

面向“双碳”目标的水库调度研究进展与展望

吴晨, 刘攀*

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年12月25日; 录用日期: 2022年2月10日; 发布日期: 2022年2月28日

摘要

水库是实现水资源高效配置的重要手段,“碳达峰、碳中和”目标给水库调度运行提出了新的需求。水库兼具碳汇和碳源双重属性,采用水库调度实现碳目标的减源增汇面临许多挑战。本文提出了面向“双碳”目标的水库碳当量目标函数的碳模型,从替代石化能源的水电站发电调度、提升生态碳汇的灌溉调度和减少水库碳排放的水库调度三个维度,详细阐述了基于水电站电量的发电调度、基于水电站容量的水风光储多能互补调度、提升生态碳汇的水库调度、减少库区碳排放和降低反照率效应的水库调度五个方面的研究进展和关键技术,最后对实现“双碳”目标的水库调度进行了总结和展望。

关键词

碳达峰, 碳中和, 水库调度, 水风光储, 互补系统

Prospects of Reservoir Operation for the Goals of Carbon Peaking and Carbon Neutrality

Chen Wu, Pan Liu*

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Dec. 25th, 2021; accepted: Feb. 10th, 2022; published: Feb. 28th, 2022

Abstract

Reservoirs are important measurements for realizing the efficient allocation of water resources. The goal of carbon peaking and carbon neutrality puts forward new requirements for reservoir operation. Reservoirs have the dual attributes of carbon sinks and carbon sources. The use of reservoir operation to achieve carbon targets by reducing carbon sources and increasing carbon sinks faces many challenges.

作者简介: 吴晨(1996-), 女, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源开发利用研究, Email: wuchen1229@163.com
*通讯作者 Email: liupan@whu.edu.cn

This paper proposes a carbon model of the reservoir carbon equivalent objective function for the carbon peaking and carbon neutrality targets. Starting from three dimensions including hydropower generation operation to replace petrochemical energy, irrigation operation to improve ecological carbon sinks, and reservoir operation to reduce carbon emissions from reservoirs, the paper introduces in detail the power generation operation based on hydropower electricity, hydro-wind-solar-storage hybrid system operation based on hydropower capacity, reservoir operation to improve ecological carbon sink, reduce carbon emissions, reduce albedo effect. Finally, the reservoir operation for achieving the carbon peaking and carbon neutrality targets that need to be studied is discussed and prospected.

Keywords

Carbon Peaking, Carbon Neutrality, Reservoir Operation, Hydro-Wind-Solar-Storage, Hybrid System

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳中和是指直接或间接产生的温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形式进行抵消以实现零排放。碳中和理念是为应对全球气候变化而推动的绿色低碳转型,目前已有 127 个国家和地区对碳中和目标做出承诺。2020 年 9 月 22 日,习近平主席在第 75 届联合国大会上宣布:“中国将采取更有力的政策和措施,力争于 2030 年前碳达峰,2060 前实现碳中和”[1]。至此,中国成为全球主要排放国中首个设定碳中和目标期限的发展中国家,“双碳”目标成为国家重大需求。

我国“双碳”目标提出后,生态环境部、国家能源局、工信部、央行等多部委多领域均为实现“碳达峰、碳中和”目标制定了一系列发展规划和行动方案[2]。十四五规划和二〇三五年远景目标在能源电力方面明确提出实现绿色生产生活方式和降低碳排放等要求,建立清洁低碳安全高效的能源体系,构建“以新能源为主体的新型电力系统”是必要的[1]。

水库作为重要的人工基础设施,具有防洪、发电、供水、灌溉、航运以及生态等多种功能。在实现清洁、可持续发展和全球范围内深化节能减排的背景下,利用水风光等清洁能源,取代石化能源已经成为全球能源发展的趋势[3][4]。水电作为优质调节的可再生能源,在中国新型电力系统的发展和建设中是实现多能互补系统协同运行的重要纽带。目前,依靠技术创新,进一步降低光能、风能发电成本,挖掘风能、光能潜力,进一步加强常规水电、抽水蓄能和储能的补偿和消纳能力,致力于构建水风光储互补协同运行的绿色、清洁电力系统,提高新能源系统调节能力和上网稳定性,是实现“双碳”目标的必经之路。

然而研究认为,水电虽替代了传统化石燃料发电,但水库碳排放引起的温室效应不容忽视[5]。研究估计,人类活动下,约有 7% 的 CH_4 排放来源于水库并造成全球变暖[6]。因此,对 CH_4 来说,水库被认为是一个值得重视的排放源[7][8]。同时,水库引水灌溉对促进农业固碳、土壤固碳和植被碳吸收等方面具有重要作用,水库灌溉调度运行方式在决定生态系统的碳通量方面意义重大。

在“碳达峰、碳中和”目标的背景下,水库的碳源和碳汇问题,受到越来越多研究者和国际社会的关注。本文结合当前已有研究,梳理了水库碳排放和碳汇的相关研究进展,提出了面向“双碳”目标的水库碳当量模型,重点围绕替代石化能源的水电站发电调度、提升生态碳汇的灌溉调度和减少水库碳排放的水库调度关键技术进行分析和展望,旨在助推“双碳”目标的实现。

2. 面向“双碳”目标的水库碳当量模型

实现水库调度助推“双碳”目标实现的关键在于，明确水库的碳源和碳汇项，进而致力于促进碳汇、控制碳源的水库调度研究。因此，本文基于水库碳属性已有研究，从宏观角度提出了面向“双碳”目标的水库碳当量模型。采用水电站全生命周期碳汇最大准则，相应目标函数为

$$C_{\text{水库}}^* = \text{Max}(C_{\text{汇}} - C_{\text{源}}) \quad (1)$$

$$C_{\text{汇}} = C_i(E_h + \Delta E_{\text{WP,PV}}) + f(C_{\text{es}}, W_i) \quad (2)$$

$$C_{\text{源}} = C_w + RF/K_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

式中， $C_{\text{水库}}$ 为运行期内水库碳当量，kg，若为正值，说明水库是碳汇，否则为碳源； $C_{\text{汇}}$ 、 $C_{\text{源}}$ 分别为水库碳汇和碳排放量，kg； C_i 为石化燃料电力碳强度， $\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ ； E_h 为水电取代石化燃料产生的电量，kWh； $\Delta E_{\text{WP,PV}}$ 为水风光储多能互补调度减少的风光弃电量，kWh； $f(C_{\text{es}}, W_i)$ 为水库灌溉碳汇函数，表示水库灌溉作用间接产生的碳汇量，kg； C_{es} 为生态碳汇，kg； W_i 为灌溉水量， m^3 ； C_w 为库区碳排放，kg； RF 为水库反照率差异造成的正辐射强迫(Radiative forcing, RF)， $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ； K_{CO_2} 为每单位 CO_2 增加的辐射压力， $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

由上述模型碳汇、碳源项可见，面向“双碳”目标的水库调度主要为三个维度的调度和五个方面的目标，详见图1。

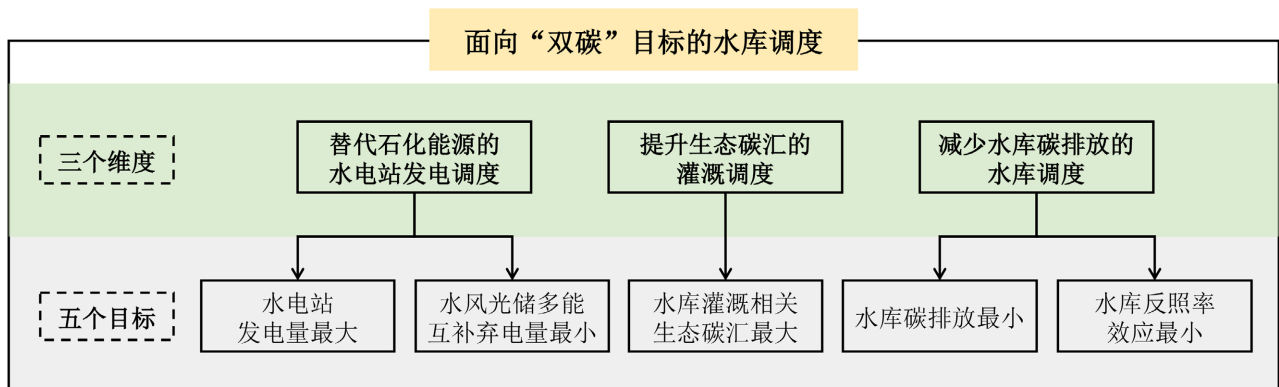


Figure 1. Overview of reservoir operations for the goals of carbon peaking and carbon neutrality

图1. 面向“双碳”目标的水库调度概述图

基于面向“双碳”目标的水库碳当量模型，本文将从替代石化能源的水电站发电调度、提升生态碳汇的灌溉调度和减少水库碳排放的水库调度三个维度，对基于水电站电量的发电调度、基于水电站容量的水风光储多能互补调度、提升生态碳汇的水库调度、减少库区碳排放和降低反照率效应的水库调度五个方面展开讨论。

3. 替代石化能源的水电站发电调度

3.1. 基于水电站电量的发电调度

截至2021年10月底，我国水电装机容量已达到3.85亿kW [9]，稳居世界第一。中国水能储量丰富，开发潜力巨大，水能资源蕴藏量约6.94亿kW，为世界之冠。经统计，中国常规能源的剩余可采总储量构成为：原煤资源占61.6%、水力资源占35.4%、原油资源占1.4%、天然气资源占1.6%。由此可见，仅次于煤炭的水资源在能源结构中处于十分重要的战略地位[10]。水电开发不仅是中国重要的国家能源发展政策，且对中国“双碳”目标的实现具有重要意义。

