食-碳之间的耦合关系,并从不同视角研究了土地利用如何影响碳排放^[78]。Raihan 和 Tuspekova^[79]探讨了可再生能源利用、农业用地扩张和碳排放之间的耦合关系,并为实现碳减排和环境可持续提供了政策建议;Feng 等^[80]利用全生命周期评估分析了水-能源-碳视角下塔里木河流域作物生产系统的耦合协调度;王勇和孙瑞欣^[81]将土地因素纳入 WEF-Nexus 中,并运用耦合协调度模型评估了京津冀城市群水-能源-粮食-土地系统耦合协调的时空演变特征,结果表明土地利用对京津冀城市群 WEF-Nexus 系统及其子系统的协调发展产生了影响。由此可见,探索水、能源、粮食、土地资源的耦合效应及其与碳排放的关系,寻求水、能源、粮食、土地资源的低碳利用模式,对实现双碳目标及缓解全球气候变化具有重要的科学意义。

2.1.2 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合关系研究

WEF-Nexus 与生态系统服务是双向耦合的两个过程,生态系统服务对 WEF-Nexus 内资源要素的供给及其可持续发展起着支持作用,而与 WEF-Nexus 相关的人类活动对生态系统服务的供给能力产生一定的反馈作用。基于此,WEF-Nexus 与生态系统服务耦合作用关系的研究逐渐引起了学者们的关注^[82]。例如, Karabulut 等^[83]和 Jarvie 等^[84]研究发现生态系统为 WEF-Nexus 提供了关键生态系统服务,如水资源、食物和燃料的供给,应将生态系统服务置于该纽带关系的中心^[85];Zhou 等^[86]构建了一个整合 WEF-Nexus 的分析框架,并探讨了 WEF-Nexus 相关胁迫源对多种生态系统服务的动态影响;Liu^[87]研究发现气候变化引起的生态系统服务退化对能源和粮食生产产生了负面影响,而改变能源和粮食的生产管理方式对减缓生态系统服务退化至关重要。此外,部分学者也探讨了 WEF-Nexus 可持续性 with 多种生态系统服务之间的相互作用关系,如 Yuan 和 Lo^[32]分析了主要的生态系统功能如何影响水资源、能源和粮食的可持续性,研究发现生态系统服务是实现 WEF-Nexus 可持续发展的关键要素;Ding 等^[31]研究发现 WEF-Nexus 可持续性 with 多种生态系统服务之间存在复杂作用关系,且二者之间的耦合协调关系也在逐渐改善。

在 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合关系研究的基础上,学者们深入探究了生态系统服务在保障 WEF-Nexus 安全方面的重要性^[88]。例如,Sahle 等^[82]量化和绘制了产水服务和土壤保持服务的供需图以分析区域 WEF-Nexus 安全状况,结果表明生态系统调节服务的退化可能会导致 WEF-Nexus 的不安全发展;Rasul^[89]分析了生态系统服务在维持兴都库什喜马拉雅地区和南亚地区 WEF-Nexus 安全方面所作的贡献,并指出当前纽带关系研究尚未认识到生态系统服务的价值、功能及其在保障 WEF-Nexus 安全方面所发挥的作用;van den Heuvel 等^[90]基于生态系统服务视角评估了瑞典水-能源-粮食-土地-气候关系之间的人为压力和物理作用,并分析了生态系统服务对该纽带关系安全的影响。由此可见,将生态系统服务考虑进 WEF-Nexus 安全分析框架中,揭示水资源、能源、粮食和生态系统服务四者之间紧密的耦合关联关系,有助于推动 WEF-Nexus 与生态系统的安全发展。

随着学界对 WEF-Nexus 与生态系统服务交互耦合关系认识的加深,WEF-Nexus 视角下生态系统服务供需关系研究逐渐受到重视。供需关系是 WEF-Nexus 与生态系统服务交互耦合的重要表现形式,其研究有助于从 WEF-Nexus 视角出发制定生态系统集成管理政策,从而推动 WEF-Nexus 与生态系统服务的协调可持续

发展。例如, Yin 等^[91]基于 WEF-Nexus 视角评估了黄河流域生态系统服务供需时空特征, 结果表明黄河流域不同空间尺度上的生态系统服务供需匹配模式存在较大差异; Ding 等^[30]评估了 WEF-Nexus 视角下城市生态系统服务供需数量及空间关系特征, 结果表明苏州市与 WEF-Nexus 相关的城市生态系统服务处于供不应求状态, 且供需空间错配显著; 张中浩等^[92]基于 WEF-Nexus 视角评估了示范区生态系统服务供需匹配关系, 研究发现 WEF-Nexus 视角下区域生态系统服务供需空间异质性明显。

2.2 耦合系统研究

生态系统作为水、能源和粮食的供应和承载主体, 在实现水安全、能源安全和粮食安全等可持续发展目标方面发挥至关重要的作用。然而, WEF-Nexus 内资源要素的生产、开发、利用和管理等过程将会对生态系统产生压力^[93], 削弱生态系统的自我修复和调节能力, 进而影响生态系统服务的稳定供应, 而这反过来又将对 WEF-Nexus 系统安全构成威胁。基于此, 一些学者逐渐意识到水、能源、粮食和生态系统四者之间存在紧密交互的耦合关系, 水-能源-粮食-生态耦合系统研究开始受到关注^[94]。例如, Martinez-Hernandez 等^[95]使用 NexSym 模拟工具分析了水-能源-粮食与生态系统的交互关系, 为平衡资源供需和增强各子系统协同效应提供了解决方法; Shi 等^[96]基于贝叶斯网络分析了咸海流域水-能源-粮食-生态耦合系统的内在因果关系, 为流域资源与生态管理提供了认知基础; Apeh 和 Nwulu^[97]将生态系统与水、能源、粮食联系起来, 提出了水-能源-粮食-生态耦合系统关系新技术, 并探讨了如何应用耦合系统关系战略以有效加强水、能源、粮食和生态的共存安全。

