

水-能-粮纽带关系研究综述：理论演进、方法创新与区域实践

郑嘉琪

北京建筑大学城市经济与管理学院，中国·北京 100044

摘要：水-能-粮纽带关系（WEF Nexus）作为资源管理领域的核心概念，其研究源于21世纪初全球资源安全危机的反思，2011年波恩会议正式提出该概念，联合国2030年可持续发展目标进一步将其提升至全球政策层面。中国因水资源时空分布不均、资源生产与消费空间错配等国情，对该领域研究具有特殊重要性与紧迫性。本文基于国内外最新文献，系统梳理WEF纽带关系研究的理论进展、方法创新与实践应用。理论层面，纽带关系从二元关系演进为包含生态、土地、碳等多要素的复杂系统，水资源成为核心枢纽，以系统动力学、耦合协调度模型及数字孪生技术推动理论模型持续创新；方法学方面，形成了精细化定量评估、创新空间分析技术、多目标优化与情景分析等多元化体系，多源数据融合、GIS与遥感技术、机器学习等方法广泛应用；实证研究呈现区域比较与多尺度特征，在中国黄河流域、京津冀城市群等典型区域形成差异化治理路径，农村家庭微观尺度研究与国际经验借鉴丰富了实践内涵；在政策应用上，空间规划、市场机制与协同治理机制创新成为核心，差异化实施路径与监测评估、公众参与等保障机制逐步完善。当前研究仍面临数据方法局限、理论整合不足、政策协同不畅等挑战，未来需向智能化、精细化方向发展，强化不确定性量化、跨尺度模型集成、系统韧性研究及公平与效率平衡等前沿方向探索，为全球可持续发展提供科学支撑。

关键词：水-能-粮纽带关系（WEF Nexus）；协同治理；理论演进；方法创新；区域实践；多要素系统

A Review of the Research on the Water-Energy-Food Nexus: Theoretical Evolution, Methodological Innovation, and Regional Practices

Zheng Jiaqi

School of Urban Economics and Management, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, China Beijing 100044

Abstract: The water-energy-food (WEF) nexus, as a core concept in the field of resource management, originated from reflections on the global resource security crisis in the early 21st century. The concept was officially proposed at the Bonn Conference in 2011, and the United Nations' 2030 Sustainable Development Goals further elevated it to the level of global policy. Due to China's uneven spatial and temporal distribution of water resources and the spatial mismatch between resource production and consumption, research in this field holds special importance and urgency. Based on the latest domestic and international literature, this paper systematically reviews theoretical progress, methodological innovations, and practical applications in WEF nexus research. At the theoretical level, the nexus has evolved from a binary relationship to a complex system involving multiple factors such as ecology, land, and carbon, with water resources as the core hub, and continuous innovation in theoretical models has been driven by system dynamics, coupling coordination models, and digital twin technology. Methodologically, diversified systems have been developed, including refined quantitative assessments, innovative spatial analysis techniques, multi-objective optimization, and scenario analysis, with widespread application of multi-source data integration, GIS and remote sensing technologies, and machine learning methods. Empirical studies display regional comparisons and multi-scale characteristics, forming differentiated governance pathways in typical regions such as the Yellow River Basin and the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, while micro-scale studies of rural households and the adoption of international experiences enrich practical implications. In terms of policy application, innovations in spatial planning, market mechanisms, and collaborative governance mechanisms are core, with differentiated implementation pathways and supporting mechanisms such as monitoring, evaluation, and public participation gradually being improved.

Current research still faces challenges including limitations in data and methodology, insufficient theoretical integration, and poor policy coordination. In the future, development should move towards intelligence and refinement, strengthening frontier explorations in uncertainty quantification, cross-scale model integration, system resilience research, as well as balancing equity and efficiency, to provide scientific support for global sustainable development.

Keywords: Water-energy-food nexus (WEF Nexus); Collaborative governance; Theoretical evolution; Methodological innovation; Regional practice; Multi-factor systems

