

社会水循环系统水-能-碳纽带关系及 低碳调控策略研究

王建华^{1,2*}, 朱永楠^{1,2}, 李玲慧^{1,2}, 李嘉欣³, 姜珊^{1,2}, 何国华^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
3. 郑州大学水利与土木工程学院, 郑州 450001)

摘要: 水是社会经济系统中最活跃、最关键的因素, 伴随水的取用和处理, 温室气体排放规模不断增加, 因而研究社会水循环系统中的能源消耗和碳排放规律对推动实现“双碳”目标具有重要意义。本文从水-能-碳纽带关系角度着手, 梳理了社会水循环过程中的能源消耗和碳排放现状, 基于变化趋势及影响因素分析结果并把握面临的机遇和挑战, 提出了“双碳”目标下社会水循环系统高效低碳发展的应对策略。我国社会水循环系统正朝着能源密集型方向发展, 其中供水、排水环节的碳排放强度增幅最大, 2009—2021 年分别增加了 23.3%、78.6%; 说明随着非常规水、跨流域调水规模的增加, 未来水系统耗能及碳排放量将持续增加, 实现碳中和目标任务艰巨。研究建议: 加强基础科学研究, 构建社会水循环全过程碳核算体系; 推动系统配置和低碳技术研发, 整体提升减污降碳综合能力; 激励全社会加强节水, 实现水资源与能源的双重节约; 完善水系统碳排放管理, 实现社会水循环低碳发展。

关键词: “双碳”; 社会水循环; 水-能-碳纽带关系; 碳核算; 水管理

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A

Water-Energy-Carbon Nexus of Social Water Cycle System and Low-Carbon Regulation Strategy

Wang Jianhua^{1,2*}, Zhu Yongnan^{1,2}, Li Linghui^{1,2}, Li Jiaxin³, Jiang Shan^{1,2}, He Guohua^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Water is the most active and critical factor in the socio-economic system, and the scale of greenhouse gas emissions accompanying water withdrawal and treatment is increasing. It is important to study the energy consumption and carbon emission of the social water cycle system to promote the achievement of carbon peaking and carbon neutrality. This study summarizes the current status of energy consumption and carbon emissions in the social water cycle from the perspective of water-energy-carbon nexus. Based on the analysis of change trends and influencing factors and focusing on existing problems and challenges, it proposes strategies for the efficient and low-carbon development of the social water cycle system under the carbon peaking and carbon neutrality targets. China's social water cycle system is developing toward an energy-intensive direction. The carbon emission intensity

收稿日期: 2023-03-29; **修回日期:** 2023-06-05

通讯作者: *王建华, 中国水利水电科学研究院正高级工程师, 研究方向为水资源工程技术; E-mail: wjh@iwhr.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(72088101, 52009141); 中国工程院咨询项目“气候变化与双碳目标背景下的能源与水综合协同发展策略研究”(2022-XZ-07)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

in water supply and drainage sectors increased the most, with an increase of 23.3% and 78.6% respectively from 2009—2021. With the increase of the scale of unconventional water and inter-basin water transfer, the energy consumption and carbon emission of the water system will continue to increase in the future, and the challenge of carbon neutrality is daunting. The study recommends that (1) basic scientific research should be strengthened and a carbon accounting system should be built for the whole process of social water cycle, (2) the research and development of system configuration and low-carbon technologies should be promoted to improve the comprehensive capabilities for pollution and carbon reduction as a whole, (3) energy conservation should be promoted in the whole society to realize the dual conservation of water and energy, and (4) carbon emission management in the water system should be improved to realize the low-carbon development of the social water cycle.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality; social water cycle; water-energy-carbon nexus; carbon accounting; water management

一、前言

20世纪以来,全球用水需求增长了6倍,与此同时气候变化导致水资源的时空分异使得水安全保障问题更加突出^[1]。为应对水资源短缺,世界各国致力于水资源保护,从水利基础设施建设、水科学技术发展、现代化水管理等方面均作出了努力^[2]。人类活动对自然水循环过程的扰动日益增加,形成了大规模的“取水-供水-用水-排水”侧枝循环过程;随着区域间贸易的发展,蕴含在产品中的“虚拟水”在不同地区社会经济系统中运移、转化,原有的自然水系统逐渐转变为“自然-社会”二元水循环系统^[3]。与主要依靠太阳辐射、地心引力等自然能驱动的自然水循环相比,社会水循环通过水利工程控制和调配将水资源引向社会经济系统^[4],改变了原有自然水循环路径;各个环节受机械力、电能和热能等人工驱动力的影响^[5],均需要消耗能源,如利用地表水或地下水需要筑坝蓄水、渠道引水、跨流域调水、泵站提水。随着城镇化进程的不断加快,城市供水量快速增长,2021年我国城市供水量为 $6.733 \times 10^{10} \text{ m}^3$,较2001年增长44.5%,供水系统能耗随之增加。为缓解缺水地区的水资源供需矛盾,具有能源密集型、高耗能特征的海水淡化、污水处理回用等非常规水利用量逐年增加^[6],加剧了社会水循环的能源消耗,扩大了碳排放的规模。

我国是水资源紧缺的国家,近年来通过全面实施国家节水行动,水资源利用效率持续提高^[7],以世界6%的水资源量养育了世界近20%的人口^[8],支撑着经济社会的高质量发展和生态环境的高水平保护。我国也是能源消耗和温室气体排放大国^[9],面对经济社会水资源和能源消耗增加、积极应对气候变化的现实需求,“水-能-碳”纽带关系逐渐成为研究热点。通过系统配置及模拟将自然社会碳排放与水资源系统联系起来,提出了基于低碳发展模

式的水资源合理配置方法^[10];针对电力行业,梳理了“水-能”耦合关系,认为应综合评估“水-能”耦合关系,分析温室气体排放等环境问题^[11];从“水-土-能-碳”耦合角度,解析了系统的耦合机制,指出自然条件、经济水平、生产效率、技术水平是影响系统发展的主要因素^[12]。生产与消费数量的不匹配形成了商品的调运与流通^[13],利用投入产出表开展各省份消费足迹研究,发现不同省份“水-能-碳”外部足迹呈正相关,需要建立更全面的“水-能-碳”框架以描述生产及消费环节的耦合机制^[14]。

