黄河古贤水利枢纽“水–能–粮–生–工”多维耦合减排研究

李超群，石 畅*

（黄河勘测规划设计研究院有限公司，450003，郑州）

摘 要：在碳达峰、碳中和目标下，开展重大水工程在流域水资源利用、能源开发、粮食生产和生态保护协同作用中的耦合减排效应研究，对于进一步明确水工程建设定位、优化工程运行管理效能、支撑流域高质量发展具有重要意义。古贤水利枢纽作为黄河干流重要控制性工程，具有防洪减淤、供水灌溉、清洁发电、生态调度和水沙调控等功能，其碳效应具有多环节、多尺度特点和显著的水沙耦合特征。本文在分析古贤水利枢纽区域水碳背景以及水库、引水灌溉和水电工程碳效应研究进展的基础上，将工程材料生产、施工建设、运行维护和退役恢复等生命周期活动纳入分析框架，构建“水－能－粮－生－工”多维耦合减排逻辑。研究认为，重大水工程低碳效应不能由水电替代效应等单一减排效益表征，而应在统一时间尺度、空间范围和基准情景下，综合核算清洁能源替代、水系统节能、粮食安全碳效率、生态碳源汇变化以及工程全生命周期碳排放，并重点关注水沙调控引起的有机碳和营养盐输移、河道冲淤及生态过程变化。在此基础上，提出“一个目标、五个维度、五类效应、七项支撑”的研究框架，重点开展基础数据监测、全生命周期碳核算、耦合机理模型构建、绿色建造与低碳施工、多目标低碳调度、数字孪生平台建设和政策制度保障研究。研究可为黄河流域重大水工程绿色低碳建设运行提供支撑。

关键词：“双碳”；重大水工程；水－能－粮－生－工；多维耦合；净碳效应；全生命周期碳核算

Multidimensional coupled emission reduction in the water-energy-food-ecology-engineering nexus of the Guxian Water Conservancy Project on the Yellow River

LI Chaoqun, SHI Chang*

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Against the background of China’s carbon peaking and carbon neutrality goals, research on the coupled emission-reduction effects of major water projects through the coordinated use of basin water resources, energy development, food production, and ecological protection is of great significance for clarifying the role of water projects, improving operational management, and supporting high-quality development in river basins. As an important control project on the main stream of the Yellow River, the Guxian Water Conservancy Project performs multiple functions, including flood control and sediment reduction, water supply and irrigation, clean hydropower generation, ecological regulation, and water-sediment regulation. Its carbon effects are characterized by multiple processes, multiple scales, and pronounced water-sediment coupling. Based on an analysis of the regional water-carbon background of the Guxian Water Conservancy Project

收稿日期：2026-05-28 修回日期：2026-08-26

作者简介：李超群，正高级工程师，主要从事水文水资源研究。

通信作者：石畅，工程师，主要从事生态水文研究。E-mail：1shichang@163.com

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFC3210601）；中国科协决策咨询专家团队项目“黄河‘几字弯’高质量发展下水网格局优化路径研究”。

and a review of research progress on the carbon effects of reservoir projects, water diversion and irrigation projects, and hydropower projects, this study incorporated life-cycle activities, including engineering material production, construction, operation and maintenance, and decommissioning and restoration, into the analytical framework, and developed a multidimensional coupled emission-reduction framework integrating water, energy, food, ecology, and engineering. The study argues that the low-carbon effects of major water projects cannot be represented by a single emission-reduction benefit such as hydropower substitution. Instead, under unified temporal scales, spatial boundaries, and baseline scenarios, comprehensive accounting should include clean-energy substitution, energy savings in water systems, the carbon efficiency of food security, changes in ecological carbon sources and sinks, and life-cycle carbon emissions from engineering activities, with particular attention to water-sediment regulation-induced changes in organic carbon and nutrient transport, riverbed erosion and deposition, and ecological processes. On this basis, a research framework of "one objective, five dimensions, five types of effects, and seven supporting components" was proposed, with emphasis on basic data monitoring, life-cycle carbon accounting, coupled-mechanism modeling, green construction and low-carbon construction practices, multi-objective low-carbon operation, digital-twin platform development, and policy and institutional safeguards. This study can provide support for the green and low-carbon construction and operation of major water projects in the Yellow River basin.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality; major water project; water-energy-food-ecology-engineering; multidimensional coupling; net carbon effect; life-cycle carbon accounting

中图分类号：TV213.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1123(2026)20-0048-09