目前, 关于水-能源-粮食-生态耦合系统的研究重点主要集中在脆弱性评估^[98-99]、耦合协调性评估^[34]和管理策略制定^[100]等方面, 研究方法包括耦合协调度^[101]、贝叶斯网络^[102]和生态循环法^[103]等。例如, Zhang 等^[104]为水-能源-粮食-生态耦合系统研究开发了一个评价指标体系, 并借助耦合协调度模型评估了该系统的耦合协调发展水平; Wang 等^[101]采用耦合协调度模型和空间收敛模型分析了西北地区水-能源-食物-生态系统的动态变化趋势和空间演变特征; Ding 和 Chen^[93]利用压力-状态-响应模型探析了水-能源-粮食-生态系统的内在耦合机制, 并采用耦合协调度模型评估了长江经济带水-能源-粮食-生态系统的耦合协调发展水平。在耦合系统评估基础上, 一些学者对水-能源-粮食-生态耦合系统开展了仿真研究, 如 Ling 等^[105]利用系统动力学分析了水-能源-粮食-生态耦合系统内部的复杂相互作用, 并构建了动态仿真模型, 比较了不同发展情景下耦合系统的发展趋势。然而, 尽管学者在 WEF-Nexus 研究中考虑了生态要素, 但现有研究主要是将生态系统整合进 WEF-Nexus 研究框架中, 缺乏 WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统的构建与演化分析。

2.3 耦合管控研究

随着城镇化和工业化快速发展, 区域生态系统退化与人类需求增长之间的矛盾日益加深, 迫切需要对于 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合状态进行调控管理, 从而为促进资源供需平衡与生态系统可持续发展提供决策依据。在此背景下, 学者们针对 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合关系提出了一系列调控管理的新理念、新方法。在管控理念方面, 部分学者针对 WEF-Nexus 与生态系统服务相互影响、相互制约的耦合关联关系, 提出从 WEF-Nexus 视角干预和调控区域生态系统服务的管理路径, 以期提升区域 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合协调状况^[31, 91]。部分学者提出将生态系统服务纳入 WEF-Nexus 管理中, 探索制定最大化区域整体利益的合作战略, 以解决在地方、流域和区域范围内的自然资源与生态环境供需失衡问题^[106]。在管控技术方法方面, nexus 模拟模型^[95]、贝叶斯网络^[107]等被广泛用于揭示 WEF-Nexus 与生态系统服务之间的交互作用关系, 并在此基础上通过情景分析^[108]、系统动力学模型^[109]、多目标优化模型^[110]等模拟和预测不同发展情景下 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合系统的发展趋势, 为未来区域发展寻求最有效地资源与生态耦合协调管控方案。

在 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合管控的实践研究当中, 主要的耦合管控方式包括生态补偿和政策干预等。其中, 生态补偿实践通常与生态系统服务付费密切相关, 其在遵循“谁受益、谁补偿; 谁污染, 谁付费”的原则基础上, 通过经济手段调整利益相关者的利益, 从而维持和改善生态条件^[111]。目前, 学者们已经在水

资源管理^[112]、耕地保护^[113]、碳减排^[114]等领域开展了生态补偿研究,并探讨了如何通过付费方式来实现资源管理与生态保护^[115]。另一方面,政策干预手段旨在调和不同资源和环境管理部门之间的权衡取舍,有效支持复杂的自然资源与生态环境管理目标,以解决资源有限与生态退化等问题^[116]。例如,Ding 等^[117]在分析 WEF-Nexus 与生态系统服务关联关系基础上,从 WEF-Nexus 视角提出了“两带、三区、四组”的长三角城市群生态安全格局优化管控政策,以支持城市群自然资源与生态系统的协调可持续发展。

3 基于人地关系理论的 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究新思路

3.1 研究述评

WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究是当前国内外研究的重点和热点话题,现有研究揭示了 WEF-Nexus 与生态系统服务的交互作用关系,探索了水-能源-粮食-生态耦合系统的构建与评估,并提出了一系列管控耦合系统的新理念、新方法。然而,二者耦合研究总体上仍处于起步阶段,且存在以下几个方面的不足:

(1) 缺乏 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合关系及作用机理研究的理论体系和技术方法。现有关于 WEF-Nexus 与生态系统服务相互作用关系的研究已取得了一定的成果,但缺乏基于系统思维来搭建二者耦合关系研究的理论框架体系,以及从多学科交叉融合角度构建探索二者“影响机理”、“反馈机理”以及“交互耦合机理”的理论研究体系,研究的综合性和系统性不足。同时构建系统性的量化模型来描述和解构二者多重耦合关系的技术方法有所欠缺,难以有效揭示二者的交互耦合关系和作用机理。

(2) 缺乏 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合系统构建及其演化机制分析研究。当前关于耦合系统的研究主要是将生态系统纳入 WEF-Nexus 研究框架中,探索水-能源-粮食-生态耦合系统的构建,并开展相关的评估研究。然而,现有研究鲜少将 WEF-Nexus 与生态系统服务放在紧密交互的视角进行综合考量,缺乏构建 WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统、识别和解析该耦合系统要素间动态互馈与交互胁迫效应、探索分析耦合系统协同演化机制的相关研究,导致现有研究对 WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统的整体认知较薄弱。

(3) 缺乏直接面向高质量发展与决策管理的实践应用研究。WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究的最终目标是为美丽中国建设和区域高质量发展提供科学依据,但现有研究鲜少将其与管控决策进行紧密结合,实践应用导向不足,难以有效解决区域水资源短缺、能源供应不足、粮食安全以及生态退化等问题。此外,当前 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究尚未厘清二者耦合演变格局与作用过程,且理论研究明显滞后于现实需求,难以满足我国国土空间规划、资源环境管理与生态文明建设等国家战略需求。