在我国提出碳达峰、碳中和(“双碳”)目标后,水利工作者围绕实现“双碳”目标对水利的需求开展探讨^[15],目前关于水利碳中和的研究集中在实现“双碳”目标的总体思路和研究框架^[16],具体包括加快水电开发利用与发展低碳能源^[17]、提高水生生态系统固碳能力^[18]、寻求水利基础设施建设及运行期的低碳发展路径^[19,20]等;对水资源利用过程中的碳排放研究则集中在城市水系统^[21],特别是污水处理环节^[22],也以典型城市为例核算了社会水循环系统的碳排放^[23,24]。然而,缺乏对我国社会水循环全过程碳排放研究,特别是不同地区、不同环节、不同工艺下的水系统能源消耗和碳排放特点的对比研究,需要深入谋划水利碳减排的贡献途径,以促进系统绿色低碳发展。

面对“双碳”目标要求,积极应对气候变化和社会经济需水不断增加的现实需求,本文从水资源利用中水-能-碳排放之间的动态关系出发,梳理社会水循环各个环节中的能源消耗和碳排放过程,分析2009—2021年社会水循环能源消耗和碳排放变化趋势,探讨碳排放总量及强度变化的主要影响因素以及存在的问题和挑战;研究“双碳”目标下的社会水循环系统中水-能-碳综合管理策略,提出减排降碳的方法和措施,支撑碳中和目标下的能源

与水协同安全保障。

二、社会水循环系统水-能-碳纽带关系解析

水在社会经济系统中形成的“取水-供水-用水-排水”循环过程，即为社会水循环^[3]。近年来，社会水循环系统不断向多样化、机械化、电气化发展，整个系统的运转过程实际上是以机械能换势能、换水量、换水质、换压力的过程，伴随着巨大的水和能源消耗，存在着复杂的水-能-碳纽带关系（见图1）。根据温室气体核算体系^[25]，碳排放包括化石燃料使用、投放药剂和氧化过程中产生的直接碳排放，使用电力、热力产生的间接碳排放以及行业运行过程中上、下游产生的其他碳排放。

取水是社会水循环的始端，包括直接从江河、湖泊、海洋或地下含水层等取水，根据导流形式的不同细分为蓄水、引水、提水、调水等。其中，提水工程由于存在供水和受水两地高程差，需要借助抽水泵以机械能换取势能完成提水，一些调水工程也需要进行提水。从用水对象来看，城市生活与工业取水工程以电力驱动为主，间接产生碳排放；农业灌溉排泵则多为分散式分布，配套动力以柴油与电动机并重的模式；工程应急需要少量使用柴油抽水泵，使用期间会直接产生碳排放。近年来，结合区域资源优势，建成热能、水能、风力或太阳能等环保型泵站，践行绿色低碳发展。

供水是将水资源由水源地通过管道或水泵输送

至农业、工业、生活等用水户的过程。农业灌溉供水系统主要由输水渠、控制闸、抽水电站等控制系统组成，地表或地下水经由各级输水渠输送并分配到田间。生活用水和大部分工业对水质有更高的要求，需通过水厂净化后向用户供水。目前，我国城市供水技术以混凝、沉淀、过滤、消毒等流程为主^[26]，取水、送水、加药等环节均是水厂间接碳排放的主要环节。输配水管网是连接水厂和用水户的重要系统，随着我国城市规模的扩大，输配水管网形成了结构复杂，规模庞大的体系。为满足末端用水户的需求，管网压力需保持在较高的范围^[27]，系统在消耗电力的同时产生间接碳排放。降低泵站耗能、控制管网漏损，是实现供水系统高效节能、城镇供水系统安全运行的重点问题。

用水系统是社会水循环的核心环节^[28]，按照用水主体可分为农业、工业、生活及生态用水。不同灌溉模式是造成农业用水相关耗能差异的主要原因^[29]；与传统雨养或漫灌模式相比，喷灌和滴灌模式可以使水资源利用效率显著提高，但能耗强度较高。在用水环节中，工业、家庭生活及商业用水的能耗相较其他环节更高^[30]。水是工业生产的重要原料之一，目前众多工业行业的生产环节都和 water 有直接或间接的关系；根据用水类型可分为生产用水、辅助生产用水、附属生产用水三大类，用水过程需使用电力或化石能源对水加热或形成工艺系统水循环。家庭生活用水环节需消耗的能量主要是加热耗能和机械耗能。随着城乡经济发展、居民生活水平

