

何立新, 高炳享, 夏浩顺, 等. 江苏省江水北调工程水量调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 896-908. HE L X, GAO B X, XIA H S, et al. Water quantity dispatch of Jiangsu Province's Water Diversion from the Yangtze River to the North[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 896-908. (in Chinese)

江苏省江水北调工程水量调度

何立新^{1,2}, 高炳享^{1,2}, 夏浩顺^{3,4}, 龙岩^{1,2}, 王超⁴, 何中政⁵

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 3. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 4. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 5. 南昌大学工程建设学院, 南昌 330031)

摘要: 江水北调工程以向江苏境内工农业及城乡生活供水为主, 同时保障改善洪泽湖、骆马湖生态, 但工程运行现状存在运行成本高、湖泊弃水量大等不足。为此, 采用模拟和优化技术相结合的方式, 以供水缺额最小、湖泊水位超限限制最小和泵站运行成本最低为优先级设定目标函数, 构建江水北调工程年水量调度优化模型, 开展不同水平年、不同补湖水位以及高水低用 3 种调度情景分析。结果表明: 骆马湖调蓄库容小, 调水运行期使得水位波动频繁, 中运河泵站会频繁开启补湖, 且容易达到输水能力上限; 适当降低洪泽湖补湖水位, 可充分利用湖泊富余水量, 使调水成本降低; 完全禁止骆马湖高水低用会加重洪泽湖以下梯级线路供水任务的运行负担, 同时增加骆马湖的弃水量, 适当允许高水低用可使成本减小, 减少泵站抽水任务。建立的模型以及相关研究成果可为江水北调工程调度运行提供一定参考。

关键词: 江水北调; 调水工程; 水资源调度; 湖泊调蓄; 多目标

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0089

随着全球水资源危机的逐步显现, 与此同时, 在经济高质量发展强烈需求的有力驱动下, 人水和谐的可持续发展理论越发受到认可^[1-2]。因此, 深入研究和优化水资源配置, 破解水资源配置与经济社会发展需求不相适应的矛盾有着重要意义^[3-4]。江苏省江水北调工程^[5] 全局串联长江、洪泽湖与骆马湖, 并以其为主要水源向沿线工农业及城乡生活供水, 与南水北调东线一期工程构成江苏省水网体系^[6]。由于江水北调工程实行双线供水, 各梯级枢纽相互关联、互相制约, 供水受洪泽湖和骆马湖水位、渠道和闸泵输水能力等限制, 不同时段内不同线路调水承载能力不同。目前, 针对江水北调工程联合南水北调工程建模研究较少, 考虑目标与调度情景单一。因此, 如何在满足工程任务的前提下, 优化各线路枢纽引水量, 使得湖泊水位最宜和调水成本最小, 是江水北调工程在调度过程中需要考虑的重要问题。

国内外学者对跨流域调水的调度规则和方法有着大量的研究。宋志红等^[7] 建立了引江济淮工程多目标水量优化调度模型, 使用多目标非支配排序遗传算法求解获得最优 Pareto 解集, 通过熵权法选择最优方案, 避免了求解效率低的问题。金鹏宇等^[8] 以胶东调水工程为研究对象, 在考虑分水口门对反调节和汇水区水量补偿调节的作用下建立了水量调控模型并制定了工程年水量调度计划。王旨祥等^[9] 剖析了引江济淮工程的供水侧和需水侧具有不确定性, 根据不同典型年调度情景集合构建了多层耦合的模拟模型, 制定了引江济淮工程年水量调度方案。Bagheri 等^[10] 调查了 Taleghan 水库向德黑兰和阿尔伯斯省供水项目的生产效应, 设计并实施了每个省份的投入产出表, 构建了水资源调配方案的总均衡模型。Javan 等^[11] 以中东输水线路 Zarrinehrood 输水系统为例, 研究评估了模型预测控制(model predictive control, MPC)和粒子群优化(particle swarm

收稿日期: 2024-04-20 修回日期: 2024-08-09 网络出版时间: 2024-09-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240904.1709.008>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209400); 国家自然科学基金项目(52209024; 42271044); 江西省自然科学基金项目(20224BAB204075; 20212BAB214065)

作者简介: 何立新(1966—), 男(回族), 宁夏石嘴山人, 教授, 博士, 主要从事智慧水务与水安全研究。E-mail: helixin@hebeu.edu.cn

通信作者: 何中政(1992—), 男, 湖北大冶人, 讲师, 博士, 主要从事复杂水资源系统建模及其优化调控研究。E-mail: he_zz@ncu.edu.cn

optimizatio, PSO) 2种方法在大型输水系统实时控制和运行管理中的应用和性能。Laassilia等^[12]以摩洛哥水路项目为例,提出了优化规模、运营和水资源分配的优化模型。董国强等^[13]以洪泽湖生态水位最宜为目标,建立了水量调控模拟模型,以生态水位保障率、偏离差为评价指标拟定了生态需水调控方案。Mansouri等^[14]以伊朗 Yalan 大坝向 Zayanderud 大坝的输水项目为例,采用动态规划法和水资源模型与水力模型的综合求解方法对工程方案进行了优化。王超等^[15]为挖掘引江济淮工程在保障供水和降低泵站输水能耗方面的潜力,构建了湖泊多目标水量优化调度模型,制定了泵站-湖泊联合调度方案。雷晓辉等^[16]通过模拟模型结合优化技术,根据水量平衡原理建立了引江济淮年水量调度模型,利用模型模拟得出了不同情景下的年度调度方案,并对引供水结果、分区段调度结果以及湖泊调蓄情况进行了对比分析。通过国内外学者对水量优化调度模型做出的大量研究,水量调度规则得到了更科学的表达,调度方案更加明确,而针对江水北调工程的水量调度研究较少,调度规则有待进一步深耕探究。

参考南水北调东线、引江济淮、胶东调水等工程,已经有许多学者构建出相应的概化模型并加以研究,而江水北调工程缺少系统化、实用性与便捷性的决策手段支持。因此,概化江水北调系统,建立多目标、多时间尺度、符合现有水资源调度原则并处理好与各湖各枢纽各用水单元间矛盾的多目标水量调配模型,制定合理定量的调度方案,是工程效益能否最大程度发挥的重要举措。为此,本文利用模型模拟技术和优化算法,针对江水北调工程,建立年水量调度模型^[16]。根据各单元不同时段的需水过程,同时考虑洪泽湖和骆马湖预报来水、开放河道输水渗漏损失等,模拟骆马湖—洪泽湖—长江段的丰、平、枯水年的梯级枢纽输水过程;采用逐步优化算法(progressive optimization algorithm, POA)优化运河线、运西线年输水过程,以及洪泽湖、骆马湖的年水位过程,以期实现水资源的最佳利用和精准调度,达成“水安全有效保障、水资源永续利用、水生态系统健康”的目标^[17]。

1 研究区概况

江水北调工程受水区域为水量调度范围,覆盖江苏省苏中、苏北 7 个市 50 个县(市、区),面积

6.3 万 km²,人口 3 900 多万人,耕地面积 3 万 km²。为解决苏北地区工农业生产和人民生活用水短缺问题^[18-19],以长江为源头,利用京杭大运河作为输水干河,串联洪泽湖、骆马湖、微山湖等调蓄湖泊,沟通江、淮、沂三大水系。根据调蓄湖泊划分,江苏境内输水线路主要分为 3 段:第 1 段为长江至洪泽湖段,主要利用三江营(主引水口门)和高港引水,通过原里运河—苏北灌溉总渠输水线以及新开辟的三阳河—金宝航道输水;第 2 段为洪泽湖至骆马湖段,通过原有的中运河线,新辟的徐洪河线输水;第 3 段为骆马湖至南四湖段,利用中运河—不牢河线,新辟中运河—韩庄运河线输水。用水对象为江水北调工程沿线用水单元与两大湖泊的生态需求,每个用水对象的用水主要为:生活用水、工业用水、农业用水。主要县(市、区)见表 1。