3.2 基于人地关系理论的 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合分析

3.2.1 人地关系与生态系统服务的理论认知

人地关系是指人类系统与地球系统之间的相互作用关系,即人类系统与地球系统之间以物质流、能量流和信息流为连接手段共同作用所形成的相互影响、相互制约的关联关系^[118]。人地关系理论是研究人类系统与承载人类活动的地球系统之间相互作用和互动关系的学科理论。本文基于人地关系理论构建了人地关系与生态系统服务的理论框架,如图 1 所示。其中,人地关系涉及到“人”和“地”两个方面,即一方面是以社会、经济和人口等为主要构成要素的人类系统,另一方面是以土地、水、气、生等为主要构成要素的地球系统。“地”对“人”的影响主要表现在地球系统为满足和支持人类生产生活需要而向人类系统提供各种生态产品和服务,即构成了“供给端”;“人”对“地”的影响主要表现在人类为满足自身发展需要而从地球系统中获取各种生态产品和服务,即形成了“需求端”。生态系统服务是指地球系统为人类系统提供的各种直接或间接惠益,即地球系统通过景观格局异质性和生态过程复杂性为人类系统提供了各种生态产品和服务,从而支持了人类生活和经济活动的发展需要,在一定程度上提升了人类福祉。人类系统以直接或间接的方式从地球系统获取各种生态系统服务以满足自身生产生活需要,人类系统的可持续发展受到地球系统的生态系统服务供给能力影响。

综上所述,生态系统服务在连接地球系统“供给端”和人类系统“需求端”之间承担着桥梁和纽带作用,为

将地球系统和人类系统联系起来提供了研究手段,且为开展人地关系研究提供了概念框架。

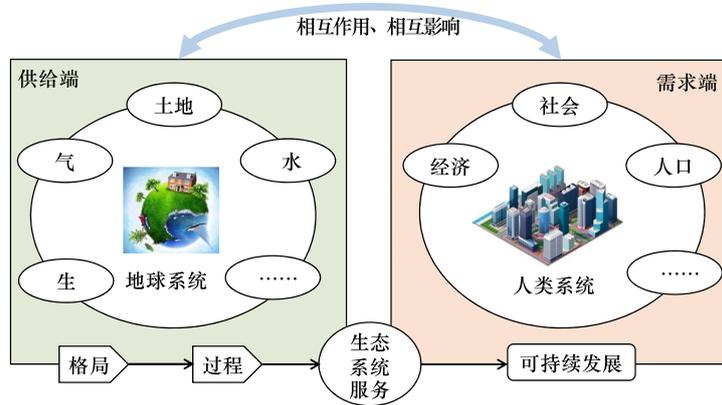


图 1 人地关系和生态系统服务的理论框架

Fig.1 Theoretical framework of human-earth relationship and ecosystem services

3.2.2 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合分析

基于人地关系与生态系统服务的理论认知,本文将地球生态系统视为地球系统的重要组成部分,即构成了“供给端”,将 WEF-Nexus 系统视为人类系统的重要组成部分,即形成了“需求端”。基于此,本文构建了纽带关系系统-地球生态系统耦合分析框架(图 2),以揭示和剖析 WEF-Nexus 与生态系统服务的耦合作用特征,为后续开展二者耦合研究提供理论基础。根据耦合分析框架,地球生态系统能够为人类生产生活提供所需的各类生态系统服务,如供应服务、调节服务、支持服务和文化服务等,而相关生态系统服务是纽带关系系统内水资源、能源、粮食的生产、开发、利用与管理等过程中的重要投入要素。此外,与 WEF-Nexus 相关的人类活动日益频繁将对地球生态系统产生一定的影响,削弱地球生态系统为人类系统提供与 WEF-Nexus 相关的生态系统服务的能力。

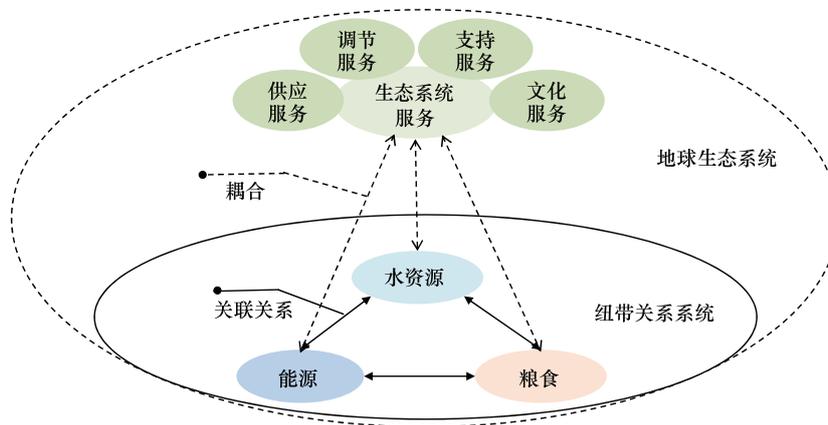


图 2 纽带关系系统-地球生态系统耦合分析框架

Fig.2 Analysis framework of the coupling between nexus system and earth ecosystem

综上所述,WEF-Nexus 系统内资源要素与地球生态系统提供的各类生态系统服务之间存在相互影响、相互制约的耦合作用关系,如“水资源-生态系统服务耦合关系”、“能源-生态系统服务耦合关系”、“粮食-生态系统服务耦合关系”、“水资源-能源-生态系统服务耦合关系”、“水资源-粮食-生态系统服务耦合关系”、“能源-粮食-生态系统服务耦合关系”和“水资源-能源-粮食-生态系统服务耦合关系”等。

