

罗琪,周研来,朱迪,等.面向温室气体管控的汉江中下游水工程群多目标优化调度[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(5):895-906. LUO Q, ZHOU Y L, ZHU D, et al. Multi-objective optimization operation of water projects in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin for greenhouse gas control[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 895-906. (in Chinese)

面向温室气体管控的汉江中下游水工程群 多目标优化调度

罗琪,周研来,朱迪,林凡奇,周颖,宁志昊

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,武汉 430072)

摘要:针对现有的水工程调度研究缺乏考虑温室气体管控目标,构建面向温室气体管控的水工程多目标优化调度模型。采用第二代非支配排序遗传算法(Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)高效求解调度模型,推求考虑温室气体管控、水华防控与发电调度目标的 Pareto 前沿解集,解析调度目标之间的协同与竞争关系,以汉江中下游 2017—2021 年枯水期的水华事件为实例开展相关研究。结果表明:温室气体管控目标同水华防控、发电调度目标均呈现竞争关系;相比常规调度方案,优化调度方案可增加发电量 0.3 亿 kW·h(增幅 4.5%)、可减少温室气体净排放 CO₂ 当量 1.56 Gg(减幅 1.2%),协调方案的三目标效益均更优;协调方案可有效提升水工程综合效益。研究成果可为实现碳减排与河流水环境水生态保障调控提供技术支撑。

关键词:优化调度;温室气体;水工程;智能算法;汉江流域

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0087

全球温室气体排放加剧所导致的气候变化已经成为备受关注的全球环境问题^[1]。与化石能源相比,水电在过去常被认为是一种清洁能源,能减少温室气体的排放,直到 20 世纪 90 年代,有学者^[2]对水电的“清洁”属性提出质疑,揭开了水库温室气体效应研究的序幕。目前国内外关于水库温室气体效应研究的内容主要包括两个方面:监测温室气体通量并分析其时空特征、影响因素、排放途径^[3-5];开发模型并利用现有研究数据^[5]估计水库的温室气体排放量与碳埋藏量。现有的研究^[6]表明:水工程蓄水后将淹没土壤与植被,使其中的有机质被降解从而排放温室气体(如 CO₂、CH₄、N₂O),受水工程调度影响呈周期性淹没与裸露的消落带也是产生温室气体排放的“热点”^[7],而埋藏于水体沉积物中的有机碳可封存大气 CO₂ 以形成碳汇^[8]。水库温室气体的排放途径通常可分为库区水-气界面排放、消落带土-气界面排放、近岸浅水区气泡释放、过坝消气及坝下河段的释放^[9]。国内有关水库温室气体效应

的研究多聚焦于三峡水库,有研究^[10]结果表明库区水-气界面排放是三峡水库温室气体排放的主要途径,并且在水位消落期间,消落带土-气界面排放也较为显著,而近岸浅水区气泡释放、过坝消气及坝下河段的释放则未呈现出显著的高排放特征。

汉江流域是我国重要的供水水源地,流域内的人口、企业较多分布于汉江中下游地区,对该地区河流生态产生一定影响,如水华事件^[11]。水工程的科学调度可缓解水华发生以及降低温室气体排放量,以达到有效改善生态环境的目的,保障流域高质量发展。多目标优化调度研究是探究水工程最优调度运行方式的有效途径,然而现有的相关研究中考虑的生态指标大多为生态需水量、生态水位、生态流量改变度、鱼类生境、水华防控目标等^[12-15],缺乏考虑水库温室气体管控目标。

以汉江中下游为研究区域,综合考虑水力发电、水华防控与温室气体管控目标,建立水工程多目标优化调度模型,采用第二代非支配排序遗传算法

收稿日期:2023-04-28 修回日期:2023-09-04 网络出版时间:2023-09-27

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230925.1646.006

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200303)

作者简介:罗琪(2000—),女,湖南娄底人,主要从事水碳调度研究。E-mail: imluoqi@whu.edu.cn

通信作者:周研来(1985—),男,湖南娄底人,教授,博士生导师,主要从事水库调度、智慧水利等研究。E-mail: yanlai.zhou@whu.edu.cn

(NSGA-II)求解模型,解析多目标之间的协同竞争关系,并针对典型水华事件进行优化调度与常规调度的对比分析,探究汉江中下游水工程最优调度运行方式,为碳减排与河流水环境水生态保障调控提供技术支撑。

1 研究区域概况

1.1 研究区域及对象

汉江流经陕西省和湖北省,于武汉汇入长江,全长 1 577 km,流域面积约为 15.9 万 km²,多年平均径流量 577 亿 m³,为长江八大支流之一。流域内多年

平均年降水量 873 mm,多年平均气温 14 ℃。2020 年末,汉江流域内总人口约为 3 867.35 万人,国内生产总值约为 21 971.5 亿元。

研究区域为汉江中下游丹江口水利枢纽至汉口江段,其中水工程涉及干流的丹江口水库和支流的寺坪、三里坪和鸭河口水库,以及下游的王甫洲、新集、崔家营、雅口、碾盘山和兴隆 6 座航电枢纽(表 1),南水北调中线和引江济汉 2 座引调水工程(表 2)。基于水库、航电枢纽、水文站点和干支流的拓扑关系,将丹江口以下概化为 6 个用水区域,并设置 2 个水华防控断面,分别为沙洋站和仙桃站,见图 1。

表 1 汉江中下游主要水利枢纽特性

Tab. 1 Characteristics of the main water projects located in the middle and lower reaches of the Hanjiang River

项目	丹江口	寺坪	三里坪	鸭河口	王甫洲	新集	崔家营	雅口	碾盘山	兴隆
集水面积/万 km ²	9.520	0.220	0.650	0.300	9.590	10.320	13.060	13.310	14.030	14.430
正常蓄水位/m	170	315	416	179.500	88	78	64.500	57	52.500	38
死水位/m	145	294	392	160	87.250	77.700	64	56.500	52.100	—
总库容/亿 m ³	290.500	2.690	4.720	13.390	3.095	4.050	2.450	4.070	9.020	4.850
死库容/亿 m ³	126.900~100	1.020	2.620	1.800	1.215	2.938	1.820	3.090	7.940	—
调节库容/亿 m ³	98.200~190.500	1.620	2.110	10.400	0.280	0.234	0.400	0.410	0.830	—
装机容量/MW	900	60	70	12.800	109	110	90	74.200	180	40
年发电量/(亿kW·h)	33.780	1.720	1.843	0.350	5.810/4.250	4.940	3.898	3.430	5.700	2.250
工程任务	防洪、供水、灌溉、发电、航运	发电	防洪、发电	防洪、灌溉	发电、航运	发电、航运	航运、发电	航运、发电	发电、航运	灌溉、航运
实施情况	建成	建成	建成	建成	建成	在建	建成	在建	在建	建成

表 2 汉江中下游主要引调水工程

Tab. 2 Main water transfer and diversion projects in the middle and lower reaches of the Hanjiang River

项目	南水北调中线工程	引江济汉工程	鄂北水资源配置工程
多年平均调水量/亿 m ³	95 (一期)	37 (补汉江水量 31 亿 m ³)	7.7
渠首引水规模/(m ³ ·s ⁻¹)	350~420	350~500	38
实施情况	建成	建成	在建