DOI：10.3969/j.issn.1000-1123.2026.20.007

一、引 言

实现碳达峰、碳中和(以下简称"双碳")是我国经济社会发展全面绿色转型的重要战略目标。水利行业既是应对气候变化、保障国家水安全的重要基础领域，也是清洁能源开发、水资源节约集约利用、粮食安全保障、生态保护修复和基础设施绿色建设的重要载体。重大水工程往往同时承担防洪减灾、水资源配置、灌溉供水、水力发电、生态调度等多重任务，其建设和运行不仅改变流域水量、水位的时空分布和泥沙输移过程，还会进一步影响能源生产与消耗、农业生产投入、生态系统碳源汇，并伴随材料生产、施工运输、运行维护等工程活动，因此其碳效应具有明显的多环节、多尺度、跨区域和强耦合特征。开展重大水工程在流域水资源利用、能源开发、粮食生产和生态保护协同作用中的耦合减排效应研究，对于进一步明确水工程建设定位、优化工程运行管理效能、支撑流域高质量发展具有重要意义。

现有水工程综合效益研究主要围绕防洪、供水、灌溉、发电和生态等经济社会效益展开；相关低碳研究则多聚焦于水电替代效应、工程建设与施工阶段碳排放、水库温室气体排放以及水-能-碳关联等相对独立的研究视角。对于兼具水沙调控与多目标调度功能的大型控制性水工程，仅以水电替代火电形成的减排量评价其低碳贡献，难以全面表征工程在不同环节产生的碳效应，如供水路径和灌溉方式变化引起的能源消耗、农业生产过程中的碳排放变化、湿地和岸带的生态碳汇、水库温室气体排放，以及工程建设期材料生产和能源消耗所产生的碳排放等。因此，重大水工程碳效应评价需要突破单工程、单环节和静态核算思路，统筹考虑工程全生命周期与流域影响范围。

需要重点解决三个方面的科学问题：一是如何建立统一的时间尺度、空间范围和基准情景，识别工程新增碳排放、生态碳汇变化与净碳效应；二是如何揭示水资源配置和水沙调度变化在"水-能-粮-生"纽带关系中向能源利用、农业生产和生态过程传递，并通过生态系统反馈进一步影响工程运行的作用机制；三是如何将工程材料生产、施工建设、运行维护和退役恢复等"工"维度纳入统一框架，评价工程全生命周期碳排放对其他维度低碳效益的约束，并识别不同目标之间的协同与权衡机理。

黄河古贤水利枢纽（以下简称古贤水库）是黄河水沙调控体系的关键控制性工程，具有防洪减淤、供水灌溉、水力发电、生态调度和水沙调控等多重功能。古贤水库所在的黄河中游水沙关系复杂、含沙量高，泥沙输移与淤积不仅关系工程库容和调度效益，还可能影响有机碳、氮等物质的迁移、埋藏与转化，这使得古贤水库的碳效应除具有多环节、多尺度特征外，还有不同于一般水电工程的显著水沙耦合特征。目前工程仍处于建设阶段，具备开展蓄水前碳源汇本底调查和构建全生命周期低碳研究体系的时间窗口。本文首先介绍古贤水库区域水碳背景；其次从水库工程、引水灌溉工程和水电工程三个方面梳理重大水工程碳减排效应研究进展；继而在统一全生命周期和工程影响边界的基础上，将工程活动维度纳入传统“水－能－粮－生”纽带关系，构建“水－能－粮－生－工”五维耦合减排机理框架；最后提出面向古贤水库的七项重点研究方向，以期为黄河流域重大水工程净碳效应评价、低碳调度和全生命周期绿色管理提供理论与技术支撑。

二、古贤水库区域水碳背景

古贤水库位于黄河中游北干流碛口至禹门口河段、山西省吉县与陕西省宜川县交界，是黄河干流梯级开发规划和水沙调控体系的重要骨干工程。水库正常蓄水位627 m，汛限水位619 m，死水位588 m，总库容133.04亿m^3，其中用于调水调沙的库容35亿m^3，防洪库容12亿m^3。工程于2024年7月开工建设，建成后将与小浪底等控制性工程联合调度，以增强黄河水沙调控和水资源保障能力。

从区域自然背景看，黄河流域总体具有显著的干旱－半干旱特征，流域多年平均年降水量约470 mm，年蒸发量高达1000 mm；古贤水库坝址所在的黄河中游是水沙矛盾最突出的河段之一，水库控制黄河流域约65%的集水面积、73%的水量、60%的沙量和80%的粗泥沙通量，平均入库含沙量高达28 kg/m^3；库区范围内多条高含沙支流汇入，水沙异源、年际年内分配不均，并存在极端“丰水丰沙”或“枯水少沙”等组合。上述水文泥沙特征会对库区碳、氮等物质循环产生重要影响。泥沙输移与淤积过程会影响有机碳和营养盐的迁移与埋藏，水库蓄水及水位涨落会进一步重塑库区水动力条件和氧化还原环境，联合调水调沙还可能推动相关影响沿黄河向下游远距离传递。

