

洪泽湖和骆马湖北调水位控制对南水北调东线工程江苏段水量调度的影响

钟华昱,方国华,闻 昕,李 鑫,颜 敏,周冰逸

(河海大学水利水电学院)

摘要:为量化洪泽湖和骆马湖北调水位约束对南水北调东线工程江苏段调度效益的影响,构建了考虑该约束(工况 S1)与不考虑该约束(工况 S2)的河、湖、闸、泵多目标联合优化调度模型,以最小化受水区综合缺水率与总抽水量为目标,并引入供水基尼系数保障各受水区间的供水均衡性。结果表明:在保障相同供水水平下,工况 S2 可显著减少总抽水量、弃水量和抽江水量,提升湖泊调蓄能力与水资源综合利用效率;丰水年,工况 S2 相较于 S1 抽水量减少 34.9%,弃水量下降 5.9%,抽江水量下降 34.7%,洪泽湖和骆马湖的供水量分别增加 1.69 亿 m³ 和 1.86 亿 m³,泵站抽水入湖水量分别减少 85.1%和 50.3%;在保障湖泊安全供水的前提下,不考虑湖泊北调水位约束可增强区域水资源保障能力,提升工程水量调度能力。

关键词:梯级泵站群;跨流域调水;水资源调度;多目标优化;南水北调东线工程

Impact of northward diversion water level control of Hongze Lake and Luoma Lake on water dispatching in Jiangsu Section of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project//Zhong Huayu, Fang Guohua, Wen Xin, Li Xin, Yan Min, Zhou Bingyi(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University*)

Abstract: To quantify the impact of the northward diversion water level control of lakes on dispatching performance in the Jiangsu Section of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project, a multi-objective joint optimization scheduling model for rivers, lakes, gates, and pumps considering this constraint (operating scheme S1) and not considering this constraint (operating scheme S2) was constructed. The goal is to minimize the comprehensive water shortage rate and total pumping volume in the receiving area, and introduce the Gini coefficient of water supply to ensure the balance of water supply in each receiving area. The results show that under the same water supply level, operating scheme S2 can significantly reduce the total pumping volume, abandoned water volume, and river pumping volume, and improve the lake's regulation and storage capacity and water resource comprehensive utilization efficiency. In the wet year, the pumping volume of operating scheme S2 decreased by 34.9% compared to S1, the amount of abandoned water decreased by 5.9%, and the amount of water pumped into the river decreased by 34.7%. The water supply of Hongze Lake and Luoma Lake increased by 169 million m³ and 186 million m³ respectively, and the amount of water pumped into the lake by the pump station decreased by 85.1% and 50.3% respectively. On the premise of ensuring safe water supply to the lake, not considering the water level constraint of the lake's northward adjustment can enhance the regional water resources guarantee capability and improve the engineering water scheduling capability.

Key words: cascade pumping stations; inter-basin water transfer; water resources dispatching; multi-objective optimization; the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

水资源在维系人类生存、推动社会经济发展以及维护生态系统平衡方面发挥着不可替代的作用^[1]。随着社会经济的快速发展和人口的持续增长,全球对水资源的需求持续攀升^[2]。气候变化与人类活动的叠加效应进一步加剧了水资源的紧张态势^[3]。许多地区用水需求已接近甚至超过当地水

资源的可承载能力,水资源短缺问题日益凸显,成为制约经济社会可持续发展的关键因素之一^[4-5]。为缓解水资源自然分布不均与用水需求不断上升所带来的压力,世界多数国家实施了跨流域调水工程^[6]。我国水资源时空分布极不平衡,基本水情呈现“夏汛冬枯、北缺南丰”的格局^[7-8]。为缓解日益

基金项目:江苏省水利科技项目(2020005)
作者简介:钟华昱(1996—),男,博士研究生,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:zhy_water@163.com
通信作者:方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhuafh@163.com