1.2 数据资料

收集了 2017—2021 年枯水期 2 月 1 日至 4 月 30 日汉江中下游丹江口水库至汉口段的各水库日时段入库流量数据,根据《汉江干流综合规划报告》计算了 6 个用水区的需水量。依据水质监测资料,按照《地表水环境质量标准》^[16]和《污水综合排放标准》^[17]评定水质标准可知,丹江口出库流量水质为

Ⅱ类,其他水库出库流量和引江济汉工程的水质为Ⅲ类,用水区退水为一级标准^[18]。水华防控相关指标的阈值范围见表 3^[18]。温室气体排放通量和有机碳埋藏率见表 4。根据丰、平、枯来水特性^[12],对各水库设置相应的初始水位值(见表 5),水位值均满足水库水位约束。

2 模型方法

建立面向温室气体管控的水工程多目标优化调度模型,采用非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)求解,推求多目标 Pareto 前沿解,以解析调度目标的协同与竞争关系。模型求解流程描述如下:

模型构建。以温室气体净排放量、水华指标超标数对数和以及水工程发电量为调度目标函数,构建面向温室气体管控的水工程多目标优化调度模型。

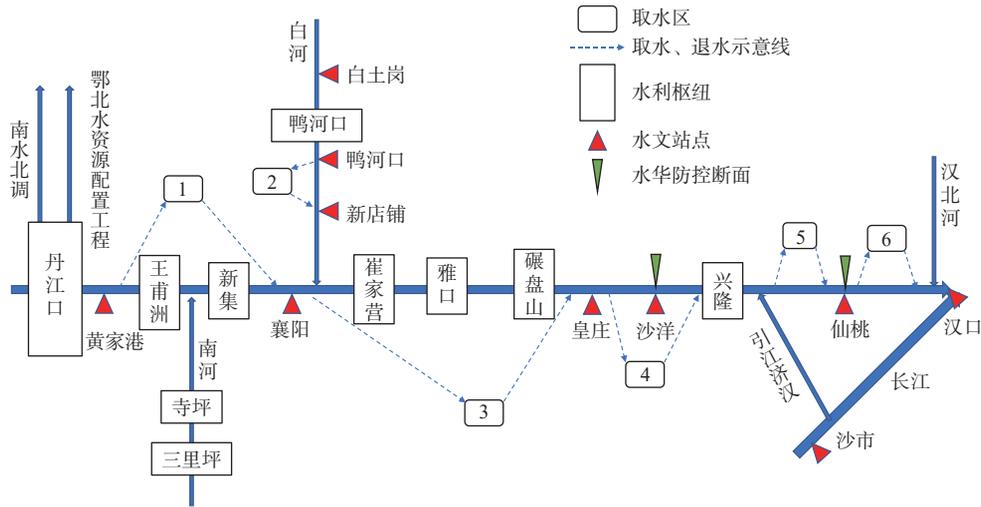


图1 汉江中下游水资源系统概化图

Fig. 1 Schematic diagram of water resource system in the middle and lower reaches of the Hanjiang River

表3 水华防控相关指标阈值范围

Tab. 3 Threshold ranges of the relative indexes of algal bloom prevention

指标	阈值范围
断面TN平均质量浓度/(mg·L ⁻¹)	≤1.00
断面TP平均质量浓度/(mg·L ⁻¹)	≤0.07
沙洋断面流量/(m ³ ·s ⁻¹)	≥850
仙桃断面流量/(m ³ ·s ⁻¹)	≥800

表4 温室气体排放通量与有机碳埋藏率

Tab. 4 Greenhouse gas emission flux and organic carbon burial rate

温室气体排放通量 /(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	水-气界面 (水面)	CO ₂	1 154	文献[21]
		CH ₄	4.140	文献[20]
土-气界面 (消落带)	N ₂ O	0.107	文献[24]	
	CO ₂	1 805	文献[23]	
有机碳埋藏率 /(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	水底埋藏	115	文献[7]	
	消落带埋藏	97	文献[25]	

表5 各水库初始水位

Tab. 5 The initial water level of each reservoir

单位: m

年份(来水频率)	2017(42%)平水年	2018(65%)枯水年	2019(72%)枯水年	2020(44%)平水年	2021(27%)丰水年
丹江口水库初始水位	167	164.3	163	167	170
寺坪水库初始水位	312	310	308	312	315
三里坪水库初始水位	413	410	408	413	416
鸭河口水库初始水位	178.5	178	176	178.5	179.5

算法求解。决策变量为丹江口、寺坪、三里坪和鸭河口4座水库的时段末库水位以及引江济汉工程的引水流量,南水北调中线工程的调水流量取设计流量值350 m³/s,模型采用NSGA-II算法进行求解并推求多目标Pareto解集。

对比分析。选择多组优化调度方案,与常规调度方案进行对比,分析多目标优化调度的综合效益,解析调度目标间的协同竞争关系。

2.1 目标函数

温室气体管控目标函数,调度期内,水库多年平均温室气体净排放CO₂当量最小。温室气体净排

放量的狭义定义为温室气体排放量与有机碳埋藏量的差值^[19],考虑到近岸浅水区气泡释放、过坝消气及坝下河段释放的监测数据匮乏,且排放量占比相对较低,故本研究温室气体排放途径仅考虑水库库区水-气界面排放和消落带土-气界面排放,这两种途径的温室气体排放量均为界面面积与相应温室气体排放通量之乘积,总的温室气体排放量为两种排放途径排放量之和。有机碳埋藏途径分为库区水底埋藏与消落带埋藏,这两种途径的有机碳埋藏量均为面积与相应有机碳埋藏率之乘积。总的有机碳埋藏量为两种途径埋藏量之和,温室气体排

放通量与有机碳埋藏率见表 4。

$$\begin{cases} f_1 = \min \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T F_i(j,t) \\ F_i(j,t) = M_{CO_2,i}(j,t) + \lambda_M \cdot M_{CH_4,i}(j,t) + \\ \lambda_N \cdot M_{N_2O,i}(j,t) - M_{burC,i}(j,t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_i(j,t)$ 为第 i 水工程第 j 年 t 时段的温室气体净排放 CO_2 当量, mg ; $M_{CO_2,i}(j,t)$ 、 $M_{CH_4,i}(j,t)$ 、 $M_{N_2O,i}(j,t)$ 分别为第 i 水工程第 j 年 t 时段所排放的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的质量, mg ; $M_{burC,i}(j,t)$ 为第 i 水工程第 j 年 t 时段有机碳埋藏质量, mg ; λ_M 、 λ_N 分别为 100 年尺度上 CH_4 、 N_2O 的全球变暖潜能系数^[19]; T 为各年份份总的计算时段数; N 为水工程数量; J 为计算年数。

