

郭旭宁, 李云玲, 闫佳铭, 等. “双碳”战略下水循环响应与需水情势变化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 22-28, 38. GUO X N, LI Y L, YAN J M, et al. Water circulation response and water demand situation change under “Double Carbon” strategy[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 22-28, 38. (in Chinese)

“双碳”战略下水循环响应与需水情势变化

郭旭宁¹, 李云玲¹, 闫佳铭², 刘为锋¹

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 长春 130021)

摘要:通过对相关文献的研究梳理, 基于“双碳”战略任务要求与实施路径, 对“双碳”战略下水循环响应与需水情势变化等进行深入探析。研究表明, 水、碳循环在自然界通过植物光合作用和蒸散发紧密相连, 在经济社会中通过水资源与能源的供-用-耗-排过程密切相关。“双碳”战略实施对水资源供、需两端均产生一定影响, 供给端主要表现在降水、径流的时空分布变化, 需求端主要表现在产业结构、布局的调整以及伴生的需水变化。针对“双碳”战略下的水-碳天然循环变化及其影响应进一步加强研究并制定适应性措施, 同时加强经济社会领域水资源与能源供-用-耗-排过程的主动调节, 为“双碳”目标实现和经济社会高质量发展提供支撑。

关键词:“双碳”战略; 水-碳耦合; 水循环; 需水情势

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0003

进入新阶段, 我国站在人与自然和谐共生的高度谋划发展, 提出实施“双碳”战略, 把“双碳”工作纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局, 将对我国经济社会发展和生态文明建设产生深远影响。

“双碳”战略目标是力争 2030 年前我国碳排放总量达到峰值, 争取 2060 年前实现碳中和, 核心任务是提高碳汇量, 减少碳排放, 实现控碳、减碳目标。水是基础性自然资源、战略性经济资源、控制性生态要素, 水与控碳、减碳关系密切。在长期的地球进化历程中, 地球的碳循环形成了固有的规律和特征, 但工业革命以来人类活动对碳循环的干扰使得大气中的碳含量超越了自然变率范围。碳含量变化引发全球气候变化, 进一步引起水循环节律变化, 使干旱、洪水等极端水文事件发生得更加频繁。除了自然界中水-碳循环过程外, 水-碳在经济社会系统中也存在着紧密关系, 广泛的经济社会活动均需要消耗水资源和能源, 排放污水和二氧化碳。“双碳”战略下产业结构、布局的调整带来需水情势变化, 给水资源保障带来新挑战。目前, 关于水与“双碳”战略的研究主要集中在水利行业如何落实“双碳”战略要求和适应举措方面, 如左其亭等^[1]从水

资源、水工程、水生态、水理念 4 个方面, 阐述了实现“双碳”目标对水利的需求, 描绘了“双碳”目标下我国水利发展新征程六大战略布局; 陈茂山等^[2]从加快水电开发利用、促进水资源集约节约利用、强化水生态系统修复、加强水利建筑行业管理 4 个方面提出水利助推实现“双碳”目标的四大路径; 贺霄霞等^[3]对水利落实“双碳”实施路径进行研究, 系统梳理了“1+N”政策保障体系。目前围绕“双碳”战略下水循环响应与需水情势变化的相关研究仍较少, 本文通过对相关文献的研究梳理, 针对“双碳”战略实施对水资源供、需两端的影响以及“双碳”战略下水循环响应与需水情势变化等进行深入探析, 以利于制定适应性和支撑性措施, 同时也具有重要理论价值与现实意义。

1 “双碳”战略下水循环响应

1.1 自然水循环响应

自然水循环是自然界中重要的物质循环之一, 是淡水资源自然更新的物理学过程, 是地球物质循环和能量输送的动力和载体, 是海洋和陆地之间相互作用与联系的纽带。降水径流构成了流域水文过程, 通过土壤侵蚀等作用向海洋输运碳和各种营

收稿日期: 2022-12-04 修回日期: 2023-01-15 网络出版时间: 2023-02-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230206.1553.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202300); 水利部水利青年拔尖人才项目

作者简介: 郭旭宁(1983—), 男, 河北高阳人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利规划与战略研究。E-mail: guoxuning@giwp.org.cn