3.3 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究的框架构建与思路方法

3.3.1 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究的框架构建

由于 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究在理论体系上存在欠缺,因此需构建 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合的理论研究框架,这不仅为深化耦合关系研究提供科学基础,也为实现美丽中国建设以及高质量发展目标等提供理论支撑。因此,本文依据人地关系理论,结合纽带关系系统-地球生态系统耦合分析框架,以“耦合关系识别-耦合机理分析-耦合过程与格局刻画-耦合管理应用”为研究脉络,探索构建了 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究框架(图 3)。

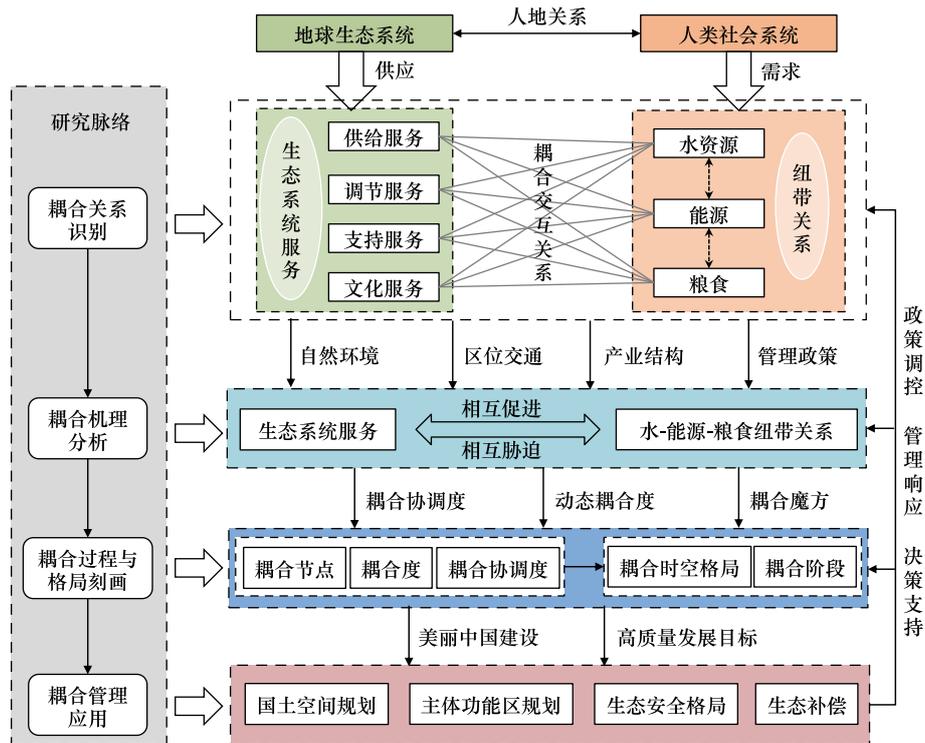


图 3 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究框架

Fig.3 Research framework of the coupling between the WEF-Nexus and ecosystem services

首先,基于人类社会系统所需要的与 WEF-Nexus 相关的各种资源、地球生态系统所供应的各类生态系统服务,定量刻画 WEF-Nexus 与生态系统服务的多维发展水平,并识别 WEF-Nexus 内各要素与各类生态系统服务的耦合交互作用关系。其次,从自然环境、区位交通、产业结构和管理政策等因素切入,深入探析 WEF-Nexus 与生态系统服务相互促进、相互胁迫的耦合作用机理。然后,构建耦合协调度、动态耦合度、耦合魔方等模型方法,通过整合社会经济统计数据、多源遥感监测数据、GIS 空间数据以及地理信息数据等,探索分析 WEF-Nexus 与生态系统服务的耦合节点、耦合度以及耦合协调度等,深入刻画二者耦合时空演变格局及耦合阶段。最后,以美丽中国建设为导向,以资源环境可持续高质量发展为目标,从国土空间规划、主体功能区规划、生态安全格局和生态补偿等维度高度凝练耦合调控管理与应用政策,并通过动态追踪、交互反馈等方式促进 WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统的有序协调演化。

3.3.2 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究的思路与方法

基于前期文献梳理可知,当前针对 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究的文献较少,缺乏深入探析二者耦合关系、耦合格局与过程的技术路径和方法体系。因此,亟需在跨学科交叉融合视角下,积极探索更加多元的 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合集成模型和技术方法,以便动态解析 WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统的交互关系、作用机理以及格局与过程等,从而加强面向国土空间管控的实践应用。基于此,在 WEF-Nexus

与生态系统服务耦合研究框架指导下,未来需通过供需流动、权衡/协同、时空匹配等方式探讨 WEF-Nexus 与生态系统服务在交互胁迫过程中所形成的非线性竞合、非对称关联、非同步演化、非空间均衡等耦合关系,从耦合协调类型、耦合协调阶段、耦合关联模式等维度探析 WEF-Nexus 与生态系统服务的耦合演变格局及动态作用过程,并模拟预测未来不同情景下 WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统的格局与过程演变趋势,开展促进 WEF-Nexus 与生态系统服务发展有序竞合、耦合协调的优化调控,以达到符合美丽中国建设和高质量发展目标的耦合协调状态。

4 研究结论与展望

WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究已成为资源学、环境学、生态学、地理学等学科的热点和前沿议题。本文总结归纳了 WEF-Nexus、生态系统服务以及二者耦合的概念内涵,从耦合关系、耦合系统、耦合管控三个维度系统梳理了 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究进展。根据研究进展可知,现有研究主要存在以下三点不足:缺乏 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合关系及作用机理研究的理论体系和技术方法,WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统构建及其演化机制分析研究欠缺,直接面向高质量发展与决策管理的实践应用研究不足。基于此,本文在人地关系理论指导下提出了 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究的新思路。

总体上看,WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究仍处于探索性阶段,在耦合机理、耦合系统以及实践应用等方面还存在较大提升空间。因此,未来 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合研究应着重从以下三个方面进行突破:

(1) 探究 WEF-Nexus 与生态系统服务互动耦合机理。目前关于 WEF-Nexus 与生态系统服务交互作用机理研究仍较浅显,其内在的互动耦合机理仍需进一步挖掘。值得注意的是,水、能源和粮食在生产、利用与管理等过程中的互动耦合关系以及相互依存机制分析为厘清 WEF-Nexus 与生态系统服务的交互耦合机理提供了研究思路。因此,未来亟需基于 WEF-Nexus 与生态系统服务的关联性和约束性特征,探索分析 WEF-Nexus 发展状况对生态系统服务的影响机理,以及生态系统服务供给能力对 WEF-Nexus 可持续性的反馈机理,从而构建 WEF-Nexus 与生态系统服务相互依赖和共生演进的非线性网络关系,揭示二者互动耦合机理特征,并采取较为成熟的技术手段和方法对二者耦合机理进行量化评估。

(2) 构建 WEF-Nexus-生态系统服务耦合系统,分析其协同演化机制。在探究 WEF-Nexus 与生态系统服务互动耦合机理的基础上,未来亟需深入揭示水、能源、粮食和生态系统服务四者复杂而深刻的互馈作用特征,通过整合社会、生态、资源等多学科知识系统构建 WEF-Nexus-生态系统服务多重非线性交互耦合系统,运用人地关系理论、复杂系统科学、系统工程理论和方法等深入剖析耦合系统的要素构成、内在结构和功能等,辨析耦合系统各要素间复杂的相关关系和联动机制。在此基础上,深入探讨耦合系统协同演化的科学内涵及其时代特征,并基于耗散结构理论、自组织理论和哈肯模型等探究耦合系统协同演化机制,揭示耦合系统复杂协同演化过程和演化趋势。

(3) 开展 WEF-Nexus-生态系统服务耦合协调应用于国土空间管控的决策实践研究。目前鲜有文献构建 WEF-Nexus-生态系统服务耦合协调评估模型,识别二者之间的耦合协调关系特征,并将其应用于国土空间管控实践中。因此,未来亟需借助相关模型和方法构建 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合协调评估模型,并建立基于二者耦合协调的国土空间管控多情景推演式模拟模型,模拟管控决策实施对 WEF-Nexus 与生态系统服务耦合协调关系的影响效应,从而在可持续发展框架内探寻推动水、能源、粮食、生态系统服务四者协同发展的国土空间管控策略。

参考文献 (References):

- [1] Chen W X, Gu T C, Xiang J W, Luo T, Zeng J, Yuan Y. Ecological restoration zoning of territorial space in China: an ecosystem health perspective. *Journal of Environmental Management*, 2024, 364: 121371.
- [2] 安志英, 孙才志, 郝帅. 我国东北生态系统服务的供需匹配关系——基于水-能源-粮食纽带视角. *生态学报*, 2024, 44(10): 4170-4186.

- [3] de Andrade Guerra J B S O, Berchin I I, Garcia J, da Silva Neiva S, Jonck A V, Faraco R A, de Amorim W S, Ribeiro J M P. A literature-based study on the water-energy-food nexus for sustainable development. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, 35(1): 95-116.
- [4] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [5] He C, Zhou L G, Yao Y R, Ma W C, Kinney P L. Estimating spatial effects of anthropogenic heat emissions upon the urban thermal environment in an urban agglomeration area in East China. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 57: 102046.
- [6] Holger H. Understanding the nexus. background paper for the Bonn2011 conference: the water, energy and food security nexus. Stockholm Environment Institute, 2011.
- [7] Ali S M, Acquaye A. An examination of water-energy-food nexus: from theory to application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 202: 114669.
- [8] Li Y Q, Zhang L X, Zhang P P, Li X Q, Hao Y. Water-energy-food nexus in China: an interregional comparison. *Agricultural Water Management*, 2024, 301: 108964.
- [9] 李雨琴, 张鹏鹏, 张力小, 郝岩, 李心晴. 中国水-能-粮资源适配格局动态演化及其驱动因素. *生态学报*, 2023, 43(21): 8985-8997.
- [10] 罗巍, 杨玄酷, 杨永芳, 程遂营. 黄河流域水-能源-粮食纽带关系协同演化及预测. *资源科学*, 2022, 44(3): 608-619.
- [11] 李激, 赵勇, 姜珊, 王浩, 齐恬鑫, 凌敏华, 朱永楠, 李海红, 何凡, 何国华. 水、能源和粮食纽带关系研究进展及发展启示. *生态学报*, 2024, 44(17): 1-15.
- [12] 郝林钢, 于静洁, 王平, 韩春辉. 面向可持续发展的水-能源-粮食纽带关系系统解析及其研究框架. *地理科学进展*, 2023, 42(1): 173-184.
- [13] Ju K Y, Wang J, Wei X Z, Li H, Xu S Y. A comprehensive evaluation of the security of the water-energy-food systems in China. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 39: 145-161.
- [14] Zhang C J, Zhao X Y, Shi C F. Efficiency assessment and scenario simulation of the water-energy-food system in the Yellow river basin, China. *Energy*, 2024, 305: 132279.
- [15] 彭俊杰. 黄河流域“水-能源-粮食”相互作用关系及其优化路径. *中州学刊*, 2021(8): 48-54.
- [16] Khourchid A M, Mahmood F, Al-Ghamdi S G, Ayyub B M, Al-Ansari T. National-level resilience: Innovative framework for Energy-Water-Food nexus evaluation. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 49: 589-605.
- [17] Qian X Y, Liang Q M. Sustainability evaluation of the provincial water-energy-food nexus in China: evolutions, obstacles, and response strategies. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103332.
- [18] Cheng Y T, Wang J L, Shu K S. The coupling and coordination assessment of food-water-energy systems in China based on sustainable development goals. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 35: 338-348.
- [19] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [20] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberger R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [21] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, Brauman K A, Chaplin-Kramer R, Fremier A, Girvetz E, Gordon L J, Kappel C V, Mandle L, Mulligan M, O'Farrell P, Smith W K, Willemsen L, Zhang W, DeClerck F A. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 70-82.
- [22] Wang Y X, Wang H M, Zhang J X, Liu G, Fang Z, Wang D D. Exploring interactions in water-related ecosystem services nexus in Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 2023, 336: 117550.
- [23] Xue Z J, Meng X W, Liu B. Spatiotemporal evolution and driving factors of ecosystem services in the upper Fenhe watershed, China. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111803.
- [24] 牛丽楠, 邵全琴, 陈美祺, 张雄一, 张廷靖. 2000—2020 年长江流域生态系统服务变化及其权衡协同关系. *资源科学*, 2024, 46(5): 853-866.
- [25] You C, Qu H J, Wang C B, Feng C C, Guo L. Trade-off and synergistic of ecosystem services supply and demand based on socio-ecological system (SES) in typical hilly regions of South China. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111749.
- [26] Huang Y T, Cao Y R, Wu J Y. Evaluating the spatiotemporal dynamics of ecosystem service supply-demand risk from the perspective of service flow to support regional ecosystem management: a case study of Yangtze River Delta urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 460: 142598.
- [27] 官冬杰, 张喻翔, 陈明珠, 朱康文, 周李磊, 张艳军. 水源供给服务供需流空间不匹配特征识别及优化. *生态学报*, 2024, 44(12): 5070-5082.
- [28] 周昱辰, 尹丹, 黄庆旭, 张玲, 白岩松. 基于生态系统服务参与式制图的“三生”空间优化建议——以白洋淀流域为例. *自然资源学报*, 2022, 37(8): 1988-2003.
- [29] Wang X X, Wang X F, Tu Y, Yao W J, Zhou J T, Jia Z X, Ma J H, Sun Z C. Systematic conservation planning considering ecosystem services can optimize the conservation system in the Qinling-Daba Mountains. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122096.
- [30] Ding T H, Chen J F, Fang L P, Ji J, Fang Z. Urban ecosystem services supply-demand assessment from the perspective of the water-energy-food nexus. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 90: 104401.
- [31] Ding T H, Fang L P, Chen J F, Ji J, Fang Z. Exploring the relationship between water-energy-food nexus sustainability and multiple ecosystem services at the urban agglomeration scale. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 35: 184-200.
- [32] Yuan M H, Lo S L. Ecosystem services and sustainable development: perspectives from the food-energy-water nexus. *Ecosystem Services*, 2020,

