

水资源、能源和碳复杂关系研究进展及发展启示

李 激¹, 李云玲¹, 李原园¹, 宋秋波¹, 寇 通², 邢西刚¹, 彭少明¹, 郭旭宁¹,
孙素艳¹, 李光轩¹, 朱永楠³, 王 浩³

(1. 水利部水利水电规划设计总院; 2. 郑州大学水利与交通学院;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室)

摘要:为厘清水资源、能源和碳复杂关系的发展历程、研究现状及存在问题,本文运用 CiteSpace 软件,系统梳理了 2010—2024 年相关文献,采用定量和定性相结合的方法综述了相关研究进展,剖析了当前存在的问题,总结凝练了未来发展启示。结果表明:发文态势呈现萌芽、探索、发展 3 个阶段,国内外研究热点各有侧重,国际研究聚焦机制与方法,国内研究侧重黄河流域等水资源、能源和碳矛盾突出的区域和典型场景下的政策落地;已有研究内容主要涵盖自然与社会系统、现状与未来维度、宏观与微观视角、内部与外部层级,形成了现阶段多系统、多维度、多视角和多层级的综合研究体系,旨在揭示水资源、能源和碳复杂关系机制,解析动态时空演化规律、跨尺度联动效应与层级交互作用机制。未来研究应强化机理研究,融合多学科方法,构建定量评估体系与全链条框架,以支撑多目标协同发展。

关键词:水资源;能源;碳;复杂关系;知识图谱

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2026)05-0195-10

Research progress and development implications of complex relationship among water resources, energy, and carbon//Li Wei¹, Li Yunling¹, Li Yuanyuan¹, Song Qiubo¹, Kou Tong², Xing Xigang¹, Peng Shaoming¹, Guo Xuning¹, Sun Suyan¹, Li Guangxuan¹, Zhu Yongnan³, Wang Hao³(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, MWR; 2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract: To clarify the development process, research status and existing problems of the complex relationship among water resources, energy and carbon, the paper utilizes CiteSpace software to systematically review relevant literature from 2010 to 2024. A combination of quantitative and qualitative analysis methods is adopted to summarize the related research progress, analyze the existing problems and summarize the future development inspirations. The results show that the publication trend can be divided into three stages: germination, exploration and development. The research hotspots in domestic and international fields have different focuses. International research focuses on mechanism and methods, while domestic research focuses on policy implementation in regions with prominent water resources, energy and carbon conflicts, such as the Yellow River Basin, as well as in typical scenarios within these areas. The existing research mainly covers the nature and society systems, current and future time dimensions, macro and micro perspectives, and internal and external hierarchical levels. A comprehensive research system characterized by multi-system, multi-dimensional, multi-perspective and multi-hierarchical level has been formed, aiming to reveal the mechanism of the complex relationship among water resources, energy and carbon, and interpret dynamic spatiotemporal evolution laws, cross-scale linkage effects and hierarchical interaction mechanisms. Future research should strengthen mechanism exploration, integrate multi-disciplinary approaches and establish a quantitative evaluation system and a full-chain framework, so as to support the multi-objective coordinated development.

Key words: water resources; energy; carbon; complex relationship; knowledge map

水资源、能源和碳并非孤立系统,而是存在着多重反馈的紧密耦合复杂关系。随着工业化与城镇化进程加速,全球能源需求量预计到 2035 年将增加 35%;同时,淡水资源与经济发展不匹配将导致超过

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211303,2023YFC3206505);国家自然科学基金项目(52509029)
作者简介:李激(1993—),女,工程师,博士,主要从事水-能-粮-生耦合系统研究及水利规划与战略研究。E-mail:liweily@gwip.org.cn
通信作者:李云玲(1978—),女,正高级工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:liyunling@gwip.org.cn

40 亿人用水困难。若趋势延续,至 2050 年碳排放量将增加 70%^[1]。能源需求激增、水资源短缺与碳排放攀升的叠加,对环境安全、经济发展及社会稳定构成系统性威胁^[2-3]。水资源开发、利用、配置与保护全过程均需能源作为动力支撑^[4],并伴随温室气体排放;能源开发利用过程同样会消耗大量水资源,且产生更多碳排放,从而使得水资源、能源和碳三者间存在复杂关系^[5]。因此,梳理水资源、能源和碳复杂关系 (complex relationship among water resources, energy and carbon, WEC-CR) 的研究现状,不仅有利于厘清三者间的交互机制,更对优化水资源配置、推动能源转型、实现碳减排目标及保障可持续发展具有指导意义。