$$\begin{cases} M_{CO_2,i}(j,t) = C_{CO_2,i}(j,t)m_{CO_2}/m_C \\ M_{CH_4,i}(j,t) = C_{CH_4,i}(j,t)m_{CH_4}/m_C \\ M_{N_2O,i}(j,t) = N_{N_2O,i}(j,t)m_{N_2O}/2m_N \\ M_{burC,i}(j,t) = C_{bur,i}(j,t)m_{CO_2}/m_C \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_{CO_2,i}(j,t)$ 、 $C_{CH_4,i}(j,t)$ 、 $N_{N_2O,i}(j,t)$ 分别为第 i 水工程第 j 年 t 时段所排放的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 包含的 C 和 N 元素的质量, mg ; $C_{bur,i}(j,t)$ 为第 i 水工程第 j 年 t 时段有机碳埋藏所包含的 C 元素质量, mg ; m_C 、 m_N 分别为 C 和 N 元素的相对原子质量; m_{CO_2} 、 m_{CH_4} 、 m_{N_2O} 分别为 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的相对分子质量。

$$\begin{cases} C_{CO_2,i}(j,t) = A_{surf,i}(j,t)r_{s,CO_2} + A_{draw,i}(j,t)r_{d,CO_2} \\ C_{CH_4,i}(j,t) = A_{surf,i}(j,t)r_{s,CH_4} + A_{draw,i}(j,t)r_{d,CH_4} \\ N_{N_2O,i}(j,t) = A_{surf,i}(j,t)r_{s,N_2O} + A_{draw,i}(j,t)r_{d,N_2O} \\ C_{bur,i}(j,t) = A_{surf,i}(j,t)r_{s,bur} + A_{draw,i}(j,t)r_{d,bur} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_{draw,i}(j,t) = A_{max,i} - A_{surf,i}(j,t) \\ A_{surf,i}(j,t) = f_{Z-A}(Z_i(j,t)) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_{surf,i}(j,t)$ 、 $A_{draw,i}(j,t)$ 分别为第 i 水工程第 j 年 t 时段的水面面积和消落带面积, m^2 ; r_{s,CO_2} 、 r_{s,CH_4} 和 r_{d,CO_2} 、 r_{d,CH_4} 分别为水面的 CO_2 、 CH_4 和消落带的 CO_2 、 CH_4 排放通量^[20-23], $mg/(m^2 \cdot d)$; r_{s,N_2O} 和 r_{d,N_2O} 分别为水面和消落带的 N_2O 排放通量^[24], $mg/(m^2 \cdot d)$; $r_{s,bur}$ 、 $r_{d,bur}$ 分别为水底、消落带的有机碳埋藏率^[7,25], $mg/(m^2 \cdot d)$; $A_{max,i}$ 为第 i 水工程的最大水面面积, m^2 , 以水位达到正常蓄水位时的水面面积表示; $f_{Z-A}(Z_i(j,t))$ 为水工程的水位-面积曲线, 当第 i 水工程第 j 年 t 时段的水位为 $Z_i(j,t)$ 时, 可由该曲线查得水面面积大小。

水华防控目标函数。以水华防控相关指标超标数的对数和最小来表示, 以表征水华防控断面的相关指标超出阈值范围的数量最少。考虑到氮、磷(水质指标)是藻类生长的物质基础, 其质量浓度超过某一阈值易诱生水华, 而河道流量(水动力指标)小

于某一阈值时, 易发生水华^[18], 故本文选择水华防控断面的总氮(TN)、总磷(TP)质量浓度以及最小流量作为水华防控指标。

$$f_2 = \min \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \ln(\varphi[Y_{l,m}(j,t) - Y_{l,m}^*] + 1) \quad (5)$$

式中: $Y_{l,m}(j,t)$ 表示第 j 年 t 时段第 l 个断面第 m 种指标的数值; $Y_{l,m}^*$ 表示第 l 个断面第 m 种指标水华发生的阈值; L 为水华防控断面数; M 为水质指标种类数; $\varphi(*)$ 表示阶跃函数, 定义如下所示。

对于正向指标, 即指标数值越高, 水华发生概率越低, 主要包括最小流量等指标:

$$\varphi[Y_{l,m}(j,t) - Y_{l,m}^*] = \begin{cases} 0 & Y_{l,m}(j,t) \geq Y_{l,m}^* \\ 1 & Y_{l,m}(j,t) < Y_{l,m}^* \end{cases} \quad (6)$$

对于负向指标, 即指标数值越高, 水华发生概率越高, 主要包括 TN、TP 质量浓度等指标:

$$\varphi[Y_{l,m}(j,t) - Y_{l,m}^*] = \begin{cases} 0 & Y_{l,m}(j,t) < Y_{l,m}^* \\ 1 & Y_{l,m}(j,t) \geq Y_{l,m}^* \end{cases} \quad (7)$$

发电目标函数。调度期内, 汉江中下游丹江口、寺坪、三里坪和鸭河口 4 座水电站与王甫洲、新集、崔家营、雅口、碾盘山和兴隆 6 座航电枢纽(表 1)的多年平均发电量最大。

$$f_3 = \max \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T k_i Q_{fd,i}(j,t) H_i(j,t) \Delta t \quad (8)$$

式中: k_i 表示第 i 个水电站(或航电枢纽)出力系数; $Q_{fd,i}(j,t)$ 表示第 i 水电站第 j 年 t 时段的发电流量, m^3/s ; $H_i(j,t)$ 表示第 i 水电站第 j 年 t 时段的发电水头, m ; Δt 表示调度计算时长, s 。

2.2 约束条件

水工程水量平衡约束, 表达式为

$$V_i(j,t+1) = V_i(j,t) - V_{i,loss}(j,t) + [I_i(j,t) - O_i(j,t)] \Delta t \quad (9)$$

式中: $V_i(j,t)$ 表示水工程水量, m^3 ; $V_{i,loss}(j,t)$ 表示水工程水量损失, m^3 ; $I_i(j,t)$ 表示水工程入流量, m^3/s ; $O_i(j,t)$ 表示水工程出流量, m^3/s 。对于丹江口水库, 需要考虑南水北调中线工程等调水约束, 表示为

$$V_d(j,t+1) = V_d(j,t) - V_{d,loss}(j,t) + [I_d(j,t) - O_d(j,t) - W_{ds}(j,t)] \Delta t \quad (10)$$

式中: $V_d(j,t)$ 表示丹江口水库的库容, m^3 ; $V_{d,loss}(j,t)$ 表示丹江口水库的水量损失, m^3 ; $I_d(j,t)$ 表示丹江口水库的入库流量, m^3/s ; $O_d(j,t)$ 表示丹江口水库的出库流量, m^3/s ; $W_{ds}(j,t)$ 表示丹江口水库的调水量, m^3/s 。

水工程水位限制约束, 表达式为

$$Z_{i,min}(j,t) \leq Z_i(j,t) \leq Z_{i,max}(j,t) \quad (11)$$

式中: $Z_i(j,t)$ 表示水工程水位, m; $Z_{i, \min}(j,t)$ 和 $Z_{i, \max}(j,t)$ 分别表示水工程水位下限和上限值, m。

水电站出力限制约束, 表达式为

$$\begin{cases} P_{i, \min}(j,t) \leq P_i(j,t) \leq P_{i, \max}(j,t) \\ P_i(j,t) = k_i Q_{fd,i}(j,t) H_i(j,t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_i(j,t)$ 表示水电站出力, kW; $P_{i, \min}(j,t)$ 和 $P_{i, \max}(j,t)$ 分别表示水电站出力下限和出力上限, kW, 综合考虑机组额定出力、受阻容量及调峰要求等确定。

