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 H R, LI X J, ZHANG L, 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)

水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望

王红瑞[1], 李晓军[2], 张力[1], 王力萍[2], 姜欣[3]

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 济南市水利工程服务中心, 济南 250099;
3. 山东省水利科学研究院, 济南 250014)

摘要: 系统梳理水-能-碳复杂关系的概念内涵, 认为其本质是水资源、能源以及碳排放在整个产品生命周期过程中的相互关系。回顾了复杂关系的近今进展, 可将评估方法归纳为基于耦合关联视角的评估、基于整体协同视角的评估、基于风险与韧性视角的评估以及基于土地利用视角的综合评估。在此基础上, 建议未来应重点关注 4 个前沿议题, 即基于水-能-碳承载力的国土空间优化研究、水-能-碳视角下资源消耗与经济增长脱钩分析、水-能-碳复杂关系确定性与不确定性量化分析以及水-能-碳工程措施助力“负排放”, 旨在通过水-能-碳系统协同管理推动绿色高质量发展。

关键词: 水-能-碳; 承载力; 脱钩分析; 不确定性

中图分类号: TV213　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0002

随着经济社会的快速发展, 水资源、能源和碳排放关系日趋尖锐, 不仅是未来几十年世界面临的主要风险, 而且被确定为联合国最新可持续发展目标议程中的关键问题[1]。预计到 2050 年, 与能源有关的二氧化碳排放将增加 70%, 温室气体排放将增加 50%。倘若这些排放量继续以目前的速度增长, 将推动碳循环脱离其动态平衡, 导致气候系统发生不可逆转的变化。在极端气候事件多发频发的背景下, 过度碳排放导致的气候变化又将影响水资源和可再生能源的可用性[2]。因此, 必须通过各种社会经济和科学技术干预, 共同努力减少碳排放、增加碳封存。我国已成为世界最大的能源消费国, 人均碳排放量超过世界平均水平的 40%, 在温室气体减排方面我国政府面临前所未有的国际压力[3-4]。为应对全球气候变化, 实现《巴黎协定》承诺, 我国政府提出到 2025 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2020 年下降 18%, 力争 2030 年二氧化碳排放量不再增长, 并在 2060 年之前实现碳中和。这对于全球可持续发展意义重大, 同时也是实现水安全、能源安全、生态环境安全、构建人类命运共同体的重大需求[5]。

系统认知水-能源-碳排放复杂关系对实现社会经济结构转型与生态环境高质量发展至关重要, 也是一项涉及多领域协调推进、权衡谋划的复杂性系统工程。同时, 复杂系统管理标志着资源治理范式由传统的单部门向多部门转型、由局部治理向整体协同治理的综合性转型, 是实现总体国家安全观的重要保障。然而当前中国水-能源-碳排放三者之间相互依存、相互制约, 矛盾日趋严峻, 严重阻碍了经济社会可持续发展。随着国家一系列重大战略的颁布和实施, 如何确保水-能-碳系统安全、从多维视角出发构建资源环境与经济社会可持续发展路径成为当下亟待解决的问题。鉴此, 在分析国内外水-能-碳复杂关系研究历程和最新进展的基础上, 系统梳理水-能-碳复杂关系的概念内涵、研究视角和主要研究方法, 进一步展望未来重点研究方向, 以期推动区域绿色高质量发展。

1　水-能源-碳排放复杂关系概念与内涵解析

水资源、能源和碳排放与经济社会、生态环境高度交织(图 1), 这种复杂的相互关系有时也被称

收稿日期: 2022-12-04　　**修回日期:** 2023-01-16　　**网络出版时间:** 2023-02-07
网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail//13.1430.tv.20230206.1543.002.html
基金项目: 国家自然科学基金项目(52279005); 济南市水务科技项目(JNSWKJ202001)
作者简介: 王红瑞(1963—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn
通信作者: 张力(1997—), 男, 江西鄱阳人, 博士研究生, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: zhanglicws@mail.bnu.edu.cn

为“水-能-碳纽带关系”(water-energy-carbon nexus, WECN)[6]。水资源、能源与碳排放三者以各种形式相互制约并互馈压力,其应对策略受到个体元素的特定限制和它们之间相互关系整体约束的显著影响。具体而言,水资源的开发、运输以及废水处理等过程需要消耗大量的能源,而从采煤到发电的整个能源生产链将在水清洗和冷却作用下完成,能源生产过程和污水处理过程又是碳排放的两大主要来源。