表 1 江水北调工程受水地区

Tab. 1 The water receiving area of Water Diversion from the Yangtze River to the North

省辖市	县(市、区)
扬州市	高邮市、宝应县、江都区
淮安市	洪泽区、金湖县、涟水县、盱眙县、淮安区、淮阴区、清江浦区
盐城市	阜宁
宿迁市	泗阳县、泗洪县、沭阳县、宿豫县、宿城区
连云港市	赣榆区、东海县、灌云县、灌南县
徐州市	贾汪区、邳州市、铜山区、丰县、沛县、睢宁市、新沂市

工程优先采用运河线调水^[20],调水能力不足时采用运西线,2 条输水线路在调水过程中途经洪泽湖与骆马湖,目的是充分利用湖泊的调蓄能力,尽可能多地减少湖泊弃水量。骆马湖以北主要经过不牢河线调水补给刘山站以北受水区;洪泽湖—骆马湖段优先采用骆南中运河线调水,供水不足时采用徐洪河线调水;长江—洪泽湖段主要利用江都站抽取长江水,经过里运河调水补湖,供水不足时采用宝应站经过金宝航道、入江水道抽取长江水。

2 数据与方法

构建江水北调工程年水量调度模型,以长江为起点,洪泽湖、骆马湖为主要控制点,形成运河线、运西线双线输水拓扑结构,概化 32 个用水单元。以

各泵站输水能力作为约束条件,供水缺额、出入骆马湖与入洪泽湖的水量作为决策变量。在给定规则调度^[21-22]前提下采用 POA 算法^[23-24]进行求解,得到水量调度方案结果。

2.1 目标函数

统筹考虑苏北地区用水需求与出省调度需求,在达成调水出省目标的前提下,使得两条线路中供水缺额最小、湖泊水位超限值最小以及运行成本最低,以更好贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路^[25]。

2.1.1 供水缺额最小

两条线路中供水缺额最小目标函数的表达式为

$$\min d = W_1 \sum_{t=1}^n (D_t - R_t) + W_2 \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^m P_i (D_{i,t} - R_{i,t}) \quad (1)$$

式中: d 为年水量调度模型的总供水缺额, 亿 m^3 ; W_1 、 W_2 分别表示山东省与江苏省的供水缺额权重; P_i 表示江苏省内各用水单元的供水缺额权重; D_t 表示在 t 时段时山东省需水量, 亿 m^3 ; R_t 表示在 t 时段对山东省的计划供水量, 亿 m^3 ; $D_{i,t}$ 表示江苏省境内第 i 个沿线用水单元在 t 时段时的需水量, 亿 m^3 ; $R_{i,t}$ 表示在江苏省境内第 i 个沿线用水单元在 t 时段的计划供水量, 亿 m^3 。

2.1.2 湖泊水位超限值最小

两条线路中湖泊水位超限值最小目标函数的表达式为

$$\min S = \begin{cases} \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^m (Z_{i,\min} - Z_{i,t}) & Z_{i,t} < Z_{i,\min} \\ 0 & Z_{i,\min} < Z_{i,t} < Z_{i,\max} \\ \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^m (Z_{i,t} - Z_{i,\max}) & Z_{i,t} > Z_{i,\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: S 为年水量调度模型计算所得湖泊水位超出水位需求区间上下限的值, m; $Z_{i,t}$ 为第 i 个湖泊在 t 时段的水位, m; $Z_{i,\min}$ 、 $Z_{i,\max}$ 为第 i 个湖泊的最低、最高水位, m。

2.1.3 运行成本最低

两条线路中运行成本最低目标函数的表达式为

$$\min C = \sum_{j=1}^n \frac{\rho g Q_j H \times \Delta t}{\eta_j} \times G \quad (3)$$

式中: C 为泵站总运行成本, 元; ρ 为水的密度, t/m^3 ; Q_j 为第 j 级泵站的流量, m^3/s ; H 为设计扬程, m; η_j 为第 j 级泵站的效率; G 为电价, 元/($kW \cdot h$)。

2.2 约束条件

2.2.1 洪泽湖、骆马湖湖泊水量平衡及约束

湖泊水量平衡约束表达式为

$$U_{t+1} = U_t + (q_t - r_t) \times \Delta t \quad (4)$$

湖泊水位约束表达式为

$$Z_t \leq Z_{\max} \quad (5)$$

湖泊库容约束曲线表达式为

$$U_t = f(Z_t), Z_t = f^{-1}(U_t) \quad (6)$$

式(4)~(6)中: U_{t+1} 、 U_t 为 $t+1$ 、 t 时段湖泊库容, m^3 ; q_t 、 r_t 为 t 时段湖泊入湖流量、出湖流量, m^3/s ; Z_t 、 Z_{\max} 为 t 时刻湖泊的水位、湖泊的最高限制水位, m; f 、 f^{-1} 为水位库容关系函数与反函数。

湖泊补水水位是每个调度时段结束后为避免下个调度时段湖泊水位下降超过警戒值而设定的水位。在江水北调年水量调度模型中, 每个调度时段结束时如果湖泊水位低于此水位就要开启泵站进行补水。江水北调工程洪泽湖和骆马湖补水水位见表 2。

表 2 江水北调工程年水量调度模型洪泽湖和骆马湖补水水位

Tab. 2 Annual water flow scheduling model for the Water Diversion from the Yangtze River to the North: Water level supplements for Hongze Lake and Luoma Lake

时段	洪泽湖补水水位	骆马湖补水水位
10月上旬	13.0	22.5
10月中旬	13.0	22.5
10月下旬	13.0	22.5
11月上旬	13.0	22.5
11月中旬	13.0	22.5
11月下旬	13.0	22.5
12月上旬	13.0	22.5
12月中旬	13.0	22.5
12月下旬	13.0	22.5
1月上旬	13.0	22.5
1月中旬	13.0	22.5
1月下旬	13.0	22.5
2月上旬	13.0	22.5
2月中旬	13.0	22.5
2月下旬	13.0	22.5
3月上旬	13.0	22.5
3月中旬	13.0	22.5
3月下旬	13.0	22.5
4月上旬	13.0	22.5
4月中旬	13.0	22.5
4月下旬	13.0	22.5
5月上旬	13.0	23.0
5月中旬	13.0	23.0

表 2(续)

Tab. 2 (Continued)

时段	洪泽湖补水水位	骆马湖补水水位
5月下旬	13.0	23.0
6月上旬	12.0	22.5
6月中旬	12.0	22.5
6月下旬	12.0	22.2
7月上旬	12.0	22.0
7月中旬	12.0	22.1
7月下旬	12.2	22.2
8月上旬	12.2	22.3
8月中旬	12.3	22.4
8月下旬	12.4	22.5
9月上旬	12.5	23.0
9月中旬	12.0	23.0
9月下旬	12.0	23.0

2.2.2 闸泵及河道约束

江水北调工程年水量调度模型主要河段与泵站见表 3。

表 3 江水北调工程年水量调度模型主要河段与泵站

Tab. 3 The main river sections and pump stations of the annual water volume scheduling model for the Water Diversion from the Yangtze River to the North

河段	泵站名称
里运河段	江都站、淮安站、淮阴站
入江水道段	宝应站、金湖站、洪泽站
骆南中运河段	泗阳站、刘老涧站、皂河站
徐洪河段	泗洪站、睢宁站、邳州站
不牢河段	刘山站、解台站
韩庄运河段	台儿庄站
废黄河	大套站、滨海站
盐河	无
淮沐新河	无
灌溉总渠	无