水工程出流限制约束综合考虑生态、航运等因素确定, 表达式为

$$O_{i, \min}(j,t) \leq O_i(j,t) \leq O_{i, \max}(j,t) \quad (13)$$

式中: $O_{i, \max}(j,t)$ 为水工程出流量允许的最大值, m^3/s ; $O_{i, \min}(j,t)$ 为水工程出流量允许的最小值, m^3/s 。

水工程初始水位约束, 表达式为

$$Z_i(1) = Z_{i, \text{start}} \quad (14)$$

式中: $Z_{i, \text{start}}$ 表示水工程调度期初的水位值, m。

引江济汉工程的补水量约束, 表达式为

$$W_{bs}(j,t) \leq W_b(j,t) \quad (15)$$

式中: $W_{bs}(j,t)$ 表示引江济汉工程兴隆断面补水流量, m^3/s ; $W_b(j,t)$ 表示引江济汉工程的补水流量上限, m^3/s 。

航电枢纽约束。王甫洲等 6 座航电枢纽主要发挥航运和发电功能, 调节能力较小, 此类水工程按其常规调度规程进行模拟调度, 其航电枢纽约束表达式为

$$O_{hd,k}(j,t) = \psi_{hd,k} [I_{hd,k}(j,t), Z_{hd,k}(j,t)] \quad (16)$$

式中: $O_{hd,k}(j,t)$, $I_{hd,k}(j,t)$ 分别表示第 k 个航电枢纽的出流、入流量, m^3/s ; $Z_{hd,k}(j,t)$ 表示第 k 个航电枢纽的水位, m; $\psi_{hd,k}(\cdot)$ 表示第 k 个航电枢纽的常规调度规程。

2.3 模型其他部分

取水、用水和汇水节点水量计算以及断面水质指标质量浓度计算公式如下:

取水节点水量计算:

$$\begin{cases} R_\sigma(j,t) = Q_{sy,\sigma}(j,t) + Q_{qj,\sigma}(j,t) - W_{qu,\sigma}(j,t) \\ W_{qu,\sigma}(j,t) = \min\{W_{xu,\sigma}(j,t), W_{kg,\sigma}(j,t)\} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $R_\sigma(j,t)$ 表示取水后河道内流量, m^3/s ; $Q_{sy,\sigma}(j,t)$ 和 $Q_{qj,\sigma}(j,t)$ 分别表示上游来水和区间入流量, m^3/s ; $W_{qu,\sigma}(j,t)$ 表示取水流量, m^3/s ; $W_{xu,\sigma}(j,t)$ 表示需水流量, m^3/s ; $W_{kg,\sigma}(j,t)$ 表示河道可供水流量, m^3/s ; σ 表示用水区编号。

用水节点水量计算:

$$W_{wi,\sigma}(j,t) = (1 - \alpha) W_{qu,\sigma}(j,t) \quad (18)$$

式中: $W_{wi,\sigma}(j,t)$ 表示退水流量, m^3/s ; α 表示汉江流域

平均耗水率^[18]。

汇水节点水量计算:

$$Q_{h,\sigma}(j,t) = R_\sigma(j,t) + W_{wi,\sigma}(j,t) \quad (19)$$

式中: $Q_{h,\sigma}(j,t)$ 表示汇水节点流量, m^3/s 。

水质指标初始质量浓度计算:

$$\begin{cases} C_{i,n}(j,t) = C_{i,n, \text{start}} \\ C_{\sigma,n}(j,t) = C_{\sigma,n, \text{start}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $C_{i,n}(j,t)$ 和 $C_{\sigma,n}(j,t)$ 分别表示水工程和用水区退水的第 n 种水质指标质量浓度, mg/L; $C_{i,n, \text{start}}$ 和 $C_{\sigma,n, \text{start}}$ 分别表示水工程和用水区退水的第 n 种水质指标的初始质量浓度, mg/L。

一维水质迁移转化方程:

采用一维水质迁移转化方程模拟用水区的污水排放及其上下游断面质量浓度的变化^[18]。

$$\begin{cases} C_{0,n} = \frac{C_{b,n}Q + C_{q,n}q}{Q + q} \\ C_{b,n} = C_{0,n}e^{-K_n t} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $C_{b,n}$ 和 $C_{q,n}$ 分别表示断面上游和断面排入污水的第 n 种水质指标质量浓度, mg/L; Q 和 q 分别表示断面上游和断面排入污水的流量, m^3/s ; $C_{0,n}$ 表示第 n 种水质指标的断面初始质量浓度, mg/L (水库出库流量的水质指标质量浓度依据假定的水质级别确定^[18]); K_n 表示第 n 种水质指标的降解系数^[18], d^{-1} ($\text{NH}_3\text{-N}$ 的降解系数为 $0.33 d^{-1}$, TP 的降解系数为 $0.06 d^{-1}$); t 为时间步长, 选为 $1 d$ 。

2.4 模型求解

针对多目标优化调度的求解, 越来越多的研究者采用进化优化算法^[26]。其中, 以 Deb 等^[27] 提出的带精英策略的快速非支配排序遗传算法 (Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) 最具代表性。该算法降低了非支配排序方法的计算复杂度, 具有运行速度快、解集的收敛性好等优点, 被广泛应用于水库多目标优化调度领域。因此, 本文采用 NSGA-II 算法求解上述模型。

2.4.1 决策变量和算法参数选择

为有效处理模型的复杂约束条件, 以时段末水库库水位、引江济汉补水流量序列作为决策变量 (5 个水工程), 即: $u = \{Z_1(1), Z_1(2), \dots, Z_1(T), \dots, Z_N(T), W_{bs}(1), W_{bs}(2), \dots, W_{bs}(T)\}$, 王甫洲、新集等日调节或无调节能力的水工程按常规调度规则进行模拟调度。

调度期为枯水期 2 月 1 日至 4 月 30 日, 调度年限为 2017—2021 年, 以日为调度时段, 调度时段共

有 446 个。考虑到决策变量为 2 230(446 时段×5 决策变量)个,数量较大,采用试误法(trial-and-error)调参,以取得收敛性结果。NSGA-II 算法的种群规模和最大迭代次数分别设置为 2 000 和 1 000,交叉和变异概率分别为 0.8 和 0.1,采用 MATLAB gamultiobj 工具箱进行优化调度计算。将 5 年的资料作为一个序列输入模型中,各水库初始水位值见表 5。在实例分析中采用 2018 年 2 月 13 日至 3 月 9 日的典型汉江水华事件期间的计算数据进行研究。

2.4.2 求解步骤

①输入水库入流与区间入流、水工程特征参数、下游用水区需水数据、水库水质、用水区退水水质、温室气体排放通量与埋藏率等资料。

②设置 NSGA-II 算法的相关参数,包括最大迭代次数 K 、交叉和变异的概率 p_1 和 p_2 、种群规模 N_p 等。

③令迭代次数 $k=1$,随机初始化父代种群 P_k ,按决策变量 u 和约束条件(9)~(21)模拟水工程调度过程,通过式(1)~(8)计算种群的适应度值,并按非支配关系排序,计算其拥挤度。