养物质。水-碳循环是陆地表层系统物质循环与能量交换的基本生物物理过程,也是陆地生态系统中耦合的两项生态学过程(图1)。生态系统以气孔行为为接点,通过植物蒸腾作用和光合作用把碳循环与水循环耦合成为一个有机的整体^[4]。水碳耦合是当前研究热点之一^[5],相关学者^[6]从基于生理生态学的叶片尺度,到利用通量观测的冠层尺度,再到基于遥感数据和水文观测的区域乃至全球尺度均证明了水碳耦合关系的存在。碳循环特征变化是引发全球气候变化、气温升高的根本原因,进而对自然水循环产生深刻影响,使得水面蒸发加剧,植株蒸发蒸腾量增加,降水格局发生变化,干旱灾害频繁,成为威胁可持续发展的重要因素。加强水、碳管理是调节气候变化进程和水资源自然更新的有效途径和切入点。在不同时空尺度以及水平(径流)与垂向方向(降水、蒸散发)上,碳排放引起的气候变化对自然水循环的影响是明显的,一批学者开展了大量研究工作。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)^[7]发布第六次评估报告第一工作组报告《气候变化2021:自然科学基础》指出人类活动导致的全球变暖及极端天气仍在继续,未来将升温1.5℃

以上,且有不可逆转的趋势。Wigley等^[8]根据IPCC预测结果并结合其他有关资料综合分析指出:全球平均温度从1990年到2100年将上升1.7~4.9℃;降水格局将发生变化,变幅为±10%。我国西部的年平均气温将升高1.7~2.3℃,降水增加5%~23%。干旱会使光合固碳过程、蒸散耗水过程以及水分利用过程发生改变^[9-10]。张强等^[11]研究发现气候变化会改变水循环中水汽来源、水汽输送及水循环过程,生态安全、粮食安全、水安全等保障方面需求逐渐增加。曹易等^[12]研究宁夏三河源地区水循环关键要素时空变化时,发现受人类活动影响该区域降雨量呈东南多西北少的特征,水资源总量呈现减少趋势。南林江等^[13]发现受全球气候变暖影响,1965—2014年重庆市年际降水变化存在4个时间尺度特征,降水量总体呈显著下降趋势。李海明等^[14]在天津平原区研究发现浅层地下水是碳汇途径的重要组成部分,沿地下水流向碳汇量的空间分布呈由低到高的变化趋势。雷君豪等^[15]研究红碱淖流域地下水系统时发现,通过水-岩作用、降水入渗、侧向径流补给和农田灌溉补给地下水,碳汇量增加可观。

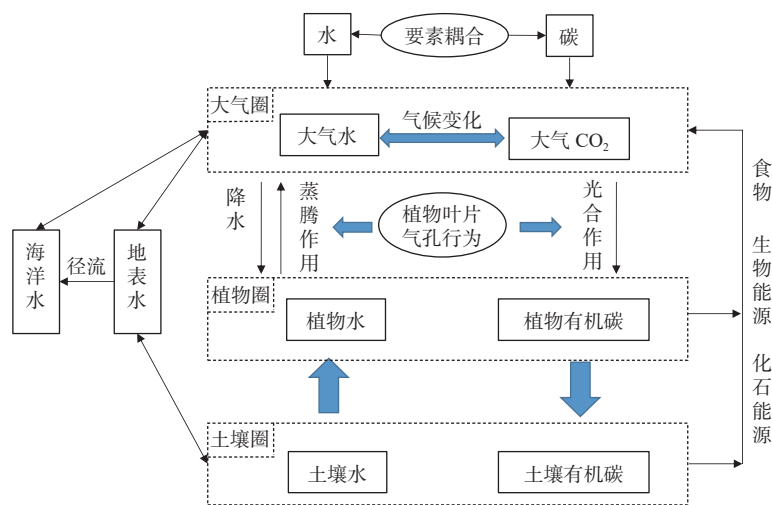


图1 水-碳自然循环过程

Fig. 1 Water-carbon natural circulation process

《中国气候变化蓝皮书(2022)》^[16]指出全球变暖趋势仍在继续,2021年我国地表平均气温等多项气候变化指标打破观测记录,我国是全球气候变化的敏感区,高温、强降水等极端天气气候事件趋多、趋强。“双碳”战略的根本在于应对由于人类活动造成的碳排放对全球气候变暖的不利影响,减缓气候变化的进程,维护健康自然水循环。陆地表层水