我国水资源、能源和碳多系统面临资源禀赋与空间分布的严重错配,以占全球约 6% 的水资源支撑了约 24.3% 的能源消费和 28.8% 的碳排放,已于 2005 年和 2009 年分别成为全球第一大碳排放国和能源消费国,空间错配及需求旺盛加剧了生态环境压力^[6]。部分地区矛盾尤为突出,如北方地区以全国 19% 的水资源承载了 46% 的人口和 60% 的煤炭产能,资源供需冲突、利用效率瓶颈与生态安全风险交织,使其成为水资源、能源和碳复杂关系矛盾凸显的典型区域^[7]。在此背景下,我国提出“双碳”目标,旨在弱化资源消耗、碳排放与生态恶化之间的深层矛盾^[8-9]。现阶段国内外针对水资源、能源和碳复杂关系的相关研究,主要聚焦在以下 3 个方面:①系统复杂关系识别研究,如计算得出全球约 8% 的能源用于水系统,约 15% 的水资源用于能源生产,揭示了水资源、能源和碳多系统间的关联特征^[10]。②关键过程与机制解析研究,如开展了水资源、能源和碳复杂关系在自然与社会层面的机理解析。自然层面侧重碳水循环机理^[11],如利用碳同化过程与水分蒸散过程耦合模型揭示了流域尺度碳-水关联;社会层面重点关注政策与产业互动^[12],如开展了“以水定产”政策对能源技术革新的驱动解析。③区域异质性与尺度效应研究,开展地理与政策背景下的空间差异性解析^[13],如解析了干旱区、资源矛盾区水资源对能源开发的强约束作用等。尽管现阶段已针对水资源、能源和碳复杂关系开展了一系列研究,但仍存在局限,主要体现在以下两方面:①理论体系尚未统一,研究碎片化特征显著。因基本概念界定、系统边界划分及耦合机制解析等方面缺乏共识,不同研究内容之间的可比性与整合性较弱,使得研究成果呈现碎片化特征。②学科壁垒突出,研究方法割裂严重。自然科学方向多聚焦水-能转化的物理过程与碳循环的生化机理,社会经济领域则侧重政

策调控与经济驱动效应分析,跨学科融合不足,使得自然与社会全链条耦合机制解析不够深入,政策模拟的全系统覆盖能力受限,难以满足现实治理需求。因此,有必要对现有研究开展全面、系统的梳理与整合^[14],归纳总结并形成全方位认知,厘清水资源、能源和碳复杂关系的发展历程、研究现状及存在问题,进而揭示当前研究体系中的薄弱环节,为未来水资源、能源和碳复杂关系研究提供基础支撑与明确的靶向方向,推动多系统可持续理论基础发展。

基于此,本文利用 CiteSpace 软件,采用定量分析与定性归纳相结合的方法,厘清国内外水资源、能源和碳复杂关系的研究演进路径和研究热点,归纳研究内容、存在问题及发展启示等,以掌握研究现状和把握未来研究趋势,为推动水资源、能源和碳复杂关系研究发展提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

采用定量分析与定性归纳相结合的方法。定量方面,运用 CiteSpace 软件对国内外文献进行可视化分析,通过发文趋势、关键词聚类等生成知识图谱^[15],揭示该领域的研究演进路径。定性方面,系统梳理该领域的研究方向、对象、尺度与方法,综合分析水资源、能源和碳复杂关系领域的研究进展。在此基础上,整合定量与定性分析结果,识别现阶段研究存在的问题,并提出未来研究展望。

1.2 数据来源

数据来源于 WOS (Web of Science) 和中国知网 (CNKI) 数据库,收集了 2010—2024 年水资源、能源和碳复杂关系相关文献。在 WOS 数据库中使用高级检索,以“‘water’ and ‘energy’ and ‘carbon’”为关键词进行精确检索;在 CNKI 数据库中使用高级检索,以“水”“能源”“碳”或“水”“能”“碳”为关键词进行精确检索,选择同时包含 3 个词的文献。检索截止时间为 2024 年 12 月 30 日,共检索到 548 篇英文文献,96 篇中文文献,剔除化工等不相关领域文献后,最终整理得到 370 篇英文文献和 59 篇中文文献。

2 研究阶段与研究热点

2.1 研究阶段

由于 2000—2009 年水资源、能源和碳复杂关系相关论文数量较少,年均发文量不足 5 篇,故从 2010 年起开始进行文献梳理。根据水资源、能源和碳复杂关系研究发文量及发展历程 (图 1),可将其演进路径划分为 3 个主要阶段:①萌芽阶段 (2010—

2015 年),年均发文量不足 10 篇,研究多集中于对森林、热带雨林等自然系统碳-水通量的定量分析,这一阶段我国分别针对水资源、能源等提出发展战略规划,整体来看,该阶段国内尚未聚焦三者间的复杂关联。②探索阶段(2016—2019 年),年均发文量增至约 20 篇,2018 年世界水论坛进一步强调需在能源、粮食与水系统领域采取综合行动,促使该阶段研究逐步转向水资源、能源和碳复杂关系内涵解析与政策探讨。③发展阶段(2020—2024 年),年均发文量超 50 篇,随着 2020 年第七十五届联合国大会对气候问题的高度关注,以及我国“双碳”目标、水资源刚性约束制度相继提出,水资源、能源和碳复杂关系整体协同治理研究进入活跃期。该阶段研究内容逐步深化至三者协调机制层面,聚焦于复杂关系的定量刻画与系统治理。值得注意的是,中国水资源、能源和碳复杂关系研究逐渐丰富,中国发文量占比显著提升,约占全球总量的 60%。不同阶段关键事件见表 1。