0 引言

水-能-粮纽带关系 (Water-Energy-Food Nexus, 简称 WEF 纽带关系) 作为资源管理领域的核心概念, 其研究起源于 21 世纪初全球资源安全危机的反思。2011 年波恩会议正式提出这一概念, 强调水、能源和粮食三种战略性资源之间存在复杂的互馈机制, 需通过系统思维推动协同治理^[1]。随着全球人口增长与气候变化压力加剧, WEF 纽带关系研究的内涵不断拓展, 特别是联合国 2030 年可持续发展目标将这一概念提升到全球政策层面, 其中目标 2 (零饥饿)、目标 6 (清洁饮水和卫生设施) 和目标 7 (可负担的清洁能源) 与纽带关系密切相关^[2]。根据我国国情, 纽带关系研究与国家战略紧密对接。生态文明建设和高质量发展战略要求统筹水、能源、粮食协同安全发展^[3]。中国作为全球人口最多的发展中国家, 水资源时空分布不均导致资源生产与消费空间严重不匹配。研究表明, 北方地区人口占全国 46%, 但只拥有全国 19% 的水资源, 却承担了大部分能源和粮食生产任务, 这种资源错配格局使得纽带关系研究在中国具有特殊的重要性和紧迫性。近年来, 纽带关系研究从最初的水-能-粮三要素系统, 逐步拓展为包含生态、土地、碳等多要素的复杂系统^[4,5]。特别是“双碳”目标提出后, 碳排放因素被纳入分析框架, 形成水-能-粮-碳协同治理新范式^[1]。本研究基于国内外最新文献, 系统梳理纽带关系研究的理论进展、方法创新与实践应用, 以期对相关领域提供参考。

1 理论基础与概念框架的演进

1.1 概念内涵的多维拓展

纽带关系理论经历了从二元关系到复杂系统的演进过程。早期研究主要关注水-能、水-粮等两两关系, 如虚拟水概念揭示的水资源与粮食贸易联系^[6]。随着研究深入, 学者们提出了更综合的框架, 如李激激等^[4]构建的单系统-双系统-三系统多维框架, 解析了要素内部开发、系统间利用效率以及多系统耦合安全三个维度。概念边界不断扩展, 从最初的水-能-粮核心要素, 逐步纳入土地、生态、碳等子系统。章恒全等^[5]在长江经济带研究中引入水-能-粮-土框架, 强调土地资源对农业用水的影

响; 田贵良等^[1]则将碳排放因素纳入黄河流域分析, 构建水-能-粮-碳系统。这种扩展体现了资源管理的整体性需求, 特别是在气候变化背景下, 碳减排与资源可持续利用的协同成为新焦点。在核心要素关系上, 水资源被普遍认为是纽带关系的关键枢纽。水资源在能源和粮食生产中扮演双重角色: 既是投入要素, 又是约束条件。例如, 能源生产用水占全球取水量的 10%-15%, 而农业用水占总用水量的 70%, 这种相互依赖性在气候变化背景下更加紧密。

1.2 理论模型的创新与发展

纽带关系研究融合了多种理论模型, 形成了更加综合的分析框架。系统动力学模型被广泛应用于模拟复杂反馈机制, 如赵含等^[1]构建的黄河中游地区水-能-粮-碳系统动力学模型, 能够模拟长期演化趋势。耦合协调度模型则用于量子子系统间的协同水平, 李刚等^[1]通过改进的耦合协调度模型测度了黄河流域水-能-粮关联系统的协同安全度。近年来, 数字孪生技术的引入为纽带关系研究提供了新范式。王浩等^[7]提出了数字孪生驱动的水-能-粮-生耦合系统协同治理理论, 通过感知-认知-决策-行动闭环调控机制, 实现了从事后分析到事前预判的转变。

2 研究方法学的创新与多元化发展

2.1 定量评估方法的精细化

纽带关系研究的方法体系日益丰富, 从单一指标向多指标集成评估发展。水足迹和能足迹分析成为量化资源消耗的基础工具, 韩顺莉等^[8]通过水足迹核算模型, 分析了贵州主要农作物耗水特征, 发现稻谷为极高耗水作物, 单位面积水足迹达 209kg/Mcal。生命周期评价 (LCA) 框架^[9]被扩展应用于纽带关系系统, 评估产品全生命周期的资源环境影响。指数分解方法在识别驱动因素方面发挥重要作用。孟凡继等^[10]采用对数平均迪氏指数法 (LMDI) 将农业用水量变化分解为人口规模、单位用水量、土地使用情况等六个因素, 发现机械效率提升是节水主要因素。类似地, 毛诗雨等^[4]运用 LMDI 分解农业碳排放, 识别出劳动生产率是主要驱动因素。在数据整合方面, 多源数据融合技术解决了数据稀缺问题。Akanga 等^[9]在肯尼亚 Mau 森林复合体研究中, 整合遥感数据、田野调查和统计资料, 克