循环和碳循环过程管理是针对全球变化问题提出的,其目的是通过人类的管理活动来调节或维持农田、森林、草地和湿地等生态系统水和碳的良性循环过程,实现管理者所期待的生态系统碳收支和水平衡状况。水、碳循环过程管理^[4]要依靠在不同类型生态系统的具体措施来完成,主要包括:土壤中的水过程与碳过程管理;土壤-植物-大气系统的水

和碳交换过程管理;流域水文与碳输运过程管理;区域或国家尺度系统的水文与碳输运的管理;对影响全球碳收支与水平衡的因素,通过政策和国际公约等进行人为调节。“双碳”战略实施对维护健康自然水循环至关重要,在实现碳中和目标之前,温室效应可能进一步加剧,导致水循环通量有所增强,水资源时空分布不均加剧,蒸发、降雨和径流都将受到一定影响,应做好防洪、除涝及抗旱等相关准备,以保障人民生命财产安全。全球碳中和之后,气候变化对水循环的影响将逐步减弱。

1.2 人工水循环响应

“双碳”战略的实施对人工水循环也有着不可忽略的影响,从“供、用、耗、排”四大方面进行分析。人工水循环包括但不限于受人类活动影响下的农业用水、工业用水、生活用水以及生态用水。

供。“双碳”战略下供水更加合理,耗能更少,供水结构和方式也逐渐优化。刘晴靛等^[17]发现城市供水减碳应从源头开展,随着人们对水资源需求及供水水质要求越来越高,能源消耗与碳足迹随之增加,对城市微气候产生负面影响,可通过智能化综合分析及检测预警精细控制实现减排。翁晓姚^[18]给出节能增效、节水降耗、能源管理优化 3 个方面的建议,助力供水企业实现绿色低碳发展目标。范晶璟^[19]就上海典型老旧小区二次供水系统能耗研究发现水池+变频水泵供水模式下总体能耗更低,有利于助力我国早日实现碳达峰、碳中和目标。以上研究表明,在“双碳”战略实施下供水系统正转向更加绿色、低碳、环保的方向发展,为助力“双碳”目标实现提供有力保障。

用。“双碳”战略下工业用水、农业用水、生活用水以及生态用水方式与结构发生转变,以保证刚性合理用水为基础,大力实现减碳、减排政策,助力碳中和。岳立等^[20]发现黄河流域工业用水存在较大节水潜力,用水效率目前呈上升趋势。栾健等^[21]提出农业节水增效是提升农业全要素生产率的关键,应加强节水灌溉技术可获取性、节水激励机制和水权制度建设。秦长海等^[22]考虑气候及经济发展差异,得出北方城市居民生活用水需求刚性程度高于南方,通过提升水价是抑制南方享受型和奢侈性用水需求的有效手段。左其亭等^[23]强调人水和谐,生态用水与经济发展为相互制约因素,优化配置水资源是实现平衡的重要措施之一。赵荣钦等^[24]探讨了郑州市“水-能-碳”关联特征,建议应重点从城