古贤水库的碳效应涉及发电、供水、生态改善以及工程建设和运行全过程。水电开发可在一定程度上替代化石能源发电；稳定供水有助于减少部分高扬程应急提水需求，并为节水灌溉创造条件；生态补水和岸带修复也可能促进植被恢复和碳汇增加；与此同时，工程建设需要消耗大量水泥、钢材、骨料和能源，由此产生的碳排放不可忽视。水库蓄水后，淹没区有机质分解及水体生物地球化学过程可能带来CO_2、N_2O和CH_4排放，调水调沙过程还会改变坝下河道的水沙条件，进而影响碳、氮的迁移与转化。因此，对于目前仍处于建设阶段的古贤水库，系统掌握施工期碳排放情况，并在蓄水前调查库区生态状况和温室气体本底，是今后判断工程实际净碳效应的重要基础。

三、重大水工程碳减排效应研究进展

1.水库工程

关于水库与温室气体的研究，早期主要讨论水库是否构成温室气体排放源，近年来则发展为多界面通量监测、蓄水前后净通量核算以及河流－水库系统碳循环分析。已有研究表明，水库与大气间的CO_2、N_2O和CH_4交换并非仅发生于开阔水面，还包括水－气界面扩散、浅水区气泡释放、过坝下泄消气、坝下河段逸散、消落带土壤与植被交换等途径。因此，如果仅以库区开阔水面的温室气体通量代表水库温室气体排放水平，往往难以反映工程运行后的实际气候效应。

水库蓄水后的温室气体排放监测结果也不直接等同于筑坝本身增加的温室气体排放量。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）提出“水库温室气体净排放量”概念，即“蓄水后温室气体排放量－蓄水前温室气体排放量－其他人类活动对温室气体排放的贡献量”，强调以蓄水前受影响区域的自然源汇状态为基线，并扣除与筑坝无关的人类活动贡献。孙志禹等在总结我国水库温室气体研究时同样指出，蓄水前的本底资料是判断水库净排放量的重要依据，且水库温室气体源汇变化并不等同于水电能源碳足迹。对古贤水库而言，工程目前尚未蓄水，拟淹没区和天然河段仍具备开展本底调查的条件，应尽可能在这一阶段获取不同季节的温室气体通量及相关环境数据。

黄河流域水库的温室气体排放也具有较为明显的区域特征。黄姝睿等的Meta分析结果表明，针对237座黄河流域水库的蒙特卡罗模拟估算显示，CO_2、N_2O和CH_4三种温室气体排放当量约为3.05 Tg CO_2–eq·a^{-1}，其中CO_2排放通量总体低于河道，但CH_4和N_2O排放通

量分别约为河道的1.9倍和10倍；与三峡等湿润地区水库相比，黄河流域水库的低有机质浓度使CO_2和CH_4排放通量相对较低，高氮负荷则使N_2O排放通量偏高。因此，古贤水库温室气体排放监测应重点关注N_2O与氮负荷、溶解氧以及水沙条件之间的关系。多沙河流梯级水库研究还表明，泥沙沉积、水力停留时间和氧化还原环境会共同影响温室气体源汇过程。

大型坝的碳影响还可能超出库区。Ni等基于长江干流4300 km范围的长期水质与温室气体资料研究发现，三峡工程运行后河流CO_2、CH_4和N_2O年均排放量总体下降，向海输送量分别减少79%、50%和9%，其变化与水动力条件、河床冲刷以及生物地球化学过程的重构有关。后续对古贤水库的温室气体排放监测和碳效应核算应结合坝下冲淤、水沙调度及下游河段环境变化，合理确定评价边界。

2.引水灌溉工程

取水、提水、输水、配水、排水和再生水利用等均依赖能源投入，单位供水量的碳排放主要受供水路径、输水扬程、泵站运行效率以及区域电力排放因子等因素影响。重大水工程投入运行后，区域水源结构和供水方式往往随之改变。若能够减少深层地下水开采、高扬程提水，或更多采用重力输水，单位供水能耗可能下降；但随着供水范围和规模扩大，系统总能耗也可能增加。因此，工程供水环节的碳减排效应应基于不同供水情景进行评价，通过比较各情景下的能源消耗和碳排放，识别工程带来的实际减排量。

灌溉供水直接影响农业生产过程。农业碳排放的来源除灌溉用电和农机燃油外，还涉及化肥、农药、农用薄膜等农业投入品，以及农田温室气体排放。稳定的灌溉水源有利于减轻旱情对粮食生产的影响，也为节水灌溉、水肥一体化等措施实施提供了条件。但随着灌溉面积扩大、复种或投入强度提升，能源和农资消耗也可能增加。已有灌区多水源研究已开始将不同供水方式、泵站能耗和碳排放相结合进行统一核算。因此，古贤水库“水－能－粮－碳”减排效应评价可结合单位灌溉水量粮食产出，单位粮食产量碳排放，单位面积灌溉能耗，化肥、农药、农用薄膜投入量等指标，识别稳产效益与碳效率变化。