严峻的水资源短缺问题,我国积极推进大型跨流域调水工程建设,如南水北调、引汉济渭、引江济汉等^[9-13]。在此背景下,提升跨流域调水工程的水资源优化配置能力、挖掘其水量调度潜力是缓解水资源时空分布不均与结构性短缺、增强区域水资源调控能力、提升供水保障水平的重要途径。

南水北调工程是目前全球最大的跨流域调水工程,截至 2024 年 12 月 12 日,南水北调东线和中线一期工程已安全运行 10 周年,累计调水量超过 767 亿 m³,惠及 45 个大中型城市,服务人口超过 1.85 亿人^[14]。作为国家水网的主骨架和大动脉,南水北调工程通过东、中、西 3 条线路连接长江、黄河、淮河、海河四大流域,构建起“四横三纵、南北调配、东西互济”的国家水资源配置新格局^[15]。南水北调东线工程江苏段作为东线工程起始段,通过大规模闸泵群连接洪泽湖、骆马湖等大型调蓄湖泊,为苏北地区和省外部分地区的多元化用水需求提供了水源保障^[9]。随着东线一期工程正式通水运行,围绕东线工程江苏段优化调度的研究不断深入,提出的南水北调东线工程江苏段最优运行方案通常包括 3 个步骤:模型构建、模型求解和方案筛选。为提升调度方案解集的质量,高性能的多目标优化算法是获取更优湖泊群联合调度与水量分配方案的有效手段。例如,Guo 等^[16]对多目标蛙跳算法进行了改进,Zhong 等^[17]优化了多目标布谷鸟算法,方国华等^[18]提出了改进的多目标量子遗传算法,均成功应用于东线工程江苏段的多目标优化模型求解,有效提升了调度效率和运行效益。为进一步增强东线工程江苏段的水量调度能力,方国华等^[19]将优化调度与水资源配置相结合,在保障受水区用水的基础上,提出了更为经济节能的运行方式;闻昕等^[20]提出了东线工程江苏段统一调度与联合运行机制,构建了“水源-线路-湖泊-枢纽”联合优化调度方案,并针对不同典型年情景开展了系统模拟分析;徐纪翔等^[21]根据工程特点,构建了“江-河-湖-站”群联合优化调度模型,系统评估了东线二期工程运行对苏北地区供水保障能力的影响。在此基础上,针对工程运行约束对水量调度效益影响的相关研究也日益受到关注。例如,方国华等^[22]提出湖泊互济互调的运行策略,在多目标优化模型中引入了“骆马湖下泄补给洪泽湖”的调度机制,进一步增强了沿线湖泊的联合调蓄能力与运行灵活性;何立新等^[23]通过对比不同“高水低用”约束控制情景,发现完全禁止骆马湖“高水低用”将加重洪泽湖以下梯级线路的供水压力,并导致骆马湖弃水量增加,而适度放宽该约束有助于降低系统运行成本,减轻泵站抽水压力,从而提

升整体调度效益与水资源配置效率。值得注意的是,骆马湖天然入流量较少,主要依赖洪泽湖及长江的抽水补给,且蓄水能力相对有限,而洪泽湖具有丰富的天然入流和较强的调蓄能力。因此,本文将洪泽湖的双向调水能力纳入调度模型,系统评估洪泽湖和骆马湖北调水位(以下简称“湖泊北调水位”)约束对东线工程江苏段调度效益的影响,以期进一步提升湖泊系统的综合调控效能。

1 研究区概况

南水北调东线工程江苏段以长江、洪泽湖和骆马湖为主要水源,承担江苏省苏中、苏北地区及北方相关省市的供水任务。其中,洪泽湖死水位为 11.30 m,汛限水位为 12.50 m,正常蓄水位为 13.50 m,汛期和非汛期调蓄库容分别为 15.30 亿 m³ 和 31.35 亿 m³;骆马湖死水位为 21.00 m,汛限水位为 22.50 m,正常蓄水位为 23.00 m,汛期和非汛期调蓄库容分别为 4.30 亿 m³ 和 5.90 亿 m³。工程输水干线总长度超过 400 km,通过梯级泵站群实现水量逐级输送,泵站和闸门的特征参数如表 1 所示。