④采用选择、交叉、变异算子产生子种群 Q_k 。

⑤将父代种群与子代种群合并组成 R_k ,并进行非支配排序,产生非支配集并计算拥挤度,并生成新父种群 P_{k+1} 。

⑥通过选择、交叉和变异算子产生子种群 Q_{k+1} ,迭代次数 $k=k+1$ 。

⑦重复步骤⑤和⑥,直至迭代次数达到 K ,得到多目标非劣解集。

3 结果分析

3.1 多目标 Pareto 解集分析

图 2 给出了多目标 Pareto 解集与常规调度结果。由三维图[图 2(a)]可知,常规调度解明显偏离 Pareto 前沿曲面,它不属于非劣解,二维投影图可佐证[图 2(b)、(c)、(d)]。据二维投影图可知,发电目标与水华防控目标呈协同关系,发电量越大则水华指标超标数对数和越小,发电目标效益的提升也伴随着水华防控目标效益的提升[图 2(b)],这是因为发电量大则出库流量多,能增加下游水华防控断面的流量,以减小下游 TN、TP 的质量浓度,进而减小断面水华指标超标数;发电目标与温室气体管控目标呈竞争关系,发电量越大则温室气体净排放量

越大,发电目标效益的提升伴随着温室气体管控目标效益的减小[图 2(c)],这是因为出库流量的增加使得温室气体排放热区(消落带)的暴露面积增大,加之消落带 CO₂ 排放通量较大,进而会增加温室气体排放量;温室气体管控目标与水华防控目标呈竞争关系,温室气体净排放量越小则水华指标超标数对数和越大,温室气体管控目标效益的提升伴随着水华防控目标效益的减小[图 2(d)]。

3.2 典型调度方案分析

选择 2018 年 2 月 13 日至 3 月 9 日的典型汉江水华事件进行分析,分别选择温室气体管控目标最优方案(方案 A)、水华防控目标与发电目标协同最优方案(方案 B)以及 1 个协调方案(方案 C)作为优选方案(见图 2,图 2 方框内为协调方案集,协调方案下的 3 个目标函数值均优于常规调度方案,进一步以温室气体净排放量为指标找到其中位数,将其对应的解选定为协调方案 C),其温室气体管控、水华防控、发电指标与常规调度方案(方案 D)的对比结果见表 6。

从表 6 可知,温室气体净排放量最小方案(方案 A)下,温室气体净排放量较常规调度(方案 D)小,但发电量也有所降低(降幅为 22.3%),并且 2 个防控断面的水华防控指标也明显劣于常规调度,也就是说温室气体管控目标效益的提升伴随着其他 2 个目标效益的显著降低。发电与水华防控目标效益协同最优方案(方案 B)下,相比常规调度,其发电量增加了 4.5%,断面水华防控指标也更优,而温室气体净排放 CO₂ 当量增加了 11 万 kg。在协调方案(方案 C)下,3 个目标效益均优于常规调度方案,总发电量增幅为 2.2%,断面最小流量增幅可达 85.9%,断面 TN、TP 质量浓度降幅最大可达 14.3%,同时温室气体净排放 CO₂ 当量减少了 10 万 kg。

3.3 典型调度过程分析

以 2018 年 2 月 13 日至 3 月 9 日的汉江水华暴发事件为典型进行分析,由 3.2 节分析可知,相较于常规调度,协调方案 C 可同时实现温室气体管控、水华防控和发电调度 3 个目标的优化。故选择协调方案 C 与常规调度方案进行调度过程对比分析(图 3 和图 4),图 3 为常规调度方案与协调方案下各水库调度过程图,图 4 为常规调度方案与协调方案下沙洋、仙桃断面 TN、TP 质量浓度与流量变化过程图。

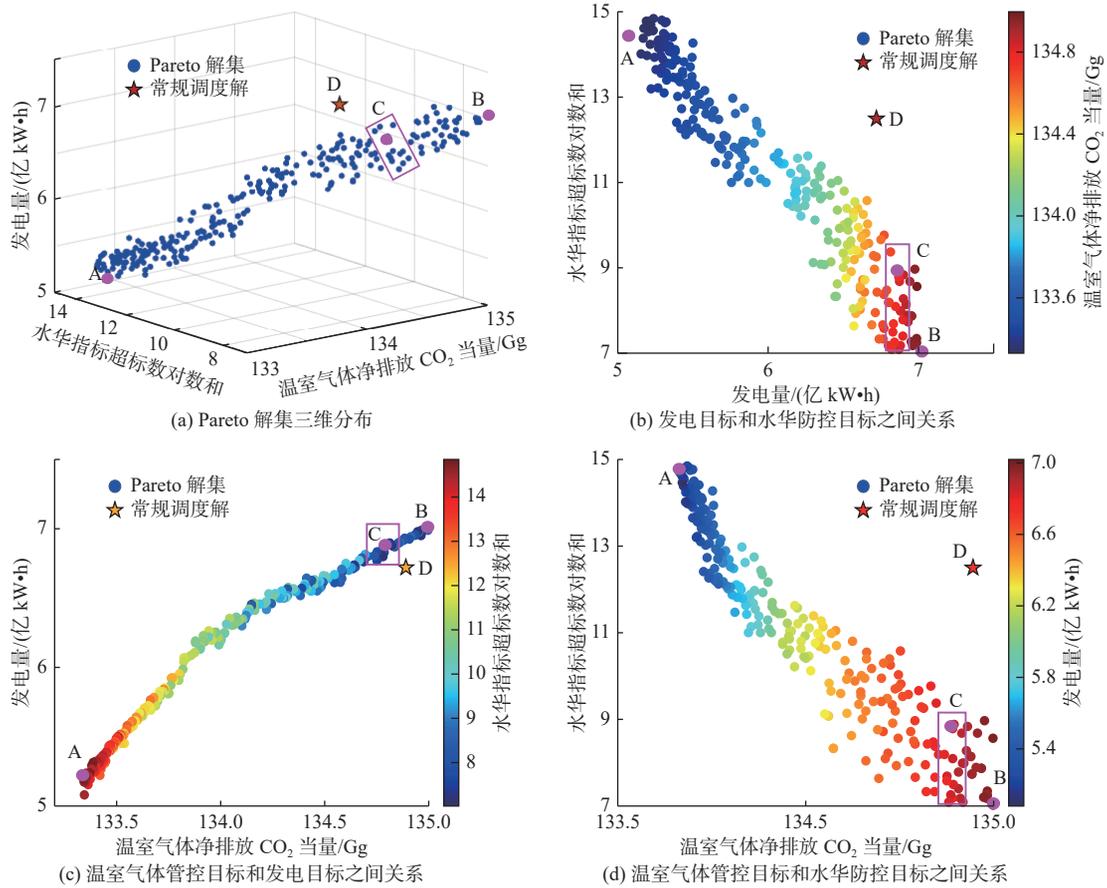


图2 多目标 Pareto 解集分布与常规调度解的对比

Fig. 2 Comparison between the Pareto solution set of multi-objectives and conventional operation solution

表6 各优化方案与常规调度指标对比

Tab. 6 Comparison of evaluation indicators between each optimal operation scheme and conventional operation scheme