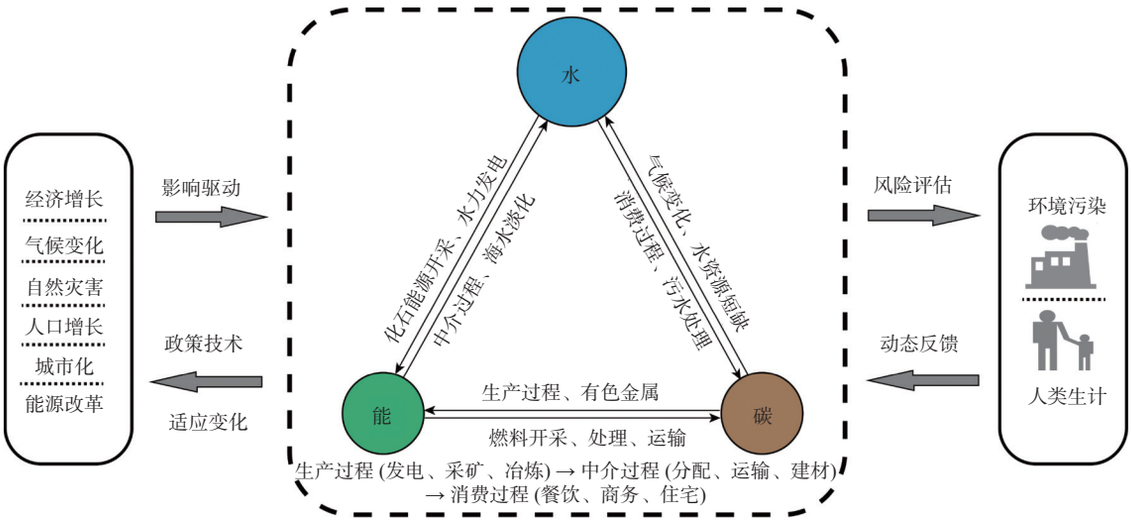

图 1　水-能-碳复杂关系概念框架

Fig. 1　Conceptual framework of Water-Energy-Carbon complex relationship

“十四五”时期作为碳达峰的关键期、窗口期,对于众多能耗领域来说,这意味着不仅要从供给端提高清洁能源的比例,也要从使用端改变用能方式、提高用能效率,而能源转型是否又导致需水量增加却有待进一步研究。与此同时,“双碳”目标是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,通过能源转型改革当前的生产消费系统以减少温室气体排放并促进从大气中捕获二氧化碳,这一重大战略决策实现将加速推动我国能源结构调整和产业结构优化。当前许多问题需要了解水-能源-碳关系,包括气候变化、环境变化下的水和能源需求变化,以及粮食和能源安全政策[7]。我国是全球最大的水资源利用、能源消耗和温室气体排放国家之一,厘清水资源-能源-碳排放三者之间复杂关系有助于确保如期实现中国高质量发展、生态文明建设和生态环境综合治理[8]。鉴此,越来越多的研究将减缓气候变化和二氧化碳排放纳入能源和水系统,并寻求有效措施以实现水-能-碳系统的联合可持续发展[9]。在电力系统规划中,水-能-碳复杂关系可以被解释为三要素间的流通压力以满足不断增长的能源需求,同时减少温室气体排放和取水[10]。有学者[11]将水-能源-碳排放关系定义为提供能源服务或排放控制所消耗的水和用于实现水服务或污染控制的能源。此外,Wang 等[12]强调各类水资源的二氧化碳排放和水足迹与能源消耗成正比,即水-能-碳关系存在协同效应。为涵盖水-能-碳复杂关系的所有维度,笔者将水-能-碳复杂关系的本质定义为水资源、能源以及碳排放在整个产品生命周期过程中的相互关系,实际上它作为一种概念方法,可以更好地帮助理解和系统分析人类活动与自然环境之间的相互作用,并致力于跨部门协调管理自然资源。

2　水-能源-碳排放复杂关系研究进展

将水-能源-碳排放视作一个有机的复杂系统,开展其复杂关系研究,揭示其复杂机理特征,协同优化其与社会经济、生态环境关系,是将节水、节能、减排落到实处的基础工作。最初学者们基于计量学的面板数据分析,围绕水资源、能源、碳排放三者间的相互关系展开研究,现阶段则朝着多尺度和多角度不断发展。本研究重点从耦合关联、协同发展、风险与韧性、土地利用 4 个视角对水-能-碳复杂关系研究进行评述。

2.1　基于耦合关联视角的水-能-碳关系研究进展

在许多城市可持续发展评估与规划体系中,水、能、碳被认为是衡量城市环境维度可持续发展水平的重要指标[13],其研究已在区域[14-15]、国家[16]和全球[17]等多个尺度下进行了讨论。不同的方法也被