表 1 南水北调东线工程江苏段的泵站和闸门特征参数
Table 1 Characteristic parameters of pumps and sluices of Jiangsu Section of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

工程类型	站名	设计流量/(m ³ /s)	装机容量/万 kW
泵站	江都	400	5.14
	宝应	100	1.36
	金湖	150	1.38
	洪泽	150	1.78
	淮安	300	2.98
	淮阴	300	2.70
	泗阳	230	2.36
	刘老涧	230	1.68
	皂河	175	2.00
	泗洪	120	1.00
	睢宁	110	2.00
	邳州	100	0.78
	刘山	125	1.40
	解台	125	1.40
	蔺家坝	75	0.40
闸门	淮阴	3 000	
	盐河	230	
	杨庄	200	
	运东	800	
	二河	3 000	
	高良涧	800	
	嶂山	8 000	
	三河	12 000	

2 湖泊北调水位约束

长江、洪泽湖和骆马湖是南水北调东线工程江

苏段的主要水源。其中,洪泽湖和骆马湖由于地理位置接近受水区域,输水路径较短,供水成本显著低于从长江取水。工程主要的受水区分布于两湖周边,而在南水北调东线工程正式运行之前,洪泽湖和骆马湖已长期作为苏北和苏中地区的重要水源地。为保障湖泊供水区的用水权益,工程调度中引入了湖泊北调水位约束机制,如图 1 所示,该约束要求湖泊在承担北调任务时需优先满足江苏省内受水区的用水需求,只有在湖泊水位高于设定的北调控制水位时方可向北方区域实施调水。由图 1(a)可见,即便洪泽湖水位始终维持在正常蓄水上限,其可用于北调的水量比例也仅为约 50%。由图 1(b)可见,骆马湖的调水能力更为有限,即使处于满蓄状态,其可用于北调的水量也不足总蓄水量的 30%。此外,自东线工程建成运行以来,东线工程江苏段向山东的调水主要集中于枯水期,调水周期通常为不早于每年 11 月初,在次年 5 月中旬或下旬结束调水。然而在此期间,洪泽湖来水显著减少,骆马湖几乎无自然径流,湖泊水位难以维持在高位,限制了其作为调水水源的可用性。因此,目前东线工程江苏段的省外供水仍主要依赖于长江。

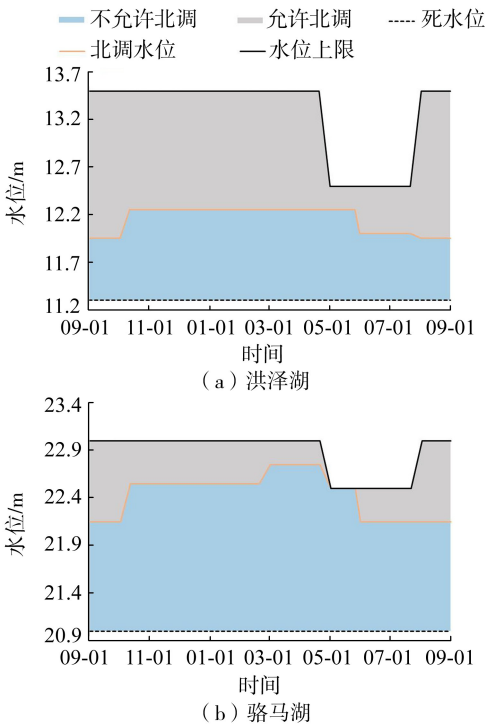


图 1 湖泊北调水位约束

Fig. 1 Water level constraint for lake northward water diversion

总体而言,湖泊北调水位约束在保障江苏省内受水区用水安全方面发挥了积极作用,但也可能引发外调水与本地水资源配置之间的潜在矛盾,限制了湖泊在区域水资源调控中的调节能力,进而影响