目标类型	指标	优化方案		常规调度方案	
		A	B	C	D
水华防控目标	沙洋断面TN平均质量浓度/(mg·L ⁻¹)	4.94(230.6%)	1.40(-6%)	1.28(-14.3%)	1.49
	沙洋断面TP平均质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.27(192.8%)	0.09(-5.6%)	0.08(-13.2%)	0.09
	沙洋断面最小流量/(m ³ ·s ⁻¹)	20(-92.6%)	330(22.2%)	502(85.9%)	270
	仙桃断面TN平均质量浓度/(mg·L ⁻¹)	1.12(58.6%)	0.67(-5.2%)	0.65(-8%)	0.71
	仙桃断面TP平均质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.06(50%)	0.04(0%)	0.04(0%)	0.04
	仙桃断面最小流量/(m ³ ·s ⁻¹)	199(-58.5%)	591(23.4%)	710(48.2%)	479
温室气体管控目标	温室气体净排放CO ₂ 当量/Gg	133.33(-1.2%)	135(0.1%)	134.79(-0.1%)	134.89
发电目标	总发电量/(亿kW·h)	5.22(-22.3%)	7.02(4.5%)	6.87(2.2%)	6.72

注: 括弧中的数字为变化率,以常规调度方案(方案D)下各指标值为比较基准,计算方案A、B、C下各指标值的变化率。

从图3(a)可知,常规调度方案D下,丹江口水库的出库流量变化趋势与入库流量变化趋势一致,当入库流量大时出库流量也很大,当入库流量小时出库流量也很小,而协调方案C下丹江口水库的出

库流量变幅更小,并且其变化趋势不完全与入库流量一致,协调方案可尽可能使水库运行水位较高,这一点也可以从其他支流水库的调度过程图得到佐证。从图3(b)可知,丹江口水库在协调方案C与

常规调度方案 D 下的水位过程相差不大,但协调方案下库水位总体上高于常规调度方案,各时段的温室气体净排放量也较小,在其他支流水库中也有同样的发现 [图 3(d)、(f)、(h)],这是因为库水位较

高时,消落带暴露面积较小,温室气体排放量相应较小,可得知水库维持高水位运行将减少温室气体的排放量。总的来说,水库在枯水期可通过优化调度,维持高水位运行,以提升综合效益。

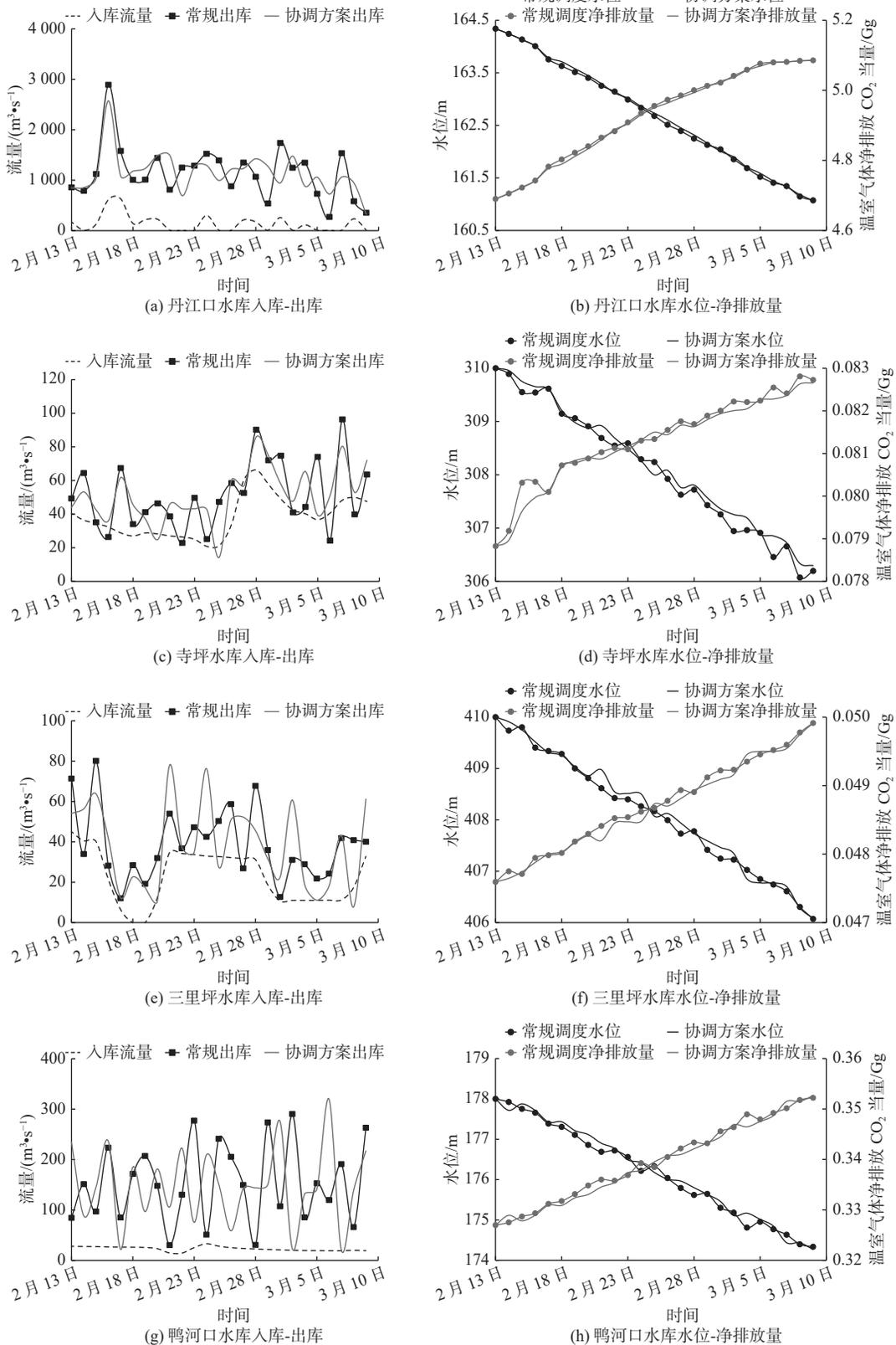


图 3 常规调度与协调方案下各水库调度过程

Fig. 3 Operation processes of the reservoirs under the conventional operation scheme and the compromised operation scheme

图4展示了两个水华防控断面的TN和TP的质量浓度变化过程以及流量变化过程。由图4可知,加大出库流量对断面TN和TP质量浓度起到了稀释作用,并且不同调度方案下2个断面的流量过程与相应的丹江口水库出库流量过程高度相似,经过对比发现协调方案下2个断面的流量变化更均匀,断面多时段TN和TP质量浓度较常规调度方案更小,这主要是因为丹江口水库的库容最大,其调节

流量也大,通过优化调度可以有效增加下游水华防控断面的流量,以减小断面TN和TP质量浓度,进而减小甚至消除水华发生的可能性。另外仙桃断面的流量整体上较沙洋断面的大,其断面TN和TP质量浓度也更小,这是因为仙桃断面位于引江济汉工程补水的下游,该工程的补水量对水华防控也能起到显著效果。