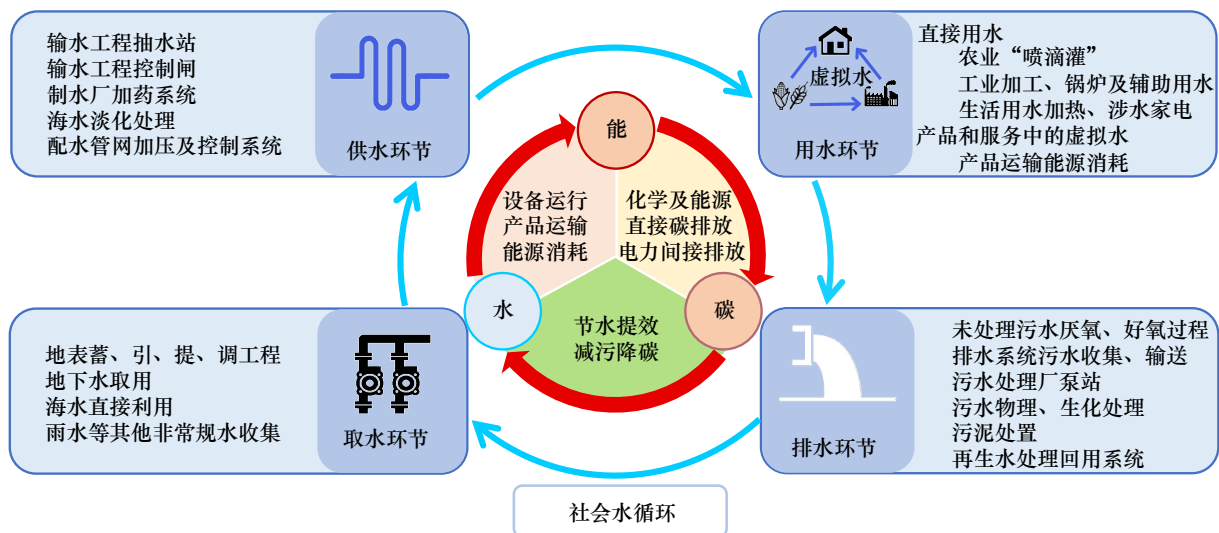


图1 社会水循环主要耗能及碳排放环节

的不断提升,生活用水系统已达到较高的电气化水平,用水机械耗能以电力消耗为主,间接产生碳排放;用水加热耗能环节则使用电力、天然气、煤气、太阳能等,同时存在直接和间接碳排放。

随着商贸物流的高速发展,产品流通的规模和范围逐年扩大。无论是食品、日用品、服饰,还是五金、化工产品,几乎所有产品在生产和加工过程中都需要水;产品加工消耗的水随着商品在不同产业和部门之间、生产部门与消费者之间流通,形成虚拟水转移。相对于实体水资源而言,商品更便于运输,因而虚拟水战略被认为是一种可以缓解水资源短缺的有效手段^[1]。产品在以汽车、火车、飞机、轮船等方式运输的过程中需要消耗能源,同时产生直接和间接碳排放,形成贸易隐含水-能-碳关联关系。

排水系统根据用水主体可分为农业排水和城市排水两类。农业排水系统主要收集农田中多余的地表水、土壤水及地下水;城镇排水系统主要收集居民生活污水和工业废水,涉及污水收集、输送、处理、回用、排放等环节。污水中含有大量有机物,因此相应厌氧和好氧过程将直接释放 CH_4 、 NO 、 CO_2 。污水处理行业属于电力密集型行业^[2],污水及污泥提升泵、物理净化、生物处理、污泥处置等设施 and 环节均需消耗大量的电力,加之污水处理过程需外加药剂,电力消耗和药剂消耗均会带来间接碳排放。

社会水循环作为自然水循环的侧枝,一方面受到区域地理特征、气候水资源本底条件等自然因素的制约,另一方面受到社会、经济、科技、管理等多方因素的影响和作用^[3],不同区域水系统结构及水-能-碳关联关系可能存在差异^[24]。同时,节水节能、减污降碳存在复杂的非线性动态耦合关系,仍需深入解析并量化系统各个环节、各种技术之间的水-能-碳动态关系。

三、社会水循环耗能与碳排放现状

本研究根据温室气体核算体系,计算了2009—2021年我国社会水循环全过程的能源消耗量和碳排放量,重点分析了不同环节、重点地区、单位水量能耗及碳排放的差异。以我国31个省级行政区(不包含港澳台)为主要研究对象,计算过程包括取

水、供水、用水、排水等诸多环节,涉及不同环节、不同地区的水量、能源消耗和碳排放数据,相应数据主要来源于统计年鉴、参考文献、典型行业调查及估算等。水量数据主要来自水利部发布的《中国水资源公报》、住房和城乡建设部发布的《中国城乡建设统计年鉴》,供水及排水环节耗能与药剂投入数据主要来自中国城镇供排水协会发布的《城市供水统计年鉴》《城镇排水统计年鉴》,跨流域调水、海水淡化、“三产”用水等能耗及碳排放数据主要通过典型调查获得,具体指标和方法详见表1。值得指出的是,社会水循环受地理位置、资源条件、社会经济结构、设备技术水平等诸多因素的影响,存在明显的区域特征,因而能耗及碳排放计算精确度不可避免地受到研究尺度的影响,存在一定的不确定性。

(一) 社会水循环各环节能耗及碳排放

我国总用水量呈现平稳波动的趋势,2009年、2021年全国总用水量分别为 $5.864 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $5.603 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (见表2)。2021年,我国社会水循环实体水耗能为 $1.2 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$,占我国能源消费量的2.5%;碳排放量为 $2.6 \times 10^8 \text{ t}$,占我国碳排放总量的2.2%;社会水循环系统中取水、供水、用水、排水等环节的设备电气化程度较高,使得碳排放占比低于耗能占比。

取水、供水、用水、排水环节的碳排放量分别占社会水循环碳排放总量的4.3%、4.1%、77.7%、13.9%(见图2)。取水环节主要包括河湖提水、跨流域调水、地下水开采、海水取用等。2009—2021年,我国总取水量基本不变,跨流域调水量、海水取用量大幅增加,分别从2009年的 $1.393 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $4.888 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增加到了2021年的 $2.168 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $1.459 \times 10^{11} \text{ m}^3$,而地下水取水量减少约22%。由于不同水源取用比例的变化,取水过程的能源消耗略有增长,增幅约为12.2%。随着城镇和农村供水的规模化发展,供水管网基础设施呈现规模宏大、结构复杂的特点,与2009年相比,2021年我国供水环节的碳排放强度增加了23.2%,总耗能、碳排放量分别增加了57.8%、65.8%。