3.水电工程

水电工程运行期间直接燃料消耗少，其减排效应主要来自发电对常规火电的替代。但水电的低碳属性需结合工程全生命周期排放和所替代的电力结构进行判断。孙志禹等在扣除蓄水前淹没区与天然河道的CO_2和CH_4释放，且不考虑防洪、航运等其他效益的条件下，估算三峡水库2010年发电碳排放强度为13.2 g CO_2–eq·（kW·h）$^{-1}$。这一结果表明，在上述核算边界下，三峡水库单位发电量的碳排放比常规化石能源单位发电量的碳排放低，但其评价结果受蓄水前本底、核算边界以及不同功能间排放分摊方式影响。

水电工程碳足迹通常覆盖材料生产、施工建设、运行维护、退役恢复等阶段。其中，建设期碳排放主要来自水泥、钢材、机电设备等材料生产，以及施工机械燃油、用电和材料运输等过程。运行期除发电替代产生的减碳效益外，还存在设备检修更新、辅助用电以及水库温室气体排放等碳源。对古贤水库而言，水电减排核算不能只计算发电替代效益，还需要扣除工程全生命周期内新增的碳排放，并对水库温室气体排放的不确定性开展情景分析。

4.概念厘清及对古贤水库碳效应评价的启示

综合上述研究，可将相关概念作如下区分：①“碳排放”指工程建设、运行或相关生态过程产生的温室气体排放，统一折算为CO_2–eq；②“减排量”指相对于既定基准情景或反事实情景减少的排放量；③“生态碳汇”指工程实施后，植被、土壤和沉积物等相对于工程实施前基准状态新增的碳吸收或固存量；④“净碳效应”指在统一的时间尺度、空间范围和生命周期边界内，综合考虑新增排放、避免排放和新增碳汇后形成的碳收支变化。

现有研究对古贤水库碳效应评价的主要启示有三点。一是评价范围不能局限于库区本身。工程建设中的材料与能源消耗、蓄水后的库区温室气体变化、坝下河段水沙与碳氮迁移转化过程，以及受水区和灌区的用能变化，都可能影响最终评价结果，因此核算应同时覆盖工程全生命周期及上述受影响区域。二是减排量的核算应建立在可比较的基准情景之上。通过比较“有工程”与“无工程”或替代方案下的碳排放差异，才能识别工程实际带来的减排效应。三是水沙过程既影响库容和调度，也可能改变有机碳和营养盐的迁移、埋藏以及坝下河段的生物地球化学过程，应作为古贤水库区别于一般水电工程的关键变量。

四、重大水工程碳循环影响与“水－能－粮－生－工”耦合减排

1.重大水工程碳循环影响与统一核算边界

重大水工程对碳循环的影响首先来自工程建设以及蓄水、调度后水文和水沙条件的变化。工程建设和

运行会改变水位、流量、泥沙输移及相关物质通量，进而改变能源生产与消耗、灌溉供水和农业投入、湿地与岸带生态过程以及水体碳氮转化过程，叠加后的综合效应既可能表现为新增温室气体排放，也可能形成避免排放或生态碳汇。与此同时，生态系统又通过植被演替、土壤碳储量变化和水质净化等形式反馈水资源和工程调度，形成闭环。

古贤水库碳效应评价需要同时考虑工程全生命周期和工程影响范围。工程全生命周期边界应包括材料生产、施工建设、运行维护以及退役恢复等阶段；而工程影响范围应覆盖拟淹没区与库区、坝下受影响河段、供水和灌溉区域，以及受联合调度影响的相关生态单元。不同环节产生的碳排放和碳汇应统一到相同的时间尺度和CO_2–eq口径。核算过程中还需注意各环节之间的交叉影响，避免同一节能效应或碳汇增量被重复计算。

2.“水－能”耦合减排

水资源开发利用离不开能源投入，而能源生产过程同样受到水资源条件约束。古贤水库“水－能”关系主要体现在发电和供水两个环节。水电可替代部分常规电源，供水调蓄及输水路径变化则会影响受水区的提水、输水和应急供水能耗。由此形成的减排效应与替代电源结构、供水扬程、泵站运行效率以及不同时段的电力排放水平有关。随着电力系统中新能源发电量比例提高，单位水电替代常规火电所对应的减排量也会发生变化。因此，古贤水库“水－能”耦合研究需采用动态电力因子和供水情景，而非使用固定系数进行长期外推。

3.“水－粮”耦合减排

“水－粮”耦合关系主要体现在灌溉保障、作物需水、粮食稳产以及农业投入品使用等环节。稳定供水能够减少干旱年份深井抽水和临时提水需求，并有利于节水灌溉、水肥一体化等措施的实施。但供水条件改善后，灌溉面积扩大或复种强度提高，也可能带来更多能源消耗和氮肥投入。因此，古贤水库“水－粮”环节的碳减排效应需同时考虑单位灌溉水量的粮食产出和单位粮食产量的CO_2–eq排放两类效率指标，并将灌溉能耗、农业投入品以及农田温室气体排放等纳入核算范围。