泵站输水能力约束,表达式为

$$Q_{j,\min} \leq Q_{j,t} \leq Q_{j,\max} \quad (7)$$

河道输水能力约束,表达式为

$$L_{i,\min} \leq L_{i,t} \leq L_{i,\max} \quad (8)$$

式(7)和(8)中: $Q_{j,t}$ 为编号为 j 的泵站在 t 时段的抽水能力, m^3/s ; $Q_{j,\min}$ 、 $Q_{j,\max}$ 为泵站允许达到的输水能力下、上限, m^3/s ; $L_{i,t}$ 为编号为 i 的河道在 t 时段的输水能力, m^3/s ; $L_{i,\min}$ 、 $L_{i,\max}$ 分别为编号为 i 的河道最小、最大输水能力, m^3/s 。

2.2.3 省外调水任务约束

省外调水任务约束条件为

$$W_t > W_T \quad (9)$$

式中: W_T 为下达的出省调水任务, 亿 m^3 ; W_t 为在 t 时段骆马湖可调水量, 亿 m^3 。

2.3 模型求解

模型考虑式(1)~(3)3个优化目标,利用多目标优先级^[26]的方法处理优先级,优先级从高到底的顺序依次为供水缺额最小、水位超限值最小和运行成本最低。这样可将多目标问题转化为单目标问题,从工程末端枢纽(蔺家坝站与台儿庄站)开始,逆序演算至工程起点枢纽(宝应站和江都站),逐级进行求解。具体步骤如下:

步骤 1,初始化参数,输入各用水单元逐旬需水量、湖泊初始水位和约束条件;步骤 2,采用 POA 算法^[23-24],设置算法参数条件;步骤 3,设置 POA 算法初始解,并评价其目标函数值;步骤 4,从第 1 个决策变量到最后 1 个决策变量进行逐步优化,获得第 g 代优化结果;步骤 5,判断 POA 算法是否收敛,收敛则迭代结束跳转步骤 6,否则跳转步骤 4 继续迭代寻优;步骤 6,迭代结束,POA 算法收敛到计算条件下的最优解。综上所述,江水北调年水量调度模型求解过程见图 1。

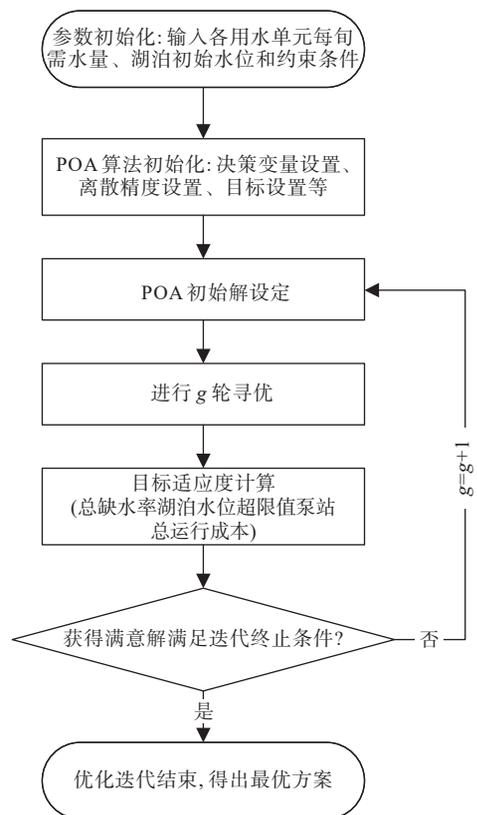


图 1 模型求解流程

Fig. 1 Model solving flowchart

3 结果与分析

3.1 计算条件

根据洪泽湖 1997—2018 年来水量,通过排频,按频率 25%、50%、75% 选取丰水年、平水年、枯水年作为典型年来水,调度期参考 2022—2023 年调水出省任务并以 2022 年 10 月上旬为开始时间进行模拟,以 2023 年 9 月下旬为结束时间,共 36 旬,各用水单元逐旬需水量来自江苏省水利厅的供水计划,洪泽湖和骆马湖的初始水位根据历年 10 月初运行水位设置,补水水位参考江苏省水利厅防办调度经验,一般非汛期洪泽湖与骆马湖的补水水位分别不超过 13.0 m 和 22.5 m,汛期洪泽湖与骆马湖的补水水位分别不超过 12.5 m 和 23.0 m。

3.2 平水年河段供水结果分析

以平水年为例,从图 2 可以看出:①里运河段泵

站分别在 1 月中旬和 4 月上旬开启补湖和对沿线的供给;②入江水道段泵站在 12 月至 5 月期间与 7 月上旬开启了运西线进行补湖,这是由于来水较少,无法满足洪泽湖附近需水,计算得到的上旬预期水位都低于 13.2 m 北调水位,因此南水北调需要开启入江水道段泵站抽取长江水;③江都站则在宝应站抽水能力达到最大时进行辅助供给;④中运河段泵站全年开启次数较多,这是由于山东供水以及沿线用水导致每过 1~2 旬骆马湖水位到达补水水位,使补水次数频繁;⑤徐洪河段泵站向山东供水任务从 2 月中旬开始加剧,达到满负荷的最大流量运行;⑥根据各河段泵站开启过程可知,洪泽湖补水次数较少,骆马湖补水次数较多;⑦由于泗阳站抽水能力上限为 240 m³/s,中运河线在补水过程中工程输水能力多次达到上限。

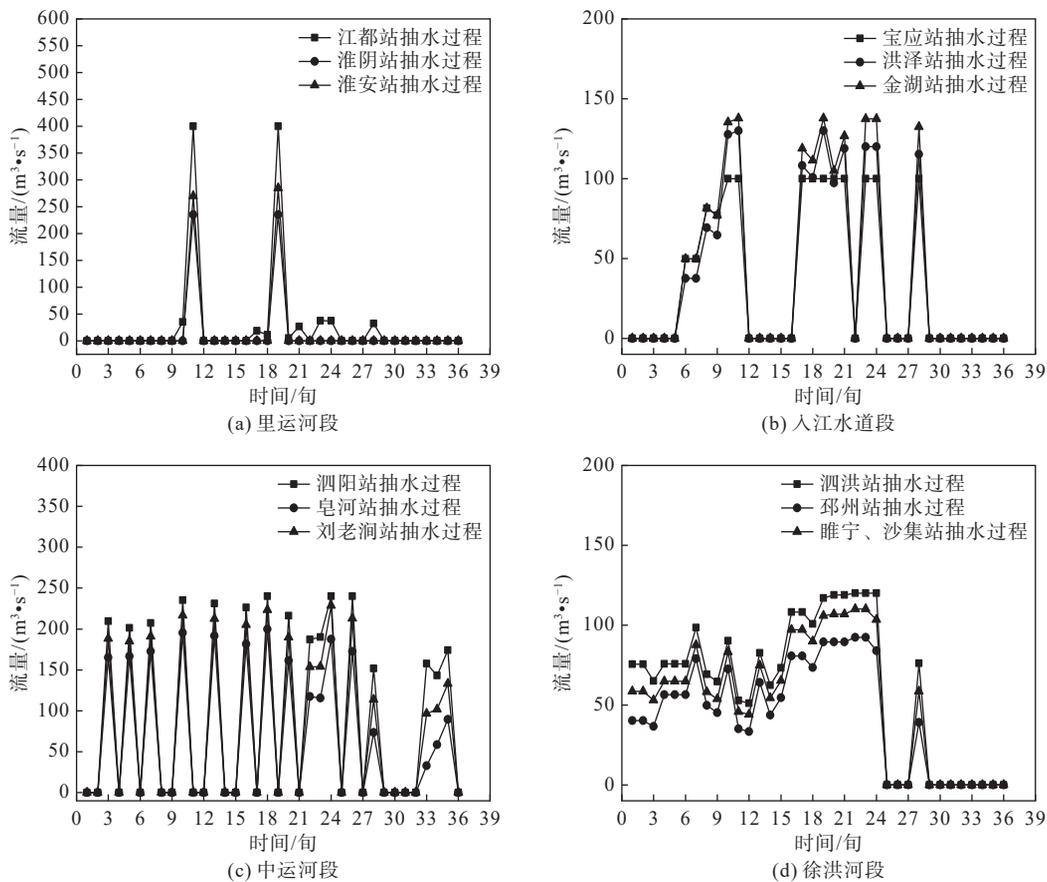


图 2 平水年各河段供水过程

Fig. 2 Water supply process of each river section in a normal year

由图 2 和表 4 的计算结果得出:由于不同水平年需水量不同,丰、平、枯水年的需水量呈上升趋势,因此 4 个河段相加的总抽水量也呈上升趋势,在枯水年达到最大。里运河、入江水道的泵站总抽水量依次递增,很大程度上由其下游湖泊即洪泽湖水情

