

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.002

# “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望

左其亭<sup>1,2,3</sup>, 吴青松<sup>1</sup>, 马军霞<sup>1</sup>, 张志卓<sup>1</sup>, 李赫<sup>1</sup>

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001; 3. 郑州市水资源与水环境重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对“双碳”目标下水资源行为调控研究, 构建了研究框架, 主要包括“双碳”目标下水资源行为作用机理研究、量化研究、调控研究3方面内容; 阐明了水资源行为与“双碳”目标的相互关系及作用机理、水资源行为对“双碳”目标作用函数确定及定量评估、面向“双碳”目标的水资源行为调控机制与定量描述3个关键问题, 并介绍了这3个问题相应的研究方法; 围绕上述内容, 从水资源行为作用机理、定量评估、调控模型、应用实践4个方面展望了下一步的研究方向。

**关键词:**“双碳”目标; 水-碳系统; 水资源行为; 作用机理; 优化调控

**中图分类号:**TV231.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0008-07

**Research framework and prospect of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals**// ZUO Qiting<sup>1,2,3</sup>, WU Qingsong<sup>1</sup>, MA Junxia<sup>1</sup>, ZHANG Zhizhuo<sup>1</sup>, LI He<sup>1</sup> (1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This paper establishes a research framework in allusion to water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals, including action mechanism of water resource behaviors on the carbon peak and carbon neutrality goals, as well as quantitative and regulation research of water resource behaviors acting on carbon peak and carbon neutrality goals. Then, three key issues are depicted, including relationship and action mechanism between water resource behaviors and carbon peak and carbon neutrality goals, action function determination and quantitative evaluation of water resource behaviors on carbon peak and carbon neutrality goals, regulation mechanism and quantitative description of water resource behaviors oriented to carbon peak and carbon neutrality goals, and the corresponding research methods of above three problems are introduced. Additionally, further research directions are prospected from four aspects, including the action mechanism and quantitative assessment of water resource behaviors, as well as the regulation model and practical application of water resources behaviors.

**Key words:** carbon peak and carbon neutrality goals; water-carbon system; water resource behavior; action mechanism; optimal regulation

在全球气候变化对人类生存发展构成威胁愈发严重的时代背景下, 发展低碳经济、构建低碳排放的未来发展模式, 成为越来越多国家的愿景与共识<sup>[1]</sup>。“双碳”目标, 即实现“碳达峰”和“碳中和”的合称, 其具体内容为中国的二氧化碳排放量力争于2030年前达到峰值, 并争取在2060年前实现碳中和, 是中国应对变化环境所提出的中长期国家战略<sup>[2]</sup>。该战略目标由习近平主席2020年9月22日

在第75届联合国大会上提出, 随后在2021年10月12日《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会上提出要构建起碳达峰、碳中和“1+N”政策体系, 形成了国际广泛共识<sup>[3]</sup>。水资源是人类生存和延续的物质基础, 也是经济社会发展和生态环境保护的关键支撑, 水资源领域是落实“双碳”目标、调控人水关系、支撑可持续发展的重点领域之一<sup>[4-5]</sup>。开展水资源行为对“双碳”目标作用的理论

**基金项目:**国家自然科学基金(52279027); 河南省重大公益性科技专项(201300311500); 国家重点研发计划(2021YFC3200201)

**作者简介:**左其亭(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

**通信作者:**马军霞(1968—), 女, 高级实验师, 硕士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: majx@zzu.edu.cn

基础及科学调控方法研究是现阶段我国科学研究的重大需求,对“双碳”战略的顺利实施具有重要的意义。

水资源行为,即与水资源开发、配置、利用、保护等相关的一系列活 动统称,其与“双碳”目标的实现有着密切的联系<sup>[6]</sup>。具体地说,污水回用、节水、水力发电等水资源行为有利于形成绿色低碳的发展模式,但水资源过度开发利用等行为也可能导致水土流失、水体污染、生态破坏等问题,对“双碳”目标的实现带来严重负面影响<sup>[7-8]</sup>。基于上述背景和需求,左其亭等<sup>[9]</sup>分析了“双碳”目标内涵及实现途径,对“双碳”目标相关的水资源行为进行了初步梳理,提出了“双碳”目标下我国水利发展新征程战略布局,阐述了节水优先、清洁水能、国家水网、生态水利、智慧水利和科技兴水等六大战略。当前,国内外针对水-碳系统之间的联系和相互作用关系已开展了较多研究,取得了系列研究成果,但同时也存在一些问题。在水-碳互馈关系方面,主要从模型构建<sup>[10]</sup>、量化分析<sup>[11]</sup>等方面展开研究,涉及国家、流域、区域等不同尺度<sup>[12-13]</sup>,虽研究成果较为丰富,但结合水循环和碳循环理论分析二者互馈关系的研究不足,缺乏对“双碳”目标下水资源行为的梳理,水资源行为对“双碳”目标的作用机理仍有待探索。在水资源行为对碳排放作用方面,结合碳足迹、水足迹、碳排放强度的研究成果,对降低碳排放提供了多视角的解决方案<sup>[14-15]</sup>,对我国实现“双碳”目标具有借鉴价值。近年来在水资源行为对碳排放作用方面的研究逐渐增加<sup>[7, 16]</sup>,但水资源行为对碳排放作用