服了发展中国家数据不足的问题。

2.2 空间分析技术的创新应用

空间显性方法为理解纽带关系的空间异质性提供了新工具。地理信息系统 (GIS) 与遥感技术结合, 实现了资源流动的空间可视化。例如, 王少剑等^[11] 通过多区域投入产出模型 (MRIO) 揭示了中国省际虚拟水流动格局, 发现北粮南运导致的虚拟水北流加剧了北方水资源压力。社会网络分析 (SNA) 被用于解析纽带关系中的关键节点和路径。王晶等^[12] 基于修正引力模型和社会网络分析, 发现京津冀地区形成了“多极网络化”空间结构, 北京、天津通过“虹吸-辐射”效应主导资源流动。

2.3 优化模型与情景分析

多目标优化模型在资源协同配置中应用广泛。丁丽瑞^[13] 以冶河灌区为例, 建立了以经济效益最大和灌溉节水量最大为目标的优化模型, 实现配水量节约 2.4% 至 3.8%。赵含等^[14] 构建的黄河中游模型可模拟不同政策情景下的长期演化, 为政策制定提供科学依据。此外, 代理模型和机器学习方法^[14] 被引入以处理高维非线性问题, 在粮食产量预测中表现更加出色。

3 实证研究的区域比较与多尺度应用

3.1 中国典型区域案例研究

中国不同区域的纽带关系研究呈现出鲜明的区域特色。黄河流域作为生态保护与高质量发展战略核心区, 面临严峻的水资源约束。研究表明, 流域水资源开发率超 70%, 远超国际警戒线。针对这一挑战, 研究提出了基于“四水四定”原则的优化配置方案, 通过水权交易和调水工程缓解水资源短缺。京津冀城市群聚焦于地下水超采治理与协同发展。刘楠等^[15] 构建了“压力-状态-响应”三维评价框架, 发现 2000-2022 年系统安全水平从 0.354 上升至 0.535, 但碳排放因素引入后下降至 0.508, 凸显了碳中和目标下纽带关系治理的复杂性。长江经济带研究强调水资源高效利用与生态保护协同。何伟军等^[16] 基于场域视角评估系统安全, 发现上游地区以水资源供给功能为主, 下游地区则面临更大的能源和粮食需求压力, 建议通过“分区管控、分类施策”实现协同发展。西北干旱区探索资源富集与生态脆弱的平衡路径。李占斌等^[17] 在黄河几字弯水土流失区研究发现, 2000-2020 年期间, 水资源量分布不均, 宝鸡市水资源量最大 (30.9 亿 m³), 而乌海市最小 (仅 0.2 亿 m³), 这种差异凸显了区域协调的必要性。

3.2 农村家庭尺度的微观实证

农村家庭作为资源消费的基本单元, 其纽带关系研究

近年来受到关注。吴梦荣等^[18] 在华北平原研究发现, 农村家庭能源消费呈现“清洁化”趋势, 但清洁供暖改造增加了 10-15% 的用水需求, 揭示了能-水关系的复杂性。

3.3 国际比较与经验借鉴

地中海地区面临严重水短缺, Rhouma 等^[9] 通过整合水足迹 (WF) 与水稀缺足迹 (WSF) 方法, 发现作物种植是水耗主因, 需通过虚拟水贸易调整政策。非洲地区研究关注气候变化下小农户的脆弱性, Akanga 等^[9] 强调性别平等在资源分配中的重要性。欧盟的经验表明, 建立跨部门协调机制是实现纽带关系协同的关键。

4 政策应用与治理创新

4.1 政策设计创新

基于目前的实际情况, 纽带关系治理政策呈现多元化创新。空间规划政策强调资源配置与区域特征匹配。例如, 针对水资源短缺的华北地区, 推行“以水定产”政策, 严格控制高耗水产业发展。市场机制设计在优化资源配置中发挥重要作用。水权交易、碳排放交易等市场工具被应用于纽带关系治理。研究表明^[10], 合理的水价形成机制可促进节水技术推广, 减少农业用水 10-15%。协同治理机制创新是政策设计的核心。建立跨部门协调平台, 打破行政分割, 实现水、能、粮统一管理。例如, 河长制与田长制的协同, 有效解决了水资源管理中的外部性问题。

4.2 实施路径与保障机制

政策实施需要差异化的路径设计。针对不同区域特点, 采取分类指导策略。例如, 西北能源富集区重点推进能源节水技术, 东部沿海地区侧重虚拟水贸易优化。而监测评估体系是政策有效实施的保障。建立纽带关系综合监测网络^[7] 如图 1 所示, 可实时追踪资源流动与效率变化。例如, 黄河流域开展的水-能-粮综合监测, 为政策调整提供了科学依据。公众参与机制的创新增强了政策可接受性。通过社区参与式管理, 将传统知识与现代技术结合, 提升治理效能。特别是在农村地区, 妇女在资源管理中的角色日益受到重视。