水电站调度运行调度期内总发电量计算公式为，

$$E_h = E^*(T) = \sum_{t=1}^T [N(t)\Delta T_h(t)] \quad (4)$$

式中, E_h 为水电取代石化燃料产生的电量, kWh; $E^*(T)$ 为调度期 T 内水电站总发电量, kWh; $N(t)$ 为 t 时段水电站总出力, kW。主要约束条件包括: 1) 水库特性约束; 2) 水电站特性约束; 3) 综合利用约束; 4) 初始与终止库水位约束和 5) 非负约束。

水库调度通过改变自然径流的时空分布在水资源规划和管理中发挥着重要作用[11] [12] [13] [14] [15]。当前关于传统水库调度的研究较为成熟, 各种优化算法已在水库调度运行中得到应用。主要有水电站调度规则[11] [12] [14]; 水电系统降维方法[16] [17] [18]和各种确定性及随机动态优化方法[18] [19] [20] [21]等, 这些方法的研究和应用为水电站发电调度奠定了坚实的基础[22]。

3.2. 基于水电站容量的水风光储多能互补调度

水电作为优质灵活的清洁可再生能源, 可有效调节风能和光能的波动性、间接性和随机性, 互补风光出力波动, 最大程度的消纳风光能源, 减少弃电量, 具体目标为:

$$\Delta E_{WP,PV} \Leftrightarrow E_{\text{总}}^*(T) = \sum_{t=1}^T \{ [N'(t) + WP'(t) + PV'(t)] \Delta T_h(t) \} \quad (5)$$

式中, $\Delta E_{WP,PV}$ 为水风光储多能互补调度减少的风光弃电量, kWh; $E_{\text{总}}^*(T)$ 为调度期 T 内水风光储互补系统实际上网总电量, kWh; $N'(t)$ 、 $WP'(t)$ 和 $PV'(t)$ 分别为 t 时段水电、风电和光电的实际上网出力。主要约束条件包括: 1) 水库特性约束; 2) 水电站特性约束; 3) 综合利用约束; 4) 初始与终止库水位约束; 5) 电力输送通道约束; 和 6) 非负约束等。

通常, 组合两个以上能源的系统可称为混合能源系统[23] [24]、多能互补系统[25]等。目前, 中国已建成多项多能互补工程, 主要有龙羊峡水光互补工程[26]、四川省雅砻江清洁能源补充基地[27]和金沙江下游水风光互补输电工程[28]等。

发挥水电在新型能源体系中优势, 加快水风光储多能互补系统科技创新是助推“双碳”目标实现的重要途径。有关多能互补系统概念的相关研究主要包括多能源的互补性分析[23] [25]、优化设计[14] [29]及其运营管理[30] [31] [32]。基于已有研究, 本文提出了与水风光储多能互补系统调度相关的 8 部分研究内容和方向。

3.2.1. 深化能源体制改革, 建立健全电力市场和碳市场机制

1) 推进电力市场碳市场政策协调和机制协同

目前中国电力市场和碳市场的顶层设计和规划相对独立, 但电力市场和碳市场的本质和共同目的都是促进中国电力行业向更加清洁、高效和低碳的方向发展。两个市场的改革方向高度一致、改革领域交错重叠、改革措施相互影响, 应该合力实现协同发展, 充分利用市场力量以实现“双碳”目标。

2) 优化电力市场下水风光储多能互补运行机制

随着新能源发电比例不断提高, 电力系统能源结构随之发生改变, 对电力系统调配能力、灵活性和稳定性等方面都提出更高要求, 水电作为调节能力最好的清洁能源, 可以有效对冲风光的间歇性与波动性, 将在各体系电力市场中扮演着无法替代的角色。电力市场下的水风光储多能互补系统优化运行存在着复杂不确定性、多目标、维数灾等难点, 如何签订中长期市场合同、制定现货市场竞标策略、参与辅助服务市场等问题仍有待深入研究。

3) 加强国家水网与电网联合调度和协同运行机制

可考虑通过国家水网与电网的联合调度与协同运行以促进“碳中和”目标实现。目前, 中国已经规划实施的南水北调东线、中线和规划中的西线工程沟通长江、淮河、黄河、海河四大流域, 初步形成了“四横三纵”

的国家水网框架。如何从系统层面构建水网电网体系、完善相应机制体制、配置宏观协调格局、实现水网电网协同运行等问题有待进一步探究。

3.2.2. 水风光储实现能源转型的可行性评估

在现有气象资源和负荷需求分布的基础上，依托水、风、光作为能源结构主力实现“碳达峰、碳中和”的可行性如何？是能源结构规划建设需要回答的首要问题。多能互补视角下水、风、光电可行性评估研究的目的是基于气象观测数据，考虑地理约束，分析各种能源出力特性和互补关系，评估其在空间和时间两个维度均满足负荷需求的能力，从而为政策制定或规划设计提供决策参考。

多能互补视角下水、风、光电可行性评估研究目前主要侧重于资源互补性和系统发电可靠性方面的评估。互补性主要通过气象观测数据，计算探讨气象要素空间上的分布特征和时间尺度的互补规律，可靠性通常以小区域为研究对象，模拟评估单个独立的互补系统发电与负荷之间的匹配程度。清洁能源未来供电可行性研究大多是对单种能源的潜力进行评估进而探讨可行性。Tian 等[33]利用观测数据和气候模型评估了北半球的风力发电潜力。Liu 等[34]估算了气候变化对中国水电潜力的区域和季节影响。Van Vliet 等[35]开发了一个全球水电模型，量化气候变化对未来水资源和水电站容量的影响。在降水和流量方面，De Jong 等[36]研究了气候变化对整个南美洲流域的水电潜力的影响。Kougias 等[37]指出，实现能源和气候目标需要通过能源系统建模以快速部署大量可再生能源。

仅从单种能源的资源评估入手，或以小区域单体互补电站为研究对象，并不能明确一定能源结构下电力供应满足负荷需求的潜力，缺乏从资源、发电、传输、负荷多个维度综合评估多能互补潜力的研究。因此，可建立以物理资源评估模块、互补调度模块和跨省交易模块的潜力评估框架，从“源-网-荷”全链条为主线进行潜力评估计算，探讨全国省际均互联传输条件下水风光供应负荷过程潜力。进而分析全国各省水风光互补系统承担所有负荷的电力供应的保证率。以此评估在未来的能源结构和电网建设规划中，实现全国所有省份电力结构的100%清洁化的潜力。依托中国丰富的水电资源、全国跨区域联网条件、季风性气候特点等独特条件可以为以上电力结构模式的实现提供有效保障。

3.2.3. 气候变化下多能互补系统的稳健性识别

水、风、光均为气象驱动的能量，气候变化对水风光能源构成的影响和冲击是显著的。同时，能源系统暴露于高度的气候变化中[34] [38] [39]，加大了预测气候相关可再生能源的难度。水、风、光电规划的常规模式假定长期气象序列过程是平稳的，并根据与历史数据等效的统计特征估算未来的气候资源，作为规划设计的输入。但是，许多研究表明由于气候变化和人类活动，水文状态和形势均已经发生了变化，全球气候变化已成为威胁人类社会可持续发展的紧迫问题。近年来，气候变化对能源安全的影响引起了人们的日益关注[40]。

从电力系统稳定性和经济性的角度来看，气候变化对水电和光伏等气候驱动型能源构成的威胁是值得关注的。许多相关研究报告了气候变化对能源系统的影响。例如，Teotónio 等[41]指出，气候变化可能改变水文气象变量，或增加水资源竞争，对水力发电产生直接和间接影响。Schaeffer 等[42]回顾了气候变化对各种可再生能源(如水电、太阳能、海洋能源和风能)可能产生的影响，结论表明，能源部门容易受到气候变化的影响。Perera 等[43]考虑未来13种气候变化情景和极端气候事件，使用随机鲁棒优化方法量化了能源系统的变化。Tobin 等[45]采用一致性模型，分别评估气候变化对太阳能光伏、热电、水电和风电的影响。Burnett 等[45]研究表明，气候变化将改变英国不同地区对太阳能的吸收。同时，越来越严重的季节性波动会对未来太阳能资源的分布产生影响，各地域之间的差异增加。

目前大多数关于气候变化与能源关系的研究主要集中在气候变化对单种可再生能源的影响评估上，很少有研究深入到规划和设计阶段来考虑气候变化的影响。驱动水光互补系统相关的气候变量比单个电站相关的气候变量更为复杂，因此在模拟互补系统发电过程时应考虑气候变量的相关性和调度规则的影响以适应气候变化，

以有效识别未来气候变化下水风光互补系统稳健性，并以此作为水风光互补系统面向未来气候变化的规划设计的参考依据。

3.2.4. 多重时间尺度嵌套协同运行的调控理论与方法

由于多能互补系统的维度更高，不确定性输入更多，调度目标的竞争性更强，互补系统的安全高效运行问题存在挑战性。因此，包括水电在内的混合能源系统的运营管理通常涉及多个时间尺度(例如短期、中期和长期)的决策。目前大量研究已经建立了许多混合能源系统短期运行模型[46] [47] [48]。Chen 等[49]针对水风经济调度问题提出了一个两阶段鲁棒分布模型。多名学者构建了多层嵌套模型，以优化大型水-光混合发电的每日发电计划[46] [50]。Biswas 等[51]探讨了如何权衡风-光-水混合能源系统的经济效益和环境绩效问题。这些研究主要集中在提高系统的短期性能，但由于短期预测信息的短视性，它们无法保证令人满意的长期性能[35] [52] [53]。在这种情况下，有必要研究水风光储多能互补系统的长期运行情况，协调不同能源之间的高效运行。长期互补运行的目的是将全年水量优化分配到较短的时间段，并调节水电以补偿风、光输出的不稳定性来满足发电需求[54]。同时，长期互补运行轨迹为短期互补运行规划发电调度提供了边界条件。最近，人们探索了水-光混合能源系统的长期调度规则、调度函数以及调度曲线。Ming 等[32]设计并优化了六种调度图，主要是优化两条调度曲线，将运行区划分为三部分。Yang 等[31]使用隐式随机优化方法推导了调度函数。Li 等[54]使用显式随机优化方法，得到不同情景下预期收益最大的调度决策。