定量描述的系统研究仍相对缺乏,需进一步深入研究。此外,针对水资源行为调控和水-碳调控模型,国内外学者也开展了一些研究<sup>[17-18]</sup>,涉及水资源多目标优化、综合管理、科学调配等方面<sup>[19-20]</sup>,包括水-碳耦合机制的理论研究<sup>[21]</sup>及水-碳耦合模型的实践应用<sup>[22]</sup>等,但结合减碳、固碳需求,对“双碳”目标下水资源行为调控的系统性和针对性研究缺乏,基于“双碳”目标构建水资源行为调控模型,是亟待研究的重点方向。

综上,针对“双碳”目标下水资源行为作用机理和定量描述以及面向“双碳”目标的水资源行为科学调控等尚缺乏研究,这正是中国贯彻新发展理念、解决水碳矛盾、实现绿色低碳发展模式的难点问题。基于此,本文提出“双碳”目标下水资源行为调控研究框架,并展望未来研究方向,以期促进以水减碳思路的形成,为后续“双碳”目标下水资源研究提供参考。

## 1 研究框架及主要内容

### 1.1 研究框架

总体思路:基于水循环和碳循环理论明晰水-碳互馈关系,系统梳理与“双碳”目标相关的水资源行为,揭示“双碳”目标下水资源行为作用机理;研究确定水资源行为对“双碳”目标作用函数,定量评估水资源行为作用;构建面向“双碳”目标的水资源行为调控模型,通过模型求解来确定水资源行为调控方案,提出“双碳”目标下水资源行为调控支撑体系。研究框架如图 1 所示。

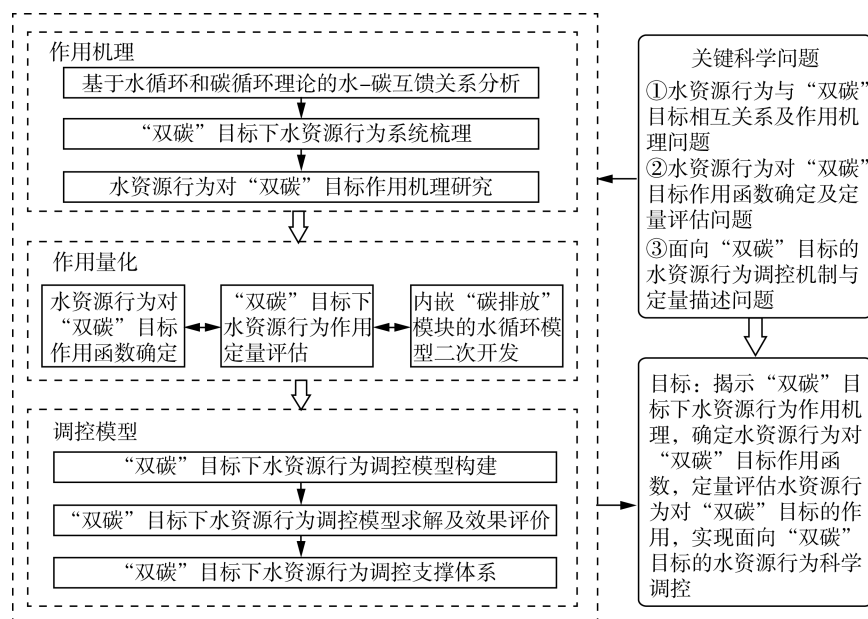


图 1 “双碳”目标下水资源行为调控研究框架

Fig. 1 Research framework of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals