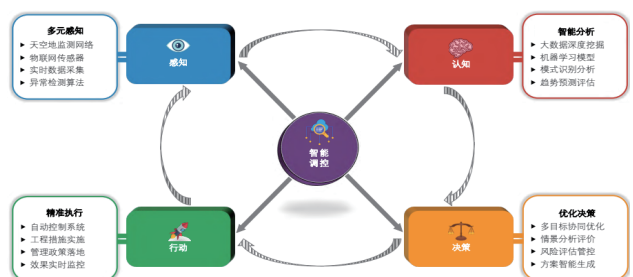


图1 监测网络智能调控示意图

5 挑战与未来研究方向

5.1 当前面临的主要挑战

纽带关系研究仍面临多重挑战。在数据与方法层面,数据不一致、模型边界模糊等问题突出。Huan 等^[19]指出,现有评估多基于加权平均法,难以真实反映资源间复杂的相互作用。在理论整合方面,多学科交叉融合不足制约了理论创新。现有研究多局限于单一学科视角,难以全面把握复杂系统的本质。同时,解析深度不足,对内在机制的理解不够深入,如系统之间的反馈机制、阈值效应等需要进一步探索。在实践应用层面,政策协同机制不健全是主要的障碍。中国水、能源、粮食分属不同部门管理,缺乏高效的跨部门协商平台^[20]。此外,气候变化带来的不确定性增加了系统脆弱性。

5.2 未来研究方向与趋势

未来研究将向智能化和精细化方向发展。人工智能与大数据技术将广泛应用于纽带关系研究,实现实时模拟与预警。例如,数字孪生技术^[19,21]可构建虚拟流域,支持决策测试。不确定性量化成为方法创新重点。发展新不确定性分析框架,提高预测可靠性。特别是在气候变化背景下,需要更好理解极端事件对纽带关系的影响。跨尺度模型集成是另一重要方向。开发能够连接微观行为与宏观模式的新型模型,揭示多尺度互动机制。在前沿科学问题方面,系统韧性研究成为新焦点,需要理解纽带关系系统抵御、适应和转型能力的内在机制。公平与效率的平衡是另一前沿问题^[22],特别是在碳中和的目标下,需要探索效率与公平协同提升的路径。

6 结论与展望

水-能-粮纽带关系研究已形成相对完善的理论体系与方法论,并在不同角度取得了丰富的实证成果^[23,24]。通过系统梳理,可得出以下结论:首先,纽带关系理论从简单的水-能-粮三要素系统发展为包含生态、土地、碳等多要素的复杂系统框架,体现了资源管理的整体观^[25,5]。数字孪生等新技术的引入为系统模拟和预警提供了新工具。其次,研究方法呈现多元化趋势,从单一指标评估向多模型集成发展,特别是在解决数据稀缺和尺度匹配问题上取得了很大程度的进展^[19,26]。定量与定性方法的结合增强了研究的实用价值。第三,实证研究^[1,10,27]揭示了显著的区域差异性,中国不同地区需要制定差异化的治理策略。农村家庭等微观尺度的研究^[28]为理解基层机制提供了新视角。未来研究应在以下方面继续深化:理论方面需要加强机制解析和理论整合,发展能够解释复杂系统行为的新理论;