系统的整体运行效益。值得注意的是,直接由洪泽湖或骆马湖向山东供水的输水距离较短,抽水能耗较低;如果由长江供水则需启用全线泵站,抽水能耗较高。

3 多目标优化调度模型

3.1 系统概化

东线工程江苏段位于苏北平原地区,区域内河网密布,水系发达,输水干线不仅贯通多个大型调蓄湖泊,还与新沂河、淮沭河、新通扬运河等骨干河道相互连通,形成了复杂的水力联系网络。在构建优化调度模型时,需对该系统进行合理概化,既要准确体现水源、输水线路、泵站和闸门等工程单元的位置与功能,又需真实反映系统的运行特性。基于对江苏省南水北调工程各工程单元的特征分析,本文根据不同工程单元之间的水力联系,以长江、洪泽湖、骆马湖和南四湖为关键节点,将工程整体划分为 3 个主要输水区段:长江—洪泽湖、洪泽湖—骆马湖、骆马湖—南四湖。同时,结合泵站分布及水系空间布局,将江苏省内受水区划分为 12 个综合受水区,如图 2 所示。

3.2 优化调度模型的建立与求解

3.2.1 目标函数

与其他大型跨流域调水工程类似,南水北调东线工程江苏段同样面临着沿线受水区水资源短缺的现实挑战。因此将受水区的综合缺水率作为衡量调度优化效果的重要评价指标。同时,作为一项具有长距离输水与多级提水特征的跨流域调水系统,抽水过程所产生的能耗是影响工程运行成本与综合效益的关键因素。在保障供水安全的前提下,如何以更加经济高效的方式完成调水任务成为优化调度的核心问题之一,因此将最小化总抽水量也作为优化目标。基于上述分析,构建以最小化受水区综合缺水率(f_1)和最小化总抽水量(f_2)为双目标的调度优化模型,目标函数形式表达式为:

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{W_{Dn,t} - W_{n,t}}{W_{Dn,t}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I W_{Pi,t} \quad (2)$$

式中: t 为时段序号; T 为时段总数; n 为受水区序号; N 为受水区总数; $W_{n,t}$ 为 t 时段内受水区 n 的实际供水量; $W_{Dn,t}$ 为 t 时段内受水区 n 的需水量; $W_{Pi,t}$ 为调度时段 t 内泵站 i 的抽水量; I 为泵站数量。

3.2.2 约束条件

a. 水量平衡约束。考虑出入湖水量、湖泊水量损失与湖泊水位之间的水量平衡关系建立约束:

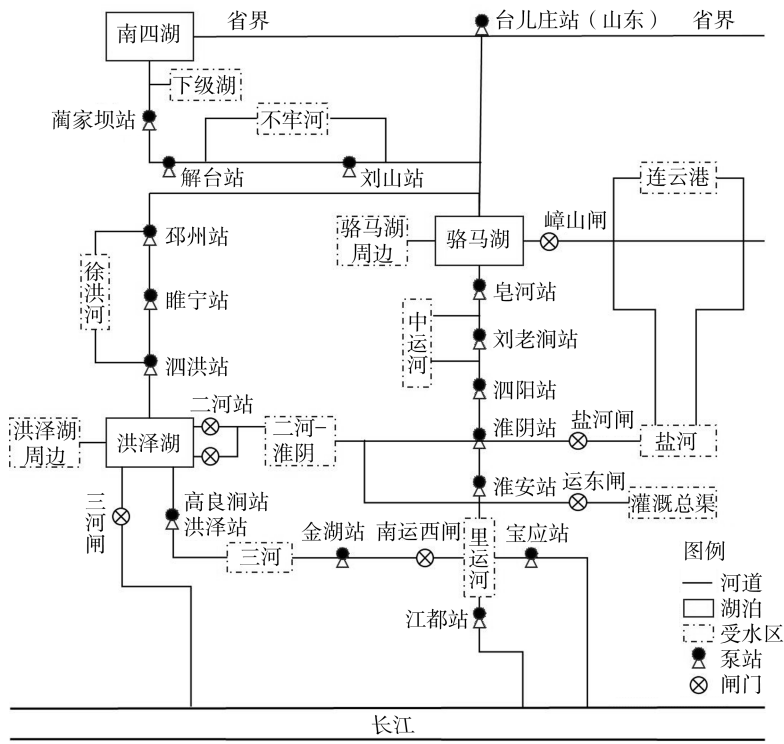


图2 南水北调东线工程江苏段系统概化图

Fig. 2 Schematic diagram of Jiangsu Section of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