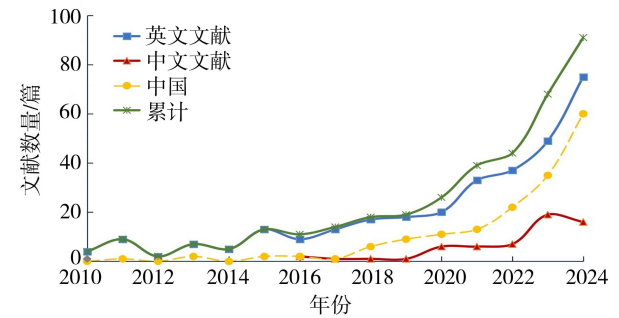


图 1 2010—2024 年水资源、能源和碳复杂关系研究发文量
Fig.1 Publication quantity for research of WEC-CR from 2010 to 2024

2.2 研究热点

2.2.1 国际研究热点

利用 CiteSpace 软件对英文文献关键词进行聚

类分析(图 2),时间选取 2010—2024 年,切片长度为 1 a,采用路径寻找算法进行剪枝,并根据对数似然比生成标签,根据聚类重要程度从高到低划为等级 G1~G8。国际水资源、能源和碳复杂关系研究热点可分为两类:①主要围绕研究内容,以 G1、G2 和 G4 为焦点,一方面侧重陆地生态系统,注重碳循环与水循环的相互作用及对全球变化的响应机制^[16];另一方面侧重社会经济系统,聚焦能源转型过程中节能、节水和减排的协同效应,尤其关注化石能源与清洁能源替代路径的减排潜力^[17]。②主要围绕技术方法,包括 G3、G5 和 G6 等,致力于通过不同技术方法开展水资源、能源和碳多系统通量的观测、模拟与核算^[18],如采用环境投入产出法揭示水、能源与碳在经济部门间及区域间的流动与转移机制^[19];采用热遥感技术进行能量与水蒸气通量的空间量化,提升系统模拟精度^[20]。

2.2.2 国内研究热点

选取中文文献较为丰富的 2016—2024 年,切片长度为 1 a,剪枝并生成标签,分析中文文献关键词聚类结果(图 3),热点主要集中于两大类:①自 2016 年起 G1 持续成为焦点,2018 年起 G2 开始成为焦点,这与我国“双碳”目标的推进紧密相关。②围绕 G3 等区域聚焦型研究。东北地区作为重工业与粮食主产区,水资源短缺与高碳排放矛盾突出,相关研究重在资源禀赋与产业需求的失衡治理^[21];黄河流域则以不足全国 2%的水资源支撑了 12%的人口及 50%以上的煤炭储量,相关研究主要聚焦水资源刚性约束下能源开发与生态保护的协同路径^[22]。东北地区与黄河流域作为典型案例区,其本质是水资源短缺-高碳排放-高能耗系统矛盾突出、粮食与能源安全的国家战略迫切需求以及多目标优化协同治理复杂系统三重逻辑的叠加效应。

表 1 水资源、能源和碳复杂关系研究关键事件

Table 1 Key events of WEC-CR research			
事件类型	萌芽阶段	探索阶段	发展阶段
水资源 相关事件	2012 年 1 月,国务院发布了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》	2018 年 3 月,世界水论坛探讨了水、能源和气候变化之间的相互作用,强调水资源在实现可持续能源和减少碳排放中的关键作用	2020 年 10 月,党的十九届五中全会提出水资源刚性约束;2021 年 10 月召开的深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会提出“四水四定”原则
	2011 年,水、能源、粮食安全纽带关系会议(波恩会议)召开;2013 年 1 月,能源发展“十二五”规划发布;2015 年 9 月,联合国可持续发展峰会正式通过了包括清洁饮水、清洁能源、气候行动等在内的 17 个发展目标	2016 年 12 月,《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》正式确定“四个革命,一个合作”国家能源发展战略	2020 年 12 月发布《新时代的中国能源发展》白皮书
能源 相关事件			
碳 相关事件	2015 年 11 月,第 21 届联合国气候变化大会多个国家签订《巴黎协定》,共同面对气候挑战	2020 年 9 月,在第七十五届联合国大会一般性辩论上,中国明确提出将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和	党的二十届三中全会通过《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》,提出建立能耗双控向碳排放双控全面转型新机制