- 46; 101217.
- [33] Hanes R J, Gopalakrishnan V, Bakshi B R. Including nature in the food-energy-water nexus can improve sustainability across multiple ecosystem services. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 137: 214-228.
- [34] Song S R, Chen X, Liu T, Zan C J, Hu Z Y, Huang S Y, De Maeyer P, Wang M, Sun Y. Indicator-based assessments of the coupling coordination degree and correlations of water-energy-food-ecology nexus in Uzbekistan. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118674.
- [35] 嵇娟, 陈军飞, 邓梦华, 顾岩, 阎晓东. 绿色发展下长三角地区水-能源-粮食-生态系统仿真和优化研究. *软科学*, 2023, 37(5): 105-114.
- [36] Sachs L, Silk D. *Food and energy: strategies for sustainable development*. Tokyo, Japan: United Nations University Press, 1990.
- [37] Endo A, Tsurita I, Burnett K, Orenco P M. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 11: 20-30.
- [38] Sanders K T, Webber M E. Evaluating the energy consumed for water use in the United States. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(3): 034034.
- [39] Scott C A. The water-energy-climate nexus: resources and policy outlook for aquifers in *Mexico*. *Water Resources Research*, 2011, 47(6): W00L04.
- [40] Zhang C, Chen X X, Li Y, Ding W, Fu G T. Water-energy-food nexus: concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 625-639.
- [41] Keskinen M, Guillaume J, Kattelus M, Porkka M, Räsänen T, Varis O. The water-energy-food nexus and the transboundary context: insights from large Asian rivers. *Water*, 2016, 8(5): 193.
- [42] Adnan H. *The status of the water, food and energy nexus in Asia and the Pacific*. Thailand: United Nations Economic and Social Commission for Asia and Pacific (UNESCAP), 2013: 13-18.
- [43] Cai X M, Wallington K, Shafiee-Jood M, Marston L. Understanding and managing the food-energy-water nexus-opportunities for water resources research. *Advances in Water Resources*, 2018, 111: 259-273.
- [44] Naidoo D, Nhamo L, Mpandeli S, Sobratee N, Senzanje A, Liphadzi S, Slotow R, Jacobson M, Modi A T, Mabhaudhi T. Operationalising the water-energy-food nexus through the theory of change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 149: 111416.
- [45] Jones-Crank J L. The contribution of water-energy-food nexus governance to sustainability: a case study of Singapore. *Environmental Science & Policy*, 2024, 160: 103849.
- [46] 赵良仕, 刘思佳, 孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究. *水资源保护*, 2021, 37(1): 69-78.
- [47] Putra M P I F, Pradhan P, Kropp J P. A systematic analysis of water-energy-food security nexus: a South Asian case study. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138451.
- [48] Foran T. Node and regime: interdisciplinary analysis of water-energy-food nexus in the Mekong region. *Water Alternatives*, 2015, 8: 655-674.
- [49] Hao L G, Yu J J, Wang P, Han C H, Gojenko B, Qu B, Jiang E H, Muminov S. A comprehensive assessment indicator of the water-energy-food nexus system based on the material consumption relationship. *Journal of Hydrology*, 2024, 633: 130997.
- [50] Westman W E. How much are nature's services worth? *Science*, 1977, 197(4307): 960-964.
- [51] Ehrlich P R, Mooney H A. Extinction, substitution, and ecosystem services. *BioScience*, 1983, 33(4): 248-254.
- [52] Daily G C. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [53] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, 2005.
- [54] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [55] La Notte A, Vallecillo S, Maes J. Capacity as "virtual stock" in ecosystem services accounting. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 158-163.
- [56] Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice I, Araújo M, Arnell N, Bondeau A, Bugmann H, Carter T, Gracia C, de la Vega-Leinert A C, Erhard M, Ewert F, Glendinning M, House J, Kankaanpää S, Klein R J T, Lavorel S, Lindner M, Metzger M, Meyer J, Mitchell T, Reginster I, Rounsevell M, Sabaté S, Sitch S, Smith B, Smith J U, Smith P, Sykes M, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science, American Association for the Advancement of Science*, 2005.
- [57] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [58] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for telemark, Norway. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [59] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [60] Fan S X, Yan M, Yu L F, Chen B W, Zhang L. Integrating ecosystem service supply-demand and ecological risk assessment for urban planning: a case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2024, 161: 111950.
- [61] Bommarco R, Vico G, Hallin S. Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security. *Global Food Security*, 2018, 17: 57-63.
- [62] Hellegers P, Zilberman D, Steduto P, McCormick P. Interactions between water, energy, food and environment: evolving perspectives and policy issues. *Water Policy*, 2008, 10(S1): 1-10.
- [63] Garcia D J, You F Q. The water-energy-food nexus and process systems engineering: a new focus. *Computers & Chemical Engineering*, 2016, 91: 49-67.
- [64] Mondal K, Chatterjee C, Singh R. Examining the coupling and coordination of water-energy-food nexus at a sub-national scale in India-Insights from