应用于描述三者间的复杂关系，例如系统动力学[18]、多主体模型[19]、生命周期分析[20]、投入产出模型[12, 21]、供应链分析[22]、链接分析[14]、生态网络分析[23]和空间集聚分析[24]，归纳总结见表 1。一些研究侧重于少数典型行业的联系，特别是电力行业的水-能-碳关系。例如，Sharifzadeh 等[25]开发了一个优化框架研究中国低碳水电路线图，涉及现有的水-能基础设施，以及可再生能源和绿色技术的投资。类似地，Zhang 等[26]探讨了电力部门缓解水资源压力和减少碳排放的可能情景。其他一些研究[27]聚焦于水-能-碳连接的时空和流动模式，将中国的能源系统和水资源系统整合起来，评估碳和水约束对电力结构和技术影响的投资组合。总体来看，已有研究中单一方法的应用仅能考虑部分要素的影响，还不能体现出水-能-碳系统相互作用的复杂特性，因而，笔者认为厘清水-能-碳系统复杂关系还需要从机理上、时空多尺度上做深入分析以及多模型的集成研究。

表 1　水-能-碳耦合关系模拟预测研究

Tab. 1　Research on simulation and prediction of water-energy-carbon coupling relationship

研究方法	研究切入点	研究区
系统动力学[18]	电源结构转型过程中碳排放的主要影响因素	中国
多主体模型[19]	主体偏好对水力发电和生态系统健康的影响	湄公河
生命周期分析[20]	不同发电技术下水资源消耗和碳排放	中国
投入产出模型[12]	虚拟水、虚拟能流以及虚拟碳排放	中国
供应链分析[22]	生态经济学视角识别水-能关键供应链	英国
链接分析[14]	城市化进展下水-能消耗的协同效应及经济部门间的相互消耗作用	北京
生态网络分析[23]	不同能源类型用水量和各用水阶段的能耗	中国
空间集聚分析[24]	能源消费碳排放的空间特征及影响因素	长江上游

2.2　基于协同视角的水-能-碳关系研究进展

能源需求增加、水资源减少和碳排放导致气候变化加剧的三重压力对水-能-碳复杂系统的鲁棒性等造成了重大影响，资源和生态环境问题的研究不可再聚焦单一问题，而是须明确多系统之间的耦合关联和作用机制，全方位实现水-能-碳的协同研究和管理对策，力求发挥协同效益，避免协同困境，从而达到协同降低水-能-碳足迹的目的。基于水-能-碳之间强烈的多要素耦联作用，破解三者间复杂关系并且给予协同调控是我国保障水资源安全、能源安全、碳排放安全(满足人类正常生产、生活需求时，保障区域内经济社会系统与碳排放保持协调发展的状态)[28]，实现区域绿色高质量发展的重要前提。部分学者考虑了水资源和能源之间的协同关系，表明在经济社会发展过程中水、能源以及生态环境系统的协同作用至关重要[29]。现阶段我国各行政主体部门制定了节水、节能和碳减排的 3 个目标，然而在关注减碳目标的同时，这些政策多有重复且彼此不够协调，在一定程度上忽视了经济社会发展与协同。应探索水-能-碳协同目标以制定统一的政策，关注多目标之间的协同发展以实行差别化政策。新形势下中国高质量发展面临的难题比以往任何时期都要复杂，明晰区域水资源、能源及碳排放三者之间的协同发展机理，具有重要的理论意义和引领作用。

2.3　基于风险与韧性视角的水-能-碳关系研究进展

风险研究对于提升水-能-碳复杂系统韧性、保障系统安全至关重要。另一方面，在风险管理时将系统韧性作为目标，通过风险告知的途径可促进其以更好的韧性形态运行。如何基于安全的角度，开展水-能-碳复杂系统安全保障风险研究是现阶段亟待回答的问题。目前的研究在理论方面主要关注水-能-碳关联系统与风险的宏观定性分析，且已有研究[30]初步构建了理论模型框架。有学者针对水-能-碳复杂系统中各要素的风险问题开展了实证研究[31-32]，探讨了能源强度和温室气体排放对城市水循环中现有水系统的关系，并描述了水资源风险对水-能关系的影响[33]；部分研究[34]则在分析整个水能系统时考虑了碳排放，表明气候变化和不断增长的能源需求单独或共同带来的风险到 2030 年将十分突出，如果在供应有限的情况下优先考虑节水取水，则可以有效减缓这些风险。总的来说，现有研究关注的风险主要为温室气体过度排放和水资源短缺，而对于复杂系统中单一要素的研究发现，它们还会产生如大气污染、水污染等多重生态环境影响，并且资源的短缺和持续增加的碳排放也会对社会、人群、生态系统等产生多维度压力。此外，已有针对水-能-碳复杂系统的研究仅是单向的风险评估，尚需进一步根据风险评估结果对系统进行动态反馈及韧性调控。韧性一词原意是回弹至原来状态，通常被认为是用来维持系统的稳定性和用来吸收扰动而维持系统内部变量之间的能力[35-36]。鉴于风险是一种“前瞻性”的事前分析，而韧性可视为风险管