所决定,洪泽湖来水量越小,抽水量则相应增加;中运河、徐洪河的泵站总抽水量依次递减,很大程度上是由下游湖泊即骆马湖水情所决定的,洪泽湖来水量越多,抽水量相应减少。此外,本文是依据洪泽湖流域来水量排频分析得到的丰、平、枯典型年

份,骆马湖的水情变化存在与洪泽湖不同期的现象,即骆马湖在洪泽湖丰、平、枯典型年的来水量依次

递增。据此,模型模拟计算结果基本合理,可作为调度方案编制工具辅助调度人员开展调度决策。

表 4 江水北调工程年水量调度模型河段泵站抽水水量结果

Tab. 4 Table of annual water volume dispatching model for the Water Diversion from the Yangtze River to the North and pumping water volume results of river section pumping stations

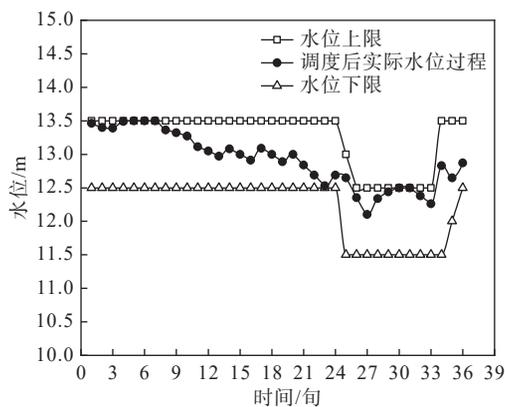
单位:亿 m^3

典型年	长江—洪泽湖段抽水量			洪泽湖—骆马湖段抽水量			总抽水量
	里运河	入江水道	小计	中运河	徐洪河	小计	
丰水年	4.53	14.41	18.94	69.37	57.51	126.88	145.82
平水年	8.85	25.70	34.55	73.35	49.68	123.03	157.58
枯水年	16.32	32.33	48.65	62.61	52.15	113.76	163.41

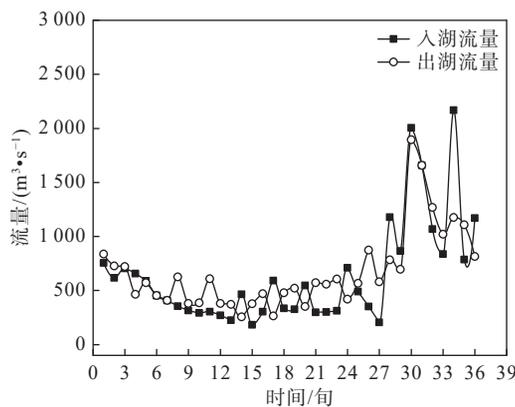
3.3 湖泊调蓄过程分析

针对年调度模型结果湖泊调蓄过程进行分析。图 3 给出了枯水年洪泽湖和骆马湖的逐旬调度后水位与调蓄过程。从湖泊调蓄过程可以看出:洪泽湖全年水位在水位约束区间内运行;11月上旬至12月上旬来水较多,洪泽湖水位达到正常蓄水位,淮水出现弃水;1月中旬至4月下旬枯期来水较少,洪泽湖水位在 13 m 处上下浮动;从 6 月上旬开始进入汛期,同时南水北调工程调水期结束,此时洪泽湖

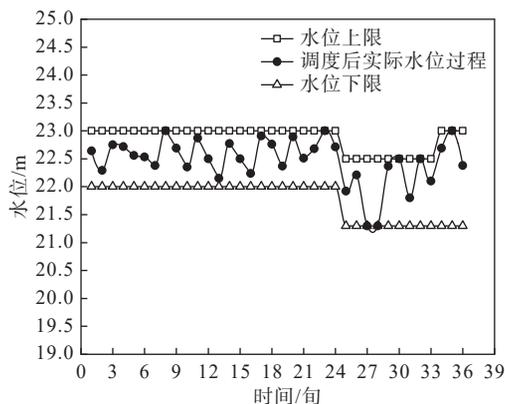
补水水位下降至 12 m,运西线运河线泵站不开启,洪泽湖周边需水主要靠二河闸、高良涧闸、三河闸开闸放水供给,出湖流量增加,既保障了供给,又使湖泊水位下降至汛限水位 12.5 m 之下;而对于骆马湖而言,由于骆马湖来水较少且调蓄能力小,利用骆马湖调水出省时,工程在运行过程中需不断从洪泽湖调入水量入湖,并向不牢河段用水单元进行供水,同时在水位可安全运行期间进行间歇性的补水,加大了骆马湖水位的波动程度。



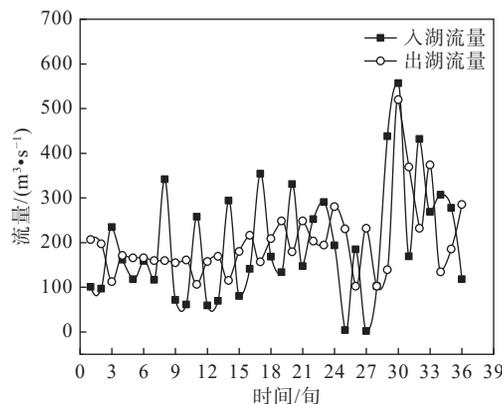
(a) 枯水年洪泽湖水位



(b) 枯水年洪泽湖流量



(c) 枯水年骆马湖水位



(d) 枯水年骆马湖流量

图 3 枯水年洪泽湖与骆马湖调蓄过程

Fig. 3 The regulation and storage process of Hongze Lake and Luoma Lake in low flow years