基于已有研究，今后应加强水、风、光的协同运行，从实时、短期、中长期开展多重时间尺度嵌套协同调控技术的研究：

1) 实时尺度方面，构建“机组-负荷”双层模型，制定实时调度决策。在互补实时运行过程中，水电机组通过调节自身出力来适应系统能源出力的变化，使得系统出力满足负荷要求。新能源难以准确预测，其出力预测的不确定性将直接传递为水电调度决策的不确定性。因此，在不确定条件下对互补经济运行过程进行建模，并且对经济运行模型进行高效求解是未来的研究趋势。为此，可针对互补系统经济运行问题(“以电定机”)，建立考虑新能源出力预测不确定性的机组组合鲁棒优化模型。采用多情景以及发生概率表征光电出力预测的不确定性；其次，结合鲁棒随机优化理论，建立考虑新能源出力预测不确定性的机组组合鲁棒优化调度模型。实现模型的高效求解，快速提供安全稳健的经济运行方案，在补偿新能源发电的同时提高水资源利用率。

2) 短期尺度方面，构建“系统-机组-负荷”三层模型，编制日前发电计划。在多能互补系统短时间尺度上，新能源出力具有强随机性的特点，进而导致日前发电计划编制的不确定性。未来应在新能源出力预测不准的情况下制定电网所偏好的发电计划方案。同时，发电计划编制问题本身存在大量的非线性约束而难以求解，尤其是在不确定性条件下求解难度更大。未来需要在不确定性条件下对发电计划编制问题进行高效求解。为此，针对互补系统日前发电计划编制问题(“以资定电”)，可建立耦合经济运行模块的发电计划编制模型，确定系统输出功率、确定机组状态以及确定机组间负荷分配，以期能在可接受的时间内，提供同时满足电网需求和流域水资源综合利用要求的日前发电计划。

3) 中长期尺度方面，构建“系统-机组-负荷-容量”四层模型，同步优化中长期调度规则与新能源装机容量，以及水电站最优运行方式的制订和实施问题。主要难点可归纳为三方面：随机性、多目标、以及高维性。多能互补研究主要集中在规划设计与短期调度方面，而对于中长期调度尤其是考虑短期互补性的中长期调度的研究相对较少。今后，针对互补系统中长期调度问题，可基于短期多能互补情况构建中长期弃电损失函数，将其耦合到中长期调度模型中，用于构建中长期互补多目标优化模型。多能互补系统中长期调度研究，可为优化水电调度规则以及全生命周期内水风光装机规划研究提供有力支撑。

3.2.5. 基于水电调节能力的风光装机最优互补配置

准确评估水风光多能源互补性及利用互补性配置风光是一个亟需解决的科学问题。对于风能和光能的波动

性、间接性和随机性，水电的灵活性可有效互补风光出力波动。关于水电光伏混合系统，Fang 等[55]提出了一个成本效益框架，以确定与现有水电联合运营的光伏电站的最佳规模。Ming 等[56]通过纳入长期运营战略，进一步改进了规模模型。水-光互补系统的经济性引起了投资者的兴趣，发现其对经济因素(如上网电价)敏感。因此，一些研究人员试图从技术角度确定水光系统，例如，电力输送需求和水库特征[57]。除了光伏装机容量外，还可以使用技术经济分析框架，得到优化混合能源系统更具体的物理参数。这些参数包括水库蓄水量[58]、不同太阳能跟踪器的部署比例[59]以及太阳能板的安装方位和倾斜角度[37]。

由于电网负荷的不确定性，能源系统不可避免地存在弃电和出力不足风险，难以实现完全互补，减少弃电和解决出力不足是多能互补系统优化配置的研究趋势。现有评估方法主要采用相关性系数和波动性描述互补性，虽评估了能源间的互补关系，但未考虑水电的调节能力及负荷的多变特征，更无法准确优选能源最佳配置。具体包括：

1) 基于能源综合出力与负荷匹配率的互补性评估方法是研究重点，以准确量化能源在时间和量级尺度上的互补性。以新能源互补性为基础，寻找基于水电调节能力的风光最优互补配置方法，优选现有水电调节能力下风电和光电的最优装机规模，从而实现能源资源高效利用的目标。

2) 水电出力不足和弃水问题可以通过水电站灵活升级改造得到解决。考虑水电站全生命周期内的成本-效益模型，采用短期-中长期嵌套方法计算水电站不同扩机容量下的发电量，作为成本-效益模型的输入，综合分析各项扩机评价指标(如净效益、单位耗水率和弃电率等)，确定适用于研究水风光储多能互补系统的水电站扩机容量或不同类型的水电机组。

3.2.6. 新形势下多能互补调度的协同机理辨识

如何在新形势下优化多能互补调度规则结构，采用有限的资料提取尽可能准确的调度规则，是研究多能互补调度协同机理的重要挑战。水库调度规则能够改变自然径流出入流，被认为是指导水库长期运行最有效的工具[60]。由于降水和太阳辐射长期内存在时间互补性[30]，混合能源系统的长期性能可通过优化运行调度规则进一步提高[61]。许多能够解决资源不确定性的有效方法，已被用于推导水电站混合能源系统的长期运行规则，包括隐式随机优化[31]、显式随机优化[54]和基于模拟的优化[32]。Gong 等[62]推导了考虑能源边际效益递减的水电-光伏混合系统的运行规则。由于多个不确定性被纳入这些优化方法，运算模型的计算复杂度高于传统模型，不考虑不确定性或考虑较少的不确定性。此外，当系统包含两个或多个水库时，由于众所周知的“维数灾难”[13]，操作规则的推导在计算上会变得更加昂贵。

新能源在能源系统中占比不断增加，其波动性和间歇性使能源系统中的突发事件发生概率增加。为应对突发事件，需要将传统的“信息-决策”映射扩展为“信息集-决策集”映射。具体到多能互补调度，则需将传统的单一调度轨迹扩展为调度区间，使调度人员面对突发事件有更大的灵活性。新能源装机规模的迅速增加，而部分装机增加的地区面临无长系列资料的问题，导致传统基于“模拟-优化”的调度规则推求方法不再适用，需要进一步从机理上辨析调度规则函数形式及参数结构对于多能互补系统特征量的响应形式，构建适用于无资料地区的解析调度规则。面对多种新能源、各样调度需求，调度规则的结构不确定性将进一步加深，需要识别调度规则结构对于边界条件的敏感程度，评估调度规则的鲁棒性，研究预报不确定性对于互补调度规则所生成决策不确定性的扰动程度，设计调度规则的时变结构。在求解过程中建立调度规则鲁棒性的评价方法，通过模拟调度实验，识别最优调度规则时变结构。

3.2.7. 多能互补系统的多重风险识别及控制

由于风速和光伏强度的随机变化和综合出力剧烈波动，导致风-光-水-储互补经济运行存在严重的欠发、弃电和弃水等风险问题，制定一套安全高效的经济运行方案成为问题的关键。互补电力系统的风险管理已成为一个具有挑战性的科学问题[63]。目前，关于能源发电不确定性已有大量研究，比如建立考虑能源出力不确定性

的随机优化模型和降低输出波动的多能互补调度模型等。Ming 等[46]提出了一种考虑光伏发电不确定性的随机水电机组组合模型,与实际运行相比可以降低耗水量。Yin 等[48]提出了一个随机调度模型来研究多源电力系统的日前调度。Yang 等[64]采用了两层嵌套的方法,制定了考虑风电不确定性的多水电发电计划,减少了风电不确定性对电网的影响,增加了系统的稳定性。Zhang 等[65]研究了考虑不确定性的风-光-水混合系统短期优化运行,避免了潜在不确定性带来的经济损失。这些研究表明,不确定性在混合能源系统的运行中非常重要。然而,由于不确定性造成的风险更是多能互补系统需要进一步研究的重点。

近年来,多能互补系统的风险得到了进一步研究,如出力不足、弃电和弃水[66] [67] [68]。Liu 等[66]根据风能、光能的统计特性和水电的长期规划,提出了旱季独立区域电网的中长期优化运行策略,提高了水电站的发电效率,避免了枯水期水电站无法发电的风险。Bird 等[67]回顾了欧洲、北美和亚洲的 11 个国家,近年来在大容量电力系统上风电和光伏弃电的国际经验。Tang 等[69]回顾了中国光伏弃电现状,并从发电和电网方面详细分析了原因。Pinto 等[70]研究了风电不确定性情景下的弃电风险和机组组合决策,并评估风险水平和对冲意外事件的成本,作为决策范例。Pei 等[71]通过分析中国电力系统大量数据,对风电弃电问题进行了详细研究,并从时空角度确定了风电弃电的特征。Liu 等[72]基于径流频率分析,提出了一种实用的弃水风险计算方法。Huang 等[68]提出了一种考虑多个风险指标的风光互补发电系统随机优化方法,降低了多能互补系统短期弃电风险。