理的目标,深入分析风险与韧性的定位及关系,揭示韧性理论的发展动因和轨迹,亟待在风险分析的基础上开展水-能-碳复杂系统韧性量化评估、风险情景研究,进而基于水-能-碳的互馈关系反向核算节水、节能目标,制定不同的韧性调控策略,促进水资源和能源的集约安全利用[37]。

2.4　基于土地利用视角的水-能-碳关系研究进展

“双碳”目标的提出,既是经济社会发展调控能力的重要体现,也是经济社会发展规律的结果。特定区域空间碳达峰的安排,决定了相应时期人均碳排放、单位 GDP 碳排放的水平,由此也极大地影响了建设用地扩张规模。近年来我国城市扩张进程加快,在这个过程中水和能源大量消耗,同时导致碳排放量急剧增长。全球每年排放的二氧化碳中大约 14% 来自土地利用,因此,近期许多学者对土地利用变化视角下碳排放和碳平衡的响应机制进行了相关研究。例如,赵荣钦等[38] 指出,水资源、土地利用、能源等多要素之间的相互需求决定了区域间的碳排放强度。此外,碳排放另一重大来源是经济发达地区快速城市化所导致的土地利用转变[39],考虑到现有研究多集中在不同土地利用类型下资源消耗及碳排放的估计与预测,却在一定程度上忽略了土地利用格局下的水-能-碳关系研究[40]。土地利用变化过程中可能产生碳源/碳汇,明确土地利用视角下的水-能-碳关系有助于解释土地利用活动的资源容量与环境效应之间的相互作用,为基于水资源-能源节约和碳减排的土地利用规划提供合理的选择。

3　水-能-碳排放复杂关系重点发展方向

3.1　基于水-能-碳承载力的国土空间优化研究

水-能-碳承载力是区域经济发展与自然生态系统稳定的重要基础(图 2),资源环境承载力作为区域经济发展与资源环境关系发展的重要基础,如何在低碳战略指引下有序协调碳排放与水资源和能源的承载规模,成为未来经济社会发展的重要约束[41-42]。国土空间布局受制于人与自然系统的碳排放及碳汇能力影响,2020 年自然资源部印发的市级国土空间总体规划编制指南明确指出“要制定水资源和能源供需平衡方案,推动全过程的减排体系以实现节水型低碳城市建设”。当前国土空间规划尚处于实践探索阶段,为此,需要基于水-能-碳承载力优化国土空间格局的研究,创新基于碳达峰、碳中和的人口、经济及建设用地等承载或开发规模的承载力评价内容,从而在不超出资源承载能力的前提下切实构建有利于支撑“双碳”战略实施的国土空间格局体系。目前资源承载力评估的技术方法主要涉及水足迹[43]、能源足迹[44]、碳足迹[45] 等足迹家族,以及指标评价体系法[46]、系统模型法等[47],而大数据、人工智能等新技术的优势可在国土空间监测评估中更好地支撑自然资源监管决策工作,未来可考虑应用其增强对国土空间规划的可靠性。

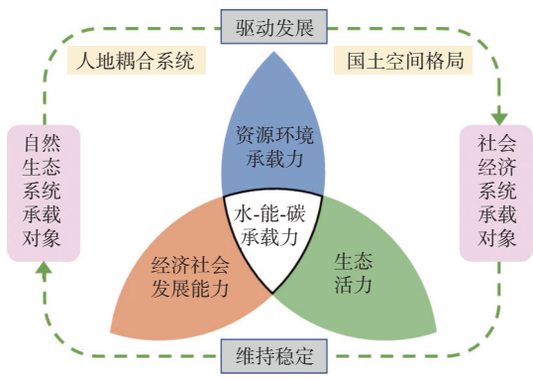

图 2　人地耦合系统水-能-碳承载力概念框架

Fig. 2　Conceptual framework for Water-Energy-Carbon carrying capacity of coupled human and natural systems