图 4 给出了平水年洪泽湖和骆马湖的逐旬调度后水位与调蓄过程。由图 4 分析湖泊水位与调蓄过

程可知:洪泽湖调蓄过程中,水位基本在约束区间内运行,较枯水年水位整体抬升;6月中旬至8月下

旬汛期期间,洪泽湖水位始终保持在汛限水位 12.5 m,说明弃水较多;骆马湖全年水位处于来回波动的状

态,一般历经 1~2 旬的供水任务后,水位会达到补湖水位,需要对骆马湖进行补湖。

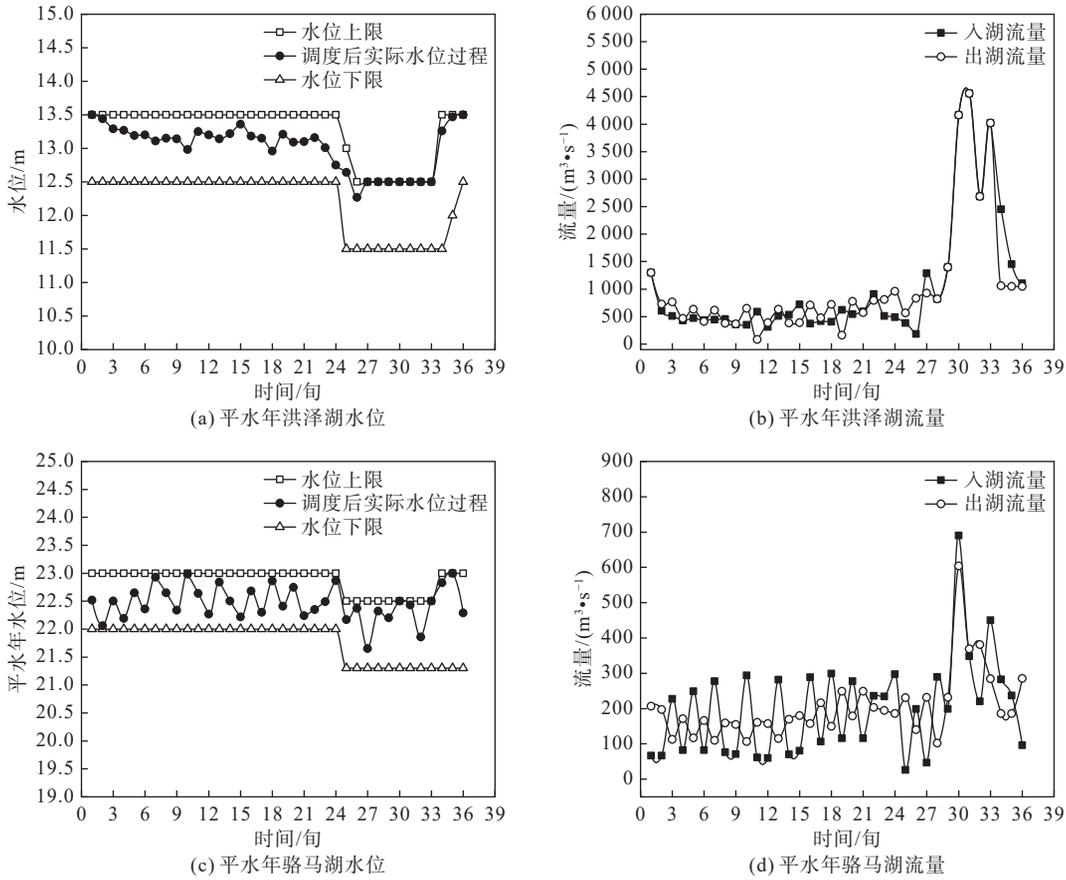


图 4 平水年洪泽湖与骆马湖调蓄过程

Fig. 4 The regulation and storage process of Hongze Lake and Luoma Lake in normal flow year

图 5 给出了丰水年洪泽湖和骆马湖的逐旬调度后水位与调蓄过程。由图 6 可知:10 月上旬至 3 月中旬,洪泽湖水位基本处于正常蓄水位,说明洪泽湖入湖流量远大于出湖供水量,需要对淮河来水进行弃用,且汛期期间洪泽湖来水偏多,需要弃水以降低湖泊水位;骆马湖水位全年均在水位约束区间运行,一般经历 1~2 旬后的调水后需要进行补湖,水位波动频率较大。

由表 5 江水北调工程年水量调度模型方案结果得知:充分利用长江水和淮水,以及考虑湖泊调蓄后,丰、平、枯水年条件下供水任务均得到满足,洪泽湖与骆马湖水位也均处于适宜区间内;淮水利用率为洪泽湖入湖水量与抽江入湖水量、弃水相减后并除以典型年淮河来水计算得出,随着来水条件从丰水年过渡到平水年甚至枯水年,江水利用量随之增大,淮水利用率也增高,湖泊调蓄能力随之减弱,两湖泊弃水量减小,这使得调水任务量增大,泵站运行成本随之增大;由于丰、平、枯典型年淮河来水总量减小,但淮水的利用减少的趋势较淮河来水的趋势慢,因此可以看出淮水利用量减少,利用率增大。

3.4 洪泽湖补湖水位分析

由于洪泽湖来水较多,存在较大弃水,来水条件与补湖水位对年水量调度模型结果影响较大。本节以洪泽湖 12.79 m 的 36 旬平均补湖水位作为初始条件,调整洪泽湖补湖水位进行对比分析,分析丰平枯水年条件下补湖水位对年水量调度模型方案结果的影响。

图 6 给出了丰水年洪泽湖补湖水位下调 0.20 m 后的湖泊水位过程,表 6~表 8 给出了 3 种典型年来水条件下洪泽湖不同补湖水位的方案结果。

根据图 6 和表 6 丰水年不同补湖水位的计算结果可知:在来水较多的情况下,整体补湖水位降低,湖泊水位下降过多但无法及时进入补湖机制,会影响湖泊的运行水位;随着补湖水位的下调,水位容易高于补湖水位使得补湖次数减少,下调补湖水位前洪泽湖在 5 月中旬和 8 月下旬启动泵站进行抽江补湖,下调后只在 5 月下旬进行了补湖,从而导致最后一旬湖泊水位超出下限 0.33 m;随着补湖水位的下调,启动泵站进行抽江补湖次数减少,对淮水的利用率增加,洪泽湖弃水随之减少,调水成本也随之降低。

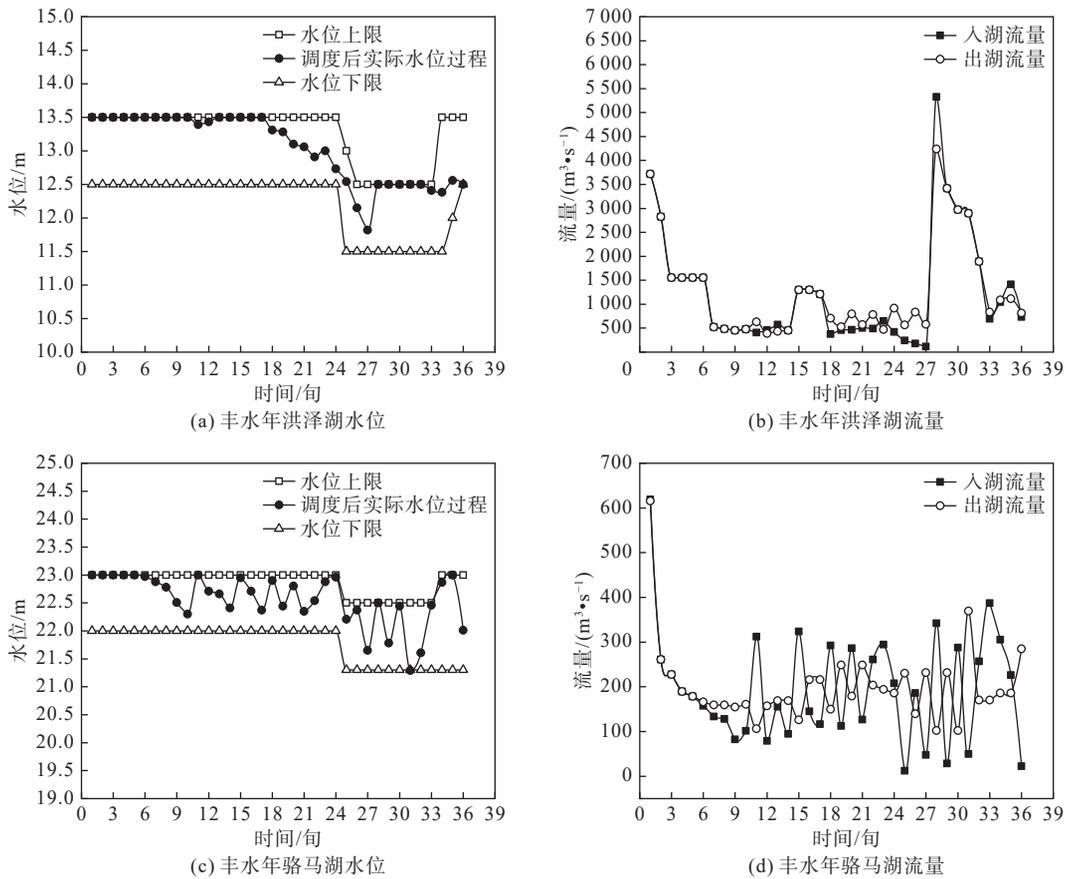


图5 丰水年洪泽湖与骆马湖调蓄过程

Fig. 5 The regulation and storage process of Hongze Lake and Luoma Lake in high flow year