今后,以风速和光伏强度随机扰动下水风光储互补调度风险指标描述为突破点,建立水风光储互补经济运行的效益-风险均衡模型。为描述风速和光伏强度的不确定性的特性,采用随机模拟模型生成各种预报情景。为减小风-光-水互补调度发电风险,提出欠发、弃电和弃水等风险指标作为目标函数。以此为基础,建立多能互补经济运行模型,解析不同预报情景对发电效益和风险因子的响应规律,制定一套安全高效的经济运行方案,实现水风光储互补运行的安全性和经济性。

3.2.8. 实现多重目标协同,协调新形势电力供应和水利功能

如何将水电补偿调节新能源的运行方式,融入水电已有且多样化的运行任务中,是水电与新能源协同运行所面临的问题和挑战之一。防洪、供水和生态等多种运行任务随着时间而变化,仅存在于某些特定时段。因此,对全年调度期进行分期处理是研究考虑目标时变性的水风光协同运行的重要手段。

1) 水风光储多能互补与防洪功能协同

可再生能源互补的同时进行水库防洪调度是挑战也是难点。在汛期,水库的首要任务为防洪,而水力发电与防洪这两个任务都有特定的水位要求,有时可能相互冲突。由于风光的出力波动和预测不确定性,为确保水风光互补系统打捆出力尽量满足负荷需求,需要依靠水库调度调整水电出力。水电出力的大幅度波动将造成水库水位和下泄流量的显著变化,这将引起库岸不稳定和下游通航水位波动等安全问题。然而,防洪是水库的首要任务,按照电调服从水调原则,为了保证水库工程和流域水安全,水电会出现弃水泄洪以及出力受限等不同状况,若发电能力不足,无法满足负荷需求,则会出现发电破坏情况,对电力生产安全运行构成极大的挑战和威胁。因此,多能互补系统和水库防洪协调调度任重道远。

2) 水风光储多能互补与供水功能协同

水力发电任务与供水任务的优先次序冲突也是有待研究的问题。在枯水期,水库的常见任务为供水,但风、光电的波动时时刻刻都存在,所以水电补偿是面向全年的一种发电运行方式。中国的南水北调工程构成我国“四横三纵、南北调配、东西互济”的水网格局。为解决水资源短缺、确保国家粮食安全、能源安全等具有重要作用。因此,为保障我国水网供水功能的安全运行,今后应加强水风光储多能互补和水库蓄水供水的多目标调度研究。

3) 水风光储多能互补与生态功能协同

多能互补调度导致的下泄流量的改变对河流生态系统有显著影响。多能互补系统调度中,水电出力的大幅度波动,使得天然流态在流量大小、持续时间、下泄时间、频率和变化率等方面都有显著改变。其中,流量大小是衡量栖息地可用性或适宜性的关键因素。流量的持续时间影响生物特定的生长发育阶段。下泄时间决定了水库下游特定流量事件的发生时间,这被用来表征是否满足生物生命周期的要求。流量或流速的特定频率和变化率可能与水生生物的搁浅有关。因此,多能互补调度导致的下泄流量的改变对河流生态系统的的变化影响有待进一步探究。同时,未来水电开发将会减少典型河段生境多样性,减弱流域的流量年际变幅、水温季节变幅,改变河流连通性,进而影响鱼类繁殖行为、缩短鱼卵生长期,改变流域生态系统稳定性。

4. 提升生态碳汇的灌溉调度

灌溉提供的水分是影响地区生产力和碳循环的关键因素之一[73]。无论时间尺度如何,其在决定生态系统的碳通量方面起着至关重要的作用[74]。

4.1. 灌溉对生态碳汇影响研究进展

4.1.1. 促进长期农业固碳

灌溉在提高作物生产力方面起着关键作用,占全球耕地的20%,粮食产量的40% [75]。农业约占全球人为排放 CH_4 的52%, N_2O 的84% [76],是温室气体的重要来源或主要碳汇。灌溉对温室气体排放的影响不同,现有研究表明,不同的灌溉量、灌溉形式、灌溉时间和频率均会对农田温室气体排放造成影响。1) 灌溉量:与不灌溉相比,灌溉通过促进土壤水分、微生物活性、碳和氮(N)矿化和土壤呼吸,增加 N_2O 和 CO_2 排放。然而,过度灌溉会减少土壤的通气量,从而抑制微生物活动和土壤呼吸[77],通过土壤有机质的厌氧分解增加 CH_4 排放,并通过反硝化作用增加 N_2O 排放[78]。2) 灌溉形式:大部分研究表明,滴灌更有利于减少农田的 N_2O 排放,因为滴灌中的水分分布模式提供了更有利的硝化条件。Kennedy等[79]指出,在半干旱地中海气候条件下,滴灌比沟灌减少了番茄种植系统的 N_2O 排放量。Maris等[80]发现,与地中海橄榄园的地面滴灌相比,地下滴灌减少了 N_2O 排放,且总水量相对于地面滴灌减少约45%。3) 灌溉时间和频率:Franco-Luesma等[81]研究了地中海条件下喷灌灌溉时间和频率对玉米田温室气体排放的影响。他们发现,与灌溉频率相比,灌溉时间对土壤温室气体排放的影响更大。Rodríguez等[82]发现,高频灌溉显著增加了粘壤土中的 CO_2 排放量,但 N_2O 排放量明显低于低频灌溉。连续灌溉可以显著缓解稻田 CH_4 和 N_2O 造成的综合温室效应,同时确保水稻产量最高[83]。

虽然灌溉农业消耗大量能源,会产生温室气体排放,但综合来看农业是碳汇,作物可将大气中的 CO_2 捕获到植物体和土壤中,产生的生物量代表了一种重要的 CO_2 碳汇,可以抵消排放。

4.1.2. 加强植树造林生态固碳

在全球变暖的背景下,植树造林的碳储量越来越重要。森林生态系统通过光合作用,将碳固定在植物中,以生物量的形式在大气中吸收和封存二氧化碳,这有效缓解了气候变暖[84]。然而,作为生态系统中的重要碳汇,植树造林会消耗大量水资源,增加区域水资源短缺压力,特别是在半干旱气候地区。生态系统在消耗大量水的同时,也是未来重要的碳库。如何平衡造林的碳储量和消耗水是全世界面临的一个重大问题[85]。Chen等[86]提出,在水热条件较充沛的地方开展造林更有利于增加森林土壤碳储量。在黄土高原的重新造林区域观察到矮树,在当地被称为“老人小树”[87],这个比喻生动地描述了水分不足时,人造林的低生长率和不良状况,导致森林无法维持理想的水土保持和碳封存的生态功能。一旦生态系统变得缺水,光合作用就会急剧下降。因此,通过水库进行补充灌溉和跨区域灌溉是维持和促进生态系统碳汇的重要举措。

4.1.3. 调节土壤固碳

土壤碳储量往往会随着自然环境中水资源利用率的增加而增加[88]。土壤含水量与生态系统碳汇密切相关。

土壤水分被确定为调节农田温室气体排放的最重要因素,因为它控制着微生物活动和所有相关过程[77] [89] [90]。在实验室研究中,CO₂排放率与土壤含水量密切相关。排放量随着田间持水量的减少而减少,这与田间持水量为土壤呼吸提供了最佳条件的观点一致[91]。在降雨量正常和较少的年份,土壤含水量较低,土壤含氧量充足,这有利于CH₄氧化细菌的生长,从而促进了土壤对CH₄的吸收[92]。土壤含水量通过改变传播速率和土壤环境条件影响CH₄氧化细菌的CH₄消耗能力[93],这可能是稻田、旱地和草地之间CH₄通量存在显著差异的原因。较高的土壤含水量导致稻田CH₄排放量高于旱地和草地。然而,干燥的土壤面临将高生物量的生态系统(例如森林)转变为低生物量的生态系统(例如草地)的风险,从而进一步减少净生物生产力[94]。

4.1.4. 加速区域水循环

植树造林可通过森林蒸腾作用增加耗水量,造成区域干旱,灌溉可以缓解这一现象,从而影响区域水文循环和大气循环的模式[84]。造林的降水反馈对区域水文循环至关重要,因为土壤水分干燥可能在没有降水反馈的情况下发生[95]。尽管蒸腾作用可能通过水循环以降水的形式返回地面,这有利于其他地区,但可能不足以抵消当地蒸散发造成的水分损失[84]。区域降水是通过局部蒸发蒸腾和外部平流水分产生的[96]。除平流水分外,局部蒸散发对降水变化的影响不容忽视,尤其是在干旱和半干旱地区。张力小和宋豫秦[97]预测,如果中国西北地区的森林覆盖率达到三北防护林系统项目确定的14.4%的目标,由于蒸腾作用的增加,该项目覆盖区域每年将出现高达 $1.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的缺水。由于实施了退耕还林计划[87],黄土高原已经被证明与该预测类似的结果。低降雨量可能会限制潜在的森林栖息地,并影响森林的有机碳储量[98] [99]。综上,灌溉可极大改善植树造林增加区域蒸散发而造成的水资源短缺,维持植被正常生长和碳储存生态功能。

4.1.5. 缓解地下水位下降

灌溉大部分来自地表水或地下水,在过去几十年中,来自地下水的比例不断增加[100]。Siebert等[101]估计40%的灌区以地下水为基础,其余60%来自地表水或其他水源。尽管灌溉对粮食生产非常有益,但大量的地下水开采导致地下水位急剧下降[102]。研究表明,地下水位的快速波动可能导致空气流入或流出土壤表面,从而改变近地表CO₂浓度梯度和排放率。地下水位的快速波动主要是由于水文动态环境中的高补给率和排放率驱动的造成的[103],但在地下水位较浅的森林中,由于植被吸收地下水引起的水位日变化也很显著[103] [104]。在新西兰的研究表明,国家碳排放与碳汇不成比例,保持较高的地下水位是改善农业泥炭管理的有效措施[105]。除了对CO₂排放有影响外,地下水位还可能影响CH₄和N₂O的排放,从而影响低地热带森林的整体温室气体平衡[106]。