用水是整个社会水循环的最大能量消耗环节。农业是用水最多的生产部门,2021年农业用水量占我国总用水量的61.6%;主要受太阳能、重力势能等

表1 数据来源及参考计算方法

环节	环节分类	数据指标	数据来源及能源、碳排放计算方法参考文献
取水	地表水提水	提水工程、提水量	全国及各省市《水资源公报》、文献[28,33]
	跨流域调水	调水工程、调水量	
	地下水提水	地下水埋深、地下水取水量	《中国地质环境监测地下水位年鉴》、全国及各省市《水资源公报》、文献[34]
供水	海水直接利用	海水直接利用量	全国及各省市《水资源公报》、文献[35]
	非常规水利用	雨水等非常规水利用量	全国及各省市《水资源公报》、文献[28]
	制水	供水量、制水单位耗电量	《城乡建设统计年鉴》《城市供水统计年鉴》
	供水	供水量、送(配)水单位耗电量	文献[24,28]
	海水淡化	海水淡化工程及技术、海水淡化量	《全国海水利用报告》《中国海水淡化年鉴》 文献[35,36]
用水	生活用水	生活用水总量、各类生活用水单位能耗	全国及各省市《水资源公报》、全国问卷调查、 文献[28]
	工业用水	工业用水总量,循环冷却用水、锅炉补水量 等用水占比,行业工业产值比重	全国及各省市《水资源公报》《统计年鉴》、全国 问卷调查、文献[23]
	农业用水	农业用水总量、各省节水灌溉面积	全国及各省市《水资源公报》《中国水利统计年鉴》、 文献[29]
	虚拟水	物流耗能及碳排放	文献[31,37]
排水	污水处理	污水处理总量、污水处理单位能耗	《城乡建设统计年鉴》《城镇排水统计年鉴》、全国及 各省市《水资源公报》、文献[28]
	再生水回用	再生水处理量、再生水处理单位能耗	

表2 2009年及2021年我国用水结构对比

环节	社会水循环过程	2009年/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	2021年/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	变幅/%
水	地表水蓄水	1567.9	1567.1	-0.05
	地表水引水	1742.2	1448.8	-16.8
	地表水提水	1388.9	1695.2	22.1
	跨流域调水	139.3	216.8	55.6
	地下水供水量	1094.5	853.8	-21.9
	海水直接利用	488.8	1459.0	198.4
	供水	城市供水	496.7	671.2
	农村供水	200.2	267.2	33.4
	海水淡化等其他水源(不含再生水)	7.3	21.2	190.4
用水	农业用水	3722.2	3644.3	-2.1
	工业用水	1389.9	1049.6	-24.5
	生活用水	751.6	909.4	20.1
排水	污水处理	279.3	611.8	119.0
	再生水利用量	23.9	117.0	389.5

自然能的驱动,与水直接相关的耗能仅有灌溉用水、牲畜喂养等环节,因而碳排放强度较低。工业是第二大用水部门,近年来工业企业不断推进节水减排,工业用水呈现显著下降趋势;2021年的工业用水量为 $1.05 \times 10^{11} \text{ m}^3$,较2009年下降了24.5%,用水平均碳排放量占社会水循环碳排放量的36.1%。2021年,我国城镇和农村生活用水合计为 $9.094 \times 10^{10} \text{ m}^3$,与2009年相比增加了21.5%。生活中的用水与用能高

度相关,饮水、烹饪、清洁卫生等均存在用水耗能和器具耗水,相关的碳排放量约占社会水循环碳排放量的35%。

排水主要包括污水的收集、处理、排放以及再生水处理等环节。污水中含有大量有机物,因而在排水及污水处理有机物降解的过程中会产生碳排放,直接碳排放量约占排水环节总碳排放量的40%。2021年,我国城市污水排放量达 $6.251 \times 10^{10} \text{ m}^3$,比

2009年增加了68.4%；我国污水处理能力也在逐年提升，2021年相应能力为 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ，是2009年的1.3倍；由于污水处理规模增加、出水水质提高，相应碳排放量增加了2.6倍。

(二) 不同环节及工艺的能源消耗、碳排放强度对比

以省份为研究单元，比较各环节及典型工艺的能源强度、碳排放强度。其中，能源强度指单位水量的能源消耗量，碳排放强度指单位水量的碳排放量。

对比发现，由于水资源本底条件及产业结构的差异，我国各地区水循环耗能及碳排放强度存在较大差异（见图3）。整体来看，取水环节的综合能源消耗及碳排放强度最小。这是由于地表水蓄水及引水工程以自流为主，该部分水量约占地表水取用量的1/2，整体削弱了取水环节的碳排放强度。供

水环节的单位耗能及碳排放强度在各省份较为接近，自来水厂制水、输配水的平均耗能强度分别为 $0.3 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 、 $0.4 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。由于供水规模差异，全国供水碳排放表现为东南部高、西北部低的空间分布状态，其中广东、江苏、山东三省的碳排放量较高（均超过 $9 \times 10^5 \text{ t}$ ）。

用水环节的“三产”碳排放强度存在显著的行业及区域差异，其中工业用水相关碳排放强度最高（约为 $1\sim 6 \text{ kg}/\text{m}^3$ ），农业用水相关碳排放强度最小（约为 $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）。生活用水受居民生活方式、器具差异影响显著，相关碳排放强度约为 $0.2\sim 4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。从生活用水环节来看，饮食、洗浴等能耗高，受季节、个人习惯等因素的影响较大；洗浴环节用水耗能强度约为 $5\sim 25 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ [38]，碳排放强度约为 $3.4\sim 17.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。污水处理工艺、排水执行标准则是影响排水环节碳排放强度的主要因素。以北京市污水处理厂的碳排放分析结果为例，厌氧-缺氧-好氧