## 1.2 主要内容

### 1.2.1 “双碳”目标下水资源行为作用机理研究

以水循环和碳循环理论为基础,分析复杂的水-碳互馈关系,系统研究水资源行为对“双碳”目标的作用机理,重点研究:①基于水循环和碳循环理论的水-碳互馈关系分析。立足于连接水-碳系统的水循环和碳循环过程,考虑系统间各要素相互关系的复杂性、联动性和变化性,构建水-碳系统相互交织的关联性网络结构,从直接和间接两个角度揭示多层次水-碳互馈关系,辨识影响二者互馈关系的主要因子。②“双碳”目标下水资源行为系统梳理。整理总结当前水资源行为,结合水-碳互馈关系分析结果,从水资源开发、配置、利用、保护等方面出发,筛选出与“双碳”目标相关性较强的水资源行为,根据作用大小、方式、方向、特点等规则对各种行为进行梳理。③水资源行为对“双碳”目标作用机理研究。从正负两个方面出发,考虑气候变化和人类活动等多重驱动因素,分析上述梳理的各种水资源行为对“双碳”目标的作用特征和影响机制,研究并总结变化环境下二者作用的动态演变规律,多尺度揭示水资源行为对“双碳”目标的作用机理。

### 1.2.2 “双碳”目标下水资源行为作用量化研究

在分析水资源行为对“双碳”目标作用机理的基础上,开展水资源行为对“双碳”目标作用量化研究,重点研究:①水资源行为对“双碳”目标作用函数确定。针对与“双碳”目标相关的水资源行为,以二氧化碳排放为衡量标准,重点关注水资源行为实施到二氧化碳排放的多环节转化关系,研究确定水资源行为对“双碳”目标作用函数。②“双碳”目标下水资源行为作用定量评估。基于研究得到的作用函数,实现单个水资源行为对“双碳”目标作用量化,针对国家、区域、流域等不同尺度,考虑水资源行为间复杂的相互关系,明确多种水资源行为作用的叠加效应,研究基于作用函数的水资源行为对“双碳”目标作用量化方法,从系统的角度实现不同尺度下水资源行为对“双碳”目标作用定量评估。③内嵌“碳排放”模块的水循环模型二次开发。基于水资源行为对“双碳”目标作用机理与水循环、碳循环物理机制,对传统水循环模型进行二次开发,在模型中嵌入“碳排放”模块,定量模拟自然水循环和社会水循环过程中各种水资源行为对“双碳”目标的作用。

### 1.2.3 “双碳”目标下水资源行为调控模型与支撑体系研究

基于上述研究,考虑水资源、经济社会、生态环境等多方面约束,以构建面向“双碳”目标的水资源

行为调控模型为核心,重点研究:①“双碳”目标下水资源行为调控模型构建。结合水资源行为作用定量评估结果,识别制约“双碳”目标实现的关键水资源行为,综合考虑减少碳源、增加碳汇两个方面,确定“双碳”目标下水资源行为调控准则与表征指标、目标函数及约束条件等,构建水资源行为调控模型。②“双碳”目标下水资源行为调控模型求解及效果评价。以模型构建为基础,结合随机森林、多目标迭代、支持向量机等寻优算法,研究水资源行为的最优参数组合,从而确定调控指标的最优值,为制定水资源行为调控方案提供参考。结合“双碳”目标下水资源行为作用量化研究成果,通过对比调控前后的作用评估结果,对构建的调控模型进行效果评估。③“双碳”目标下水资源行为调控支撑体系。从水-碳系统的全局视角出发,研究构建面向“双碳”目标的水资源行为调控支撑体系,包括工程、政策、制度、行政、投资、技术、管理等方面,保障水资源行为调控方案的顺利实施。

## 2 关键问题及研究方法

### 2.1 关键问题

a. 水资源行为与“双碳”目标相互关系及作用机理问题。水-碳系统间存在着复杂、联动、变化的相互关系,在水资源行为实施到二氧化碳排放的多环节转化过程中,由于关联结构的复杂性使得二者的关系难以表述,明晰水资源行为对“双碳”目标作用机理,是进行“双碳”目标下水资源行为作用量化的理论基础和重要支撑,是亟须解决的关键问题。

b. 水资源行为对“双碳”目标作用函数确定及定量评估问题。在定性表征水-碳互馈关系的基础上,需要量化各种水资源行为对“双碳”目标所起的作用。水资源行为对“双碳”目标作用函数,能够直观反映作用大小、方式、方向、特点等以及随时间变化的规律,是对水资源行为作用量化的重要基础。针对不同研究尺度,定量描述水资源行为对“双碳”目标的作用也是研究的重点和需要攻克的难点。

c. 面向“双碳”目标的水资源行为调控机制及定量描述问题。水资源行为受经济社会、生态环境等多方面因素的共同影响,行为间存在着复杂的相互作用关系,在水资源行为作用量化的基础上,进行水资源行为调控是助力“双碳”目标实现的有效途径。但如何在考虑多重驱动因素的作用下,揭示满足“双碳”目标的水资源行为调控机制并对其进行定量描述,是进行水资源行为调控的前提和亟待解决的关键问题。