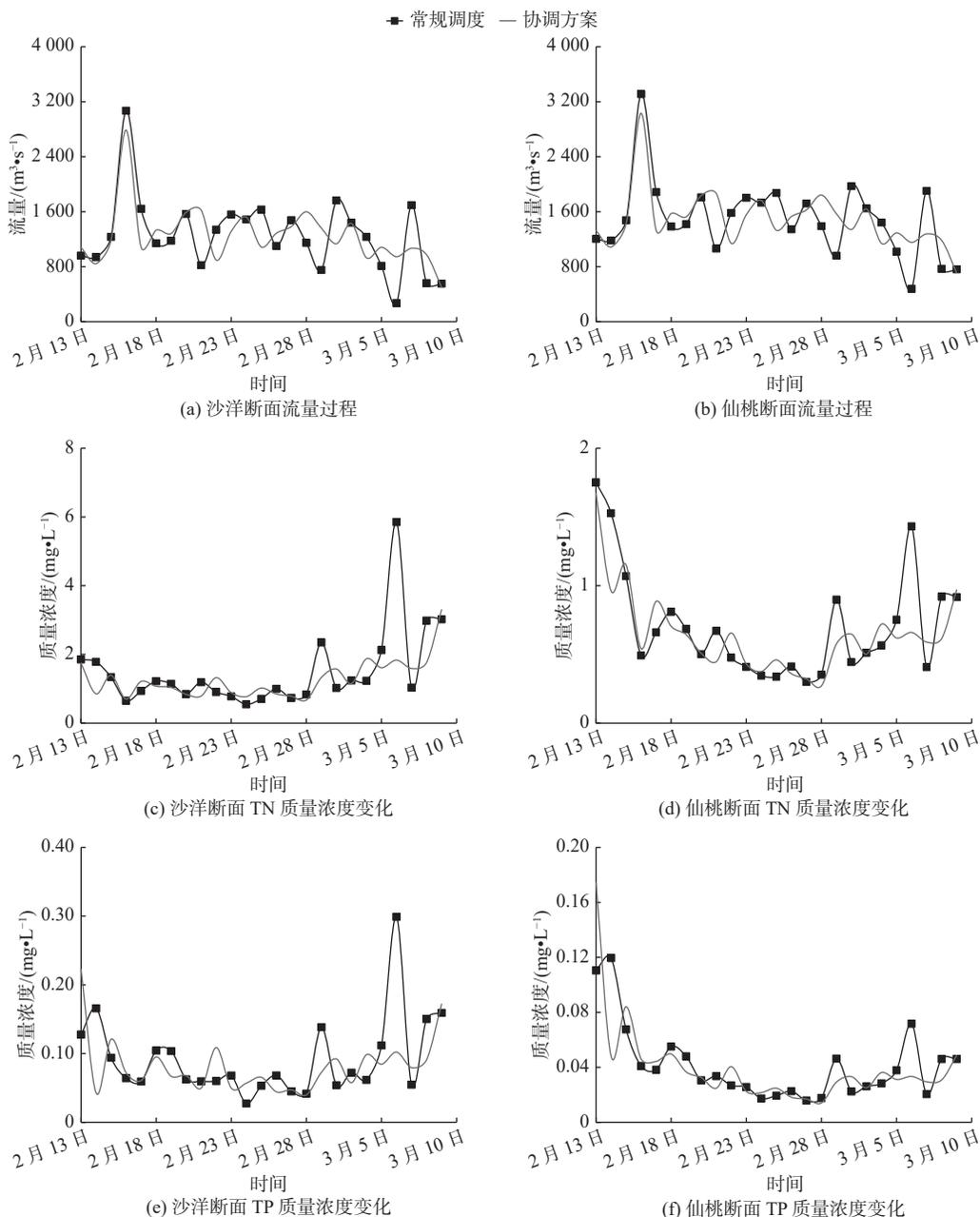


图4 常规调度与协调方案下沙洋、仙桃断面 TN、TP 质量浓度与流量变化过程

Fig. 4 Variation processes of TN and TP mass concentrations and water flow values of the Shayang and Xiantao stations under the conventional operation scheme and the compromised operation scheme

引江济汉工程流量的大小对长江干流取水口下游河道流量有一定影响,若引水流量较大会对下游洞庭湖三口断流现象产生一定程度的负面影响,

图5展示了常规调度方案和协调方案下引江济汉工程的引水流量过程,可以看出协调方案下各时段引水流量均小于常规调度方案,差值最大可达163 m³/s。

相较于常规调度方案,协调方案可以在减少引江济汉引水流量的基础上通过汉江流域水库群优化调度来达到水华防控的目的。

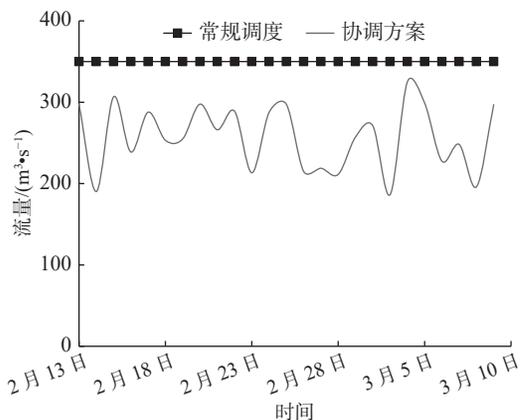


图 5 常规调度与协调方案下引江济汉工程引水流量变化过程

Fig. 5 Variation processes of water flow values of the Water Transfer Project from the Yangtze River to the Hanjiang River under the conventional operation scheme and the compromised operation scheme

4 结语

本文构建面向温室气体管控的水工程多目标优化调度模型,采用 NSGA-II 算法进行求解,解析调度目标的协同竞争关系,以汉江中下游 2017—2021 年枯水期的恶劣水华事件为实例开展相关研究,并选择 2018 年 2 月 13 日至 3 月 9 日的水华事件为典型进行方案对比分析,得出的主要结论如下:

发电目标和水华防控目标呈现协同关系,而温室气体管控目标与发电和水华防控目标均呈现竞争关系,前者效益的提升会引起后 2 个目标效益的显著降低。

与常规调度(方案 D)相比,温室气体净排放量最小方案(方案 A)下的温室气体净排放 CO₂ 当量减少了 1.56 Gg(降幅为 1.2%);发电和水华防控目标效益协同最优方案(方案 B)下水电站总发电量增加了 0.3 亿 kW·h(增幅为 4.5%);协调方案下(方案 C)的 3 个目标效益均优于常规调度,总发电量增加 0.15 亿 kW·h(增幅为 2.2%),温室气体净排放 CO₂ 当量减少了 10 万 kg,水华防控断面的相关指标也有明显的改善。

由常规调度与协调方案的调度过程分析比较可知,协调方案可通过优化调度使水库维持高水位运行,提升了综合效益。丹江口水库的出库流量对下游水华防控效果起主要作用,通过优化调度可以减