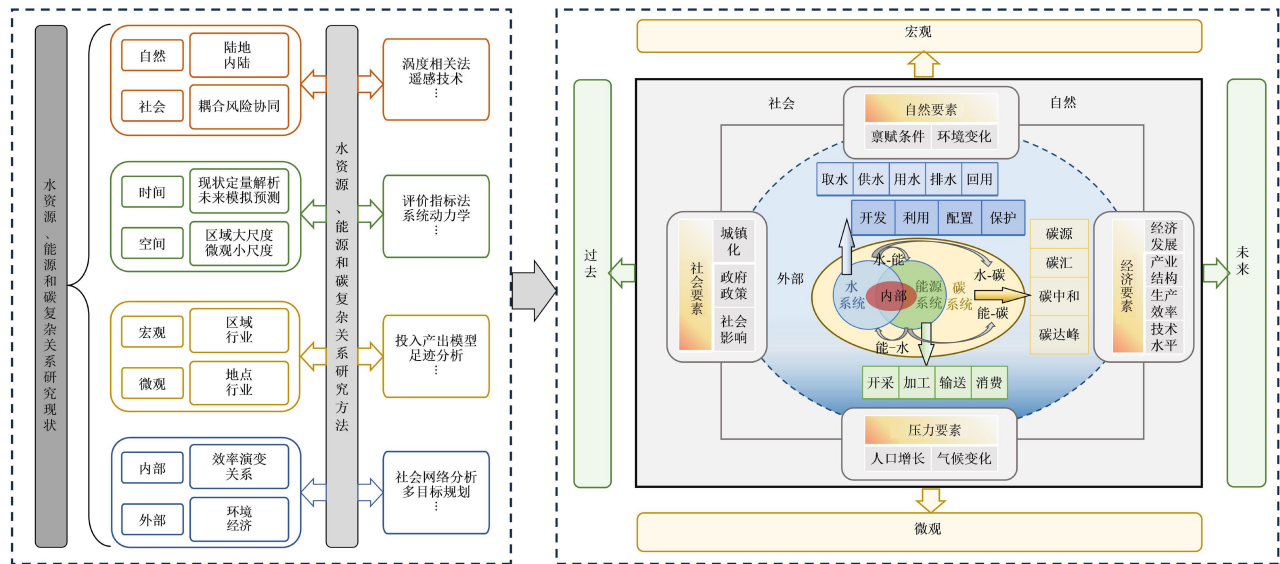


图 4 水资源、能源和碳复杂关系研究内容

Fig. 4 Research contents on WEC-CR

究多采用核算方法与评价模型,通过对历史数据分析厘清水资源、能源和碳复杂关系的相互作用机制与演变规律。例如:Li 等^[33]运用投入产出模型,测算 2002—2015 年中国各部门直接和间接产生的隐含水、能源消耗以及碳排放总量,发现农业等部门隐含水激增,因此提出需从部门联动视角制定农业节水措施。现状尺度研究旨在通过明晰时空异质性及驱动因素,为发现现存问题、制定管控规划提供关键依据。

b. 约 20% 的文献采用系统动力学、机器学习等方法开展未来情景预测。通过构建耦合模型,设置多种政策与气候情景,预测区域至国家尺度的水资源利用、能源消费与碳排放趋势,并评估其协同效率与权衡关系^[21]。例如:Cheng 等^[34]采用模糊能源-碳-水关联模型量化了福建省 2022—2050 年电力系统在不同政策导向下不同决策目标之间的权衡关系;Xiang 等^[35]预测 2030 年全国多数地区水资源、能源和碳多系统利用效率偏低。未来模拟研究旨在通过识别未来风险与政策交互影响,为科学决策与路径优化提供关键支撑^[36]。

3.3 宏观与微观视角

a. 宏观尺度研究约占 70%,主要聚焦全球、国家、流域及区域层面,揭示资源跨部门流动与空间配置问题。全球层面,农业灌溉是核心用水部门,约占 70%^[37]。国家层面,能源生产在工业化国家中耗水量占比较高,如 2015 年美国热电取水水量占比约为 40%^[38]。我国 2023 年农业用水占比约为 62%,工业用水占比约为 16%,其中,火核电直流冷却水约占工业用水的 50%,农业与工业用水合计占比近

80%,凸显高耗水与高排放部门高度重叠特征。流域层面,黄河流域作为粮食与能源基地,其农业用水占比 66.31%^[22],第二产业能源消耗与碳排放占比均超 90%,水资源短缺制约区域农业和能源发展,甚至影响国家供应链安全。宏观视角研究强调科学统筹不同区域、不同行业需求匹配状况,支撑区域可持续发展。

b. 微观尺度研究约占 30%,深入具体技术、设施或管理单元内部,剖析水资源、能源和碳关联机理与效率差异。研究覆盖农业种植系统^[39-41]、城市水系统^[4]、工业过程^[42-44]及单体建筑^[45-46]等,通过精细化的过程解析与核算,量化不同研究对象的能耗与碳足迹等特征。微观尺度研究通过精准解析具体场景的复杂关系,为技术改进、流程优化及精准减排提供理论依据。

3.4 内部与外部层级

a. 内部层级研究旨在通过改进单一或多个子系统间要素效率,驱动单个系统较优或者寻求多系统协同优化发展。单系统层面,旨在通过能源结构转型、水资源循环利用等技术提升单系统效率。两系统协同层面,重点在于利用水资源-能源耦合技术与碳捕集、利用与封存等集成技术,实现资源互补,加强资源联动与污染共治。多系统整合层面则强调跨领域技术融合,通过动态匹配水、能、碳流动路径,提升整体资源利用效率。如我国部分省份工农业部门碳排放效率存在显著差异^[47],水-能网络循环率普遍低于 40%^[35],竞争关系突出。内部层级研究的核心挑战与研究方向在于识别、量化和提高单系统效率,寻找多系统间的最优平衡点^[21]。

b. 外部层级主要受自然、社会、经济、压力等外部因素影响。其中,自然要素是基础性影响因子,资源禀赋与气候变化直接决定水、能、碳的分布格局与稳定性^[48]。此外,土地利用等自然要素影响水资源、能源和碳复杂系统,如赵荣钦等^[49]将土地利用纳入水-土-能-碳系统的构建,揭示子系统间的互动机制。社会经济要素则通过政策、产业、技术等途径驱动系统演变,其中,产业政策与环保法规引导资源开发方向与配置方式^[50],产业结构与技术水平影响资源利用效率与排放强度。相关学者研究表明,经济与人口增长通常是加剧资源环境压力的主因,而技术与结构优化则是促进系统与经济发展“脱钩”、实现可持续转型的关键驱动力^[51]。外部层级分析为厘清水资源、能源和碳复杂关系与宏观环境的互动机制提供了系统性视角。