## 2.2 主要研究方法及讨论

### 2.2.1 水资源行为对“双碳”目标作用机理研究方法

应用于水资源行为对“双碳”目标作用机理研究的方法众多,包括实验分析、观测统计、定性分析、定量计算等,也可以多种方法组合应用,一般应具有把握重点、整体考虑、系统识别的优势和特点。其中,实验方法主要是通过测定元素、分子等的数量在物质迁移转化过程中的变化,明确其在起始端(行为实施)到末端端(碳排放)的转化过程,进而实现机理研究。观测统计方法是根据在过程中观察到的现象、数据、规律等,得到现实资料进行统计分析,总结得出一般性和普遍性的特征。定性分析主要是基于现有的水-碳互馈理论和认知,构建能够反映真实转化过程的经验性概念模型等,从二者的内在规律性出发开展研究。定量计算方法是目前最为常用,也更容易实施和达到研究目标的手段,其主要是通过量化要素之间的转换关系,分析并总结出二者之间具有本质性的作用机理。虽然当前针对作用机理的研究方法和手段较为丰富,但如何将其较好地应用于水资源行为对“双碳”目标作用机理研究,是目前急需攻克的问题。

在现有基础上发展水资源行为对“双碳”目标作用机理研究的嵌入式系统动力学方法<sup>[23]</sup>,构建水-碳系统的关联性网络结构,能够动态模拟各种驱动因素影响下的水-碳互馈关系及演变规律。其主要内容包括确定系统边界、分析因果关系、模型建立、参数估计、模型检验、情景模拟等<sup>[24]</sup>;应用的难点在于,一是明确水-碳系统要素之间的因果关系并进行定量表征,二是模型精度的校正以及根据模拟结果对一般性规律进行总结。此外,在系统梳理水资源行为的基础上,可以采用和谐辨识方法<sup>[4]</sup>,从水资源开发、配置、利用、保护等方面出发,识别水资源行为对“双碳”目标作用的主要影响因素,研究变化环境下的动态演变规律和作用机制,从而揭示水资源行为对“双碳”目标的作用机理。其难点在于针对不同的问题选取合适的和谐辨识方法,以及结合辨识结果从定性和定量两个角度阐明水资源行为的作用机理。

### 2.2.2 水资源行为对“双碳”目标作用量化方法

**a.** 基于作用函数的水资源行为对“双碳”目标作用量化方法。目前已有许多量化水资源行为对碳排放作用的方法<sup>[7,25]</sup>,包括碳足迹法、碳收支核算方法、全生命周期法、质量平衡法、投入产出法等,能够在一定程度上满足研究需求。上述方法应用的核心在于确定水资源行为和碳排放量的函数关系,通过数学方程来量化二者之间的转换过程。但在实际情

况中,有些水资源行为与碳排放是间接相关的,且转换关系复杂,作用函数的精度大幅影响着结果的可靠性,需在已有基础上进一步完善研究。此外,水资源行为是相互影响的,针对国家、区域、流域等尺度进行量化时,并不是简单求和的关系,应考虑各种行为作用的叠加效应以避免重复计算,基于此,需要改进已有的定量评估方法,提出更为精确的基于作用函数的水资源行为对“双碳”目标作用量化计算方法,以应对不同尺度的水资源行为作用量化问题。

**b.** 水资源行为对“双碳”目标作用综合评估方法。综合评估是指运用系统、规范的方法对多个指标或系统进行整体性评价<sup>[26]</sup>,已广泛应用于评价水资源承载力、水质状况、水资源利用效率、水安全和河流健康等。当前常用的综合评估方法包括和谐评估方法、灰色关联分析、模糊物元法、减法集对势、云模型、相对差异函数等,这些方法同样可以应用于水资源行为对“双碳”目标作用综合评估,通过构建指标体系、指标量化、指标集成、结果判别等步骤实现研究目标。以左其亭等<sup>[27]</sup>提出的和谐评估方法中最常用的“单指标量化-多指标综合-多准则集成”方法为例,其应用的大致流程是:①构建全面反映水资源行为对“双碳”目标作用的指标体系,并确定指标的节点值;②按照单指标量化、多指标综合、多准则集成的步骤,对指标体系进行逐层集成和综合,得到最终的量化结果;③结合既定的判别标准,确定水资源行为对“双碳”目标作用的总体水平。上述研究的难点在于,一是构建系统、全面、科学、有效的指标体系,二是合理确定指标节点值和评判标准。