4.“水－生”耦合减排

相较于传统“水－能－粮”纽带关系，“水－能－粮－生”纽带关系更有助于阐明生态系统在资源供给、调节和反馈中的作用。生态补水、湿地修复、库岸带植被恢复、水土保持等措施，可通过增加植被生物量和土壤有机碳储量形成一定的碳汇效应。但水库蓄水后，水位涨落等变化也会影响水体和沉积物中的有机碳分解、甲烷生成及硝化－反硝化过程，并可能通过水－气界面交换和过坝消气过程形成CO_2、N_2O和CH_4排放。对于古贤水库这类多沙河流控制性水库，还应关注泥沙对有机碳埋藏、营养盐输移以及坝下河床冲刷的调节作用。生态碳汇与水库温室气体排放必须以相同的基准情景和空间边界进行核算，才能准确识别“水－生”环节的净碳效应。

5.“工”维度全生命周期碳约束

本文将“工”定义为工程的材料生产、施工建设、运行维护以及退役恢复等生命周期活动。与“水”“能”“粮”“生”等维度相比，“工”维度更多体现工程建设和运行本身带来的碳排放约束，并贯穿其他环节。工程建设阶段通常是碳排放较为集中的时期，其中水泥、钢材等材料生产所形成的隐含碳，以及施工机械燃油、施工用电和材料运输等均构成工程前期碳排放。工程运行后，水电替代和供水节能产生的减排效应会逐步积累，能否抵消建设阶段的碳排放，需要结合工程运行年限进行判断。因此，古贤水库“工”维度的评价除核算全生命周期碳排放外，还应关注前期排放被后续减排收益抵消所需的时间，并分析材料选择、施工方式、设备更新以及能源结构变化对长期碳效应的影响。

6.“水－能－粮－生－工”多维耦合、反馈与权衡

“水－能－粮－生－工”五个维度之间既存在协同，也存在权衡。例如，提高蓄水位有利于增加发电量、增强供水保障，但水位变化也会影响消落带范围及水库温室气体的产生和释放过程；农业供水增加能够降低作物受旱风险，但若缺少用水总量约束，也可能使灌溉用水和农业投入增加；对于古贤水库这类多沙河流控制性水库，水沙调度在维持有效库容的同时，还会改变下游泥沙、有机碳和营养盐的输移；低碳施工可减少建设期排放，但也可能增加初期成本。

因此，耦合研究不能将各环节的碳效应简单相加，而应厘清工程调度引起的水沙变化如何传递到能源利用、农业生产和生态过程并进一步影响碳排放与碳汇。在此基础上，结合生态过程的反馈，分析不同工程方案和运行条件下各维度之间的协同与权衡关系。

五、古贤水库多维耦合减排效应研究重点方向

围绕古贤水库多维耦合减排效应研究，建议构建“一个目标、五个维度、五类效应、七项支撑”的研究框

架（见图1）。“一个目标”是在防洪安全、供水安全、工程安全等刚性约束下，实现综合效益发挥与净碳排放最小化的协调；“五个维度”为水、能、粮、生、工；“五类效应”为清洁能源替代效应、水系统节能效应、粮食安全碳效率效应、生态净碳效应和全生命周期工程碳约束效应；“七项支撑”包括基础数据监测、全生命周期碳核算、耦合机理模型构建、绿色建造与低碳施工、多目标低碳调度、数字孪生平台建设和政策制度保障。在这一框架下，提出一系列研究重点方向。

1.“双碳”基础数据体系研究

古贤水库多维耦合减排效应研究首先需要建立系统、连续、可核查的数据基础。重点研究内容包括：一是开展蓄水前温室气体本底调查，可在拟淹没范围内根据主要土地利用类型和生态类型分层布设样点，重点覆盖耕地、林地、草地、灌丛、荒地、滩地及现状河道，并兼顾丰水期与枯水期等代表性时段；除CO_2、N_2O和CH_4通量外，还应同步监测土壤有机碳、含水率、温度、氮素，植被生物量，以及水体溶解氧、营养盐等主要影响因子。二是建立工程建设期碳排放数据清单，涵盖水泥、钢材、粉煤灰、砂石骨料、柴油、电力、施工机械、材料运输和临建设施等。三是建立工程运行期水量、沙量、发电量、供水量、灌溉水量、生态补水量和调度过程数据库。四是建立受水区灌区能耗和农业生产数据库，涵盖泵站能耗、渠系输水损失、灌溉制度、作物种植结构、农机投入、化肥和农药施用量等。五是建立生态碳监测数据库，涵盖库区水体温室气体排放通量、消落带植被情况、坝下湿地情况、土壤有机碳储量和生态补水过程等。