表5 江水北调工程年水量调度模型方案结果

Tab. 5 Results table of annual water dispatch model scheme for the Water Diversion from the Yangtze River to the North

典型年	供水缺额/%	调水成本/亿元	洪泽湖弃水/亿m ³	骆马湖弃水/亿m ³	江水利用/亿m ³	淮水利用/亿m ³	淮水利用率/%
丰水年	0	2.18	194.66	4.88	13.83	184.49	48.43
平水年	0	2.39	119.31	3.68	19.82	193.52	61.58
枯水年	0	2.65	18.20	2.92	32.59	162.20	89.48

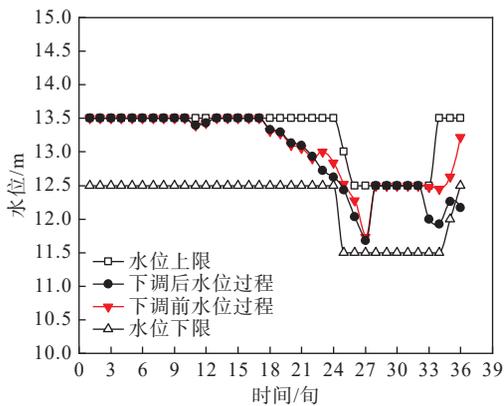


图6 丰水年洪泽湖下调补水水位 0.2 m 后江水北调年水量调度的洪泽湖水位过程

Fig. 6 The water level process of Hongze Lake in the year of abundant water after lowering and supplementing the water level by 0.2 m in Hongze Lake

根据表7平水年不同补水水位的计算结果可知:在平均补水水位 12.69 m 向下降低时,总调水成本随之降低,下降至 2.33 亿元时出现了水位超出下限 0.08 m;补水水位向上逐步抬升时,每改变一个补水水位后,洪泽湖最优水位过程也随之改变,导致淮水利用量也随之减少,调水成本呈现波动且上涨的趋势。

根据表8枯水年不同补水水位的计算结果可知:水位调整水位后,方案的结果来回增减,说明洪泽湖水位在全年波动频率较大,出现了每改变 0.10~0.20 m 补水水位,会进入补水机制的情况,后续可改变离散精度进行分析;在补水水位 12.69 m 时,江水北调工程运行成本总体最低。

表 6 丰水年洪泽湖不同补水水位条件下江水北调年水量调度结果

Tab. 6 Annual water volume regulation results of Water Diversion from the Yangtze River to the North under different replenishment water levels in Hongze Lake during the high flow year

平均补水水位/m	供水缺额/%	水位违反值/m	总调水成本/亿元	洪泽湖弃水/亿m ³	江水利用/亿m ³	淮水利用/亿m ³	淮水利用率/%
12.39	0	0.40	2.06	191.60	8.87	187.55	49.24
12.49	0	0.33	2.06	192.91	9.62	186.24	48.89
12.59	0	0.33	2.05	193.14	9.62	186.00	48.83
12.69	0	0.33	2.05	193.14	9.62	186.00	48.83
12.79	0	0	2.18	194.66	13.83	184.49	48.43
12.89	0	0	2.15	195.45	14.03	183.69	48.23
12.99	0	0	2.22	197.91	15.59	181.24	47.58
13.09	0	0	2.20	198.93	15.05	180.21	47.31
13.19	0	0	2.27	203.04	17.92	176.11	46.23

表 7 平水年洪泽湖不同补水水位条件下江水北调年水量调度结果

Tab. 7 Annual water volume regulation results of Water Diversion from the Yangtze River to the North under different replenishment water levels in Hongze Lake during the normal flow year

平均补水水位/m	供水缺额/%	水位违反值/m	总调水成本/亿元	洪泽湖弃水/亿m ³	江水利用/亿m ³	淮水利用/亿m ³	淮水利用率/%
12.39	0	0.08	2.330	114.24	17.80	198.58	63.19
12.49	0	0	2.396	118.40	19.79	194.42	61.86
12.59	0	0	2.398	118.51	19.90	194.31	61.83
12.69	0	0	2.420	118.51	20.40	194.31	61.83
12.79	0	0	2.390	119.31	19.82	193.52	61.58
12.89	0	0	2.340	120.74	19.45	192.08	61.12
12.99	0	0	2.390	124.59	20.30	188.23	59.89
13.09	0	0	2.340	124.13	20.68	188.70	60.04
13.19	0	0	2.410	127.72	22.49	185.10	58.90

表 8 枯水年洪泽湖不同补水水位条件下江水北调年水量调度结果

Tab. 8 Annual water volume regulation results of Water Diversion from the Yangtze River to the North under different replenishment water levels in Hongze Lake during the low flow year

平均补水水位/m	供水缺额/%	水位违反值/m	总调水成本/亿元	洪泽湖弃水/亿m ³	江水利用/亿m ³	淮水利用/亿m ³	淮水利用率/%
12.39	0	0	2.65	17.87	32.10	162.52	89.66
12.49	0	0	2.68	17.80	32.89	162.60	89.70
12.59	0	0	2.67	19.50	31.83	160.90	88.76
12.69	0	0	2.65	17.73	32.87	162.67	89.74
12.79	0	0	2.65	18.20	32.59	162.20	89.48
12.89	0	0	2.75	22.17	34.63	158.23	87.29
12.99	0	0	2.73	21.78	34.51	158.62	87.51
13.09	0	0	2.76	26.38	35.28	154.02	84.96
13.19	0	0	2.65	25.50	34.15	154.90	85.45

3.5 骆马湖高水低用结果分析

江苏省湖泊遵循高水高用、低水低用,避免高水低用的原则^[17],高水高用为高梯级泵站抽调的水

量用于同梯级区域的用水单元,低水低用为低梯级泵站抽调的水量用于同梯级区域的用水单元,高水低用则为高梯级泵站抽调的水量通过闸门放水至

低梯级泵站区域的用水单元使用。江苏省供水水源主要依靠湖泊蓄水来解决,由于骆马湖—洪泽湖段线路中,骆马湖以下梯级区间用水户取用水需借助泵站与闸门放水满足,本节参考3个典型年来水