**c.** 基于水循环模型的水资源行为对“双碳”目标作用模拟方法。随着水科学及相关学科的发展,水循环的物理机制逐渐清晰,对水循环的模拟也愈发成熟,水循环过程已在众多模型中得到有效体现<sup>[28]</sup>。一些代表性模型,例如:SWAT(soil and water assessment tool)、MIKE SHE、IHDM(institute of hydrology distributed model)、TOPMODEL(topography-based hydrological model)、SWMM(storm water management model)等分布式流域水文模型,VIC(variable infiltration capacity)、SiB(simple biosphere model)、ISBA(interactions between the soil-biosphere-atmosphere)等陆面过程模拟模型,以及WEP(water and energy transfer processes)模型和GBHM(geomorphology-based hydrological model)模型,为水循环要素过程模拟研究提供了重要平台,也为水资源行为对“双碳”目标作用量化研究打下了坚实基础<sup>[29]</sup>。但是,上述模型大多聚焦于水循环模拟,并未涉及碳循环过程,还无法直接实现水资源行

为对“双碳”目标作用的量化模拟。参考人水关系模拟模型的设计思路<sup>[4]</sup>,基于水资源行为对“双碳”目标的作用机理,融合水-碳耦合物理机制和能量交换过程,将“碳排放”模块嵌入到现有水循环模拟的成熟模型中去,在进行水循环过程模拟的同时,实现水循环过程中各种水资源行为对“双碳”目标作用的模拟,将是对传统水循环模型的重要改进和创新,也将成为“双碳”目标下水资源行为调控研究的有力工具。实现上述模型二次开发的难点在于,一是水-碳耦合系统物理机制的概化描述,二是碳循环过程参数的设计和率定。

### 2.2.3 “双碳”目标下水资源行为调控模型构建方法

基于水资源行为对“双碳”目标作用机理和作用量化研究进行系统优化,针对现存问题采用水资源行为调控措施提升水资源领域对减少碳排放的作用,对现状及未来的情形做出有效的判断,是实现以水减碳目的和水-碳系统协同发展的重要手段,对制定综合发展规划、水资源开发与保护、产业结构调整 and 布局等具有重要参考价值。目前调控模型的构建方案和求解方法较多,可以应用于“双碳”目标下水资源行为调控模型构建,大体思路是判断系统是否达到各参与方暂时都能接受的平衡状态,明确当前平衡状态与“双碳”目标的差距,确定模型边界条件、调控准则、目标函数和约束条件等,构建面向“双碳”目标的水资源行为调控模型,通过寻优算法求解模型的最优情景,得到优选的行为调控方案。例如,应用左其亭<sup>[30]</sup>提出的和谐论理论方法,以水资源行为与“双碳”目标和谐度最大为目标函数,以水资源-经济社会-生态环境多维临界阈值及互馈关系方程、水循环和碳循环方程等为约束,构建面向“双碳”目标的水资源行为多维临界和谐调控模型,结合优化算法进行求解,并通过对比调控前后的和谐度进行模型检验。其中,模型构建过程中需考虑现状水平、未来需求、人为和自然因素影响等多个方面,这是确保模型科学性和有效性的关键环节,也是模型实现的难点问题<sup>[31]</sup>。

## 3 研究展望

### 3.1 进一步揭示水资源行为对“双碳”目标作用机理

目前针对水-碳互馈关系已取得一些研究成果,但水系统和碳系统本身都是十分复杂的系统,其耦合而成的水-碳系统及内部相互关系的复杂性,决定了二者之间的作用机理是需要长期探索的问题<sup>[32]</sup>。在低碳排放的大背景下,有必要开展水资源行为与

“双碳”目标关系的系统分析,进一步研究水资源行为对“双碳”目标作用机理,夯实水资源行为作用量化和调控的理论基础。可以从以下3个方面入手:①系统梳理与“双碳”目标相关的水资源行为,明确二者是直接还是间接相关,存在的因果关系,以及二者之间的转化节点;②针对不同的时间和空间尺度,准确构建起水资源行为和碳排放之间的联系;③考虑耦合系统的复杂性,注重多学科理论和方法组合应用,从定性和定量结合的角度展开研究。在当前的基础上深化研究,通过多尺度、多方面、多层次的分析全面揭示水资源行为对“双碳”目标作用机理。