4.2. 提升生态碳汇的水库调度技术展望

灌溉需求的增加,以及对能源消耗和温室气体排放的相应影响,将引发缓解全球变暖和适应政策方面的潜在冲突。在这种情况下,水库调度技术和流域内水资源配置是水资源规划的有效工具,可在缓解水资源短缺和气候变化影响方面发挥重要作用。

4.2.1. 农业灌溉调度

在提出“碳达峰、碳中和”目标这一新形势下,灌区水资源调度面临了一系列新挑战。不仅要延续以往提高作物产量和节水灌溉目标下的优化调度,还要考虑减少农业温室气体排放和促进农业固碳的灌溉目标。目前,不同灌溉制度对农业固碳作用的影响已有大量研究。因此,以流域水量分配方案为前提,在确定不同作物的灌溉制度和需水量后,结合当地降水、蒸发等气象因素,确定不同水平年(尤其是水资源短缺年份)水库灌溉调度规则,将水库水位控制在合理的范围内。

4.2.2. 造林区灌溉调度

中国植树造林生态工程大力建设,主要的灌溉水量来自天然降水,但水库对苗木、花卉、林果、牧草地等

林牧业的补充灌溉不容忽视。水库主要位于陡峭的山丘区，大多为发电水库，森林覆盖率较高[107]，如何协调水库发电与灌溉的冲突，如何进行跨区域水资源调度，是生态灌溉亟需解决的问题。除此之外，大面积植树造林对区域水文循环和大气循环的模式造成了显著影响，流域径流变化为水库运行管理带来了新挑战。因此，生态工程对灌溉的反馈作用也是需要关注的问题之一，进一步推进变化环境下水资源调度研究。

5. 减少水库碳排放的水库调度

5.1. 水库碳排放研究进展

5.1.1. 水库温室效应

水库建设显著改变了陆地水系统碳循环，与水库相关的 CO_2 、 CH_4 等温室气体源汇问题近年来备受国际关注[108]。研究认为，水电虽替代了传统化石燃料发电，但水库碳排放引起的温室效应不容忽视[5]。研究表明，水库温室气体主要释放途径为水-气界面扩散途径、气泡释放和水生植物(包含消落带)释放途径三种。影响水库碳排放的因素较多，主要有水温、库龄、水体富营养程度、水深、梯级水库拓扑结构等因素[109]。

5.1.2. 水库温室效应影响因素

1) 水库水位波动

第一，水库水位波动改变消落带植被和土壤特性，进而影响温室气体排放。水位在短时间内的大幅涨落会对水库消落带土壤的理化性质产生强烈的影响，进而影响温室气体的排放。水库水位下降，可能导致消落带在短时间内释放较高的温室气体。研究发现，湖泊强烈的水位波动会使得消落带基质更粗糙且降低植被覆盖率[110]。由于不同水库的调度规则不同，水位变化规律难以总结，因此很难辨识水库消落带植被演替的一般规律。然而，对于同一水库来说，运行多年后，其消落带会形成相对稳定的植被分布格局[111]。水库消落带通常是 CO_2 、 CH_4 的源，但水位变化会导致土壤含水量和氧化还原环境改变，将在较大程度上改变土-气界面 CO_2 、 CH_4 的源汇状态，因此，水库消落带也有可能转变为 CO_2 、 CH_4 的汇[112]。

第二，水库水位波动改变水深，进而影响温室气体排放。对三峡水库的研究发现，蓄水期间(11月至次年4月)高水位水域区 CO_2 排放显著低于低水位期间(6、7月)的排放[109]。这是由于水深影响温室气体从底部到水气表面的传输距离和氧化程度。其中，水深越大传输距离越长， CH_4 被氧化的概率就越大，最终能到达水气表面并释放到大气中的 CH_4 就越少。

第三，水库水位波动会导致大量沉积物在河岸和内部重新分配中再悬浮，进而影响温室气体排放。水库的复杂形态可能导致沉积物大小和沉积物成分的小规模变化。类似地，水库水位降低促进了富含 CH_4 的气泡从沉积物向大气的转移，以及沿海地区富含有机物的沉积物，可能形成水库中的 CH_4 排放热点[113] [114]。水库中的 CH_4 排放率表现出高温时刻，在高温时刻， CH_4 排放率会短暂升高。例如，冬季冰下积聚的 CH_4 ，或在热分层期间积聚的 CH_4 ，可分别在春季冰融化和秋季排放到大气中[115]。这些湖泊混合模式产生了短暂的强烈排放，已被证明占年排放量的 45% [116]。

第四，水库水位波动转化为静水压力的变化，引发水库 CH_4 沸腾，从而影响温室气体排放。将静水压力视为沉积物-水界面处由于上覆水柱和大气的重量而产生的压力。当水位下降时，将气泡固定在适当位置的静水压力减小，增加了沉积物中储存的气体平衡压力超过环境压力的可能性，这是沉积物中形成气相的先决条件，因此也是发生沸腾的先决条件[117]。在活跃沸腾的水域， CH_4 氧化为 CO_2 的比例会大大降低，因为上升的气泡会快速通过水柱，基本不受 CH_4 氧化的影响[116]，尤其是在浅水区[118]。因此，水位下降触发沸腾事件，可能会使得 CH_4 不易被氧化并增加排放到大气中的比例。Harrison 等[119]证明，水位下降期间引起的 CH_4 排放，可占美国西北太平洋地区的水库年 CH_4 排放量的 90% 以上，这表明在水位下降期间监测排放量对构建准确的 CH_4 预算至关重要。在没有水位下降的情况下， CH_4 可能溶解在沉积物孔隙水中，扩散到水柱中，并被氧化为 CO_2 。

2) 水库反照率效应

水电站水库的建设通常涉及土地利用的变化，以前的陆地生态系统被淹没或筑坝扩大了现有水体，而牺牲了地表覆盖。土地利用变化的结果是地表反照率降低，因为水体反射的阳光比大多数陆地生态系统少。这反过来又导致大气顶部的正辐射强迫增加，会抵消水电发电置换化石燃料产生的负辐射强迫。Wohlfahrt 等[120]在调查水库反照率的累积效应时，将水体表面的反照率平均为周围陆地景观反照率的一半。通过量化全球水电站分布及其周围景观之间的反照率差值，得到，19%的调查水电站置换化石燃料获得的负辐射作用，需 40 年以上的时间来抵消反照率效应。46%的水电站需要不到四年的时间来抵消反照率效应。水电装机容量和发电量与水库面积之比有显著的正比例关系。这表明，与大型水电站相比，小型水电站的发电量与水库表面积之比往往不利于反照率效应的削弱。因此，在所有其他条件相同的情况下，小水电需要更多的时间避免 CO₂ 排放，以抵消反照率效应。

综上，在水库流量季节性变化剧烈的情况下，水电站发电、水库引水灌溉或饮用水供水等引起的水库水位频繁变化的特殊情况，可能会大大影响水库 CH₄ 向大气排放的时间和幅度，导致水库在温室气体排放方面可能会有很大不同。因此，通过水库调度对水位进行调节最有可能缓解频繁水位下降或 CH₄ 沸腾率。

5.2. 减少水库碳排放的水库调度技术展望

尽管目前没有测试减少水库温室效应的管理策略的研究，但关于温室气体排放对水位波动的响应研究，为水库调度提供了越来越多的可行性策略，从而在水位管理和温室气体排放之间建立了联系。Harrison 等[119]的研究表明，降低消落带占用历时和幅宽，可以减少 CH₄ 排放，这突出了发电和温室气体排放之间的潜在权衡。

5.2.1. 延迟水库水位下降时间

鉴于水位管理在控制 CH₄ 通量方面的重要性，改变水库水位管理可减少水库温室气体排放。通过水位下降的改变，增加 CH₄ 氧化菌将 CH₄ 氧化为 CO₂ 的比例，那么水位下降的调节可以减少温室气体年排放量[121]。在温暖的天气月份，通过微生物活动产生的天然气产量往往超过通过沸腾产生的 CH₄ 损失率，从而导致水库沉积物中大量 CH₄ 的积聚。当富含氧气的地表水混合到较深的富含 CH₄ 的水中时，CH₄ 氧化可能在秋季成为一个重要的 CH₄ 汇。改变水库水位下降的时间(例如，通过将夏季分层期结束时的水位下降推迟到秋季)，也有可能通过刺激沉积物 - 水界面的快速 CH₄ 氧化作用来减少水位下降对 CH₄ 排放的影响，但这一假设需要进一步检验。

5.2.2. 降低水位变化率

CH₄ 排放速率表现出极端的水库空间非均质性。例如，河流 - 水库过渡区可能成为 CH₄ 排放聚集区，部分原因是高沉积速率促进了有机物向缺氧沉积物的输送。研究表明，水位的大幅度变化可以增加 CH₄ 的沸腾通量，还可以增加与船闸运行等相关的短期水位波动[122]或水力发电水库的每日水位下降[119]。Encinas Fernández 等[123]观察到，当水位下降发生在没有水位下降的一段时间后，沸腾通量显著增加。这与几个水库的观察结果一致，这些水库在秋季仅运行一次主要的年水位下降[119]。此外，在自然系统中，例如亚马孙河漫滩，当水位在长时间的水位上升后下降时，CH₄ 沸腾通量变大[124]。因此，来自沉积物的沸腾通量与水位变化率呈显著负相关，定期较小的水位下降而不是单一的大规模水位下降有利于减少 CH₄ 排放。