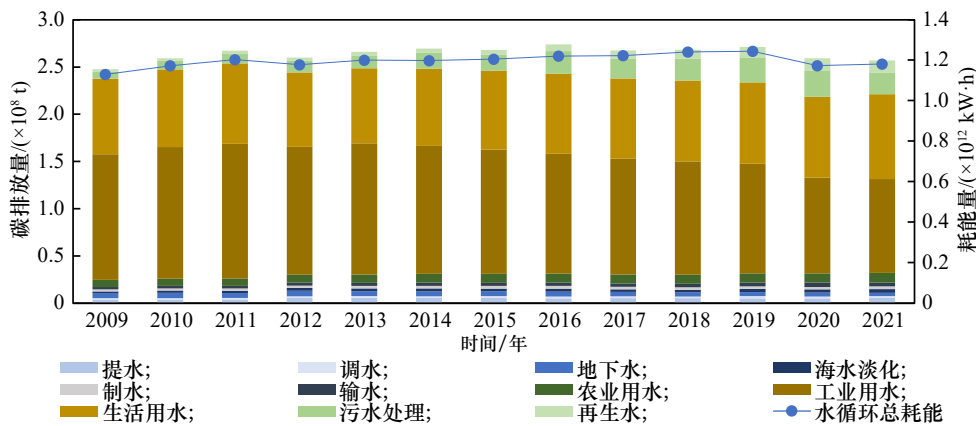


图2 全国社会水循环耗能及碳排放变化（2009—2021年）

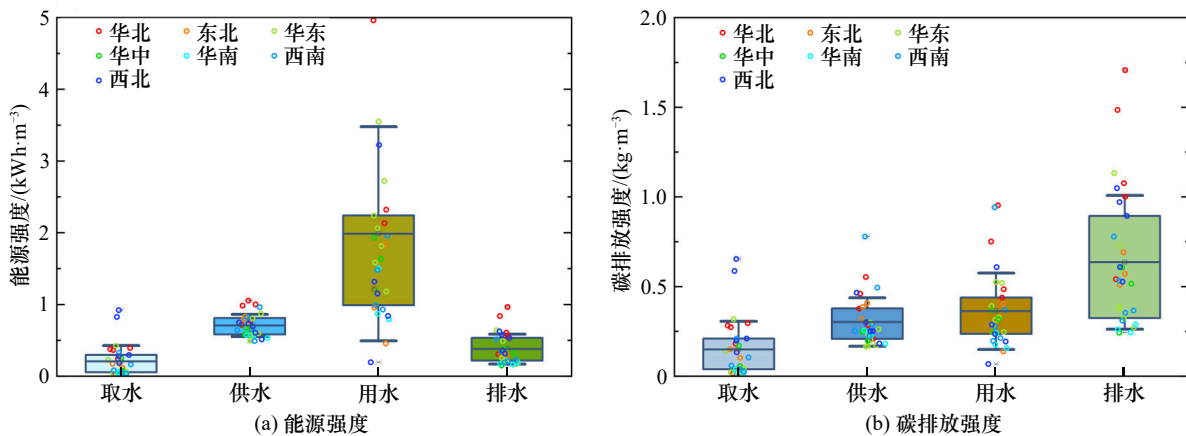


图3 社会水循环耗能及碳排放强度（2021年）

生物脱氮除磷工艺(AAO)碳排放强度较低(约为 1.0 kg/m^3),膜生物反应器(MBR)工艺碳排放强度较高(1.8 kg/m^3)^[39]。2021年,我国排水环节碳排放平均强度相比2009年增加了78.6%

四、社会水循环系统低碳发展存在的问题及挑战

(一) 主要环节向高耗能、高碳排放发展

随着居民生活水平的不断提高,对水质、水环境的要求也越来越高。上海、苏州、雄安新区等地相继实施高品质供水示范项目,通过臭氧活性炭和纳滤膜等^[40]深度处理工艺将自来水提升至饮用水标准。为保护水环境,各地区逐步提高污水处理厂出水水质要求,如河北保定、山东潍坊等地通过工艺改造、新建厂等方式建设高标准污水处理厂,出水主要检测指标已达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2020)中的三类水要求^[41]。供水和排水系统水质的提高主要依靠改造、增加工艺流程或增加药剂使用,这些处理均需新增能源动力,直接增加了水系统的能耗及碳排放。以北京市污水处理系统为例,执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准的污水处理厂碳排放强度约为 1.09 kg/m^3 ,而执行北京市地标一级A标准的平均碳排放强度提高至 1.36 kg/m^3 。

整体来看,社会水循环系统主要环节均呈现从低能耗转向高能耗、高碳排放的发展态势。除供水、排水环节外,用水环节的低碳运行也应予以重视。近年来,现代物流不断发展,商品生产与流通逐步分离,虚拟水贸易作为缺水地区解决水资源问题的战略受到更多关注^[37],然而,随着商品转移、销售,碳足迹随之产生。基于2017年投入产出表构建模型^[42]发现,长江流域贸易隐含水-能-碳压力呈现由经济较发达地区向欠发达省市转嫁的现象,如上海市净调入虚拟水约 $1.516 \times 10^9 \text{ m}^3$,隐含碳约为 $1.16 \times 10^8 \text{ t}$,折合单方虚拟水碳排放强度达 76.3 kg/m^3 ,远高于实体水碳排放强度。因此,仍需从全局角度优化市场端的水、能、碳资源配置,积极促进碳中和。与此同时,随着用水效率提升以及自动化和智能化设备的广泛应用,用水环节的能源强度也呈增加趋势。生活中的洗衣机、净水机、洗碗机、拖地机器人等设备应用,增加了生活用水

的能源强度。工业行业中的钢铁、火电、石化等高耗水工业水循环技术显著革新^[43],而水循环系统仍需依靠水泵控制形成闭路循环,由此带来的高能耗问题须予以重视^[44]。

(二) 水资源补源工程多是以能换水

我国水资源禀赋与社会经济格局存在时空布局不匹配情况。合理规划并利用外调水,加快推进再生水、雨水、海水淡化等非常规水工程建设,强化补源措施成为缺水地区保障供水安全的必然选择。上述补源工程多是以能量消耗换取水量的空间转移、水质的快速净化过程,与传统水资源相比具有更高的耗能及碳排放强度。常规工艺的城市污水处理能源强度多为 $0.2\sim 0.3 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$,碳排放强度为 $0.6\sim 0.7 \text{ kg/m}^3$,而出水水质更高的再生水能耗为 $0.8\sim 1 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$,碳排放强度为 $1.9\sim 2.1 \text{ kg/m}^3$,接近常规工艺污水处理碳排放强度的3倍^[41]。目前先进的反渗透海水淡化能耗仍达 $3\sim 4 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$,碳排放强度为 $2.7\sim 3.6 \text{ kg/m}^3$ 。泵站是调水工程中用能最多的装置,如南水北调东线工程输水干线工程设34座泵站,中线工程干渠全程自流但支渠配套工程仍设有多级泵站,能源消耗大^[45],因而提升泵站运行效率对工程节能减排、高效经济运行意义重大。