市工业和生活节水、水处理工艺改进、水系统能效提升等方面入手,降低水系统能源消耗和碳排放。

耗。耗水是反应水资源利用及人工水循环情况的最佳指标,耗水变化可反映出“双碳”战略实施的效果。刘珊珊等^[25]指出气候变化下坡面产耗水发生变化,耗水管理侧重灌区农业作物耗水,精细化水资源管理应提出合理的控制阈值。吴炳方等^[26]指出工业和生活耗水是人类活动耗水的重要组成部分,应建立以蒸散发检测为核心的检测体系、健全以耗水上限为核心的刚性约束方法、落实以耗水管控为核心的约束机制,量化流域人类经济社会活动可消耗水量,实现水资源可持续利用。赵晶等^[27]发现我国火力发电单位发电耗水量呈下降趋势,北方地区火力发电用水效率高于全国平均水平,全国仍具有较大的节水潜力。马佳丽等^[28]从生态耗水角度出发对岱海进行研究发现,岱海水面面积呈下降趋势,若进行生态补水,岱海水质及生态环境将得到一定改善,有助于发挥“碳汇”作用。闫书琪等^[29]发现因电力生产结构变化和燃煤发电技术革新,新疆电力生产的单位水足迹呈下降趋势。李亮荣等^[30]指出绿色制氢技术是坚持绿色低碳发展道路的必然选择,但电解水制氢存在能耗较高的问题,太阳能分解水存在工艺及经济层面的限制因素。陈彬等^[31]强调碳中和背景下可再生能源制氢技术是实现碳中和的关键,指出利用风电、太阳能进行海水制氢是未来大规模氢能系统的核心,应加大关键核心材料研发。

排。排水是碳达峰、碳中和的关键影响因素之一。排水过程一般伴随着大量废水、废气和废渣的排放,“双碳”战略实施对排水起到了约束作用,加强排水管理,可为实现双碳目标提供有力帮助。郭恰等^[32]指出城市水系统碳排放关键因素在于管网漏损、泵站日常运维及污水处理,可通过调整能源结构、提高能量转化等措施消减间接排放、增加碳汇,实现污水减排。常雷等^[33]提出利用秸秆降解排水技术,采用秸秆作为生产材料,可减少原生产材料制作时所产生的碳排放,助力碳达峰、碳中和。刘智晓^[34]在气候变化及极端天气增加的背景下就传统城镇排水系统给出了增加排水系统韧性、可靠性、生态保护多样性的提议,并构建了可持续城镇排水系统技术指标体系,为碳中和视域下城市发展与生命健康提供可靠支撑。王金丽等^[35]全面分析

我国城市排水系统,从系统、绿色、协同角度出发,提出优化排水设施布局、提升污水收集处理系统效能等城市绿色排水系统规划技术体系。

人工水循环领域作为自然水循环的侧支,对“双碳”战略的响应是积极的,“双碳”战略实施在供、用、耗、排等方面都产生了不可忽视的正反馈响应,对人工水循环减少碳排放、增加碳汇量以及高新绿色节水技术发展起到了促进作用,加强经济社会领域水资源与能源供-用-耗-排过程的主动调节,将有力支撑促进“双碳”目标实现。

2 “双碳”战略下需水情势变化情况分析

2.1 经济社会产业结构变化

随着工业化发展的快速推进,能源过度消耗和水资源严重紧缺等一系列问题接踵而至。水、能、碳作为社会经济发展中联系紧密的重要投入和环境产出已成为国内外极为关注的重点领域。早期国内外对水、能源和碳排放的研究主要集中在单要素分析,随着对系统耦合的认识和协同研究管理的现实压力,针对两要素关系以及水-能-碳三者耦合关系和作用机制的研究日渐增多。如相关研究^[36]表明,为应对气候变化,减少温室气体排放,需对现有的能源结构进行改革,增加可再生能源供给比重,虽然大力发展风、光、水、生等可再生能源能减少温室气体排放,但是会对水资源系统造成更大的压力。若出于节约水资源和保护环境的目,大规模应用污水处理和回用技术,能源消耗需求增加是应该考虑的重要问题之一^[37]。因此,应全面比较各种可再生能源的水耗、能源效率和温室气体排放情况,筛选区域适宜的产业和能源发展方式^[38]。现有研究对水-能-碳耦合关系有一定的了解,但仍需进一步协同分析三者的耦合关系。此外,众多学者研究^[39]发现“双碳”战略的实施将会促使经济社会产业结构进一步优化,有助于产业结构升级,改造传统服务业,加大技术创新,减少碳排放;发展高端制造业,减少高排放、高耗能产业比重。钢铁和电力是产业结构优化的重点行业,应推动钢铁、电力行业节能改造,大力发展先进制造业和新兴产业及节能减排和清洁能源替代的技术创新^[40]。产业协同集聚是实现生产生活方式绿色转型、资源配置更加合理、能源利用率大幅提高的重要手段之一。“双碳”战略的实施对产业协同集聚产生影响,可解决产业空间结构优化与低碳减排问题^[41]。可见,“双碳”战略实施将对产业结构产生重大影响,总体上将使经济产