5.2.3. 协调水体反照率与水位

水体反射的阳光比大多数陆地生态系统少，水库建设降低了反照率，使得大气顶部的正辐射强迫增加，对水电作为碳中和能源有削弱作用。对于同一条件下的水库来说，调节水库水位，减小水表面积，降低反照率效应，有利于削弱土地利用变化带来的温室效应。由水体面积来看，水位降低可使表面积缩小，增加区域反照率。然而，这与缓解水库温室气体排放的水位管理研究是相互矛盾的。因此，需进一步协调水位下降削弱反照率效应和控制水位下降抑制温室气体排放两者之间的关系，为今后水库调度策略提供参考依据。

6. 结论与展望

在中国提出“碳达峰、碳中和”目标的背景下，水电作为能源结构转型的核心，与三北风、光清洁能源构成了重要的清洁能源系统。然而，水库不仅具有替代石化能源减少碳排放的碳汇作用，同时存在库区水体碳排放的消极作用和影响。面向“十四五”时期和“双碳”目标，合理有效地协调水库多目标调度，充分考虑减少碳排放和增加碳汇的水位控制条件，对未来充分发挥水库功能，缓解气候变化具有重大意义。根据对未来中国能源结构转型的趋势和水库调度全方位的问题认知，本文首次提出了面向“双碳”目标的水库碳当量目标函数的碳模型，立足水库全生命周期，围绕水库替代石化能源的发电调度、提升生态碳汇的灌溉调度和减少水库碳排放的水库调度三个维度，综合分析了基于水电站电量的发电调度、基于水电站容量的水风光储多能互补调度、提升生态碳汇的水库调度、减少库区碳排放和降低反照率效应的水库调度五个方面，积极探索减源增汇的水库调度技术，对未来水库调度研究进行展望。特别是，替代石化能源的水电站发电调度，在碳目标中是否占据主导地位，仍有待深入研究。本文不仅从宏观角度全面认知了水库调度，而且事关清洁能源体系的发展和缓解全球变暖的国家政策，为助推我国“双碳”目标的实现提供了重要理论基础和技术展望。

基金项目

湖北省科技支撑计划项目(2014BCB036)和国家自然科学基金重点项目(U1865201)资助。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm, 2021-11-15.
XI Jinping. Statement at the general debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm, 2021-11-15. (in Chinese)
- [2] 谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. 《双碳》目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.
TAN Xiandong, LIU Jiu, XU Zhicheng, *et al.* Power supply and demand balance during the 14th five-year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality. *Electric Power*, 2021, 54(5): 1-6. (in Chinese)
- [3] GOSENS, J., HEDENUS, F. and SANDÉN, B. A. Faster market growth of wind and PV in late adopters due to global experience build-up. *Energy*, 2017, 131: 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.046>
- [4] ANOUNE, K., BOUYA, M., ASTITO, A., *et al.* Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93(5): 652-673. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.032>
- [5] ROSA, L. P., SCHAEFFER, R. Global warming potentials. The case of emissions from dams. *Energy Policy*, 1995, 23(2): 149-158. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(95\)91418-C](https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)91418-C)
- [6] SVENSSON, B. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: A global perspective. In *Proceedings of international seminar on greenhouse fluxes from hydro reservoirs and workshop on modeling greenhouse gas emissions from reservoir at watershed level*. Rio de Janeiro: Eletrobras, Coppe/Ufrj. 2005: 25-37.
- [7] 赵登忠, 谭德宝, 汪朝辉, 等. 清江流域水布垭水库温室气体交换通量监测与分析研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 197-204.
ZHAO Dengzhong, TAN Debao, WANG Zhaohui, *et al.* Measurement and analysis of greenhouse gas fluxes from Shuibuya reservoir in Qingjiang River basin. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(10): 197-204. (in Chinese)
- [8] DELSANTO, T., MCGINNIS, D. F., SOBEK, S., *et al.* Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(7): 2419-2425. <https://doi.org/10.1021/es9031369>
- [9] 国家能源局. 我国可再生能源发电累计装机容量突破 10 亿千瓦[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2021-11/20/c_1310323021.htm, 2021-12-16.
National Energy Administration. China's cumulative installed capacity of renewable energy power generation exceeds 1 billion kilowatts. http://www.nea.gov.cn/2021-11/20/c_1310323021.htm, 2021-12-16. (in Chinese)
- [10] 许贝贝. 水力发电机组系统可靠性与多能互补综合性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北农林科技大学, 2020.
XU Beibei. Reliability and comprehensive performance of a hydroelectric generating system with multi-energy complementary. Ph.D. Thesis, Xi'an: Northwest A & F University, 2020. (in Chinese)

- [11] LIU, P., GUO, S., XIONG, L., *et al.* Deriving reservoir refill operating rules by using the proposed DPNS model. *Water Resources Management*, 2006, 20(3): 337-357. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-0322-7>
- [12] LIU, P., LI, L., CHEN, G., *et al.* Parameter uncertainty analysis of reservoir operating rules based on implicit stochastic optimization. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.012>
- [13] FENG, Z. K., NIU, W. J., JIANG, Z. Q., *et al.* Monthly operation optimization of cascade hydropower reservoirs with dynamic programming and latin hypercube sampling for dimensionality reduction. *Water Resources Management*, 2020, 34(6): 2029-2041. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02545-0>
- [14] MING, B., LIU, P., CHANG, J., *et al.* Deriving operating rules of pumped water storage using multiobjective optimization: Case study of the Han to Wei interbasin water transfer project, China. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(10): 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000828](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000828)
- [15] YANG, G., GUO, S., LIU, P., *et al.* Multiobjective cascade reservoir operation rules and uncertainty analysis based on PA-DDS algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(7): 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000773](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000773)
- [16] HEIDARI, M., CHOW, V. T., KOKOTOVIC, P. V., *et al.* Discrete differential dynamic approach to water resources optimization. *Water Resources Research*, 1971, 7(2): 273-283. <https://doi.org/10.1029/WR007i002p00273>
- [17] LOUCKS, D. P., DORFMAN, P. J. An evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning and operation. *Water Resources Research*, 1975, 11(6): 777-782. <https://doi.org/10.1029/WR011i006p00777>
- [18] TURGEON, A., CHARBONNEAU, R. An aggregation-disaggregation approach to long-term reservoir management. *Water Resources Research*, 1998, 34(12): 3585-3594. <https://doi.org/10.1029/98WR02608>
- [19] STEDINGER, J. R., SULE, B. F. and LOUCKS, D. P. Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization. *Water Resources Research*, 1984, 20(11): 1499-1505. <https://doi.org/10.1029/WR020i011p01499>
- [20] FABER, B. A., STEDINGER, J. R. Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts. *Journal of Hydrology*, 2001, 249(1-4): 113-133. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00419-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00419-X)
- [21] LI, H., LIU, P., GUO, S., *et al.* Hybrid two-stage stochastic methods using scenario-based forecasts for reservoir refill operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2018, 144(12): 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001013)
- [22] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 29-36.
CHENG Chuntian. Function remodeling of hydropower systems for carbon neutral and its key problems. *Automation of Electric Power System*, 2021, 45(16): 29-36. (in Chinese)
- [23] JURASZ, J., BELUCO, A. and CANALES, F. A. The impact of complementarity on power supply reliability of small scale hybrid energy systems. *Energy*, 2018, 161: 737-743. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.182>
- [24] GHIASI, M. Detailed study, multi-objective optimization, and design of an AC-DC smart microgrid with hybrid renewable energy resources. *Energy*, 2019, 169: 496-507. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.083>
- [25] BELUCO, A., KROEFF DE SOUZA, P. and KRENZINGER, A. A method to evaluate the effect of complementarity in time between hydro and solar energy on the performance of hybrid hydro PV generating plants. *Renewable Energy*, 2012, 45: 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.096>
- [26] 龚传利, 王英鑫, 陈小松, 等. 龙羊峡水光互补自动发电控制策略及应用[J]. *水电站机电技术*, 2014, 37(3): 63-64.
GONG Chuanli, WANG Yingxin, CHEN Xiaosong, *et al.* Automatic power generation control strategy and application of hydro-solar complementary systems in Longyangxia. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2014, 37(3): 63-64. (in Chinese)
- [27] ZHANG, X., MA, G., HUANG, W., *et al.* Short-term optimal operation of a wind-PV-hydro complementary installation: Ya-long River, Sichuan Province, China. *Energies*, 2018, 11(4): 1-19. <https://doi.org/10.3390/en11040868>
- [28] WEN, P. Preliminary discussion on the complementary regulation and development of wind and scenery water in the dry hot river valley in the lower reaches of Jinsha River in Sichuan province. *Sichuan Water Power*, 2015, 34: 71-73.
- [29] MING, B., LIU, P. and CHENG, L. An integrated framework for optimizing large hydro-photovoltaic hybrid energy systems: Capacity planning and operations management. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 306: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127253>
- [30] LI, F. F., QIU, J. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system. *Applied Energy*, 2016, 167: 377-384. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.018>
- [31] YANG, Z., LIU, P., CHENG, L., *et al.* Deriving operating rules for a large-scale hydro-photovoltaic power system using implicit stochastic optimization. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 562-572. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.154>
- [32] MING, B., LIU, P., GUO, S., *et al.* Hydropower reservoir reoperation to adapt to large-scale photovoltaic power generation. *Energy*, 2019, 179: 268-279. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.209>