3.2　水-能-碳视角下资源消耗与经济增长脱钩分析

明确资源消耗与经济增长二者间的脱钩效应及驱动关系,对推动区域绿色高质量发展意义重大。脱钩(Decoupling)这一术语出自物理学,表示两个或多个变量之间的关系中断或脱离,而在经济和资源环境领域,脱钩指一个经济体能够通过减少水或化石燃料等资源的使用量,在维持经济增长的同时不对环境施加压力[48]。鉴于我国当前经济发展模式所处的阶段,减排承诺与经济增长的冲突仍然不可避免,分析资源环境压力与经济增长的脱钩效应对于制定减缓气候变化的政策至关重要。水和能源是脱钩关键优先议程,在实现“双碳”目标的过程中势必伴随着节水、节能政策的制定,然而这可能会影响经济增长[49]。资源消耗、碳排放和经济脱钩的广泛战略是支持多样化、可持续的能源消费结构并保持经济稳定增长,进一步提高能源效率和安全性,降低二氧化碳强度,从而走向脱钩。近年来,将脱钩理论应于节水、节能、减排的相关研究成果开始丰富起来[50]。然而,大多数学者在进行脱钩分析时通常考虑不全面,即将水资源、能源和碳排放作为

单独的实体进行规划和管理，忽视了对三者的综合考虑和关联分析，显然对最终结果会造成一定影响。绝对脱钩是实现真正可持续发展议程的重要途径，寻找经济发展与碳排放脱钩的方法对中国来说既重要又紧迫。因此，亟待关联分析研究部门“水-能-碳”资源环境压力状况，综合不同部门之间导致的“水-能-碳”间接排放，深入探讨经济增长与资源环境消耗的脱钩效应以及影响机制，对于我国实现减排目标、增强经济可持续发展的动力有重要的理论与现实意义。

3.3　水-能-碳复杂关系确定性与不确定性量化分析

现有从各种特定视角出发的研究都有重要意义，但是在研究主体上，缺乏将“能源中的水和碳排放”和“水中的能源和碳排放”都纳入完整系统的研究，分析过程也多属于历史的、静态的确定性模拟，难以满足认识和揭示变化环境下水-能-碳复杂系统演化规律与协同安全的需求。系统构建地不完整将导致后续分析结果的局限性，如何揭示水资源、能源、碳排放三个子系统之间耦合关系并将其有机结合到同一体系中，是现阶段面临的首要挑战。但实现“双碳”目标不可能毕其功于一役，在推进有序减少传统能源消耗过程中应逐步使用绿色能源替代，以保障经济社会稳固发展。因此，未来情景下合理准确的模拟预测对制定合理的节水、节能与减碳联动政策也是十分必要的。可考虑采用系统动力学模型，结合未来情景，建立适合的水-能-碳复杂系统确定性与不确定性演化模型，从多角度、多尺度实现复杂系统的动态模拟和评估，或将成为破解“双碳”约束下的水-能-碳复杂关系的核心议题(图 3)。值得注意的是，受制于气候变化不确定性以及其他自然或人类活动要素的影响，未来特定情景下模拟的资源要素以及碳源、碳汇能力同样具有不确定性，由此需要对水资源、能源与碳排放空间格局、均衡特征及其演化态势加以深入分析，从而为节水、节能和碳排放减少提供科学参考。

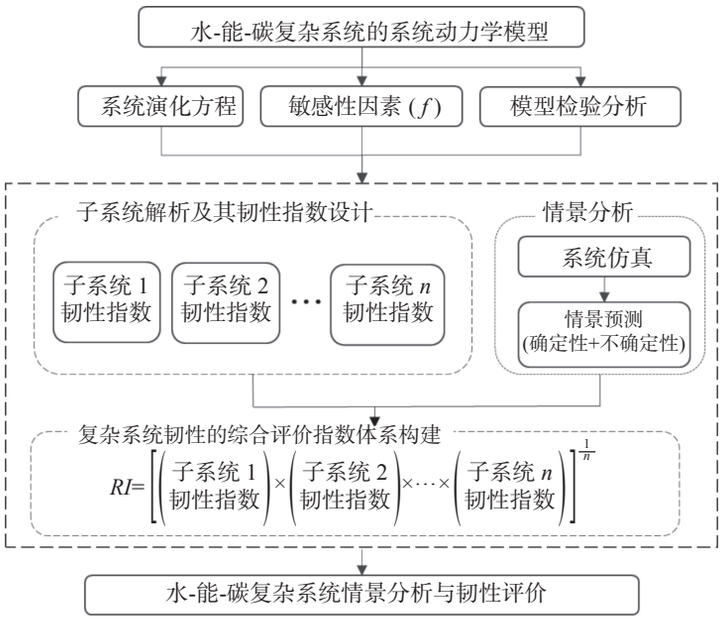

图 3　水-能-碳复杂关系情景演化模型

Fig. 3　Scenario evolution model of Water-Energy-Carbon complex relationship

3.4　水-能-碳工程措施助力“负排放”