小甚至消除下游水华发生的可能性。

为了探究水工程科学调度方法,以达到改善流域生态环境的目的,构建的多目标优化调度模型以温室气体管控、水华防控和发电为目标,并以汉江中下游为研究区域开展实例研究,对比分析常规调度方案与优化调度方案之间的目标效益差异与调度过程差异,研究成果可为水工程多目标优化调度提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王红瑞, 李晓军, 张力, 等. 水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 13-21. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0002.
- [2] GRINHAM A, DUNBABIN M, GALE D, et al. Quantification of ebullitive and diffusive methane release to atmosphere from a water storage[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(39): 7166-7173. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.09.011.
- [3] 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20210715.
- [4] 杜琪琪, 李伯根, 蔡虹明, 等. 澜沧江梯级水库水化学特征及其对水-气界面 CO₂ 通量的影响[J]. *地球与环境*, 2023, 51(1): 36-46. DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2022.50.069.
- [5] 邓欧平, 唐祺超, 叶丽, 等. 川西平原小流域不同水体 N₂O 排放特征及驱动因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9305-9314. DOI: 10.5846/stxb202004291048.
- [6] 李雨晨, 秦宇, 杨柳, 等. 长江上游大中型水库碳排放量估算与分析: 以 IPCC 国家温室气体清单指南为基础[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(1): 131-145. DOI: 10.18307/2023.0108.
- [7] KELLER P S, MARCÉ R, OBRADOR B, et al. Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(6): 402-408. DOI: 10.1038/s41561-021-00734-z.
- [8] MENDONCA R, KOSTEN S, SOBEK S, et al. Organic carbon burial efficiency in a subtropical hydroelectric reservoir[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(11): 3331-3342. DOI: 10.5194/bg-13-3331-2016.
- [9] 张翎, 王远见, 夏星辉. 水库建成与运行对温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 298-

307. DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2021.0545](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2021.0545).
- [10] 李哲,杨柳,吴兴华,等. 三峡水库CO₂、CH₄通量监测分析研究[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 423-434. DOI: [10.18307/2023.0205](https://doi.org/10.18307/2023.0205).
- [11] 李建,尹炜,贾海燕,等. 汉江中下游水华防控生态调度研究[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(3): 740-751. DOI: [10.18307/2022.0304](https://doi.org/10.18307/2022.0304).
- [12] 王何予,田晶,郭生练,等. 考虑水文改变生态指标的丹江口水库多目标优化调度[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1041-1051. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0103](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0103).
- [13] 高志强,丁伟,唐榕,等. 耦合水文情势及鱼类需求的生态调度研究[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2018, 16(2): 14-20. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0033](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0033).
- [14] 岳浩,郑永路,徐斌,等. 洪泽湖多目标水量调度决策模型及其应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 258-266. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0026](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0026).
- [15] 杨翊辰,刘攀,王奕博,等. 基于长短期记忆模型的汉江中下游藻类防控调度[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 324-331. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0033](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0033).
- [16] GB 3838—2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社. 2002.
- [17] GB 8978—1996. 污水综合排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社. 1996.
- [18] 郭生练,田晶,杨光,等. 汉江流域水文模拟预报与水库水资源优化调度配置[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [19] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [20] CHEN H, YUAN X, CHEN Z, et al. Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116: D21306. DOI: [10.1029/2011JD016244](https://doi.org/10.1029/2011JD016244).
- [21] ZHAO Y, WU B F, ZENG Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10: 1219-1230. DOI: [10.5194/bg-10-1219-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-1219-2013).
- [22] YANG L, LU F, WANG X K, et al. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: D10109. DOI: [10.1029/2011JD017362](https://doi.org/10.1029/2011JD017362).
- [23] ZHOU S, HE Y, YUAN X, et al. Greenhouse gas emissions from different land-use areas in the Littoral Zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 316-324. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2017.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.003).
- [24] ZHU D, CHEN H, YUAN X, et al. Nitrous oxide emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 150-154. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2013.07.049](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.049).
- [25] DONG X H, ANDERSON N. J, YANG X D, et al. Carbon burial by shallow lakes on the Yangtze floodplain and its relevance to regional carbon sequestration[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2205-2217. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2012.02697.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02697.x).
- [26] ZHOU Y L, GUO S L, CHANG F J, et al. Boosting hydropower output of mega cascade reservoirs using an evolutionary algorithm with successive approximation[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1726-1739. DOI: [10.1016/j.apenergy.2018.07.078](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.078).
- [27] DEB K P A, AGARWAL S. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197. DOI: [10.1109/4235.996017](https://doi.org/10.1109/4235.996017).

Multi-objective optimization operation of water projects in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin for greenhouse gas control

LUO Qi, ZHOU Yanlai, ZHU Di, LIN Fanqi, ZHOU Ying, NING Zhihao

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the context of global climate change, greenhouse gas emissions from water projects are received increasing attention. The impoundment of water projects submerges soil and vegetation, causing the degradation of

the inner organic matter to produce greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) and discharge them into the atmosphere. The drawdown area which is repeatedly flooded and exposed affected by the regulation of water projects is also a "hot spot" for producing greenhouse gases, while the organic carbon buried in the sediment of water bodies can store atmospheric CO_2 thus forming carbon sinks in the short or long term. The assessment of greenhouse gas flux of water projects is a research hotspot, and the existing monitored data can be used for research.

The middle and lower reaches of the Hanjiang River are important ecological and economic zones, and the development of society has damaged the health of the rivers in this area, for example more than ten algal bloom outbreaks have occurred so far, which is not conducive to the high-quality development of the basin. A rational operation of water projects is beneficial for alleviating algal bloom outbreaks and reducing greenhouse gas emissions. In order to effectively improve the ecological environment and ensure high-quality development of the watershed, multi-objective optimization operation research is always carried out to explore the optimal operation mode of water projects. However, most of the existing researches focused on ecological indicators such as ecological water demand, ecological flow change degree, fish habitat, and algal bloom prevention and control, lacking the consideration of greenhouse gas emissions. In this case a multi-objective optimization model that comprehensively considered power generation, algal bloom prevention and control, and greenhouse gas emission control was established to explore the optimal operation mode of water projects.

To solve the multi-objective problems, more and more researchers are using evolutionary optimization algorithms, among which the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) with elite strategy is the most representative, which can reduce the computational complexity of non-dominated sorting methods, has advantages such as fast running speed and good convergence of solution sets, and has been widely used in the field of multi-objective optimization of reservoir operation. Therefore, the NSGA-II algorithm was used to solve the proposed model.

The results show that the objective of greenhouse gas emission control was in a competitive relationship with both the objective of power generation and algal bloom prevention and control. Compared with the conventional operation scheme, the optimal operation schemes can achieve improvement in some indicators. Among the three optimal operation schemes, the compromised scheme can achieve improvement of all the indicators, indicating the effectiveness of the proposed model. The analysis of the operation process during typical events reveals a close relationship between greenhouse gas emissions and water level fluctuations.

Using the established model, the net greenhouse gas emissions of water projects during the operation period were estimated, and an optimal operation scheme which can achieve better benefits compared to the conventional operation scheme was found. The results can provide technical support for achieving the optimal operation of water projects, reducing greenhouse gas emissions, and repairing the ecological environment of rivers.

Key words: optimal operation; greenhouse gas; water engineering; intelligent algorithm; Hanjiang River basin