### 3.2 深入研究水资源行为对“双碳”目标作用定量计算评估

由于行为之间的联动效应,取、供、用、耗、排等各种水资源行为在一定程度上会对碳排放产生作用,准确量化作用的大小是需要深入研究的课题<sup>[33]</sup>。目前针对水资源行为对碳排放作用评估方法已有一些探讨,但考虑到水-碳系统间复杂的互馈关系,需要深入开展水资源行为对“双碳”目标作用定量计算评估的系统研究。重点考虑3个方向:①从作用量化的角度,水资源行为和碳排放之间的函数关系至关重要,不同的水资源行为对应的函数关系差异较大,需要针对性研究能够准确反映多环节转化过程的作用函数,其中可能需要运用实验、统计、模拟等多种技术手段。对于某些定性措施的水资源行为,量化其对“双碳”目标作用,并从整体的角度量化国家/省(市)/流域尺度的水资源行为作用,均是下一步的重要研究方向。②从综合评估的角度,目前的评估方法很多,但水资源行为对“双碳”目标作用评估方面,有待形成涵盖指标体系、评价方法和评价标准等的完善方法体系,其中多指标综合评估只是一个方面,还需要拓展研究具有普适性的评估方法,以及针对特定问题的评估方法。③从模型二次开发角度,目前尚未有水循环模型能够定量模拟不同水资源行为对“双碳”目标作用,需尽快嵌入水-碳互馈的物理机制,设计基于水循环过程的“碳排放”模块,并与传统水文模型、水资源模型、水环境模型等相耦合,这也是未来研究的重要方向。

### 3.3 亟待开展面向“双碳”目标的水资源行为调控理论、方法、模型的研究

目前多目标优化、水资源综合管理、水资源优化调配等方面的大量研究能够为水资源行为调控研究提供丰富的理论和方法借鉴,但缺乏满足“双碳”目标的水资源行为调控理论、方法和模型的研究,而该方面也是当前亟待解决的多学科交叉问题<sup>[34]</sup>。实



现面向“双碳”目标的水资源行为科学调控,需从以下3个方面加强研究:①进一步开展“双碳”目标下水资源行为调控的专门理论研究,提出涵盖指导思想、基本原则、遵循规律、研究对象、研究目标等的理论框架体系,为后续的水资源行为调控提供理论支撑;②创新面向“双碳”目标的水资源行为调控方法,借鉴现有调控方法,注重多学科方法交叉运用,结合研究内容的特点,深入创新面向“双碳”目标的水资源行为调控方法,研发配套调控软件系统;③加强研究“双碳”目标下水资源行为调控模型,用于给出最优参数组合对应的调控方案,具体内容包括模型目标函数的设定、约束条件的选择、复杂模型求解与调控方案制定、模型精度提高和适应性优化等。

### 3.4 进一步探索“双碳”目标下水资源行为调控应用实践

“双碳”目标下水资源行为调控的系列理论方法,最终都是为了指导生产实践,制定考虑“双碳”目标需求的变化环境下水资源开发利用规划和政策。因此,需要加强“双碳”目标下水资源行为调控应用实践<sup>[35]</sup>,重点关注以下方面:①开展水资源行为作用机理实践研究,作用机理研究作为当下热点,除理论研究外,需结合实例分析各种水资源行为对碳排放作用的机制及规律;②进一步开展水资源行为作用量化方法的应用研究,水资源行为作用的定量评估十分重要,但当前量化方法的应用还存在诸多短板,需加强针对性应用研究;③深化水资源行为调控模型的应用研究,选取研究区构建调控模型,结合实例对模型进行改进和校正,得到契合实际的水资源行为调控方案,为解决水碳矛盾现实问题提供方向和措施;④加强水资源行为调控方案在水资源规划、管理、配置、调度中的应用,上述内容是水资源学科的重要组成部分,也是水利事业的重要工作内容<sup>[36]</sup>,应充分发挥调控方案在水利工作中的参考和应用价值;⑤开展“双碳”目标下水资源行为调控支撑体系的应用实践,科学合理、有针对性的支撑体系是实现水资源行为调控的必要保障,需推动支撑体系应用于面向“双碳”目标的水资源行为调控实践。

## 4 结 语

立足于“双碳”目标的国家战略需求,构建了“双碳”目标下水资源行为调控研究框架,阐明了其涵盖的3方面主要内容;提出了“双碳”目标下水资源行为调控亟待解决的3个关键问题,并从多个角度探讨了关键问题的主要研究方法;在此基础上,考虑现状和未来发展需求,从水资源行为作用机理、定量评估、调控模型、应用实践4个方面给出了研究展

望,为后续“双碳”目标下水资源研究提供参考。“双碳”目标下水资源行为调控涉及学科众多、内容纷杂,牵涉不同学科的理论基础和技术方法,在水资源领域落实“双碳”目标需要解决的问题远不止于此。在今后的研究中,将重点针对“双碳”目标下水资源行为作用机理、作用函数确定、调控模型构建等开展研究。