碳负排放处于行业革命的前沿，IPCC 第六次评估报告指出，负排放技术是“到 2100 年将升温限制在 1.5℃ 或可能低于 2℃ 的情景的必要手段”。碳负排放可以通过多种方式实现，最重要的是促进碳封存和减少化石燃料碳排放，以及参与直接减少大气中二氧化碳量的活动。具体到工程措施，主要包括以下 5 个方面：①海洋施肥。通过对海洋输入铁/铝等养分促进光合浮游生物生长效率，降低有机碳的分解速率，增强上层海洋吸收固碳以及深层海洋沉积物中碳的埋藏通量[51]。②生产绿色能源。采用零碳源的可再生能源(水电、阳光、潮汐、风和地热能)和生物质能是弥合二氧化碳净零排放的说法和现实之间差距的关键。③增强岩石风化。通过散布碎矿物来增强岩石风化，这些矿物天然能够吸附陆地或海洋中的二氧化碳[52]。④通过生物炭、堆肥、

生物废弃物掺入来封存土壤碳[53]。⑤沿海湿地恢复。尽管全球沿海湿地面积较小,但其单位面积碳封存量显著高于陆地森林,在提供的各种生态系统服务中,湿地“蓝碳”(封存在沿海栖息地中的碳)封存和温室气体减排潜力的重要性日益增加[54]。

4　结 语

本世纪将见证全球能源获取、储存和利用方式的重大转型,并且还将迎来更深刻的改革,水资源、能源和碳排放在这个过程中尤为重要。在明确水-能-碳复杂关系本质的基础上,从耦合、协同、风险与韧性、土地利用 4 个视角讨论了水-能-碳复杂关系的研究进展。对未来水-能-碳复杂关系重点研究方向展望如下:

基于水-能-碳承载力优化国土空间格局的研究,创新基于碳达峰、碳中和的人口、经济及建设用地等承载或开发规模的承载力评价内容,在不超出资源承载能力的前提下切实构建有利于支撑“双碳”战略实施的国土空间格局体系。

绝对脱钩是实现真正可持续发展议程的重要途径,明确资源消耗与经济增长二者间的脱钩效应及驱动关系,对于我国实现减排目标、增强经济可持续发展动力有重要的理论与现实意义。

建立适合的水-能-碳复杂系统确定性与不确定性演化模型,从多角度、多尺度实现复杂系统的动态模拟和评估,或将成为破解“双碳”约束下的水-能-碳复杂关系的核心议题。

通过工业手段,研究从大气中捕获碳,以及促进陆地和海洋生态系统中碳封存的各种潜在战略,助力早日实现碳负排放。

参考文献:

[1] 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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129092.

[2] TAN Q, LIU Y, YE Q. The impact of clean development mechanism on energy-water-carbon nexus optimization in Hebei, China: A hierarchical model based discussion[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 264: 110441. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110441.

[3] 李虹, 王帅. 中国行业隐含能源消费及其强度的变动与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(5): 47-57. DOI: 10.12062/cpre.20201006.

[4] 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 等. 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5305-5314. DOI: 10.13227/j.hjkx.202112066.

[5] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12): 2995-3006. DOI: 10.31497/zrzyxb.20211201.

[6] LIANG M S, HUANG G H, CHEN J P, et al. Energy-water-carbon nexus system planning: A case study of Yangtze River Delta urban agglomeration, China[J]. Applied Energy, 2022, 308: 118-144. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118144.

[7] BUKHARY S, BATISTA J, AHMAD S. Water-energy-carbon nexus approach for sustainable large-scale drinking water treatment operation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 587: 124953. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124953.

[8] TIAN P P, LU H W, REINOUT H, et al. Water-energy-carbon nexus in China's intra-and inter-regional trade[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150666. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150666.

[9] YANG X C, WANG Y T, SUN M X, et al. Exploring the environmental pressures in urban sectors: An energy-water-carbon nexus perspective[J]. Applied Energy, 2018, 228: 2298-2307. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.090.

[10] WEBSTER M, DONOHOO P, PALMINTIER B. Water-CO_2 trade-offs in electricity generation planning[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(12): 1029-1032. DOI: 10.1038/nclimate2032.

[11] WANG L, GONG Z, GAO G, et al. Can energy policies affect the cycle of carbon emissions? : Case study on the energy consumption of industrial terminals in Shanghai, Jiangsu and Zhejiang[J]. Ecological Indicators, 2017, 83: 1-12. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.07.036.

[12] WANG X C, KLEME J J, WANG Y, et al. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China: An environmental input-output model-based approach[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114431. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114431.

[13] 曾萌, 张园园, 王红瑞, 等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 159-

165. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.021.

[14] FANG D, CHEN B. Linkage analysis for the water-energy nexus of city[J]. Applied Energy, 2017, 189: 770-779. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.04.020.

[15] LI R S, ZHAO R Q, XIE Z X, et al. Water-energy-carbon nexus at campus scale: Case of North China University of Water Resources and Electric Power[J]. Energy Policy, 2022, 166: 113001. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113001.