$$W_{Sm,t+1} = W_{Sm,t} + q_{m,t} + W_{Plm,t} - W_{Pom,t} - W_{Som,t} - W_{m,t} - L_{m,t} \quad (3)$$

式中: m 为湖泊编号; $W_{Sm,t}$ 为湖泊 m 在 t 时段的蓄水量; $q_{m,t}$ 为湖泊 m 在 t 时段的自然来水量; $W_{Plm,t}$ 为泵站在 t 时段向湖泊 m 补给的水量; $W_{Pom,t}$ 为泵站在 t 时段从湖泊 m 抽取的水量; $W_{Som,t}$ 为湖泊 m 经闸门下泄的水量; $W_{m,t}$ 为湖泊 m 在 t 时段满足湖泊周边用水需求的水量; $L_{m,t}$ 为湖泊 m 在 t 时段因蒸发、渗漏产生的水量损失。

b. 湖泊北调控制水位约束。当江苏以北地区存在用水需求且相应时段湖泊水位低于北调控制水位时,应停止从该湖泊抽水用于北调,北向供水水源此时将切换为其他湖泊或直接由长江供水。洪泽湖与骆马湖的北调控制水位如图1所示。

c. 江苏省内受水区需水量约束:

$$W_{n,t} \leq W_{Dn,t} \quad (4)$$

d. 省外受水区供水刚性约束。自南水北调东线工程正式通水运行以来,供水出省任务均完全满足。因此,本文将省外受水区供水设定为一项刚性约束,即在所有调度时段内,省外受水区的需水量均得到完全满足:

$$W_{Ot} \geq W_{ODt} \quad (5)$$

式中: W_{Ot} 、 W_{ODt} 分别为 t 时段省外受水区的实际供水量和需水量。

e. 湖泊调蓄能力约束:

$$W_{Sminm,t} \leq W_{Sm,t} \leq W_{Smaxm,t} \quad (6)$$

式中: $W_{Sminm,t}$ 、 $W_{Smaxm,t}$ 分别为湖泊最小、最大蓄水量。

f. 泵站工作能力约束:

$$0 \leq W_{Pi,t} \leq W_{Pmax,i} \quad (7)$$

式中: $W_{Pmax,i}$ 为泵站 i 的最大抽水能力。

g. 闸门工作能力约束:

$$0 \leq W_{Gk,t} \leq W_{Gmax,k} \quad (8)$$

式中: $W_{Gk,t}$ 、 $W_{Gmax,k}$ 分别为 t 时段内闸门 k 的泄水量和最大泄水能力。

h. 供水均衡性约束。在常规调度策略中,通常优先向距离水源近且供水成本低的区域供水,尽管该策略有助于提升整体供水效率,但容易造成距离水源远且供水成本高的受水区出现严重缺水问题。为在调度过程中保障多受水区之间的供水均衡性,本文引入供水基尼系数约束,对供水公平性进行控制。根据基尼系数的定义^[24],当其数值超过 0.4 时,通常被认为存在较为严重的资源分配不均,应采取相应的调控措施。因此,本文设置基尼系数不超过 0.4 作为公平调度的约束条件,以实现多区域间的相对公平供水。基尼系数的计算公式为:

$$G_{WS} = \frac{1}{TJM_t} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{n'=n}^N \left| \frac{W_{n,t}}{W_{Dn,t}} - \frac{W_{n',t}}{W_{Dn',t}} \right| \quad (9)$$