工况针对骆马湖高水低用的2种使用场景进行对比分析。图7给出了不同工况下不同情景的骆马湖水位过程对比,表9至表11给出了禁止和允许高水低用不同情景计算方案结果。

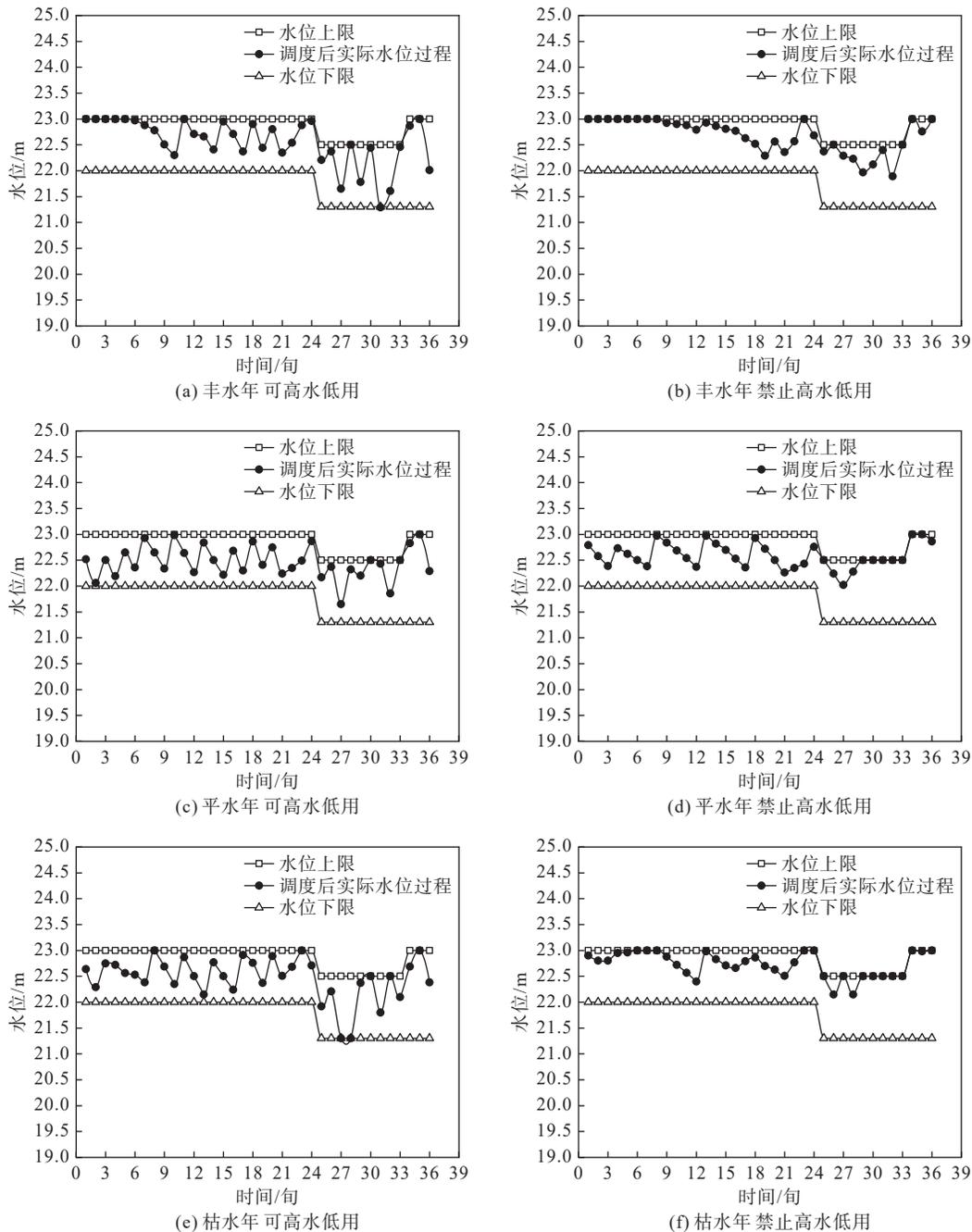


图7 骆马湖水位过程对比

Fig. 7 Comparison of water level processes in Luoma Lake

无论高水低用启用与否,不同情景下江水北调工程均保障了供水需求,根据表9至表11可知:在丰水年与平水年情景下来水较为充沛,允许高水低用后骆马湖弃水分别减少了3.46亿、6.12亿 m^3 ,但洪泽湖弃水分别增加了3.52亿、5.63亿 m^3 ,而江水利用量差别不大,使得高水低用启用和不启用的总

调水成本几乎相同;枯水年来水相对不足,允许高水低用后,骆马湖弃水与洪泽湖弃水大幅减少,使得江水利用量减少了6.07亿 m^3 ,运行成本减少近7%;在禁止高水低用情景下,受不同水平年来水过程影响骆马湖弃水有所差别,但枯水年相比丰水年和平水年江水利用量明显增加,导致总成本加大。

表 9 丰水年骆马湖高水使用情景结果对比

Tab. 9 Comparison of high water use scenarios in Luoma Lake during the high flow year

高水使用目标	高水使用/ 亿m ³	长江—洪泽湖段成本/ 亿元	洪泽湖—骆马湖段成本/ 亿元	总调水成本/ 亿元	洪泽湖弃水/ 亿m ³	骆马湖弃水/ 亿m ³	江水利用/ 亿m ³
禁止	0	0.47	1.29	2.177	191.14	8.34	15.47
允许	16.53	0.42	1.34	2.176	194.66	4.88	13.83

表 10 平水年骆马湖高水使用情景结果对比

Tab. 10 Comparison of high water use scenarios in Luoma Lake during the normal flow year

高水使用目标	高水使用/ 亿m ³	长江—洪泽湖段成本/ 亿元	洪泽湖—骆马湖段成本/ 亿元	总调水成本/ 亿元	洪泽湖弃水/ 亿m ³	骆马湖弃水/ 亿m ³	江水利用/ 亿m ³
禁止	0	0.64	1.26	2.33	113.68	9.80	19.50
允许	18.06	0.66	1.31	2.39	119.31	3.68	19.82

表 11 枯水年骆马湖高水使用情景结果对比

Tab. 11 Comparison of high water use scenarios in Luoma Lake during the low flow year

高水使用目标	高水使用/ 亿m ³	长江—洪泽湖段成本/ 亿元	洪泽湖—骆马湖段成本/ 亿元	总调水成本/ 亿元	洪泽湖弃水/ 亿m ³	骆马湖弃水/ 亿m ³	江水利用/ 亿m ³
禁止	0	1.24	1.18	2.84	22.12	9.22	38.66
允许	18.33	1.02	1.21	2.65	18.20	2.92	32.59

综上所述,允许高水低用在丰水年与平水年总调水成本差距不大,在枯水年可以大幅减少洪泽湖与骆马湖的弃水,减少运行成本。

4 结论

通过构建的江水北调工程年水量优化调度模型,计算丰、平、枯水年 3 种情景下江水北调工程年水量调度方案,分析线路供给、湖泊调蓄、补湖水位确定以及高水低用情景,得到主要结论如下:首先对河段调度情况以及模型合理性进行了验证,验证结果基本合理;骆马湖水位波动频繁,中运河泵站则会同频开启补湖,且流量接近设计流量,频繁开启时工程能力易达到上限;适当降低补湖水位,使调水成本降低,充分利用来水;完全禁止高水低用会加重洪泽湖以下梯级线路的运行负担,同时增加骆马湖的弃水量,适当允许高水低用可使成本减小,减少泵站抽水任务,对工程运行有益。

本文以丰、平、枯典型年来水条件从不同情景模拟的角度开展了探究,由于规则的限制,洪泽湖与骆马湖两湖间没有得到充分的联合调度,洪泽湖存在较大弃水。如何进行优化从而打破规则限制,寻找最优补湖机制,优化上下游湖泊之间的协同调度以及水位平稳运行,以降低水位波动,进行全域

水量平衡指导分区水量调配以及决策,是在江水北调水资源调度工作中需要进一步深入研究的内容。

参考文献:

- [1] 贾志峰,刘鹏程,马艳,等.我国水资源动态演变及开发利用现状分析[J].水电能源科学,2023,41(3):27-30.DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220437.
- [2] 陈思.确定地下水管控指标维护水资源良性循环[N].中国水利报,2021-04-01(005).DOI:10.28136/n.cnki.ncslb.2021.000489.
- [3] 周晋军,庞亚莉,王昊,等.我国城市雨水资源化发展研究综述[J].水利水电技术(中英文),2023,54(5):61-74.DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2023.05.006.
- [4] 仲志余.在更高水平上保障国家水安全[N].人民政协报,2023-06-01(003).DOI:10.28660/n.cnki.nrmzx.2023.003359.
- [5] 张劲松.江苏省江水北调工程实践[J].中国水利,2020(21):41-42.DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2020.21.019.
- [6] 李松柏,孙涛.新时代治水思路下江苏南水北调工程高质量发展战略研究[J].水利经济,2021,39(4):19-23,77-78.DOI:10.3880/j.issn.1003-9511.2021.04.004.
- [7] 宋志红,刘渊,江生金,等.引江济淮工程(河南段)多目标水量优化调度[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(1):39-47.DOI:10.13476/j.cnki.nsb-