### 参考文献:

- [1] 刘燕华,李宇航,王文涛.中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动[J].中国人口·资源与环境,2021,31(9):1-5. (LIU Yanhua, LI Yuhang, WANG Wentao. Challenges, opportunities and actions for China to achieve the targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 1-5. (in Chinese))
- [2] 庄贵阳.我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J].人民论坛,2021(18):50-53. (ZHUANG Guiyang. Challenges and countermeasures faced by my country to achieve the goal of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. People's Tribune, 2021(18):50-53. (in Chinese))
- [3] 欧阳志远,史作廷,石敏俊,等.“碳达峰碳中和”:挑战与对策[J].河北经贸大学学报,2021,42(5):1-11. (OUYANG Zhiyuan, SHI Zuoting, SHI Minjun, et al. Challenges and countermeasures of “carbon peak and carbon neutrality” [J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2021, 42(5): 1-11. (in Chinese))
- [4] 左其亭.人水关系学的学科体系及发展布局[J].水资源与水工程学报,2021,32(3):1-5. (ZUO Qiting. Discipline system of human-water relationship and its development layout [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(3): 1-5. (in Chinese))
- [5] 夏军,刁艺璇,余敦先,等.鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J].水资源保护,2022,38(3):1-8. (XIA Jun, DIAO Yixuan, SHE Dunxian, et al. Analysis on ecological security and ecological carrying capacity of water resources in the Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 1-8. (in Chinese))
- [6] 左其亭,刘欢,马军霞.人水关系的和谐辨识方法及应用研究[J].水利学报,2016,47(11):1363-1370. (ZUO Qiting, LIU Huan, MA Junxia. Research on identification methods and applications for harmony of human-water relationship [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(11): 1363-1370. (in Chinese))
- [7] 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))

- [ 8 ] 闫旭,邱德志,郭东丽,等. 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征[J]. 环境科学,2018,39(3):1256-1263. (YAN Xu, QIU Dezhi, GUO Dongli, et al. Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China[J]. Environmental Science, 2018, 39(3):1256-1263. (in Chinese))
- [ 9 ] 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. (ZUO Qiting, QIU Xi, ZHONG Tao. China's new journey of water conservancy development under the “carbon peak and neutrality” goals [J]. China Water Resources, 2021 (22):29-33. (in Chinese))
- [ 10 ] MEHRJERDI H, ALJABERY A A M. Modeling and optimal planning of an energy-water-carbon nexus system for sustainable development of local communities [J]. Advanced Sustainable Systems. 2021, 5(7): 2100024.
- [ 11 ] KHORCHANI M, NADAL-ROMERO E, LASANTA T, et al. Carbon sequestration and water yield tradeoffs following restoration of abandoned agricultural lands in Mediterranean mountains [J]. Environmental Research, 2022, 207: 112203.
- [ 12 ] 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))
- [ 13 ] 刘静,余钟波. 江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020, 48(4): 320-326. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4):320-326. (in Chinese))
- [ 14 ] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护,2020,36(4):47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4):47-51. (in Chinese))
- [ 15 ] KASHYAP D, AGARWAL T. Carbon footprint and water footprint of rice and wheat production in Punjab, India [J]. Agricultural Systems, 2021, 186: 102959.
- [ 16 ] 王川,刘永昌,李稚. 塔里木河下游生态输水对植被碳源/汇空间格局的影响[J]. 干旱区地理,2021,44(3):729-738. (WANG Chuan, LIU Yongchang, LI Zhi. Effects of ecological water conveyance on the spatial pattern of vegetation carbon sources/sinks in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3):729-738. (in Chinese))
- [ 17 ] 张琦,占车生,胡实,等. 基于改进 TVGM 的水-碳耦合机制研究:以北京森林站研究区为例[J]. 北京师范大
- 学学报(自然科学版),2020,56(3):394-401. (ZHANG Qi, ZHAN Chesheng, HU Shi, et al. Water-carbon coupling mechanism on improved TVGM: case of Beijing Forest Station[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(3): 394-401. (in Chinese))
- [ 18 ] JAVANMARD M E, GHADERI S F, HOSEINZADEH M. Data mining with 12 machine learning algorithms for predict costs and carbon dioxide emission in integrated energy-water optimization model in buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 238: 114153.
- [ 19 ] ZUO Qiting, WU Qingsong, YU Lei, et al. Optimization of uncertain agricultural management considering the framework of water, energy and food [J]. Agricultural Water Management, 2021, 253, 106907.
- [ 20 ] 洪思扬,王红瑞,梁俊芬,等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护,2021,37(5):102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 102-111. (in Chinese))
- [ 21 ] MASELLI F, VACCARI F P, CHIESI M, et al. Modelling and analyzing the water and carbon dynamics of Mediterranean macchia by the use of ground and remote sensing data [J]. Ecological Modelling, 2017, 351: 1-13.
- [ 22 ] 赵玲玲,夏军. 基于非线性系统理论的水-碳耦合模型[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(1):1-5. (ZHAO Lingling, XIA Jun. Water-carbon coupling model based on nonlinear system approach [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1):1-5. (in Chinese))
- [ 23 ] 左其亭. 人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型[J]. 自然资源学报,2007,22(2):268-274. (ZUO Qiting. The embedded system dynamic model used to human-water system modeling [J]. Journal of Natural Resources, 2007,22(2):268-274. (in Chinese))
- [ 24 ] 秦欢欢. 北京市水资源供需二次平衡的系统动力学模拟与研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):21-27. (QIN Huanhuan. System dynamics simulation and study on the second time balance of water supply and demand in Beijing[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018,29(3):21-27. (in Chinese))
- [ 25 ] 陈莎,吕鹤,李素梅,等. 面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(4):22-28. (CHEN Sha, LYU He, LI Sumei, et al. Methods of comprehensive water footprint assessment for sustainable utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2021,37(4):22-28. (in Chinese))