其中

$$M_t = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{W_{n,t}}{W_{Dn,t}}$$

式中: G_{WS} 为基尼系数; J 为供水类别数; $W_{n,t}$ 和 $W_{Dn',t}$ 分别为 t 时段内受水区 n' 的实际供水量与需水量; M_t 为调度时段 t 内所有受水区的平均供水与

需水比值。

3.2.3 模型求解

本文结合南水北调东线工程江苏段“河-湖-闸-泵”系统高度耦合的运行特性,采用模拟-优化方法^[25]构建多目标联合调度模型,并利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。模型充分考虑跨流域调水工程中水源多元、供需矛盾突出、调度对象复杂等特征,在系统结构上对长江、洪泽湖、骆马湖等主要供水水源及其与泵站、闸门、输水干线、受水区之间的水力联系进行了合理概化。模型输入数据包括湖泊入流过程、水位-库容关系、蒸发与输水损耗、泵站与闸门运行参数、受水区逐时段需水数据等。

模型以最小化受水区综合缺水率与最小化泵站总抽水量为双优化目标,兼顾供水效益与运行经济性。NSGA-II算法采用二元锦标赛选择、模拟二进制交叉与多项式变异等遗传操作,并通过非支配排序与拥挤度距离机制保持种群多样性与解的收敛性^[26]。NSGA-II算法的种群规模设为100,最大迭代次数为30 000,交叉与变异概率分别为0.6和0.4。通过迭代更新获得一组Pareto最优解,形成多个可行的调度方案,为后续多准则决策分析与最优方案筛选提供支撑。

3.3 基于CECG-VIKOR的优化调度方案筛选

尽管Pareto最优解集中的每个解在理论上均为非劣解,但在实际工程应用中,仍需结合调度目标偏好与评价指标权重,对方案进行进一步筛选与排序,以确定最契合南水北调东线工程江苏段运行需求的调度策略。为实现更全面的效益评价,本文在以总抽水量与总缺水率为核心运行目标的基础上,进一步引入长江调水量与总弃水量作为补充性指标。在江苏段调水系统中,长江为主要水源,但其距离受水区较远,调水成本较高,因此在调度优化中需控制长江供水比例,以降低系统运行能耗。同时,减少弃水量对于提升整体供水系统的水资源利用效率也具有重要意义。其中,长江调水量由江都和宝应两座主要泵站的实际取水量计算得出,弃水量则包括湖泊弃水与泵站弃水。

为在多指标权衡下科学优选调度方案,本文引入CECG-VIKOR决策方法对Pareto解集进行排序与筛选。该方法融合合作博弈赋权(comprehensive empowerment of cooperative game, CECG)与VIKOR多准则排序机制,前者通过综合主观权重(如层次分析法)与客观权重(如熵权法)构建协调、合理的指标权重体系,克服了单一赋权方法的偏倚问题;后者则以理想解为参照,在权衡群体效用与个体后悔度的基础上,确定最具妥协性的优选方案。该方法

适用于目标冲突明显、评价维度较多的复杂水资源系统优化问题。CECG-VIKOR决策方法的技术细节参考Zhang等^[27]的研究成果。

4 结果与分析

本文基于洪泽湖1959—2019年实测来水资料,采用频率分析法选取年径流对应频率为5%、25%、50%、75%和95%的年份,分别代表特丰水年、丰水年、平水年、枯水年和特枯水年,构建典型年来水情景。调度周期以水文年为单位(每年10月至次年9月),其中6月至8月上旬为江苏省内“大用水期”,按候划分,其余月份按旬划分,共设置42个调度时段。为避免初始水位差异对结果产生影响,洪泽湖与骆马湖初始水位统一设定为多年平均的10月1日水位。