方法上应推进智能方法与传统模型的融合,提高研究成果的实用价值;应用层面需强化政策转化和实践创新,推动成果转化应用。最终,通过多学科合作、跨部门协同、全球化视野,推动水-能-粮纽带关系研究向更加深入、系统、实用的方向发展,为全球可持续发展提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 田贵良,徐倩,王慧敏等. 高质量发展背景下黄河流域“水-能-粮-碳”系统韧性提升策略研究[J]. 中国农村水利水电, 2024, 47(6): 78-86.
- [2] Gong, D., Chen, Y., Li, M., et al. Operationalizing SDGs through the Water-Energy-Food Nexus: multi-level assessment of ecosystem service supply-demand patterns in China[J]. Ecological Indicators, 2025, 158, 111503.
- [3] 章恒全,王媛,张丹等. 水-能-粮-土关联下长江经济带农业用水量时空特征及驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 45-53.
- [4] 毛诗雨. 水-能-粮-土-人-碳关联下中国农业碳排放演变的驱动因素研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(2): 67-75.
- [5] Sun, S, et al. Assessing the Water-Energy-Food Nexus in China: A Systematic Review[J]. Science of the Total Environment, 2023, 874, 162398.
- [6] Yang, L, et al. Water-Energy-Food Nexus: A Review of Modeling Approaches[J]. Advances in Water Resources, 2024, 183, 104589.
- [7] 王浩,孟现勇,丁建丽等. 数字孪生驱动的水-能-粮-生耦合系统协同治理新范式[J]. 中国水利, 2025, (4): 34-42.
- [8] 韩顺利,张鹏飞,卢媛等. 基于水-能-粮关联关系的贵州农作物种植结构优化调整[J]. 中国农业气象, 2024, 45(4): 89-97.
- [9] Akanga, D. O., Moore, N., Kihara, D. Advancing sustainability in data-sparse landscapes using a water-energy-food nexus approach[J]. Global Environmental Change, 2025, 82, 102781.
- [10] 孟凡继,陈鹏宇,周金晶等. 水-能-粮-土关联下江苏省农业用水量时空特征及驱动因素分析[J]. 江苏水利, 2025, (11): 26-30.
- [11] 王少剑,崔世熹,梁筠怡等. 区域贸易视角下中国水-能-粮系统的水压力研究[J]. 地理学报, 2025, 80(9): 2486-2501.
- [12] 张洪航,梁传彬,张文歆等. 水-能-碳视角下的中国主粮作物热量生产力评估[J]. 水资源与水工程学报,

2025, 36(5): 195-204.

[13] 丁丽瑞. 基于区间规划的水-能-粮纽带系统多目标优化配置模型研究——以冶河灌区为例[J]. 农村经济与科技, 2025, 36(8): 45-52.

[14] Ding, T., Chen, J., Fang, L, et al. Assessing urban ecosystem service supply from the water-energy-food system and multi-scenario perspective[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 105, 105263.

[15] 刘楠, 门宝辉等. 京津冀地区水-能-粮-碳纽带关系及安全探究[J]. 水力发电学报, 2025, 44(3): 89-97.

[16] Karri, R. R., Ravindran, G., Pingali, V., et al. Integrating the Food-Energy-Water Nexus: Strategies for climate change mitigation with SDG alignment[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2025, 106, 107502.

[17] 李占斌, 邓铭江等. 黄河几字弯水土流失区水-能-粮-生融合发展研究[J]. 中国水利, 2025, (2): 67-75.

[18] Wu, M., Liu, G., Morris, R. Synergies and trade-offs in the food-energy-water nexus of rural households: A case study in the North China Plain[J]. Journal of Rural Studies, 2025, 107, 103255.

[19] Huan, S., Liu, L. Research progress of integrated assessment models in food-water-energy-environment analysis: A bibliometric analysis[J]. Energy and Climate Change, 2025, 6, 100112.

[20] 何伟军, 覃晴, 袁亮. 场域视角下的长江经济带水-能-粮系统安全评价及预测研究[J]. 水力发电学报,

2025, 44(4): 102-110.

[21] 王晶, 高紫妍, 陈文辉等. 京津冀水-能-粮-生态系统安全和经济韧性耦合网络研究[J]. 中国农村水利水电, 2025, 37(2): 45-53.

[22] 李彬权, 赵麦换, 刘静等. 以水为核心的“水-能-粮-生”关系研究[J]. 中国水利, 2025, (5): 23-31.

[23] 肖雨. 可持续发展视角下我国水-能-粮-地系统评价、关联与驱动因素研究[D]. 上海师范大学, 2025.

[24] Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., et al. The Water-Energy-Food Nexus Concept: A Comprehensive Review of Applications and Research Areas. Journal of Environmental Management, 2023, 328, 116939.

[25] Endo, A., Tsurita, I., Burnett, K. et al. Approaches to Sustainable Water-Energy-Food Nexus Management. Sustainability, 2020, 12(1), 90.

[26] Zhang, P., Zhang, L., Hao, Y. et al. Challenges and Solutions of Water-Energy-Food Nexus under Carbon Neutrality. Geography and Sustainability, 2024, 5(1), 56-68.

[27] Wang, Z., Fang, C., Wang, J. Quantitative Analysis of the Urban Water-Energy-Food Nexus: A Case Study of Beijing. Journal of Environmental Management, 2024, 351, 119800.

[28] 赵含, 李占玲, 王红瑞等. 黄河中游地区水-能-粮-碳纽带关系模拟与韧性调控[J]. 华北水利水电大学学报, 2024, 45(3): 67-75.