整体来看,目前我国非常规水及调水规模相对较小,能源及碳排放总量规模不大;但基于我国自然气候特征及社会发展规律的认识,短期内我国水资源短缺的局面难以改变,补源措施仍是未来一定时期内缓解供需矛盾的重要手段。根据国家发展和改革委员会、自然资源部发布的相关规划,2025年全国海水淡化总规模将为 $2.9 \times 10^6 \text{ t/d}$,比2021年增加 $1.05 \times 10^6 \text{ t/d}$;2025年全国地级及以上缺水城市再生水利用率将为25%,京津冀地区将达到35%。随着非常规水利用规模的增加,社会水循环的耗能及碳排放量也将大幅增加。

(三) 低碳节水技术储备不足

“双碳”目标给全社会、各行业都提出了新的更高要求。目前,各地区“双碳”工作的重点集中在能源、工业生产、建筑、交通等传统领域,而对水利特别是社会水循环系统关注较少。整体来看,我国相关节水技术与材料研发的自主创新能力仍不强,主要依靠引进、消化、吸收、再创新^[46];节水

技术往往并不节能，也未与低碳、清洁能源技术进行结合，导致低碳、零碳节水技术和设备的发展水平偏低，远不能满足各行业节水减碳的应用需求。

（四）实现“双碳”目标面临重大挑战

水是经济社会发展不可或缺的支撑和保障。数十年来，我国水利事业快速发展，以有限的水资源支撑了经济社会的高速发展，供水基础设施逐步完善，水资源统筹调配能力、供水保障能力不断提高。从现状分析结果看，社会水循环系统中水-能-碳紧密关联，目前整个系统的碳排放量占全社会碳排放总量的比例并不大，但主要环节的能源及碳排放强度均呈增加趋势。考虑未来发展以及居民生活水平的提高，全社会对水的需求、水质的要求均将不断提升；特别是缺水地区非常规水、跨流域调水的增长，将使社会水循环耗能及碳排放量继续增加，实现碳中和目标仍面临重大挑战。

我国社会水循环各个环节紧密关联，是“牵一发而动全身”的运转系统。从碳排放测算结果看，实体水部分的碳排放量占我国碳排放总量的2.2%；若结合产品“虚拟水”流通实现系统整体调控，或可成为落实碳排放目标的“潜力股”，在减少化石能源消耗和碳排放中起到重要作用。着眼“取水-供水-用水-排水”全过程，从基础研究、资源配置、技术装备研发、水循环过程出发，全面提升系统效率和节能环保水平，构建立体化、全过程的低碳调控能力。

五、推进社会水循环系统高效低碳发展的策略建议

（一）加强基础科学研究，构建社会水循环全过程碳核算体系

我国在社会水循环系统碳排放方面的基础研究仍然较少，未能解析不同地区、不同发展模式下社会水循环系统取水、供水、用水、排水等环节的水-能-碳关联关系、影响因素、耦合机制。现阶段水资源开发利用过程中水-能-碳相关研究所构建的关系模型和情景方案，大多基于已有的碳排放定额或碳排放因子，已不能准确反映不同地区、不同水源、不同技术工艺的实际情况，仍需加强基础数据收集。建议相关机构联合开展典型地区涉水工

程的温室气体排放监测及碳排放测算研究，构建覆盖社会水循环全过程的碳核算体系，支持开展水-能-碳纽带关联视角下的资源协同调控。

（二）推动系统配置和低碳技术研发，整体提升减污降碳综合能力

能源消耗是水利、给排水等工程建设和运行成本的重要组成部分，也是工程可持续的重要影响因素。建议在工程规划阶段，加强顶层设计，推动区域大系统的结构优化，从规划设计阶段起即贯彻节能减排原则。对于高耗能、高碳排放的工程，加强可行性论证及低碳优化配置方案比选，综合评估系统水-能-碳综合效率，提出协同配置最优方案。针对污水处理环节，加强污水处理和自然净化的治污综合体建设，优化处理工艺并构建减污降碳协同模式。从技术工艺角度，在重点环节淘汰高耗能、高碳排放生产工艺和技术，对涉水设备制定水效、能效双准入门槛以及相应的激励机制，激发企业和用水户自主节水减碳；加快研发并推广水处理同步产能、低碳生产工艺及技术，促进相关企业优化配置、转型升级。

（三）激励全社会加强节水，实现水资源与能源的双重节约

用水系统是社会水循环的核心环节、系统能源消耗和碳排放占比最高的环节。尽管我国综合用水效率得到明显提升，不少城市的供水管网漏损率仍然较高，每年由此产生近百亿立方米的水浪费，造成取水和供水环节电力资源浪费而间接增加了约 1.32×10^6 t碳排放。从用水主体来看，加强高耗能、高用水行业的节水降碳管理，是推进“双碳”目标、建设资源节约型社会的工作重点。对高用水行业实施用水监控、强化用水管理、推广先进节水技术、提高用水效率，不仅可以减少水资源浪费，还能相应减少取水、供水、排水环节的能源消耗与碳排放。以全国现状平均社会水循环碳排放强度估算，用水环节若减量10%，整个社会水循环系统可减少 1×10^7 t碳排放。

（四）完善水系统碳排放管理，实现社会水循环低碳发展

从“取水-供水-用水-排水”主要环节来看，

社会水循环的实体水系统涉及水利、住建部门以及农业、工业、生活等行业，产品虚拟水转移还涉及交通运输等部门，管理较为复杂。目前，水利部门的工作主要围绕生产、生活、生态用水的统筹和保障展开，对碳排放统计较为宏观；工业和信息化部门针对重点行业，制定相关工业产品碳排放管理体系；住建部门在碳排放管理方面更多关注建筑耗能、耗热及制冷，而对用水相关的碳排放关注较少。面向“双碳”目标，建议相关部门联合开展水系统的碳排放管理工作，坚持控源减排，进一步提高水资源利用效率；水利部门可将能源消耗因子和碳排放因子纳入水资源管理范畴，逐步实现各环节碳排放的精准管理，通过管理促进社会水循环的绿色低碳发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 29, 2023; **Revised date:** June 5, 2023

Corresponding author: Wang Jianhua is a professor-level senior engineer from the China Institute of Water Resources and Hydropower Research. His major research field is water resource engineering technology. E-mail: wjh@iwhr.com