[16] ZHOU N, ZHANG J, KHANNA N, et al. Intertwined impacts of water, energy development, and carbon emissions in China[J]. Applied Energy, 2019, 238(15): 78-91. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.12.085.

[17] WHITE D J, HUBACEK K, FENG K , et al. The water-energy-food nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis[J]. Applied Energy, 2017, 210(15): 550-560. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.159.

[18] 陈文溆乐, 向月, 彭光博, 等. "双碳"目标下电力系统供给侧形态发展系统动力学建模与分析[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1567-1576. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.294.

[19] KHAN H F, YANG Y, XIE H, et al. A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(12): 6275-6288. DOI: 10.5194/hess-21-6275-2017.

[20] FENG K, HUBACEK K, SIU Y L, et al. The energy and water nexus in Chinese electricity production: A hybrid life cycle analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 342-355. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.080.

[21] HU M M, CHEN S Q, WANG Y F, et al. Identifying the key sectors for regional energy, water and carbon footprints from production-, consumption- and network-based perspectives[J]. Science of The Total Environment, 2021, 764: 142821. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142821.

[22] OWEN A, SCOTT K, BARRETT J. Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus[J]. Applied Energy, 2018, 210: 632-642. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.069.

[23] WANG S, LIU Y, CHEN B. Multiregional input-output and ecological network analyses for regional energy-water nexus within China[J]. Applied Energy, 2018, 227: 353-364. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.093.

[24] 孙贵艳, 王胜, 肖磊. 基于夜间灯光数据的长江上游地区能源消费碳排放及影响因素研究[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(4): 159-162. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2020.04.027.

[25] SHARIFZADEH M, HIEN R K T, SHAH N. China's roadmap to low-carbon electricity and water: Disentangling greenhouse gas (GHG) emissions from electricity-water nexus via renewable wind and solar power generation, and carbon capture and storage[J]. Applied Energy, 2019, 235: 31-42. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.10.087.

[26] ZHANG Y, WANG J, ZHANG L, et al. Optimization of China's electric power sector targeting water stress and carbon emissions[J]. Applied Energy, 2020, 271: 115221. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115221.

[27] HUANG W, MA D, CHEN W. Connecting water and energy: Assessing the impacts of carbon and water constraints on China's power sector[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1497-1505. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.048.

[28] 何岩岩, 南灵, 麻小婷. 陕西省土地利用碳排放安全评价及预测研究[J]. 福建农业学报, 2017, 32(9): 1034-1042. DOI: 10.19303/j.issn.1008-0384.2017.09.020.

[29] 王红瑞, 赵伟静, 邓彩云, 等. 水-能源-粮食纽带关系若干问题解析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 307-319. DOI: 10.31497/zrzyxb.20220203.

[30] LAL R. Research and development priorities in water security[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(4): 1567-1572. DOI: 10.2134/agronj15.0046.

[31] LIU Y, CHEN B. Water-energy scarcity nexus risk in the national trade system based on multiregional input-output and network environ analyses[J]. Applied Energy, 2020, 268: 114974. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114974.

[32] 王红瑞, 钱龙霞, 赵自阳, 等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 980-989. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190177.

[33] LEE M, KELLER A A, CHIANG P C, et al. Water-energy nexus for urban water systems: A comparative review on energy intensity and environmental

impacts in relation to global water risks[J]. Applied Energy, 2017, 205: 589-601. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.002.

[34] BYERS E, HALL J, AMEZAGA J, et al. Water and climate risks to power generation with carbon capture and storage[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(2): 024011. DOI: 10.1088/1748-9326/11/2/024011.

[35] 杨亚锋, 王红瑞, 巩书鑫, 等. 可变勾股模糊VIKOR水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 633-646. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200455.

[36] 张湘洁, 乔昌凯, 万航, 等. 气候变化条件下基于河岸带生态韧性的防洪堤高程优化模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 614-624. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0065.

[37] 王红瑞, 杨亚锋, 杨荣雪, 等. 水资源系统安全的不确定性思维: 从风险到韧性[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 1-8. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2022001.

[38] 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. DOI: 10.11821/dlxb201609012.

[39] FENG Y, CHEN S, TONG X, et al. Modeling changes in China's 2000–2030 carbon stock caused by land use change[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119659. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119659.

[40] FENG M, ZHAO R, HUANG H, et al. Water-energy-carbon nexus of different land use types: The case of Zhengzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109073. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109073.

[41] 赵荣钦, 黄贤金, 郧文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1123-1136. DOI: 10.31497/zrzyxb.20220502.

[42] 杨亚锋, 闫佳伟, 王红瑞, 等. 长江经济带水环境承载力时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(4): 714-723. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0073.