(下转第 56 页)

Published for the European Water Resources Association (EWRA), 2019, 33(7):2439-2452.

- [25] GUO Yi, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712:136502.
- [26] 肖祖香,朱双,罗显刚,等.三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J].河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6):515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6):515-520. (in Chinese))
- [27] 李天水,王顺,庄文化,等.游程理论和 Copula 函数在二维干旱变量联合分布中的应用[J].干旱区资源与

环境, 2016, 30(6):77-82. (LI Tianshui, WANG Shun, ZHUANG Wenhua, et al. Application of the theory of run and Copula function to the joint distribution of two-dimension drought variables [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(6):77-82. (in Chinese))

- [28] ELTAHIR E A B, YE H P J F. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois [J]. Water Resources Research, 1999, 35(4):1199-1217.
- [29] PETERS E, TORFS P J J F, VAN LANEN H A J, et al. Propagation of drought through groundwater: a new approach using linear reservoir theory [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(15):3023-3040.

(收稿日期:2022-01-16 编辑:熊水斌)

(上接第 14 页)

- [26] 王肖鑫,岑威钧,晏成明,等.基于改进赋权的山区堤防安全云模型评价方法[J].水利水电科技进展, 2022, 42(5):58-63. (WANG Xiaoxin, CEN Weijun, YAN Chengming, et al. Cloud model evaluation method of levee safety in mountain area based on improved weighting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):58-63. (in Chinese))
- [27] 左其亭,张云,林平.人水和谐评价指标及量化方法研究[J].水利学报, 2008, 39(4):440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4):440-447. (in Chinese))
- [28] 傅春,付耀宗,肖存艳,等.基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J].水利水电科技进展, 2022, 42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))
- [29] 刘永伟,王文,刘元波,等.水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J].河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6):483-491. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6):483-491. (in Chinese))
- [30] 左其亭.和谐论:理论·方法·应用[M].2版.北京:科学出版社, 2016.
- [31] 高甫章,何新林,杨广.克拉玛依市水资源多维临界调控研究[J].水利水电技术, 2019, 50(1):73-80. (GAO Fuzhang, HE Xinlin, YANG Guang. Study on multidimensional critical regulation of water resources in

Karamay [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1):73-80. (in Chinese))

- [32] ZHAO Fubao, WU Yiping, YAO Yingying, et al. Predicting the climate change impacts on water-carbon coupling cycles for a loess hilly-gully watershed [J]. Journal of Hydrology, 2020, 581:124388.
- [33] 张惠云,秦丽杰,贾利.吉林省水稻生产的碳足迹与水足迹时空变化特征[J].浙江农业学报, 2021, 33(6):974-983. (ZHANG Huiyun, QIN Lijie, JIA Li. Temporal and spatial characteristics of carbon footprint and water footprint in rice production in Jilin Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(6):974-983. (in Chinese))
- [34] 左其亭,韩淑颖,韩春辉,等.基于遥感的新疆水资源适应性利用配置-调控模型研究框架[J].水利水电技术, 2019, 50(8):52-57. (ZUO Qiting, HAN Suying, HAN Chunhui, et al. Research frame of adaptive utilization allocation-regulation model of water resources in Xinjiang region based on RS [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8):52-57. (in Chinese))
- [35] 汤勇生,张智通,汪永禄.碳中和目标下零碳水利风景区建设与发展路径[J].水利经济, 2022, 40(2):74-78. (TANG Yongsheng, ZHANG Zhitong, WANG Yonglu. Construction and development path of zero-carbon national water parks under carbon neutrality target [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(2):74-78. (in Chinese))
- [36] 左其亭.人水关系学的基本原理及理论体系架构[J].水资源保护, 2022, 38(1):1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):1-6. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-21 编辑:施业)