2. 全生命周期碳足迹与净碳收支核算研究

为准确识别古贤水库建设与运行过程中的碳排放效应、减排效应和增汇效应，需要在统一核算边界下开展全生命周期碳收支分析。重点研究内容包括：一是构建工程全生命周期碳排放清单。根据工程建设和运行特点，明确功能单位、时间尺度、空间边界及不同功能之间的排放分摊方式，核算材料生产、设备制造、施工能源消耗与运输、运行维护、更新改造以及水库净温室气体排放等主要碳源。二是核算工程运行形成的减排量和新增碳汇。重点分析水电替代形成的减排量，以及供水路径优化带来的节能减排效应；同时评估因工程实施引起的湿地、岸带植被和土壤碳储量变化，识别源于工程的新增碳汇。三是设置基准情景并开展净碳效应比较。针对发电和供水环节分别设置无工程、替代电源和替代供水等情景，比较不同方案下的碳排放差异。四是开展关键参数与运行情景的不确定性分析。针对活动数据、排放因子、水库温室气体通量、未来电力结构



图1 “双碳”目标下古贤水库多维耦合减排效应研究框架

及工程运行方式等不确定因素，识别主要影响参数，为工程长期减排效应评价提供更为稳健的结果。

3.“水－能－粮－生－工”耦合减排机理研究

古贤水库的碳减排效应是水资源调控、能源利用、农业生产、生态过程和工程活动共同作用的结果，需进一步研究“水－能－粮－生－工”耦合减排机理，为后续研究提供理论依据。重点研究内容包括：一是构建“水－能－粮－生－工”多维碳效应的耦合关系。以水库调度和水沙变化为主线，分析水资源配置、水电出力、供水能耗、灌区生产、生态碳汇、水库温室气体以及工程建设运行排放之间的作用路径，明确五个维度之间的碳效应作用关系。二是开展典型水文、水沙情势与工程运行情景分析。设置丰水、平水、枯水以及极端干旱和暴雨洪水等情景，并考虑电力结构、农业节水水平、生态调度方式及工程运行条件变化，识别不同水文、水沙情势和工程运行条件下各维度对净碳效应的贡献及敏感性。三是研究古贤水库与小浪底水库联合调水调沙的碳效应。重点分析联合调度引起的河道冲淤变化，以及泥沙输移过程中有机碳和营养盐的埋藏、再悬浮及滩区生态演替等过程，研究水沙调控对能源生产、水资源利用、生态过程及工程运行的影响，识别由此产生的间接碳效应。四是分析水沙调控下碳效应的空间变化。结合库区、坝下河段及下游受影响区域的水沙和生态变化，研究碳的输移转化及碳源汇格局的沿程变化，分析其空间再分配特征，为古贤水库多维耦合减排机理解析及低碳调度优化提供依据。

4.绿色建造与低碳施工研究

古贤水库建设规模大、施工周期长，建设期开展绿色建造与低碳施工，可有效降低工程碳排放水平。重点研究内容包括：一是开展低碳材料与资源化利用研究。结合工程所需混凝土、砂石骨料等大宗材料的使用特点，重点评价低熟料水泥、掺合料混凝土、工业固废资源化、绿色骨料及材料循环利用的适用性，在满足工程性能和质量要求的前提下降低材料隐含碳排放。二是研究施工能源替代方案。比较电动化施工机械、清洁电力与传统燃油施工方式的能耗和碳排放差异，分析不同施工环节的能源替代潜力。三是优化施工组织与运输过程。结合料源布置、土石方调配、运输距离和施工时序，减少不必要的材料运输和机械待机能耗。四是建立建设期碳排放台账。按月或按季度记录主要材料、燃料和电力消耗，并与工程量、施工进度和主要工序相对应，为工程建设期碳排放核算及低碳施工措施效果评估提供基础。

5.多目标低碳调度研究

古贤水库具有多目标联合调度特征，其低碳运行需要在满足工程安全和水沙调控要求的基础上，与防洪、减淤、供水、灌溉、发电和生态等目标协同优化。重点研究内容包括：一是构建兼顾安全与低碳的多目标调度模型。在保障防洪、减淤、供水、灌溉、发电、生态需求和工程安全的基础上，将净碳排放作为调度评价指标之一。二是量化不同调度方案的碳效应。综合考虑水电替代减排量、供水能耗、水库温室气体排放、生态碳汇以及水沙调度带来的间接影响，比较不同运行方式下的净碳变化。三是研究不同时期的调度目标权衡。针对汛期、调水调沙期、枯水期和生态敏感期等典型阶段，分析各类目标的重要性及其相互制约关系，形成相应的最优方案集。四是识别低碳调度的关键阈值。重点分析不同目标调整过程中综合效益与碳排放发生明显变化的临界区间，为古贤水库制定兼顾安全、效益与低碳要求的调度规则提供依据。

6.数字孪生支撑下的耦合模拟研究

古贤水库低碳运行需要将分散的监测数据、计算模型与调度业务有效衔接，数字孪生平台可为碳效应的动态分析和调度应用提供技术基础。重点研究内容包括：一是整合多源监测与业务数据。依托数字孪生流域和古贤水库数字化建设，将遥感、物联网、水文泥沙监测、工程运行、灌区用水及碳监测等数据接入统一平台，为碳效应分析提供连续的数据基础。二是构建面向碳效应分析的模型联动机制。在现有水沙、水资源调度和工程运行模型基础上，进一步接入能源、灌溉、生态碳过程及全生命周期碳清单，实现碳排放和碳汇变化的动态计算。三是开展多情景推演与调度方案比选。结合来水来沙、供水、发电、灌溉和生态调度等不同情景，实时更新碳效应推演结果，比较不同调度方案下的净碳变化。四是将低碳指标纳入现有调度与工程评价过程。结合防洪、水沙调度和水资源配置方案，同步核算碳排放与碳汇变化，并将其作为运行优化和工程后评价的重要依据。