4 存在问题及发展启示

水资源、能源和碳复杂关系研究现状及发展启示如图 5 所示。

4.1 自然与社会系统

自然系统研究聚焦内陆水体与陆地生态系统的碳水耦合。当前重点在于解析水生代谢过程及其水-气交换碳通量,探究不同土地利用类型对内陆水体净初级生产力与二氧化碳排放的耦合影响。尽管气候变化影响研究较为多见,但不同生态系统的碳水耦合内在机制差异尚不明晰,制约了系统模拟与

预测精度。未来亟须融合生态学、地球化学及气象学等多学科方法,依托地球系统模型深化机制模拟,揭示全球变化下碳水循环的反馈机制,以支撑气候变化背景下的水资源管理与生态保护决策。

社会系统研究应主要围绕三大核心展开。

a. 碳源碳汇失衡与调控缺失。工业生产、能源消耗等碳源与森林、湿地等碳汇分布失衡,且缺乏系统评估与调控机制。未来亟须构建全面监测体系,通过产业结构调整、生态修复等措施,解析碳源碳汇动态关系,以实现区域碳平衡。

b. 水资源与能源空间错配,协同路径不明。二者空间分布错配问题突出,亟须借助空间分析技术优化布局;同时,聚焦社会水循环能耗解析,明确水利设施建设运营的碳排放管理路径,通过对比不同场景下水资源系统能耗与碳排放特征,支撑三者协同发展。

c. 能源安全战略下,碳目标与水资源错配。核心矛盾在于传统能源依赖与低碳转型的路径冲突,以及水资源与能源空间错配导致的生态承载失衡。未来亟须通过空间优化与技术创新,突破减排技术瓶颈与产业重构成本约束,减少能源生产对水资源的依赖,实现水资源合理利用与低碳发展双赢。

4.2 宏观与微观视角

宏观尺度上,我国水资源、能源和碳复杂关系面临多重结构性挑战,主要体现在水资源、水生态环境、水利工程和体制机制管理 4 个方面,核心矛盾体



图 5 水资源、能源和碳复杂关系研究现状及发展启示示意图

Fig. 5 Schematic diagram of current research status and development insights on WEC-CR

现在资源空间错配与部门协同不足。水资源与能源分布失衡突出,北方能源富集区水资源承载力不足,而南方丰水地区能源开发效率有待提升,加剧了区域供需矛盾。水生态层面,河湖生态流量保障不足、湿地碳汇功能退化以及水土流失引发的土壤碳库流失,削弱了生态系统的固碳能力^[52]。水利工程作为关键人为干预系统,其规划设计、建材生产、施工建造及运行维护的全生命周期均存在高碳排放问题,且当前缺乏有效的碳减排协同机制与低碳改造激励政策^[53]。体制机制方面的问题主要体现在水资源、能源和碳多系统分属不同管理部门,缺乏统一的规划与政策体系,导致资源配置效率低下,从而成为水资源、能源和碳多系统协同发展的瓶颈。未来亟待通过系统协同与调控,破解水资源空间错配瓶颈,强化河湖生态流量保障与碳汇功能修复,推动水利工程全生命周期低碳化转型,并构建跨部门统一规划与政策协同机制,以实现水资源、能源和碳多系统综合效能最大化。

微观尺度上,社会水循环的取、供、用、排各环节紧密耦合,是水资源、能源和碳多系统关联作用与节能降碳的关键场域。取水环节的能耗强度差异显著,河湖提水、跨流域调水以及海水淡化能耗分别为 $0.2 \sim 1.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 、 $0.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 和 $3 \sim 4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[29]。供水环节的能效提升空间较大,长距离($>100 \text{ km}$)输水能耗占供水总能耗的 $60\% \sim 80\%$,老旧管网漏损率为 $15\% \sim 25\%$,优化供水网络是降碳重点。用水环节中农业灌溉能耗占据主导,占农业总能耗的 70% 。排水环节的污水处理、再生水产水能耗分别为 $0.3 \sim 0.6 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 和 $0.8 \sim 1.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,能耗占比较高。未来亟须发展低碳处理工艺并构建全过程碳管理体系。

4.3 内部与外部层级

内部层级问题核心在于单个、两两以及三个系统之间技术效率较低与要素传递机制不清晰。水资源处理与能源转换技术效率不足,如污水处理能耗偏高^[54]、火电节水技术应用有限,制约协同效能。同时,水、能、碳要素之间传递与反馈关系复杂且缺乏系统解析,导致其交互机制不清晰,制约了单个、两两以及三个系统的协同优化与资源配置效率。

外部层级挑战集中于不确定性风险与跨要素协同不足方面。气候变化引发降水格局改变与极端水文事件,加剧资源供应波动;国际能源市场动荡与地缘冲突进一步冲击区域能源结构调整与碳减排进程。此外,水、能、土地等多个要素在政策与管理中缺乏统筹,部门目标差异导致合力不足,影响协同效能与风险应对^[55]。