- the perspective of Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 43: 140-154.
- [65] Birol E, Das S. Estimating the value of improved wastewater treatment: the case of river *Ganga*, India. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(11): 2163-2171.
- [66] United Nation. World urbanization prospects, the 2014 Revision. 2014.
- [67] Ajanovic A. Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? *Energy*, 2011, 36(4): 2070-2076.
- [68] Aquastat F A O. FAO's information system on water and agriculture. 2011.
- [69] Al-Saidi M, Elagib N A. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1131-1139.
- [70] Bazilian M, Rogner H, Howells M, Hermann S, Arent D, Gielen D, Steduto P, Mueller A, Komor P, Tol R S J, Yumkella K K. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 2011, 39(12): 7896-7906.
- [71] Terrapon-Pfaff J, Ortiz W, Dienst C, Gröne M C. Energising the WEF nexus to enhance sustainable development at local level. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223: 409-416.
- [72] Fader M, Cranmer C, Lawford R, Engel-Cox J. Toward an understanding of synergies and trade-offs between water, energy, and food SDG targets. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 112.
- [73] Wang Y R, Song J X, Sun H T. Coupling interactions and spatial equilibrium analysis of water-energy-food in the Yellow River Basin, China. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 88: 104293.
- [74] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 杜磊, 黄道涵. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真. *管理评论*, 2016, 28(10): 11-26.
- [75] 孙才志, 周舟, 赵良仕. 基于 SD 模型的中国西南水-能源-粮食纽带系统仿真模拟. *经济地理*, 2021, 41(6): 20-29.
- [76] Deng X Z, Güneralp B, Su H B. Observations and modeling of the climatic impact of land-use changes. *Advances in Meteorology*, 2014, 2014: 718695.
- [77] Wang Q, Yang C H, Wang M L, Zhao L, Zhao Y C, Zhang Q P, Zhang C Y. Decoupling analysis to assess the impact of land use patterns on carbon emissions: a case study in the Yellow River Delta efficient eco-economic zone, China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 412: 137415.
- [78] Janus J, Ertunç E. Impact of land consolidation on agricultural decarbonization: estimation of changes in carbon dioxide emissions due to farm transport. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162391.
- [79] Raihan A, Tuspekova A. The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: new insights from *Peru*. *Energy Nexus*, 2022, 6: 100067.
- [80] Feng M Q, Chen Y N, Duan W L, Zhu Z Y, Wang C, Hu Y N. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of crop production in the Tarim river basin, Northwest China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 396: 136566.
- [81] 王勇, 孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响——以京津冀城市群为研究对象. *自然资源学报*, 2022, 37(3): 582-599.
- [82] Sahle M, Saito O, Fürst C, Yeshitela K. Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 573-586.
- [83] Karabulut A, Eghob B N, Lanzanova D, Grizzetti B, Bidoglio G, Pagliero L, Bouraoui F, Aloe A, Reynaud A, Maes J, Vandecasteele I, Mubareka S. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 278-292.
- [84] Jarvie H P, Sharpley A N, Flaten D, Kleinman P J A, Jenkins A, Simmons T. The pivotal role of phosphorus in a resilient water-energy-food security nexus. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(4): 1049-1062.
- [85] Engel S, Schaefer M. Ecosystem services—a useful concept for addressing water challenges? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 696-707.
- [86] Zhou S Y, Li W, Lu Z G, Yue R W. An analysis of multiple ecosystem services in a large-scale urbanized area of Northern China based on the food-energy-water integrative framework. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 98: 106913.
- [87] Liu Q Q. Interlinking climate change with water-energy-food nexus and related ecosystem processes in California case studies. *Ecological Processes*, 2016, 5(1): 14.
- [88] Bizikova L, Roy D, Swanson D, Venema H, McCandless M. The water-energy-food security nexus: towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management. *International Institute for Sustainable Development*, 2013.
- [89] Rasul G. Food, water, and energy security in South Asia: a nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan Region. *Environmental Science & Policy*, 2014, 39: 35-48.
- [90] van den Heuvel L, Blicharska M, Masia S, Sušnik J, Teutschbein C. Ecosystem services in the Swedish water-energy-food-land-climate nexus: anthropogenic pressures and physical interactions. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101141.
- [91] Yin D Y, Yu H C, Shi Y Y, Zhao M Y, Zhang J, Li X S. Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: a perspective of the water-energy-food nexus. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135469.
- [92] 张中浩, 张永瑶, 胡熠娜, 高峻. 基于“水-能源-粮食”纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例. *生态学报*, 2023, 43(22): 9430-9445.
- [93] Ding T H, Chen J F. Evaluation and obstacle factors of coordination development of regional water-energy-food-ecology system under green