7.政策机制与评价制度研究

为推动重大水工程低碳评价由研究分析向工程管理应用延伸，除完善监测与核算方法外，还需要相应的制度安排和政策机制予以保障。重点研究内容包括：一是研究低碳评价与重大水工程现有管理制度的衔接方式。将碳排放和减排评价逐步纳入工程可行性研究、初

步设计、施工管理、蓄水验收、运行调度和后评价等环节，明确不同阶段的评价内容和管理要求。二是完善低碳效益的数据监测与核验规则。围绕水电替代、供水节能、粮食安全碳效率、生态碳汇和水库净温室气体等内容，明确数据来源、监测方法和核验要求。三是研究相关政策工具的衔接机制。结合绿色金融、生态补偿、碳市场和水权交易管理等政策，分析重大水工程低碳效益的实现和转化路径。四是建立透明、可复核的核算规则。对于缺乏实测资料、基准情景不明确或难以直接归因于工程的潜在效益，不宜提前计入减排量，确保评价结果具有可核查性和可比性。

六、结 论

重大水工程碳效应具有明显的全生命周期、多过程和跨区域特征。以古贤水库为例，工程运行可能通过水力发电替代常规电源、优化供水路径、降低部分提水能耗、改善灌溉保障条件以及促进湿地和岸带生态修复等途径产生减排或增汇效应；与此同时，材料生产、施工建设、运行维护以及水库温室气体排放等又构成新增碳源。上述作用受到水资源配置、水沙调度、电力结构、农业生产方式和生态过程变化的共同影响。因此，重大水工程碳效应研究应以净碳效应为核心，将“水－能－粮－生－工”五个维度纳入统一分析框架。

古贤水库区别于一般水电工程的重要特征在于复杂的水沙过程。水库蓄水及联合调水调沙不仅影响发电、供水和工程运行，还可能通过改变泥沙淤积与河床冲刷、有机碳和营养盐输移、水体生物地球化学过程以及滩区和湿地生态演替，对库区、坝下河段乃至更大范围的碳源汇格局产生影响。因此，工程碳效应研究应覆盖工程全生命周期、合理确定空间影响边界，建立统一、可比较的基准情景，将工程材料生产、施工、运行维护及退役等活动的新增排放、避免排放、生态碳汇变化和水库净温室气体排放统一到相同时间尺度和CO_2-eq口径下进行核算，并通过情景分析和不确定性分析提高净碳效应评价的可靠性。

面向古贤水库后续建设与运行，建议构建“一个目标、五个维度、五类效应、七项支撑”的研究框架，即在防洪安全、供水安全和工程安全等刚性约束下，以综合效益发挥与净碳排放最小化相协调为目标，系统评价清洁能源替代、水系统节能、粮食安全碳效率、生态净碳效应以及全生命周期工程碳约束，并重点推进基础数据监测、全生命周期碳核算、耦合机理模型构建、绿色建造与低碳施工、多目标低碳调度、数字孪生平台建设和政策制度保障。尤其应充分利用工程蓄水前的时间窗口完成温室气体、生态碳源汇和碳排放本底调查，并形成全过程连续监测体系。通过建立透明、可复核、可比较的核算和评价体系，可为古贤水库后续低碳建设运行以及黄河流域和国家水网重大水工程全生命周期绿色管理提供科学依据。

参考文献：

[1] 于贵瑞，郝天象，朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J].中国科学院院刊，2022，37(4)：423-434.
[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.
[3] 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.
[4] 胡兴娥，曹瑞.三峡工程蓄水运用20年综合效益发挥与展望[J].长江科学院院报，2024，41(6)：1-9.
[5] 杨明明，赵勇，秦长海，等.南水北调东、中线一期工程综合效益评估及预测[J].水利学报，2025，56(5)：659-671.
[6] 刘宇，任品桥，郑焱，等.水力发电生命周期评价及碳足迹区域化分析[J].北京工业大学学报，2024，50(3)：282-289.
[7] 沈心怡，马骏，卢玉钦.碳中和目标下我国绿色水电碳减排效率评价[J].水利经济，2022，40(4)：23-27+92.
[8] 李萌，龚群超，潘家华.碳中和目标下中国小水电价值评估与发展战略转型[J].北京工业大学学报(社会科学版)，2022，22(2)：86-104.
[9] 黄跃群，刘耀儒，许文彬，等.水利水电工程全生命周期碳排放研究：以犬木塘工程为例[J].清华大学学报(自然科学版)，2022，62(8)：1366-1373.
[10] 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.
[11] 杜海龙，李哲，郭劲松.基于ISO14067的长江上游某水电项目碳足迹分析[J].长江流域资源与环境，2017，26(7)：1102-1110.
[12] 黄姝睿，张佩嘉，郑文秀，等.黄河流域水库温室气体排放特征及影响因素：Meta分析[J].中国科学：地球科学，2024，54(7)：2243-2258.
[13] 孙志禹，陈永柏，李翀，等.中国水库温室气体研究(2009—2019)：回顾与展望[J].水利学报，2020，51(3)：253-267.