业结构更加优化,单位能耗降低,清洁能源、绿色能源和可再生能源领域将快速发展,一些高能耗、化石能源消耗量大、不可再生资源消耗量大等产业将被调整,“双碳”战略将倒逼产业转型升级,转向绿色发展。

2.2 经济社会产业布局变化

“双碳”战略下,我国制定出台涉及能源、工业、建筑及交通等重点领域,电力和钢铁水泥等重点行业的一系列实施方案,综合运用科技、财税和金融等多种保障措施,优化经济社会产业布局。在“双碳”目标的牵引下,从全局视角考虑水-能-碳在不同地区和不同产业部门间的转移转化关系,我国经济社会产业布局向着更加合理、更加节能、更加绿色的方向发展。煤基产业绿色低碳发展是我国经济社会产业结构完善的重点之一,姜华等^[42]建议煤基产业应科学谋划产业布局、加大生态环保力度、强化节能改造提效,开展低碳、零碳、负碳等核心技术攻关,加快构建化石能源清洁化、清洁能源规模化、能源供应智能化产业格局。随着南水北调、西电东输、东数西算等重大战略工程的建设与推进,我国的经济社会产业布局将进一步得到优化,为“双碳”目标实现提供支撑。因此,应立足于地区优势,考虑能、水、碳等资源能源投入要素分布和环境产出,加大对重工业等耦合压力较大的传统资源型产业进行先进技术改造,大力发展能-水-碳耦合压力较小的现代服务业,使经济社会产业布局与源能源投入要素分布及环境产出要求更加匹配,逐步构建节能节水低碳的现代产业体系。

2.3 经济社会及生态环境需水变化

降水经由下垫面的调蓄分配到土壤水、蒸散发与产汇流,其中土壤含水量与蒸散发是决定植物光合作用与生态系统生产力的关键因素,而植被也通过冠层截留降水与蒸腾作用耗水反馈影响水文系统。近年来气候变暖以及极端天气的发生导致天然降水变化进而对需水时空分布产生明显影响,而“双碳”战略作为减缓气候变化的重要举措,其实施将对需水时空分布产生影响,特别是在水-碳耦合的重点领域农业需水和生态环境需水等方面。水-碳平衡紧密耦合并与外部环境交互作用,直接关系到生态系统的健康稳定与人类社会的供水安全和粮食安全^[43]。聂堂哲等^[44]对黑龙江省1960—2015年水稻生长进行研究发现,ET₀自西向东为先减小后增大趋势,气候倾向率呈下降趋势,水稻需水量为

西部、东部、中部、北部逐渐减小趋势,气候倾向率总体为增加趋势,需水量与有效降雨耦合度自西向东呈先增加后减小趋势。马芳等^[45]发现近 60 年固原市玉米、马铃薯和春小麦 3 种作物生育期平均需水量呈上升趋势,作物需水量周期及有效降水周期均呈大-小-大变化规律,其中玉米和春小麦对灌溉需水依赖较高。Sun 等^[46]利用通量测站与模型模拟数据分析了生态系统水分利用效率在我国的时空演变特征,发现在 1979—2012 年,水分利用效率在东北、西南与中部地区有所增长,而下降趋势主要分布在西部。在“双碳”战略视域下生态环境用水得到重视,生态环境用水量增加是重要趋势,因此“双碳”战略的实施对生态环境用水的影响是正相关的,需增加生态补水量。目前,“双碳”战略下经济社会与生态环境需水变化表现出复合性(如气候、土地利用、海拔高度等)与区域性(不同地区变化规律不完全一致),要弄清不同环境因素影响范围、程度、驱动机理仍存在一定困难,需进一步研究。