4.4 全链条研究

鉴于当前水资源、能源和碳复杂关系研究缺乏全链条整合,自然系统碳循环机理与社会系统政策市场影响研究较为分散,宏观与微观尺度衔接不足,内外驱动要素协同机制不明晰,导致多目标优化缺乏系统性定量支撑。未来亟须构建融合多学科、全链条的研究框架,衔接自然与社会系统、宏观与微观视角、内部与外部层级,融合多学科方法,搭建多层次模型,完善定量评估体系,识别关键耦合界面与传导路径,协同能源结构优化、生态保护与发展目标,形成可操作的多目标调控策略,支撑系统低碳转型。

5 结 论

a. 从定量研究来看,根据文献数量及主要事件将水资源、能源和碳复杂关系发展历程归纳为 3 个阶段:萌芽阶段(2010—2015 年)主要聚焦自然通量研究;探索阶段(2016—2019 年)逐步开展内涵及政策相关研究;发展阶段(2020—2024 年)发文量呈现快速增长趋势,我国发文量逐步领先,约占发文总量的 60% 。研究热点方面,国际研究聚焦流域尺度耦合机制以及投入产出模型、通量观测技术等机制与方法;国内研究侧重将矛盾区域作为典型区域,开展政策落地研究。

b. 从定性分析研究内容来看,现阶段研究主要包括自然与社会系统、现状与未来维度、宏观与微观视角、内部与外部层级,形成了多系统、多维度、多视角和多层级综合研究体系,以支撑可持续转型决策。具体来看,主要以自然与社会系统耦合为核心,自然系统侧重陆地与水体的碳水循环机制,社会系统聚焦城市水-能关联及政策影响。时间维度研究主要采用现状评估及未来模拟,揭示水、能源和碳排放的短期和长期动态规律;空间维度旨在明确不同区域水资源、能源和碳多系统间分布差异与关联特征,为区域协同管理及资源优化配置提供空间格局依据。宏观视角旨在揭示国家或流域结构网络,微观视角重在探析部门或工程效率路径。内部层级重在资源效率与协同优化研究,外部层级重在调和与环境矛盾,探索水资源、能源和碳复杂关系内外部机理。

c. 从存在问题及发展启示来看,自然与社会系统层面,自然系统中内陆水体与陆地生态系统碳水耦合机制研究不足,尤其缺乏全球气候变化下差异机制的解析;社会系统中碳源碳汇分布不均衡、水-能空间适配性差,且缺乏跨产业、跨区域的协同调控体系。宏观与微观视角上,宏观尺度上面临水资源与能源布局错配及多系统协同不足等困境;微观尺

度上则凸显社会水循环各环节能效低下,亟须技术升级与行为优化。内部与外部层级方面,内部要素传递机制不明;外部要素受气候风险、地缘冲突及政策割裂制约,多要素协同管理缺位。整体来看,存在全链条研究断层,导致自然与社会系统、宏观与微观视角、内部与外部层级间研究脱节,缺乏理论机理研究和多学科融合的定量评估模型,难以支撑能源转型、生态保护与经济平衡等多目标优化。为此,未来需加强各系统、尺度和层级间作用机理研究,完善定量评估体系,通过整合多学科方法构建全链条框架,从而实现对水资源、能源和碳多系统间的精准调控与优化,为多目标协同发展提供科学支撑。

参考文献:

[1] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, et al. Impacts of 1.5℃ global warming on natural and human systems [M]//Masson-Delmotte V, Pörtner H O, Skea J, et al. Global Warming of 1.5℃:an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5℃ above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: IPCC,2018:175-311.

[2] Oh X B, Rozali N E M, Liew P Y, et al. Design of integrated energy-water systems using Pinch analysis: a nexus study of energy-water-carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 322: 129092.

[3] 杨晨星, 庞庆华. 基于 STIRPAT 模型的淮河生态经济带碳排放门槛效应研究[J]. 水利经济, 2025, 43(1): 42-47. (Yang Chenxing, Pang Qinghua. Research on threshold effect of carbon emissions in Huaihe River Ecological Economic Belt based on STIRPAT model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(1): 42-47. (in Chinese))

[4] 赵荣钦, 余娇, 肖连刚, 等. 基于“水-能-碳”关联的城市水系统碳排放研究[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3119-3134. (Zhao Rongqin, Yu Jiao, Xiao Liangang, et al. Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3119-3134. (in Chinese))

[5] Venkatesh G, Chan A, Brattebø H. Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: comparison of four city case studies and the relevant influencing factors[J]. Energy, 2014, 75: 153-166.

[6] Du Shixiong, Liang Changmei, Sun Huaiwei, et al. Policy implications of energy-water-carbon emissions nexus based on national policies in China [J]. Energy, 2025, 339: 138950.