- [33] TIAN, Q., HUANG, G., HU, K., *et al.* Observed and global climate model based changes in wind power potential over the northern hemisphere during 1979-2016. *Energy*, 2019, 167: 1224-1235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.027>
- [34] LIU, X., TANG, Q., VOISIN, N., *et al.* Projected impacts of climate change on hydropower potential in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3343-3359. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3343-2016>
- [35] VAN VLIET, M. T. H., WIBERG, D., LEDUC, S., *et al.* Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 375-380. <https://doi.org/10.1038/nclimate2903>
- [36] DE JONG, P., BARRETO, T. B., TANAJURA, C. A. S., *et al.* The impact of regional climate change on hydroelectric resources in south America. *Renewable Energy*, 2021, 173: 76-91. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.077>
- [37] KOUGIAS, I., SZABÓ, S., MONFORTI-FERRARIO, F., *et al.* A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems. *Renewable Energy*, 2016, 87: 1023-1030. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.073>
- [38] WANG, X., MEI, Y., KONG, Y., *et al.* Improved multi-objective model and analysis of the coordinated operation of a hydro-wind-photovoltaic system. *Energy*, 2017, 134: 813-839. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.047>
- [39] LAN, T., LIN, K. R., LIU, Z. Y., *et al.* A clustering preprocessing framework for the subannual calibration of a hydrological model considering climate-land surface variations. *Water Resources Research*, 2018, 54(12): 10034-10052. <https://doi.org/10.1029/2018WR023160>
- [40] SOLAUN, K., CERDÁ, E. Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109415>
- [41] TEOTÓNIO, C., FORTES, P., ROEBELING, P., *et al.* Assessing the impacts of climate change on hydropower generation and the power sector in Portugal: A partial equilibrium approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74: 788-799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.002>
- [42] SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., PEREIRA DE LUCENA, A. F., *et al.* Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy*, 2012, 38(1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056>
- [43] PERERA, A. T. D., NIK, V. M., CHEN, D., *et al.* Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 2020, 5(2): 150-159. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>
- [44] TOBIN, I., JEREZ, S., GREUILL, W., *et al.* Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5°C, 2°C and 3°C warming. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 1-8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab211>
- [45] BURNETT, D., BARBOUR, E. and HARRISON, G. P. The UK solar energy resource and the impact of climate change. *Renewable Energy*, 2014, 71: 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.034>
- [46] MING, B., LIU, P., GUO, S., *et al.* Robust hydroelectric unit commitment considering integration of large-scale photovoltaic power: A case study in China. *Applied Energy*, 2018, 228: 1341-1352. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.019>
- [47] WANG, X., CHANG, J., MENG, X., *et al.* Short-term hydro-thermal-wind-photovoltaic complementary operation of interconnected power systems. *Applied Energy*, 2018, 229: 945-962. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.034>
- [48] YIN, Y., LIU, T. and HE, C. Day-ahead stochastic coordinated scheduling for thermal-hydro-wind-photovoltaic systems. *Energy*, 2019, 187: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115944>
- [49] CHEN, Y., WEI, W., LIU, F., *et al.* Distributionally robust hydro-thermal-wind economic dispatch. *Applied Energy*, 2016, 173: 511-519. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.060>
- [50] MING, B., LIU, P., CHENG, L., *et al.* Optimal daily generation scheduling of large hydro-photovoltaic hybrid power plants. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 528-540. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.001>
- [51] BISWAS, P. P., SUGANTHAN, P. N., QU, B. Y., *et al.* Multiobjective economic-environmental power dispatch with stochastic wind-solar-small hydro power. *Energy*, 2018, 150: 1039-1057. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.002>
- [52] XU, B., ZHONG, P. A., STANKO, Z., *et al.* A multiobjective short-term optimal operation model for a cascade system of reservoirs considering the impact on long-term energy production. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3353-3369. <https://doi.org/10.1002/2014WR015964>
- [53] ZHAO, T., ZHAO, J. Joint and respective effects of long- and short-term forecast uncertainties on reservoir operations. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.063>
- [54] LI, H., LIU, P., GUO, S., *et al.* Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization. *Applied Energy*, 2019, 238: 863-875. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.111>
- [55] FANG, W., HUANG, Q., HUANG, S., *et al.* Optimal sizing of utility-scale photovoltaic power generation complementarily operating with hydropower: A case study of the world's largest hydro-photovoltaic plant. *Energy Conversion and Management*, 2017, 136: 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.012>
- [56] MING, B., LIU, P., GUO, S., *et al.* Optimizing utility-scale photovoltaic power generation for integration into a hydropower reservoir by incorporating long- and short-term operational decisions. *Applied Energy*, 2017, 204: 432-445.

- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.046>
- [57] ZHANG, Y., MA, C., LIAN, J., *et al.* Optimal photovoltaic capacity of large-scale hydro-photovoltaic complementary systems considering electricity delivery demand and reservoir characteristics. *Energy Conversion and Management*, 2019, 195: 597-608. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.036>
- [58] JURASZ, J., CIAPALA, B. Integrating photovoltaics into energy systems by using a run-off-river power plant with pondage to smooth energy exchange with the power grid. *Applied Energy*, 2017, 198: 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.042>
- [59] HUA, Z., MA, C., LIAN, J., *et al.* Optimal capacity allocation of multiple solar trackers and storage capacity for utility-scale photovoltaic plants considering output characteristics and complementary demand. *Applied Energy*, 2019, 238: 721-733. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.099>
- [60] REN, K., HUANG, S., HUANG, Q., *et al.* Assessing the reliability, resilience and vulnerability of water supply system under multiple uncertain sources. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119806>
- [61] DING, Z., WEN, X., TAN, Q., *et al.* A forecast-driven decision-making model for long-term operation of a hydro-wind-photovoltaic hybrid system. *Applied Energy*, 2021, 291: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116820>
- [62] GONG, Y., LIU, P., MING, B., *et al.* Deriving pack rules for hydro-photovoltaic hybrid power systems considering diminishing marginal benefit of energy. *Applied Energy*, 2021, 304: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117858>
- [63] IEA. *Harnessing variable renewables: A guide to the balancing challenge*. Paris: OECD Publishing, 2011.
- [64] YANG, Y., ZHOU, J., LIU, G., *et al.* Multi-plan formulation of hydropower generation considering uncertainty of wind power. *Applied Energy*, 2020, 260: 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114239>
- [65] ZHANG, Z., QIN, H., LI, J., *et al.* Short-term optimal operation of wind-solar-hydro hybrid system considering uncertainties. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112405>
- [66] LIU, Z., ZHANG, Z., ZHUO, R., *et al.* Optimal operation of independent regional power grid with multiple wind-solar-hydro-battery power. *Applied Energy*, 2019, 235: 1541-1550. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.072>
- [67] BIRD, L., LEW, D., MILLIGAN, M., *et al.* Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082>
- [68] HUANG, K., LIU, P., MING, B., *et al.* Economic operation of a wind-solar-hydro complementary system considering risks of output shortage, power curtailment and spilled water. *Applied Energy*, 2021, 290: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116805>
- [69] TANG, N., ZHANG, Y., NIU, Y., *et al.* Solar energy curtailment in China: Status quo, reasons and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 97: 509-528. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.021>
- [70] PINTO, M. S. S., MIRANDA, V. and SAAVEDRA, O. R. Risk and unit commitment decisions in scenarios of wind power uncertainty. *Renewable Energy*, 2016, 97: 550-558. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.037>
- [71] PEI, W., CHEN, Y., SHENG, K., *et al.* Temporal-spatial analysis and improvement measures of Chinese power system for wind power curtailment problem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 148-168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.106>
- [72] LIU, G., ZHOU, J., YANG, Y., *et al.* Risks analysis of discarding water in power generation process of hydropower station. *IEEE Access*, 2020, 8: 132703-132720. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931939>
- [73] COLLINS, S. L., BELNAP, J., GRIMM, N. B., *et al.* A multiscale, hierarchical model of pulse dynamics in arid-land ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2014, 45: 397-419. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091650>
- [74] NIU, Y., LI, Y., WANG, M., *et al.* Variations in seasonal and inter-annual carbon fluxes in a semi-arid sandy maize cropland ecosystem in China's Horqin Sandy Land. *Environmental Science and Pollution Research*, Media Deutschland GmbH, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15751-z>
- [75] ROCKSTRÖM, J., FALKENMARK, M. Semiarid crop production from a hydrological perspective: Gap between potential and actual yields. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2000, 19(4): 319-346. <https://doi.org/10.1080/07352680091139259>
- [76] EDENHOFER, O. *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [77] OERTEL, C., MATSCHULLAT, J., ZURBA, K., *et al.* Greenhouse gas emissions from soils: A review. *Chemie der Erde*, 2016, 76(3): 327-352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- [78] SAINJU, U. M., STEVENS, W. B., CAESAR-TONTHAT, T., *et al.* Soil greenhouse gas emissions affected by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6): 1774-1786. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0176>
- [79] KENNEDY, T. L., SUDDICK, E. C. and SIX, J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 170: 16-27.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.002>