Funding project: National Natural Science Foundation of China (72088101, 52009141); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Comprehensive Coordinated Development Strategy of Energy and Water in the Context of Climate Change and Dual Carbon Target” (2022-XZ-07)

参考文献

- [1] UNESCO, Un-Water. United Nations world water development report 2020: Water and climate change [R]. Paris: UNESCO, Un-Water, 2020.
- [2] Qu J, Liu H, Liu G. Science and technology for combating global water challenges [J]. *Engineering*, 2022, 9(2): 2.
- [3] 王浩, 龙爱华, 于福亮, 等. 社会水循环理论基础探析 I: 定义内涵与动力机制 [J]. *水利学报*, 2011, 42(4): 379–387.
Wang H, Long A H, Yu F L, et al. Study on theoretical method of social water cycle I: Definition and dynamical mechanism [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(4): 379–387.
- [4] 王浩, 王佳, 刘家宏, 等. 城市水循环演变及对策分析 [J]. *水利学报*, 2021, 52(1): 3–11.
Wang H, Wang J, Liu J H, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(1): 3–11.
- [5] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然–社会”二元水循环理论与研究方法 [J]. *水利学报*, 2016, 47(10): 1219–1226.
Wang H, Jia Y W. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(10): 1219–1226.
- [6] 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.
Chen M S, Chen C, Liu D X. Four paths for water conservancy to help achieve carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Water Resources Development Research*, 2022, 22(8): 1–4.
- [7] 鄂竟平. 坚持节水优先 强化水资源管理——写在 2019 年世界水日和中国水周之际 [J]. *水利发展研究*, 2019 (3): 1–2.
E J P. Adhere to the priority of water conservation and strengthen water resources management—Written on the occasion of the 2019 World Water Day and China Water Week [J]. *Water Resources Development Research*, 2019 (3): 1–2.
- [8] 曾衍德. 我国拥有世界 10% 的耕地和 6% 的淡水资源 农业节水势在必行 [J]. *农业工程*, 2017 (S1): 43.
Zeng Y D. China has 10% of the world’s arable land and 6% of freshwater resources, agricultural water conservation is imperative [J]. *Agricultural Engineering*, 2017 (S1): 43.
- [9] 梁振兴, 姜玮, 张国俊. 国家自然科学基金能源化学发展规划和布局概况 [J]. *科学通报*, 2021, 66(9): 6.
Liang Z X, Jiang W, Zhang G J. Strategic development and discipline layout of energy chemistry of National Natural Science Foundation of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(9): 6.
- [10] 严登华, 秦天玲, 肖伟华, 等. 基于低碳发展模式的水资源合理配置模型研究 [J]. *水利学报*, 2012, 43(5): 586–593.
Yan D H, Qin T L, Jiang W H, et al. Study on the model of water resources rational deployment for the low-carbon development mode [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(5): 586–593.
- [11] 王春艳, 田磊, 俞敏, 等. 电力行业水–能耦合关系研究综述 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 7.
Wang C Y, Tian L, Yu M, et al. Review of the studies on the water-energy nexus of the electricity sector [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12): 7.
- [12] 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): 16.
Zhao R Q, Li Z P, Han Y P, et al. The coupling interaction mechanism of regional water–land–energy–carbon system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 16.
- [13] Fang K, Heijungs R, Snoo de G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 508–518.
- [14] 田沛佩. 基于 MRIO 的中国水–能–碳耦合关系研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (博士学位论文), 2021.
Tian P P. Water–Energy–Carbon nexus in China’s trade network: An analysis with multi-regional input-output paradigm [D]. Beijing: North China Electric Power University (Doctoral dissertation), 2021.
- [15] 张建云, 周天涛, 金君良. 实现中国“双碳”目标水利行业可以做什么 [J]. *水利水运工程学报*, 2022, 191(1): 1–8.
Zhang J Y, Zhou T T, Jin J L. What can the water sector do to achieve China’s dual carbon target [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022, 191(1): 1–8.
- [16] 左其亨, 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, 56.