- dqk.2024.0006.
- [8] 金鹏宇,王超,孙嘉辉,等.胶东调水工程年度水量调度方案研究[J].*人民长江*,2023,54(8):131-138. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.018.
- [9] 王旨祥,王超,雷晓辉,等.考虑湖泊来水结果的分层耦合水量调度模型研究[J].*中国农村水利水电*,2023(10):69-76. DOI: 10.12396/znsd.230590.
- [10] BAGHERI S, HAYATI B, YAZDANI S, et al. A study on the productive effects of the project of Taleghan water transfer to Tehran and Alborz Provinces, with a general equilibrium model[J]. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 2022, 53(2): 325-345. DOI: 10.22059/IJAEDR.2021.278858.668735.
- [11] JAVAN SALEHI M, SHOURIAN M. Comparative application of model predictive control and particle swarm optimization in optimum operation of a large-scale water transfer system[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(2): 707-727. DOI: 10.1007/s11269-020-02755-6.
- [12] LAASSILIA O, OUAZAR D, BOUZIANE A, et al. Simulation-optimization model for dynamic and sustainable management of the water transfer between two interconnected reservoirs: Case study in Morocco[J]. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2022, 10(2): 177-190. DOI: 10.5890/JEAM.2022.06.005.
- [13] 董国强,王振龙,刘猛,等.基于生态需水优先的洪泽湖水量调控研究[J].*水生态学杂志*,2020,41(5):39-48. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.05.005.
- [14] MANSOURI R, PUDEH H T, YONESI H A, et al. Dynamic programming model for hydraulics and water resources simulating and optimizing water transfer system (a case study in Iran)[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2017, 66(8): 684-700. DOI: 10.2166/aqua.2017.110.
- [15] 王超,孔令仲,朱双,等.考虑湖泊调蓄的引江济淮工程旬水量调度方案[J].*南水北调与水利科技* (中英文),2022,20(6):1109-1116. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0109.
- [16] 雷晓辉,张利娜,纪毅,等.引江济淮工程年水量调度模型研究[J].*人民长江*,2021,52(5):1-7. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.05.001.
- [17] 张劲松,朱建英,陈静,等.水利精准调度理论与实践[M].南京:河海大学出版社,2022.
- [18] 高菲,刘宏伟,朱建英,等.江苏苏北地区水资源联合调度实践[J].*中国防汛抗旱*,2019,29(12):55-57. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2018197.
- [19] 杜丽永.苏北地区农业完全成本水价农户承受力调查:基于水源地生态补偿的视角[J].*江苏商论*,2020(4):25-28. DOI: 10.13395/j.cnki.issn.1009-0061.2020.04.007.
- [20] 闻昕,黄抒艺,谭乔凤,等.江苏省南水北调多工程多目标联合优化调度方法[J].*水资源保护*,2023,39(5):118-124. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.014.
- [21] 尚文绣,王远见,贾冬梅.基于天然水文情势的水库调度规则研究[J].*人民黄河*,2019,41(6):34-37. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.06.008.
- [22] 陈潇.三峡水电站短期精细化水量计算方法与调度建模研究[D].武汉:华中科技大学,2022. DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2022.001315.
- [23] 杨会刚.基于逐步优化算法的梯级电站优化调度研究[J].*四川水力发电*,2020,39(3):75-79. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2184.2020.03.019.
- [24] 郭旭宁,蔡思宇,雷晓辉,等.跨流域水库群联合调度理论研究[M].北京:中国水利水电出版社,2019.
- [25] 于琪洋.认真践行“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路加快实施水资源刚性约束制度[J].*水利发展研究*,2024,24(3):64-68. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2024.03.013.
- [26] 朱新峰,吴名位,王国海.基于多目标优先级粒子群算法的资源调度策略[J].*计算机技术与发展*,2022,32(1):19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1673-629X.2022.01.004.

Water quantity dispatch of Jiangsu Province's Water Diversion from the Yangtze River to the North

HE Lixin^{1,2}, GAO Bingxiang^{1,2}, XIA Haoshun^{3,4}, LONG Yan^{1,2}, WANG Chao⁴, HE Zhongzheng⁵

(1. School of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Key Laboratory of Smart Water Resources, Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 4. Institute of Water Resources, China Academy of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China; 5. School of Engineering and Construction, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Jiangsu Province's Water Diversion from the Yangtze River to the North, which integrates the Yangtze River, Hongze Lake, and Luoma Lake as its main water sources, constitutes a water network system in Jiangsu Province along with the Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project Phase I. Jiangsu Province's Water

Diversion from the Yangtze River to the North has made great contributions to the economic and social development of northern Jiangsu Province; however, there are shortcomings in the current operation status of the project, such as high operating costs and large lake abandoned water volume.

Therefore, the use of this study is intended as a model to construct the annual water dispatching of Jiangsu Province's Water Diversion from the Yangtze River to the North, starting from the Yangtze River and using Hongze Lake and Luoma Lake as the main control points to form a dual-line water conveyance topology structure of canal lines and west-to-east lines, and generalizes the water use units. Taking the water delivery capacity of each pump station, lake water levels, and reservoir capacity as constraints, and the water supply deficit, water inflow and outflow to Luoma Lake, and water inflow to Hongze Lake as decision variables, the objective function is to minimize the water supply deficit, optimize the ecological water level of the lake, and minimize the operating cost of the pump station. Using rule-based scheduling and stepwise optimization algorithms, as well as the method of target priority, the multi-objective problem is transformed into a single-objective problem. Starting from the end of the project hub (Linjiaba pump station and Taierzhuang pump station), it is solved in reverse order to the starting point hub (Baoying pump station and Jiangdu pump station) of the project, the results of the water dispatching scheme are obtained. For three typical years of high, normal, and low waterflow, a joint dispatching scheme for the gate pump-lake system was formulated to verify the rationality of the model. Further analysis of the lake regulation and storage process, engineering benefits, and engineering characteristics of each scheme was conducted, and scenarios of high water levels with low water use were analyzed.

The following conclusions were drawn: First, the storage capacity of Luoma Lake is small, and the water level fluctuates frequently during the water transfer operation period. The Zhongyun Canal pumping station also frequently opens the lake for replenishment, and it is easy to reach the upper limit of water transfer capacity. Secondly, appropriately reducing the water level of Hongze Lake can fully utilize the surplus water in the lake and reduce the cost of water transfer. Thirdly, completely prohibiting the use of water from the high cascade of Luoma Lake for the low cascade will increase the operational burden of water supply tasks for the cascade lines below Hongze Lake, while also increasing the amount of abandoned water in Luoma Lake. Allowing high water for low use can appropriately reduce costs and pumping tasks for pump stations. However, due to the limitations of the rules, significant water abandonment in Luoma Lake results from insufficient joint dispatching between Hongze Lake and Luoma Lake. Optimizing and breaking the rules to find the optimal water supplement mechanism, optimizing collaborative dispatching between upstream and downstream lakes, maintaining stable water levels, and making engineering operations safer and more reliable are areas that require further research in the field of water resource dispatching for the Jiangsu Provincial Water Transfer Project. In summary, the research results can provide certain reference value for the scheduling and operation of the Water Diversion from the Yangtze River to the North.

Key words: Water Diversion from the Yangtze River to the North; water transfer project; water resources scheduling; lake storage; multi-objective

.....

(上接第 864 页)

processing was the main component of the blue water footprint during energy production. Thermal power generation was the most water-intensive form of energy processing. The high-value areas of the blue water footprint of energy production were concentrated in the "Ji-shaped bend region" in the past, where water scarcity issues were also severe, such as Erdos, Baotou, Yinchuan, and Taiyuan city.

Key words: energy structure; water footprint; the upper and middle reaches of the Yellow River; energy water correlation; energy security