- development: a case study of Yangtze River economic belt, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2022, 36 (9): 2477-2493.
- [94] Liu S Y, Wang L C, Lin J, Wang H, Li X G, Ao T Q. Evaluation of water-energy-food-ecology system development in Beijing-Tianjin-Hebei region from a symbiotic perspective and analysis of influencing factors. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5138.
- [95] Martinez-Hernandez E, Leach M, Yang A D. Understanding water-energy-food and ecosystem interactions using the nexus simulation tool Ne₃Sym. *Applied Energy*, 2017, 206: 1009-1021.
- [96] Shi H Y, Luo G, Zheng H W, Chen C B, Hellwich O, Bai J, Liu T, Liu S S, Xue J, Cai P, He H L, Ochege F U, Voorde T, Maeyer P. A novel causal structure-based framework for comparing a basin-wide water-energy-food-ecology nexus applied to the data-limited Amu Darya and Syr Darya river basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25: 901-925.
- [97] Apeh O O, Nwulu N I. The water-energy-food-ecosystem nexus scenario in Africa: perspective and policy implementations. *Energy Reports*, 2024, 11: 5947-5962.
- [98] 刘黎明, 陈军飞, 王春宝. 长江经济带水-能源-粮食-生态脆弱性时空特征及影响机制. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8): 1628-1640.
- [99] Pan Y, Chen Y, Liu Y. Vulnerability evaluation and prediction of the water-energy-food-ecology nexus in the Yangtze River Economic Belt based on TOPSIS, neighborhood rough set and support vector machine. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 944075.
- [100] Li J X, Liu S J, Zhao Y Z, Gong Z W, Wei G, Wang L H. Water-energy-food nexus and eco-sustainability: a three-stage dual-boundary network DEA model for evaluating Jiangsu province in China. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2021, 14(1): 1501.
- [101] Wang M, Zhu Y F, Gong S W, Ni C Y. Spatiotemporal differences and spatial convergence of the water-energy-food-ecology nexus in Northwest China. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 665140.
- [102] Shi H Y, Luo G P, Zheng H W, Chen C B, Bai J, Liu T, Ochege F U, De Maeyer P. Coupling the water-energy-food-ecology nexus into a Bayesian network for water resources analysis and management in the Syr Darya River basin. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124387.
- [103] Del Borghi A, Tacchino V, Moreschi L, Matarazzo A, Gallo M, Arellano Vazquez D. Environmental assessment of vegetable crops towards the water-energy-food nexus: a combination of precision agriculture and life cycle assessment. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 109015.
- [104] Zhang L, Jiang X H, Li Y H, Xu F B, Huang X. Analysis of coupling coordination structural characteristics of water-energy-food-ecosystems based on SNA model: a case study in the nine provinces along the Yellow River, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2024, 135: 103654.
- [105] Ling M H, Qi T X, Li W, Yu L L, Xia Q Y. Simulating and predicting the development trends of the water-energy-food-ecology system in Henan Province, China. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111513.
- [106] Bidoglio G, Brander L. Enabling management of the water-food-energy-ecosystem services nexus. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 265-267.
- [107] 施海洋, 罗格平, 郑宏伟, 陈春波, 白洁, 刘铁. 基于“水-能源-食物-生态”纽带因果关系和贝叶斯网络的锡尔河流域用水分析. *地理学报*, 2020, 75(5): 1036-1052.
- [108] Qiu J Q, Huang T, Yu D Y. Evaluation and optimization of ecosystem services under different land use scenarios in a semiarid landscape mosaic. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108516.
- [109] Dang C H, Zhang H B, Singh V P, Zhang S Q, Mu D R, Yao C C, Zhang Y, Lyu F G, Liu S D. Tracking and managing the water-food-environment-ecosystem (WFEE) nexus in groundwater irrigation districts using system dynamics modelling. *Science of the Total Environment*, 2024, 947: 174705.
- [110] Li M, Fu Q, Singh V P, Ji Y, Liu D, Zhang C L, Li T X. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 1416-1434.
- [111] Hu H, Tian G L, Wu Z, Xia Q. A study of ecological compensation from the perspective of land use/cover change in the middle and lower Yellow River, China. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109382.
- [112] Lü C M, Xu X Y, Guo X, Feng J Z, Yan D H. Basin water ecological compensation interval accounting based on dual perspectives of supply and consumption: taking qingyi river basin as an example. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 385: 135610.
- [113] 刘利花, 蔡英谦, 刘向华. 习近平生态文明思想指引下的耕地生态补偿机制构建. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(3): 59-68.
- [114] 张晖, 顾典, 吴霜, 虞祎. 流域生态补偿政策下受偿地区碳减排效应——以新安江流域为例. *资源科学*, 2022, 44(4): 768-779.
- [115] Sheng W P, Zhen L, Xie G D, Xiao Y. Determining eco-compensation standards based on the ecosystem services value of the mountain ecological forests in Beijing, China. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 422-430.
- [116] Zhao Y, Jiang C, Dong X L, Yang Z Y, Wen M L, Yang J. Understanding the complex environmental management through a lens of food-water-ecosystem nexus: insights from an ecosystem restoration hotspot in dryland. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 147029.
- [117] Ding T H, Chen J F, Fang L P, Ji J. Identifying and optimizing ecological security patterns from the perspective of the water-energy-food nexus. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130912.
- [118] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, (3): 1-6.