[7] 李原园, 李云玲, 何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1340-1346. (Li Yuanyuan, Li Yunling, He Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1340-1346. (in Chinese))

[8] 沈际杰, 柏欣莉, 衣鹏. 节水建设城市用水时空差异模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 38-43. (Shen Jijie, Bai Xinli, Yi Peng. Research on temporal and spatial difference model of urban water use for water-saving construction [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 38-43. (in Chinese))

[9] 刘洛生, 伏建民, 钱凯, 等. 水利工程施工阶段减碳措施与碳排放管理研究[J]. 水利经济, 2024, 42(4): 47-52. (Liu Luosheng, Fu Jianmin, Qian Kai, et al. Discussion on carbon reduction methods and carbon emission management in the construction stage of water conservancy projects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 47-52. (in Chinese))

[10] Hoff H. Understanding the nexus: background paper for the Bonn2011 Conference: the water, energy and food security nexus [R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.

[11] Choudhury B J. Carbon-water-energy relations for selected river basins[J]. Advances in Space Research, 2000, 26(7): 1091-1099.

[12] Qin Jingxiu, Duan Weili, Zou Shan, et al. Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 3084.

[13] 程蕾, 陈吕军, 田金平, 等. “以水定产”驱动的黄河流域可持续水管理策略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 187-197. (Cheng Lei, Chen Lyujun, Tian Jinping, et al. Sustainable water management in Yellow River Basin based on balancing water resources and industrial development[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 187-197. (in Chinese))

[14] 王红瑞, 李晓军, 张力, 等. 水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 13-21. (Wang Hongrui, Li Xiaojun, Zhang Li, et al. Research progress and the prospect of a complex relationship between water-energy-carbon emission [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 13-21. (in Chinese))

[15] 李激, 赵勇, 姜珊, 等. 水、能源和粮食纽带关系研究进展及发展启示[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 1-15. (Li Wei, Zhao Yong, Jiang Shan, et al. Research progress and development enlightenment of the water, energy, and food nexus[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 1-15. (in Chinese))

[16] Lee X, Hu Xinzhang. Forest-air fluxes of carbon, water and

- energy over non-flat terrain [J]. Boundary-Layer Meteorology,2002,103(2):277-301.
- [17] Meng Linghao, Asuka J. Impacts of energy transition on life cycle carbon emission and water consumption in Japan's electric sector[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5413.
- [18] Da Silva P F, De Sousa Lima J R, Antonino A C D, et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil[J]. Journal of Arid Environments, 2017, 147:71-82.
- [19] Wang Yanwei, Luo Weijun, Zeng Guangneng, et al. Characteristics of carbon, water, and energy fluxes on abandoned farmland revealed by critical zone observation in the karst region of southwest China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 292:106821.
- [20] Baldocchi D, Falge E, Gu Lianhong, et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [21] 王菲,曹永强,范帅邦. “双碳”目标下东北三省水-能源纽带关系及网络特征分析[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5692-5707. (Wang Fei, Cao Yongqiang, Fan Shuaibang. Analysis of water-energy ties and network characteristics in the three provinces of northeast China under the “double carbon” target [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5692-5707. (in Chinese))
- [22] 王菲,陈敏,曹永强,等. 黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征[J]. 水利水电科技进步, 2024, 44(4): 31-37. (Wang Fei, Chen Min, Cao Yongqiang, et al. Network characteristics of water-land-energy-carbon correlation system of nine provinces along the Yellow River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 31-37. (in Chinese))
- [23] Fuhrman J, Bergero C, Weber M, et al. Diverse carbon dioxide removal approaches could reduce impacts on the energy-water-land system [J]. Nature Climate Change, 2023, 13(4): 341-350.
- [24] Chan F C C, Arain M A, Khomik M, et al. Carbon, water and energy exchange dynamics of a young pine plantation forest during the initial fourteen years of growth[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 410:12-26.
- [25] Liu Shaomin, Xu Ziwei, Che Tao, et al. A dataset of energy, water vapor, and carbon exchange observations in oasis-desert areas from 2012 to 2021 in a typical endorheic basin[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(11): 4959-4981.
- [26] Aguilera E, Vila-Traver J, Deemer B R, et al. Methane emissions from artificial waterbodies dominate the carbon footprint of irrigation: a study of transitions in the food-energy-water-climate nexus (Spain, 1900-2014) [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(9): 5091-5101.
- [27] 段凯,孙阁,刘宁. 变化环境下流域水-碳平衡演化研究综述[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 300-309. (Duan Kai, Sun Ge, Liu Ning. A review of research on watershed water-carbon balance evolution in a changing environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(3): 300-309. (in Chinese))
- [28] Deemer B R, Harrison J A, Li Siyue, et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis[J]. BioScience, 2016, 66(11): 949-964.
- [29] Tian Jinyu, Meng Zhe. Study on the effect of digital economy development on carbon emissions: evidence from 30 provinces in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(60): 126088-126103.
- [30] 姜珊. 水-能源纽带关系解析与耦合模拟[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [31] 王建华,朱永楠,李玲慧,等. 社会水循环系统水-能-碳纽带关系及低碳调控策略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 191-201. (Wang Jianhua, Zhu Yongnan, Li Linghui, et al. Water-energy-carbon nexus of social water cycle system and low-carbon regulation strategy [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(4): 191-201. (in Chinese))
- [32] 苏健,梁英波,丁麟,等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001-1009. (Su Jian, Liang Yingbo, Ding Lin, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001-1009. (in Chinese))
- [33] Li Hao, Zhao Yuhuan, Kang Jianing, et al. Identifying sectoral energy-carbon-water nexus characteristics of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249:119436.
- [34] Cheng Yang, Jin Lei, Fu Haiyan, et al. Investigating the impact of climate change and policy orientation on energy-carbon-water nexus under multi-criteria analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 114032.
- [35] Xiang Weiqi, Yang Xiaohua, Bian Dehui, et al. Evaluation and prediction of water-energy-carbon nexus efficiency in China based on a new multiregional input-output perspective[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 339:117786.
- [36] Feng Tingting, Liu Bin, Ren Hourui, et al. Optimized model for coordinated development of regional sustainable agriculture based on water-energy-land-carbon nexus system: a case study of Sichuan Province [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291:117261.
- [37] Pomoni D I, Koukou M K, Vrachopoulos M G, et al. A review of hydroponics and conventional agriculture based