[43] 游进军, 蔡露瑶, 林鹏飞, 等. 基于分类效率识别的水资源承载能力三层次评价方法[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(4): 631-642. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0065.

[44] 薛若晗. 基于净初级生产力模型的福州市能源生态足迹和生态承载力研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(6): 64-67,70. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.06.018.

[45] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏玮, 等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380.

[46] 丁相毅, 石小林, 凌敏华, 等. 基于“量-质-域-流”的太原市水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(1): 9-20. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0002.

[47] 马涵玉, 黄川友, 殷彤, 等. 系统动力学模型在成都市水生态承载力评估方面的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 101-110. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.017.

[48] 潘竟虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 206-220. DOI: 10.11821/dlxb202101016.

[49] PAO H T, CHEN C C. Decoupling strategies: CO_2 emissions, energy resources, and economic growth in the Group of Twenty[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 907-919. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.190.

[50] 余锦如, 王远, 余凡, 等. 基于“水-能-碳”消费视角的福建省资源环境与经济增长脱钩关系[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3845-3855. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.008.

[51] ZHOU L, LIU F, LIU Q, et al. Aluminum increases net carbon fixation by marine diatoms and decreases their decomposition: Evidence for the iron-aluminum hypothesis[J]. Limnology and Oceanography, 2021, 66(7): 2712-2727. DOI: 10.1002/lno.11784.

[52] BUSS W, YEATES K, ROHLING E J, et al. Enhancing natural cycles in agro-ecosystems to boost plant carbon capture and soil storage[J]. Oxford Open Climate Change, 2021. DOI: 10.1093/oxfclm/kgab006.

[53] 王红瑞, 赵含, 李占玲, 等. 减碳与生物多样性若干问题评述[J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2022, 53(1): 17-24. DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr2023-01-002.

[54] SAPKOTA Y, WHITE J R. Carbon offset market methodologies applicable for coastal wetland restoration and conservation in the United States: A review[J]. Science of The Total Environment, 2020, 701: 134497. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134497.

Research progress and the prospect of a complex relationship between water-energy-carbon emission

WANG Hongrui[1]，LI Xiaojun[2]，ZHANG Li[1]，WANG Liping[2]，JIANG Xin[3]

（1. *College of Water Science*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*；2. *Jinan Water Conservancy Engineering Service Center*, *Jinan* 250099, *China*；3. *Water Resources research Institute of Shandong Province*, *Jinan* 250014, *China*）

Abstract: The analysis of the complex relationship between water-energy-carbon is crucial to promoting the green transformation of economy and society. Meanwhile, it is also a major requirement for water security, energy security, ecological and environmental security, and the building of a community with a shared future for mankind. At present, China's water, energy, and carbon emissions are interdependent and mutually restricted, and the contradictions among them are becoming more and more serious, hindering sustainable social and economic development. Besides, in the context of the "carbon peaking and carbon neutrality" target, for many energy consumption fields, it means not only improving the proportion of clean energy from the supply side but also changing the way of energy use and improving energy efficiency from the user side. However, whether the energy transformation will lead to an increase in water demand needs further study. China is one of the world's largest users of water resources, energy consumption, and greenhouse gas emissions. Clarifying the complex relationship between water resources, energy and carbon emissions will help ensure China's high-quality development, ecological progress, and comprehensive ecological and environmental improvement as scheduled. Based on this, the conceptual connotation of the complex relationship of water-energy-carbon is systematically sorted out and it is believed that its essence is the relationship between water resources, energy, and carbon emissions in the entire product life cycle process. Reviewing the recent progress of complex relationships, the evaluation methods can be summarized into the evaluation based on the perspective of coupling and association, perspective of overall synergy, the outlook of risk and resilience, and the comprehensive perspective of land use. In addition, it is suggested that the following four frontier topics should be focused on in the future: Research on the optimization of territorial space based on water-energy-carbon carrying capacity, and on the premise of not exceeding the carrying capacity of resources, effectively build a territorial spatial pattern system conducive to supporting the implementation of the "carbon peaking and carbon neutrality" strategy; Clarify the decoupling effect and driving relationship between resource consumption and economic growth, and promote the realization of truly SDGs (Sustainable Development Goals); Establish an appropriate evolution model for the certainty and uncertainty of the water-energy-carbon complex system, and realize the dynamic simulation and evaluation of the complex system from multiple perspectives and scales; Realize "negative emissions" through water-energy-carbon engineering measures, including ocean fertilization, green energy production, enhanced rock weathering, increased soil carbon sequestration, coastal wetland restoration, etc. This research aims to achieve the coordinated and sustainable development of the water-energy-carbon system through systematic governance and scientific management and control.

Key words: water-energy-carbon; carrying capacity; decoupling analysis; uncertainty