3 总结与展望

水-碳循环是地球陆地表层系统物质循环与能量交换中紧密耦合的生物物理过程和生态学过程,能、水、碳作为社会经济发展的重要投入和环境产出在经济社会领域中的联系也异常紧密。围绕“双碳”战略下水循环响应、需水情势变化开展研究,对于加强水-碳综合管理、助力可持续发展具有重要意义。研究表明,水、碳循环在自然界通过植物光合作用和蒸散发紧密相连,在经济社会中通过水资源与能源的供-用-耗-排过程密切相关。“双碳”战略实施对水资源供、需两端均产生一定影响,供给端主要表现在降水、径流的时空分布变化,需求端主要表现在产业结构、布局的调整以及伴生的需水变化。针对“双碳”战略下的水-碳天然循环变化及其影响应进一步加强研究并制定适应性措施,同时加强经济社会领域的水资源与能源供-用-耗-排过程的主动调节,实现水资源-经济社会-生态环境和谐统一,为“双碳”目标实现和经济社会高质量发展提供支撑。

参考文献:

[1] 左其亭,邱曦,钟涛. “双碳”目标下我国水利发展新征程[J]. 中国水利, 2021(22): 29-33. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2021.22.014.

- [2] 陈茂山,陈琛,刘定湘. 水利助推实现“双碳”目标的四大路径[J]. 水利发展研究, 2022, 22(8): 1-4. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2022.08.001.
- [3] 贺霄霞,李梦娅. 水利落实碳达峰、碳中和实施路径初探[J]. 水利发展研究, 2022, 22(5): 34-37. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2022.05.007.
- [4] 于贵瑞,王秋风,于振良. 陆地生态系统水-碳耦合循环与过程管理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19: 831-839. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2004.05.022.
- [5] 张彦群,康绍忠,丁日升,等. 西北旱区葡萄酒水碳通量耦合模拟[J]. 水利学报, 2013(S1): 40-50. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.s1.026.
- [6] 刘宁,孙鹏森,刘世荣,等. 流域水碳过程耦合模拟: WaSSI-C模型的率定与检验[J]. 植物生态学报, 2013, 37(6): 492-502. DOI: 10.3724/sp.j.1258.2013.00051.
- [7] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis[R]. Cambridge University Press, 2021.
- [8] WIGLEY TML, RAPER SCB. Interpretation of high projections for global-mean warming[J]. Science, 2001, 293(5529): 451-454. DOI: 10.1126/science.1061604.
- [9] 于贵瑞,高扬,王秋风,等. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 1-13. DOI: 10.3724/sp.j.1011.2013.00001.
- [10] 李倩,高阳,王洪博,等. 温度升高和干旱对农田生态系统水碳交换动态影响的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 110-118. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2021285.
- [11] 张强,何昌原,申泽西,等. 基于CiteSpace知识图谱的新疆水汽循环及其影响研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(3): 491-500. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022113.
- [12] 曹易,张珂,李致家,等. 宁夏三河源地区 2000—2017 年水循环关键要素时空变化分析[J]. 水文, 2021, 41(3): 88-94. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200331.
- [13] 南林江,杨明祥,郝少魁. 1965—2014 年重庆地区降水时空分布特征分析[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 64-69. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.s2.015.
- [14] 李海明,李梦娣,肖瀚,等. 天津平原区浅层地下水水化学特征及碳酸盐风化碳汇研究[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 167-178. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2022.1.39.
- [15] 雷君豪,董少刚,张敏,等. 沙漠区地下水系统碳平衡-以红碱淖流域为例[J]. 地球与环境, 2023, 51(1): 47-55. DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2022.50.045.
- [16] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书