- on energy and water consumption, environmental impact, and land use[J]. *Energies*, 2023, 16(4):1690.
- [38] Dieter C A, Maupin M A, Caldwell R R, et al. Estimated use of water in the United States in 2015[R]. Reston: US Geological Survey, 2018.
- [39] Platis D P, Mamolos A P, Kalburtji K L, et al. Analysis of energy and carbon and blue water footprints in agriculture: a case study of tomato cultivation systems [J]. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2021, 6(1):12.
- [40] Tran T, Da G, Moreno-Santander M A, et al. A comparison of energy use, water use and carbon footprint of cassava starch production in Thailand, Vietnam and Colombia[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 100:31-40.
- [41] Zhang Yucui, Shen Yanjun, Xu Xianli, et al. Characteristics of the water-energy-carbon fluxes of irrigated pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd) orchards in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 128:140-148.
- [42] Elshkaki A. Material-energy-water-carbon nexus in China's electricity generation system up to 2050 [J]. *Energy*, 2019, 189:116355.
- [43] Becker L, Gondhalekar D. Estimating the water and carbon footprints of growing avocados in the Munich metropolitan region using waste heat as a water-energy-food nexus potential [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2022, 6:857650.
- [44] Yuan Guohua, Elshkaki A, Xi Xiao. Dynamic analysis of future nickel demand, supply, and associated materials, energy, water, and carbon emissions in China [J]. *Resources Policy*, 2021, 74:102432.
- [45] 陆瑶, 王宏燕, 李炎锋, 等. 大型体育场馆水-能-碳足迹关联模型与不确定性分析[J]. *环境工程*, 2022, 40(12):165-172. (Lu Yao, Wang Hongyan, Li Yanfeng, et al. A water-energy-carbon footprint nexus model for large sports venues and its uncertainty analysis [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(12):165-172. (in Chinese))
- [46] Chhipi-Shrestha G, Hewage K, Sadiq R. Water-energy-carbon nexus modeling for urban water systems: system dynamics approach [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(6):04017016.
- [47] 江文渊, 曾珍香, 张征云. 考虑“水-土-能-碳”关联的我国工农业碳排放效率及减排潜力研究[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(6):120-129. (Jiang Wenyan, Zeng Zhenxiang, Zhang Zhengyun. China's Industrial and agricultural carbon emission efficiency and reduction potential considering the water-land-energy-carbon nexus [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(6):120-129. (in Chinese))
- [48] Feng Yingjie, Zhu Aikong, Wang Jingya, et al. Study on the low-carbon development under a resources-dependent framework of water-land-energy utilization: evidence from the Yellow River Basin, China [J]. *Energy*, 2023, 280:128207.
- [49] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(9):1613-1628. (Zhao Rongqin, Li Zhiping, Han Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9):1613-1628. (in Chinese))
- [50] Pomponi F, Stephan A. Water, energy, and carbon dioxide footprints of the construction sector: a case study on developed and developing economies [J]. *Water Research*, 2021, 194:116935.
- [51] 左其亭, 刘佳政, 蒋国栋, 等. 中国水资源行为二氧化碳排放与经济增长二维脱钩分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6):1-9. (Zuo Qiting, Liu Jiazhang, Jiang Guodong, et al. Two-dimensional decoupling analysis of water resource behavior carbon dioxide emission and economic growth in China[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6):1-9. (in Chinese))
- [52] 李金帅, 郝天象, 杨萌, 等. 中国自然湿地生态系统碳循环关键过程及增汇途径[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(8):2478-2495. (Li Jinshuai, Hao Tianxiang, Yang Meng, et al. Key processes of carbon cycle and sink enhancement paths in natural wetland ecosystems in China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2024, 54(8):2478-2495. (in Chinese))
- [53] 左其亭, 吴青松, 马军霞, 等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1):8-14. (Zuo Qiting, Wu Qingsong, Ma Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1):8-14. (in Chinese))
- [54] 余娇, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 基于“水-能-碳”关联的城市污水处理系统碳排放研究[J]. *资源科学*, 2020, 42(6):1052-1062. (Yu Jiao, Zhao Rongqin, Xiao Liangang, et al. Carbon emissions of urban wastewater treatment system based on the “water-energy-carbon” nexus [J]. *Resources Science*, 2020, 42(6):1052-1062. (in Chinese))
- [55] Gamarra A R, Istrate I R, Herrera I, et al. Energy and water consumption and carbon footprint of school buildings in hot climate conditions. Results from life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195:1326-1337.

(收稿日期:2025-12-29 编辑:施业)