- [80] MARIS, S. C., TEIRA-ESMATGES, M. R., ARBONÉS, A., *et al.* Effect of irrigation, nitrogen application, and a nitrification inhibitor on nitrous oxide, carbon dioxide and methane emissions from an olive (*Olea europaea* L.) orchard. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 966-978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.040>
- [81] FRANCO-LUESMA, S., ÁLVARO-FUENTES, J., PLAZA-BONILLA, D., *et al.* Influence of irrigation time and frequency on greenhouse gas emissions in a solid-set sprinkler-irrigated maize under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.042>
- [82] RODRÍGUEZ, D. Á., MARTÍN, L. S., TORRES, L. G., *et al.* Management of irrigation frequency and nitrogen fertilization to mitigate GHG and NO emissions from drip-fertigated crops. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 880-888. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.065>
- [83] MARIS, S. C., TEIRA-ESMATGES, M. R. and CATALÀ, M. M. Influence of irrigation frequency on greenhouse gases emission from a paddy soil. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14(1): 199-210. <https://doi.org/10.1007/s10333-015-0490-2>
- [84] PIAO, S., WANG, X., PARK, T., *et al.* Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x>
- [85] ZHANG, D., ZUO, X. and ZANG, C. Assessment of future potential carbon sequestration and water consumption in the construction area of the Three-North Shelterbelt Programme in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108377>
- [86] CHEN, L., GONG, J., FU, B., *et al.* Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China. *Ecological Research*, 2007, 22(4): 641-648. <https://doi.org/10.1007/s11284-006-0065-1>
- [87] MCVICAR, T. R., VAN NIEL, T. G., LI, L. T., *et al.* Parsimoniously modeling perennial vegetation suitability and identifying priority areas to support China's re-vegetation program in the Loess Plateau: Matching model complexity to data availability. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1277-1290. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.002>
- [88] HARRADINE, F., JENNY, H. Influence of parent material and climate on texture and nitrogen and carbon contents of virgin California soils: I. Texture and nitrogen contents of soils. *Soil Science*, 1958, 85(5): 235-243. <https://doi.org/10.1097/00010694-195805000-00001>
- [89] WU, J., GUO, W., FENG, J., *et al.* Greenhouse gas emissions from cotton field under different irrigation methods and fertilization regimes in arid northwestern China. *Scientific World Journal*, 2014, 2014: 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/407832>
- [90] SCHEER, C., GRACE, P. R., ROWLINGS, D. W., *et al.* Nitrous oxide emissions from irrigated wheat in Australia: Impact of irrigation management. *Plant and Soil*, 2012, 359(1-2): 351-362. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1197-4>
- [91] GOODRICK, I., CONNOR, S., BIRD, M. I., *et al.* Emission of CO₂ from tropical riparian forest soil is controlled by soil temperature, soil water content and depth to water table. *Soil Research*, 2016, 54(3): 311-320. <https://doi.org/10.1071/SR15040>
- [92] BRUMME, R., BORKEN, W. Site variation in methane oxidation as affected by atmospheric deposition and type of temperate forest ecosystem. *Soil Science*, 1999, 13(2): 493-501. <https://doi.org/10.1029/1998GB900017>
- [93] KOH, H. S., OCHS, C. A. and YU, K. Hydrologic gradient and vegetation controls on CH₄ and CO₂ fluxes in a spring-fed forested wetland. *Hydrobiologia*, 2009, 630(1): 271-286. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9821-x>
- [94] GREEN, J. K., SENEVIRATNE, S. I., BERG, A. M., *et al.* Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. *Nature*, 2019, 565(7740): 476-479. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0848-x>
- [95] LI, Y., PIAO, S., LI, L. Z. X., *et al.* Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): 1-10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar4182>
- [96] ZANGVIL, A., PORTIS, D. H. and LAMB, P. J. Investigation of the large-scale atmospheric moisture field over the midwestern United States in relation to summer precipitation. Part II: Recycling of local evapotranspiration and association with soil moisture and crop yields. *Journal of Climate*, 2004, 17(17): 3283-3301. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3283:IOTLAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3283:IOTLAM>2.0.CO;2)
- [97] 张力小, 宋豫秦. 三北防护林体系工程政策有效性评析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(4): 594-600. ZHANG Lixiao, SONG Yuqin. Efficiency of the three-north forest shelterbelt program. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(4): 594-600. (in Chinese)
- [98] 王彦辉, 于澎涛, 张淑兰, 等. 黄土高原和六盘山区森林面积增加对产水量的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 15-26. WANG Yanhui, YU Pengtao, ZHANG Shulan, *et al.* Effects of forest area increase on water yield on the Loess Plateau and Liupan Mountains region of Northwest China. *Forest Research*, 2018, 31(1): 15-26. (in Chinese)
- [99] WANG, Y., XIONG, W., GAMPE, S., *et al.* A water yield-oriented practical approach for multifunctional forest management and its application in dry land regions of China. *Journal of the American Water Resources Association*, 2015, 51(3): 689-703. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12314>
- [100] GIORDANO, M. Global groundwater? Issues and solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34(1): 153-178. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.030308.100251>

- [101] SIEBERT, S., BURKE, J., FAURES, J. M., *et al.* Groundwater use for irrigation: A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(10): 1863-1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- [102] SHEN, Y., ZHANG, Y., SCANLON, B. R., *et al.* Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 181: 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.07.013>
- [103] CONNOR, S., NELSON, P. N., ARMOUR, J. D., *et al.* Hydrology of a forested riparian zone in an agricultural landscape of the humid tropics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 180: 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.006>
- [104] LOHEIDE, S. P., BUTLER, J. J. and GORELICK, S. M. Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: A saturated-unsaturated flow assessment. *Water Resources Research*, 2005, 41(7): 1-14. <https://doi.org/10.1029/2005WR003942>
- [105] SMITH, P. Land use change and soil organic carbon dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81(2): 169-178. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9138-y>
- [106] YU, K., FAULKNER, S. P. and BALDWIN, M. J. Effect of hydrological conditions on nitrous oxide, methane, and carbon dioxide dynamics in a bottomland hardwood forest and its implication for soil carbon sequestration. *Global Change Biology*, 2008, 14(4): 798-812. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01545.x>
- [107] TSAI, Y. W., LIN, J. Y. and CHEN, Y. C. Establishment of the watershed health indicators and health check of reservoirs. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107779>
- [108] 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. SUN Zhiyu, CHEN Yongbo, LI Chong, *et al.* Research of reservoir greenhouse gas emissions in China (2009-2019): Review and outlook. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(3): 253-267. (in Chinese)
- [109] 汪溪远. 长江流域温室气体排放与气候变化响应及脆弱性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2016. WANG Xiyuan. Greenhouse gas emissions, responses and vulnerability to climate change in the Yangtze River Basin. Doctoral Dissertation, Wuhan: Wuhan University, 2016. (in Chinese)
- [110] EVTIMOVA, V. V., DONOHUE, I. Water-level fluctuations regulate the structure and functioning of natural lakes. *Freshwater Biology*, 2016, 61(2): 251-264. <https://doi.org/10.1111/fwb.12699>
- [111] 李姗泽, 邓玥, 施凤宁, 等. 水库消落带研究进展[J]. *湿地科学*, 2019, 17(6): 689-696. LI Shanze, DENG Yue, SHI Fengning, *et al.* Research progress on water-level-fluctuation zones of reservoirs: A Review. *Wetland Science*, 2019, 17(6): 689-696. (in Chinese)
- [112] LI, Z., ZHANG, Z., LIN, C., *et al.* Soil-air greenhouse gas fluxes influenced by farming practices in reservoir drawdown area: A case at the Three Gorges Reservoir in China. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.080>
- [113] JUUTINEN, S., ALM, J., LARMOLA, T., *et al.* Major implication of the littoral zone for methane release from boreal lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1-28. <https://doi.org/10.1029/2003GB002105>
- [114] HOFMANN, H. Spatiotemporal distribution patterns of dissolved methane in lakes: How accurate are the current estimations of the diffusive flux path? *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(11): 2779-2784. <https://doi.org/10.1002/grl.50453>
- [115] MICHMERHUIZEN, C. M., STRIEGL, R. G. and MCDONALD, M. E. Potential methane emission from north-temperate lakes following ice melt. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(5): 985-991. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.5.0985>
- [116] BASTVIKEN, D., COLE, J., PACE, M., *et al.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(4): 1-12. <https://doi.org/10.1029/2004GB002238>
- [117] BEAULIEU, J. J., BALZ, D. A., BIRCHFIELD, M. K., *et al.* Effects of an experimental water-level drawdown on methane emissions from a Eutrophic Reservoir. *Ecosystems*, 2018, 21(4): 657-674. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0176-2>
- [118] MCGINNIS, D. F., GREINERT, J., ARTEMOV, Y., *et al.* Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C9): 1-15. <https://doi.org/10.1029/2005JC003183>
- [119] HARRISON, J. A., DEEMER, B. R., BIRCHFIELD, M. K., *et al.* Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(3): 1267-1277. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03185>
- [120] WOHLFAHRT, G., TOMELLERI, E. and HAMMERLE, A. The albedo-climate penalty of hydropower reservoirs. *Nature Energy*, 2021, 6(4): 372-377. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00784-y>
- [121] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [122] MAECK, A., HOFMANN, H. and LORKE, A. Pumping methane out of aquatic sediments-ebullition forcing mechanisms in an impounded river. *Biogeosciences*, 2014, 11(11): 2925-2938. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2925-2014>
- [123] ENCINAS FERNÁNDEZ, J., HOFMANN, H. and PEETERS, F. Diurnal pumped-storage operation minimizes methane ebullition fluxes from hydropower reservoirs. *Water Resources Research*, 2020, 56(12): 1-15.

<https://doi.org/10.1029/2020WR027221>

- [124] ENGLE, D., MELACK, J. M. Methane emissions from an Amazon Floodplain Lake: Enhanced release during episodic mixing and during falling water. *Biogeochemistry*, 2000, 51(1): 71-90. <https://doi.org/10.1023/A:1006389124823>