- (2022)[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [17] 刘晴靓, 王如菲, 马军. 碳中和愿景下城市供水面临的挑战、安全保障对策与技术研究进展[J]. *给水排水*, 2022, 58(1): 1-12. DOI: [10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.01.001](https://doi.org/10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.01.001).
- [18] 翁晓姚. 碳达峰与碳中和目标下供水企业绿色低碳发展的思考[J]. *净水技术*, 2022, 41(5): 1-4, 13. DOI: [10.15890/j.cnki.jsjs.2022.05.001](https://doi.org/10.15890/j.cnki.jsjs.2022.05.001).
- [19] 范晶璟. “双碳”背景下上海典型老旧小区二次供水系统能耗研究[J/OL]. *华东理工大学学报(自然科学版)*: 1-7 [2023-02-14]. DOI: [10.14135/j.cnki.1006-3080.20220418003](https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20220418003).
- [20] 岳立, 曹雨暄. 技术创新视角下黄河流域工业用水效率研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(5): 75-80. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.05.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.05.016).
- [21] 栾健, 张哲晰. 农业全要素生产率增长能降低农业用水强度吗? [J/OL]. *中国农业资源与区划*: 1-11 [2023-02-14] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20220818.1042.010.html>.
- [22] 秦长海, 曲军霖, 孙华月, 等. 城市居民生活需水函数模型的构建与应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 209-217. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0023](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0023).
- [23] 左其亭, 吴青松, 金君良, 等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. *水科学进展*, 2022, 33(2): 165-173. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.001](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.001).
- [24] 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. DOI: [10.11821/dlxb202112017](https://doi.org/10.11821/dlxb202112017).
- [25] 刘姗姗, 秦天玲, 张鑫, 等. 流域产耗水识别及水土资源配置研究进展[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(S2): 490-495. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.s2.103](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.s2.103).
- [26] 吴炳方, 曾红伟, 马宗瀚, 等. 完善新时期水资源管理指标的方法[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 553-566. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.004](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.004).
- [27] 赵晶, 吴迪, 回晓莹, 等. 我国火力发电行业用水情况与节水潜力分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(2): 95-103. DOI: [10.19760/j.ncwu.zk.2021026](https://doi.org/10.19760/j.ncwu.zk.2021026).
- [28] 马佳丽, 刘东伟, 王杰, 等. 基于长时间序列(1975—2020年)生态耗水的岱海动态生态需水分析[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 207-219. DOI: [10.18307/2022.0117](https://doi.org/10.18307/2022.0117).
- [29] 闫书琪, 李素梅, 吕鹤, 等. 基于混合LCA的新疆地区电力生产水足迹分析及碳中和目标下的变化[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3): 294-304. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2021.274](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2021.274).
- [30] 李亮荣, 彭建, 付兵, 等. 碳中和愿景下绿色制氢技术发展趋势及应用前景分析[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 508-520. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0183](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0183).
- [31] 陈彬, 谢和平, 刘涛, 等. 碳中和背景下先进制氢原理与技术研究进展[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 106-116. DOI: [10.15961/j.jsuese.202100686](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202100686).
- [32] 郭恰, 陈广, 马艳. 城市水系统关键环节碳排放影响因素分析及减排对策建议[J]. *净水技术*, 2021, 40(10): 113-117. DOI: [10.15890/j.cnki.jsjs.2021.10.016](https://doi.org/10.15890/j.cnki.jsjs.2021.10.016).
- [33] 常雷, 李学丰, 李红中, 等. 碳中和、碳达峰中秸秆降解排水技术的应用与刚柔复合地基的关系[J]. *建筑技术开发*, 2022, 49(7): 85-89. DOI: [10.3969/j.issn.1001-523x.2022.07.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-523x.2022.07.022).
- [34] 刘智晓. 碳中和视角下城市可持续排水系统构建及评估指标体系[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(16): 1-15. DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.001](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.001).
- [35] 王金丽, 孙永利, 郑兴灿, 等. 城市绿色排水系统规划技术体系研究[J]. *城市发展研究*, 2022, 29(1): 18-21, 28. DOI: [10.3969/j.issn.1006-3862.2022.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-3862.2022.01.013).
- [36] HUSSEY, KAREN, JAMIE PITTOCK. The energy-water nexus: Managing the links between energy and water for a sustainable future[J]. *Ecology and Society*, 2012, 17(1): 31. DOI: [10.5751/es-04641-170131](https://doi.org/10.5751/es-04641-170131).
- [37] WOLSINK, MAARTEN. Contested environmental policy infrastructure: Socio-political acceptance of renewable energy, water, and waste facilities[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2010, 30(5): 302-311. DOI: [10.1016/j.eiar.2010.01.001](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.01.001).
- [38] YANG, X Y, WANG X, WANG L. Transferring of components and energy output in industrial sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(8): 2580-2584. DOI: [10.1016/j.biortech.2009.10.055](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.055).
- [39] 赵玉焕, 钱之凌, 徐鑫. 碳达峰和碳中和背景下中国产业结构升级对碳排放的影响研究[J]. *经济问题探索*, 2022(3): 87-105.
- [40] 李国平, 吕爽. “双碳”目标视角下的京津冀产业结构优化研究[J]. *河北经贸大学学报*, 2022, 43(2): 81-89. DOI: [10.14178/j.cnki.issn1007-2101.20220105.006](https://doi.org/10.14178/j.cnki.issn1007-2101.20220105.006).
- [41] 罗天. “双碳”目标下产业协同集聚与低碳发展模式塑造[J]. *生态经济*, 2022, 38(7): 42-47, 71.
- [42] 姜华, 李艳萍, 高健. 双碳背景下煤基产业绿色低碳转型之路[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5): 1580-1583. DOI: [10.12153/j.issn.1674-991x.2022001](https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991x.2022001).
- [43] 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.