[14] 李哲，王殿常.从水库温室气体研究到水电碳足迹评价：方法及进展[J].水利学报，2022，53(2)：139-153.
[15] 王远见，张翎，董泽鲲，等.多沙河流梯级水库群温室气体源汇效应研究进展与挑战[J].人民黄河，2025，47(9)：110-120.
[16] Ni Jinren，Wang Haizhen，Ma Tao，et al.Three Gorges Dam：friend or foe of riverine greenhouse gases?[J].National Science Review，2022，9(6)：81-89.
[17] 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.
[18] 于磊，杨睿峰，李智凯，等.灌区多水源系统碳排放核算及水-能-碳关联分析[J].水科学进展，2026，37(1)：81-93.
[19] 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.
[20] 张金良，李达.黄河古贤水利枢纽工程泥沙设计理念与关键技术[J].中国工程科学，2025，27(4)：176-186.
[21] 谭培影，葛怀凤，陈凯麒，等.小北干流湿地演变机制及古贤水库对其生态影响研究[J].水利学报，2026，57(6)：959-971.
[22] 左其亭，赵晨光，马军霞，等.水资源行为的二氧化碳排放当量分析方法及应用[J].南水北调与水利科技(中英文)，2023，21(1)：1-12.
[23] 胡永浩，张昆扬，胡南燕，等.中国农业碳排放测算研究综述[J].中国生态农业学报(中英文)，2023，31(2)：163-176.
[24] 王奕佳，刘焱序，宋爽，等.水-粮食-能源-生态系统关联研究进展[J].地球科学进展，2021，36(7)：684-693.
[25] 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.
[26] 郭子良，王大安，刘丽，等.中国湿地生态补水发展现状及其生态效应研究进展[J].世界林业研究，2022，35(5)：72-77.
[27] 袁田田，陈敏，薛菲，等.水库消落带土壤有机碳固存机制研究进展[J].湿地科学，2025，23(3)：621-633.
[28] 曹文洪，张晓明，张永娥，等.水土保持碳汇内涵与测算方法[J].中国水土保持科学(中英文)，2024，22(1)：1-11.
[29] 王浩，孟现勇，丁建丽，等.数字孪生驱动的水-能-粮-生耦合系统协同治理新范式[J].中国水利，2025(18)：1-11.
[30] 李彬权，赵麦换，刘静，等.以水为核心的“水-能-粮-生”关系研究[J].中国水利，2025(9)：14-20.
[31] 邓嘉祥，赵勇，权全，等.基于复杂网络的黄河上游水-能-粮-生系统[J].水科学进展，2026，37(3)：436-450.

责任编辑 王 慧

(上接第38页)改革的经验做法[J].山东水利，2022(12)：20-21.
[25] 李晓卫.莒县小型水库管理体制改革经验启示[J].山东水利，2021(10)：32-33.
[26] 江炜，吕天伟，罗林峰.浙江省小型水库专业化管护模式探索实践与思考[J].水利建设与管理，2025，45(1)：74-79.
[27] 崔春磊，齐娅丽，赵垒.泗水县小型水库管理体制改革实践[J].山东水利，2021(9)：11-13.
[28] 陈维惠.福建省小型水库物业化管理机制探讨[J].水利科技，2020(3)：56-57.
[29] 王鹏，杨挺博，范书婷，等.行唐县小型水库管理模式创新及成效[J].河北水利，2022(6)：32-33.
[30] 陶文富.小型水利工程“水库管家”运行管理服务模式研究[J].水利信息化，2020(2)：66-69.
[31] 张宇琪，李海鹏.潮阳区小型水库集中式管护模式探究[J].人民珠江，2023，44(S2)：116-119+130.
[32] 陈华，田冰茹，闫鑫，等.小型水库安全运行管理模式研究[J].中国农村水利水电，2022(2)：174-178+183.
[33] 李亚茹.临泽县小型水库管理体制改革实践与启示[J].水资源开发与管理，2024，10(3)：64-67.
[34] 朱家胜，张士辰，尹江珊，等.我国小型水库降等报废现状及对策研究[J].水利水电技术(中英文)，2022，53(S2)：365-371.
[35] 向衍，盛金保，袁辉，等.中国水库大坝降等报废现状与退役评估研究[J].中国科学：技术科学，2015，45(12)：1304-1310.

责任编辑 李卢祎