- Zuo Q T, Wu Q S, Ma J X, 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, 56.
- [17] 沈心怡, 马骏, 卢玉钦. 碳中和目标下我国绿色水电减排效率评价 [J]. *水利经济*, 2022, 40(4): 23-27, 92.
- Shen X Y, Ma J, Lu Y Q. Evaluation of carbon emission reduction efficiency of China's green hydropower under the goal of carbon neutralization [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2022, 40(4): 23-27, 92.
- [18] 张亚捷, 霍守亮, 吴丰昌. 我国流域减污降碳协同增效: 路径、技术与对策 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 41-48.
- Zhang Y J, Huo S L, Wu F C. Pathway, technology, and strategy for synergizing the reduction of pollution and carbon emissions in China's watersheds [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 41-48.
- [19] 吴晨, 刘攀. 面向“双碳”目标的水库调度研究进展与展望 [J]. *水资源研究*, 2022, 11(1): 1-19.
- Wu C, Liu P. Prospects of reservoir operation for the goals of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2022, 11(1): 1-19.
- [20] 王鼎, 赵钟楠, 邢子强, 等. 碳达峰碳中和背景下水利工作的思考 [J]. *水利规划与设计*, 2022, 221(3): 11-14, 112.
- Wang D, Zhao Z N, Xing Z Q, et al. Reflections on water conservation in the context of carbon neutral carbon peaking [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2022, 221(3): 11-14, 112.
- [21] Lam K L, Liu G, Motelica-Wagenaar A M. Toward carbon-neutral water systems: Insights from global cities [J]. *Engineering*, 2022, 7(14): 77-85.
- [22] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力 [J]. *给水排水*, 2017, 53(3): 1-3, 73.
- Wang H C. China's urban sewage treatment industry carbon emission reduction path and potential [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(3): 1-3, 73.
- [23] 李健. 城市水系统碳排放核算研究——以常州市为例 [D]. 江苏: 南京大学 (硕士学位论文), 2011.
- Li J. Accounting for carbon emissions from urban water systems: The case of Changzhou City [D]. Jiangsu: Nanjing University (Master's thesis), 2011.
- [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.
- Zhao R Q, Yu J, Xiao L G, et al. Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3119-3134.
- [25] 世界资源研究所. 温室气体核算体系: 产品生命周期核算与报告标准 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- World Resources Institute. Greenhouse gas accounting system: Product life cycle accounting and reporting standard [M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2013.
- [26] 李都望, 余天奇. 水厂的能耗分析与节能措施 [J]. *有色冶金设计与研究*, 2019, 40(6): 109-110, 118.
- Li D W, Yu T Q. Energy consumption analysis and energy saving measures of water plant [J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 2019, 40(6): 109-110, 118.
- [27] 刘俊. 基于DE与BP神经网络的城市供水系统节能优化调度研究 [D]. 天津: 天津理工大学 (硕士学位论文), 2016.
- Liu J. Study of power optimal scheduling of water distribution system based on Differential Evolution and BP neural network [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology (Master's thesis), 2016.
- [28] 姜珊. 中国水-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 (博士学位论文), 2017.
- Jiang S. Scientific concept of water-energy nexus and coupling simulation [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research (Doctoral dissertation), 2017.
- [29] 张慧芳, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 不同灌溉模式下农业水能消耗及碳排放研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(12): 119-126.
- Zhang H F, Zhao R Q, Xiao L G, et al. The effects of irrigation methods on carbon emission and water-energy consumption of crop production [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(12): 119-126.
- [30] Wakeel M, Chen B, Hayat T, et al. Energy consumption for water use cycles in different countries: A review [J]. *Applied Energy*, 2016, 178(sep.15): 868-885.
- [31] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路 [J]. *中国科学院院刊*, 2003, 18(4): 6.
- Cheng G D. Virtual water—A strategic instrument to achieve water security [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2003, 18(4): 6.
- [32] 张羽就, 席佳锐, 陈玲, 等. 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(8): 8-17.
- Zhang Y J, Xi J R, Chen L, et al. Energy consumption statistics and benchmarking analysis of urban Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(8): 8-17.
- [33] 古作良, 高焰. 流域用水碳排放量计算方法及应用 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(10): 53-56, 143.
- Gu Z L, Gao Y. Study on the influence of geological strength index on the stability of surrounding rock of baihetan underground cavern [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(10): 53-56, 143.
- [34] Zhao Y, Zhu Y, Lin Z, et al. Energy reduction effect of the South-To-North water diversion project in China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15956.
- [35] 刘淑静, 张拂坤, 王静, 等. “双碳”目标下中国海水淡化减碳路径及对策研究 [J]. *环境科学与管理*, 2022, 47(10): 15-19.
- Liu S J, Zhang F K, Wang J, et al. Research on carbon reduction path and countermeasures of seawater desalination in china under “dual carbon” goals [J]. *Environmental Science And Management*, 2022, 47(10): 15-19.
- [36] 吴水波, 苏立永, 葛云红. 海水淡化生命周期碳足迹评估及减排策略研究 [J]. *生态经济*, 2012, 261(12): 24-26, 40.
- Wu S B, Su L Y, Ge Y H. Study on the life-cycle carbon footprint assessment and reduction strategies of seawater desalination [J]. *Ecological Economy*, 2012, 261(12): 24-26, 40.
- [37] 朱志强. 江苏省产业虚拟水出口贸易变动及其驱动因子研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(2): 7.
- Zhu Z Q. Research on export trade change of virtual water and its driving factors in Jiangsu Province [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27(2): 7.
- [38] 刘满芝, 刘贤贤. 中国城镇居民生活能源消费影响因素及其效

- 应分析——基于八区域的静态面板数据模型 [J]. 资源科学, 2016, 38(12): 2295–2306.
- Liu M Z, Liu X X. Factors affecting Chinese urban household energy consumption and spatial differences based on static panel data modelling for eight regions [J]. Resources Science, 2016, 38 (12): 2295–2306.
- [39] 郝晓地, 陈峤, 李季, 等. MBR 工艺全球应用现状及趋势分析 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 7–12.
- Hao X D, Chen Q, Li J, et al. Status and trend of MBR process application in the world [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 7–12.
- [40] 董秉直, 肖健, 华建良, 等. 高品质饮用水的思考以及苏州实践 [J]. 给水排水, 2021, 47(8): 9.
- Dong B Z, Xiao J, Hua J L, et al. View of high quality drinking water and its practice in Suzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 9.
- [41] 王磊. 城市生活污水处理厂提标到地表三类水工艺路线及调试运行 [J]. 科学技术创新, 2021 (34): 3.
- Wang L. Urban domestic wastewater treatment plant upgrading to surface class III water process route and commissioning operation [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021 (34): 3.
- [42] 王保乾, 肖佳慧. 长江经济带省际贸易隐含水–能–碳耦合关系研究 [J]. 水利经济, 2023, 41(1): 47–54, 61, 104–105.
- Wang B Q, Xiao J H. Water–energy–carbon nexus in Yangtze River Economic Belt's inter-provincial trade [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 47–54, 61, 104–105.
- [43] 林雪茹, 李达, 古勇, 等. 工业循环水系统的节能优化研究 [J]. 自动化仪表, 2018, 39(8): 36–39.
- Lin X R, Li D, Gu Y, et al. Research on the energy conservation optimization of industrial circulating water system [J]. Process Automation Trumentation, 2018, 39(8): 36–39.
- [44] 赵晶, 倪红珍, 陈根发. 我国高耗水工业用水效率评价 [J]. 水利水电技术, 2015. 46(4): 11–15.
- Zhao J, Ni H Z, Chen G F. Evaluation on water use efficiency of water-intensive industries in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(4) : 11–15.
- [45] 沈涵, 车奇星, 李建洲, 等. 郑州市南水北调配套工程典型泵站经济运行的探讨与实践 [J]. 科技风, 2022 (22): 3.
- Shen H, Che Q X, Li J Z, et al. Exploration and practice on economical operation of classical pump system in South to North water diversion project in Zhengzhou [J]. Ke Ji Feng, 2022 (22): 3.
- [46] 王浩. 我国节水面临问题与对策 [R]. 北京: 全国节约用水办公室, 2022.
- Wang H. Problems facing water conservation in China and countermeasures [R]. Beijing: National office of Water Conservation, 2022.