在典型年来水情景下,设置两类湖泊运行工况进行对比分析:考虑北调水位约束(工况S1)与不考虑北调水位约束(工况S2)。模型以“河-湖-闸-泵”系统为基础,构建多水源、多目标联合优化调度模型,以受水区综合缺水率最小与泵站总抽水量最小为优化目标,分析湖泊北调水位约束对系统运行效益的影响。

为构建优化调度模型并开展结果的合理性分析,本文收集的基础数据包括:向山东地区调水的年均出省水量来源于2013—2020年南水北调泵站抽水实测数据;典型年份湖泊逐日来水过程来源于《淮河流域水文年鉴》;河道输水损耗数据参考《南水北调东线一期工程江苏部分河段输水损失测验分析》(2020年);江苏省内各受水区年度用水任务参照2018—2020年《江水北调沿线供水调度计划》。

4.1 湖泊北调水位约束对工程调度效益的影响

基于NSGA-II算法分别对两种工况下的南水北调工程东线江苏段“河-湖-闸-泵”联合优化调度模型进行求解,获得了不同典型年湖泊来水情景下受水区综合缺水率与泵站总抽水量的Pareto解集,结果如图3所示。由图3可见,泵站总抽水量与受水区综合缺水率之间存在显著的权衡关系:随着综合缺水率的降低,系统所需的总抽水量明显上升。在不同典型年来水条件下,工况S2的调度效益始终优于工况S1,在相同抽水量条件下,工况S2可实现更低综合缺水率,表现出更高的调度效益。值得注意的是,随着湖泊来水的减少,工况S1与S2之间的调度效益差异逐渐缩小,二者优化结果趋于一致。综上所述,取消湖泊北调水位约束有助于提升东线工程江苏段的调度效益,尤其在湖泊来水充沛的情形下,其调度效益提升更为显著。

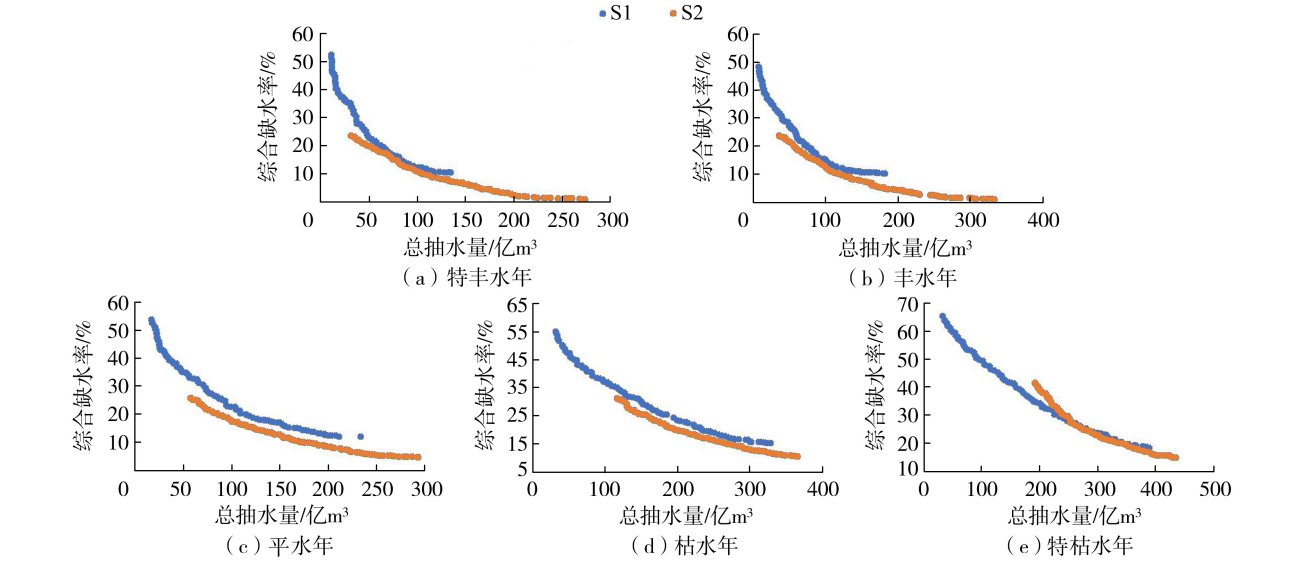


图3 不同典型年情景两种工况下的优化调度非劣解集

Fig.3 Optimization scheduling of non-inferior solution set under two operating schemes in different typical year scenarios