- DOI: [10.13243/j.cnki.slx.20200172](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.20200172).
- [44] 聂堂哲, 张忠学, 齐智娟, 等. 1960—2015年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 279-290. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.032](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.032).
- [45] 马芳, 张维江, 冯娜, 等. 固原市主要农作物生育期有效降水与需水量特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 205-212, 223. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2022.01.023](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2022.01.023).
- [46] SUN S, SONG Z, WU X, et al. Spatio-temporal variations in water use efficiency and its drivers in China over the last three decades[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 292-304. DOI: [10.1016/j.ecolind.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.003).

Water circulation response and water demand situation change under “Double Carbon” strategy

GUO Xuning¹, LI Yunling¹, YAN Jiaming², LIU Weifeng¹

(1. *General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China*;

2. *China Water Northeastern Investigation, Design & Research Company, Changchun 130021, China*)

Abstract: In the new stage, the implementation of the "double carbon" strategy was put forward and integrated into the overall layout of ecological civilization construction and the overall situation of economic and social development by China government from the height of the harmonious coexistence of man and nature to plan and develop, which would have a profound impact on China's economic and social development and ecological civilization construction. The strategic goal of "double carbon" was to strive to reach the peak of China's total carbon emissions by 2030 and to achieve carbon neutrality by 2060. The core task was to increase carbon sinks, to reduce carbon emissions, and to achieve carbon control and carbon reduction goals.

Water resources was a basic natural resource, strategic economic resource and controlling ecological factor. Water resources was closely related to carbon control and carbon reduction. The water-carbon cycle was a biophysical and ecological process that was closely coupled in the material cycle and energy exchange of the earth's land surface system. As an important input and environmental output of social and economic development, water, energy and carbon were also closely related in the economic and social fields. In the long-term evolution of the earth, the carbon cycle of the earth had formed its inherent laws and characteristics, but the interference of human activities on the carbon cycle since the industrial revolution had made the carbon concentration in the atmosphere beyond the range of natural variability. The change of carbon concentration caused global climate change, further caused the change of water cycle rhythm, and made extreme hydrological events such as drought and flood occur more frequently. In addition to the water-carbon cycle process in nature, water-carbon also had a close relationship in the economic and social system. A wide range of economic and social activities need to consume water and energy, discharge sewage and carbon dioxide. Under the "double carbon" strategy, the adjustment of industrial structure and layout had brought about changes in water demand and brought new challenges to water resources security.

At present, the research on water and "double carbon" strategy mainly focused on how to implement the "double carbon" strategy requirements and adaptation measures in the water conservancy industry. There were still few studies on the response of water cycle and the change of water demand situation under the "double carbon" strategy. Based on the research of relevant literature, an in-depth analysis of the impact of the implementation of the "double carbon" strategy on the supply and demand of water resources was made in this paper, as well as the response of water cycle and the change of water demand situation under the "double carbon" strategy, so as to facilitate the formulation of adaptive and supportive measures, which had important theoretical value and practical significance for strengthening the comprehensive management of water-carbon and promoting sustainable development.

(下转第 38 页)