为评估湖泊北调水位约束对东线工程江苏段的综合运行效益的影响,本文采用 CECG-VIKOR 决策方法从 5 种湖泊典型年来水情景中选取工况 S2 的最优“河-湖-闸-泵”联合调度方案,并与在相同受水区综合缺水率条件下的工况 S1 方案进行对比分析,调度指标综合权重如表 2 所示,比较结果如表 3、表 4 所示。结果表明,在特丰水年、丰水年、平水年、枯水年和特枯水年,当实现同等供水水平时,工况 S2 在多项运行指标上表现更优。在丰水年来水情景下,工况 S2 相较于工况 S1 显著减少总抽水量 60.65 亿 m³(下降 34.9%)、总弃水量 11.65 亿 m³(下降 5.9%) 以及抽江水量 15.99 亿 m³(下降 34.7%)。在平水年来水情景下,减少总抽水量 49.35 亿 m³(下降 25.7%)、弃水量 19.09 亿 m³(下降 42.9%)、抽江水量 14.23 亿 m³(下降 23.9%)。即便在湖泊来水较小的枯水年,工况 S2 仍可较工况 S1 减少总抽水量 34.56 亿 m³(下降 12.4%)、弃水量 8.69 亿 m³(下降 85.5%)、抽江水量 4.26 亿 m³(下降 4.7%)。

表2 不同典型年情景下调度指标综合权重
Table 2 Comprehensive weight of dispatching indicators in different typical year scenarios

典型年	受水区综合缺水率	总抽水量	总弃水量	抽江水量
特丰水年	0.2402	0.4127	0.2208	0.1262
丰水年	0.2333	0.4129	0.2370	0.1168
平水年	0.2526	0.4100	0.1906	0.1469
枯水年	0.2616	0.4138	0.1697	0.1548
特枯水年	0.2606	0.4136	0.1593	0.1664

上述结果表明,在保障受水区用水安全的前提下,不考虑湖泊北调水位约束能够有效提升工程运行效益,主要体现在减少高成本的抽江供水、降低弃

表3 不同典型年情景下两种工况调度指标对比

Table 3 Comparison of dispatching indicators under two operating schemes in different typical year scenarios

典型年	工况	受水区综合缺水率/%	总抽水量/亿 m ³	总弃水量/亿 m ³	抽江水量/亿 m ³
特丰水年	S1	10.4	134.18	708.64	36.78
	S2	10.4	102.93	697.96	29.96
丰水年	S1	10.5	173.59	198.69	46.08
	S2	10.5	112.94	187.04	30.09
平水年	S1	13.2	192.13	44.48	59.64
	S2	13.2	142.78	25.39	45.41
枯水年	S1	16.8	278.26	10.17	91.70
	S2	16.8	243.70	1.48	87.44
特枯水年	S1	20.3	342.79	6.92	114.05
	S2	20.3	332.96	1.80	115.74

表4 不同典型年情景下两种工况调度指标变化率

Table 4 Change rate of dispatching indicators under two operating schemes in different typical year scenarios

典型年	总抽水量变化率/%	总弃水量变化率/%	抽江水量变化率/%
特丰水年	-23.3	-1.5	-18.5
丰水年	-34.9	-5.9	-34.7
平水年	-25.7	-42.9	-23.9
枯水年	-12.4	-85.5	-4.7
特枯水年	-2.9	-74.0	1.5

水损失以及总调水量的显著下降。尤其在丰水年和平水年,调度系统可利用的湖泊蓄水充足,放宽北调水位约束后,湖泊调蓄能力得到更充分发挥,进一步提升了工程的水量调配能力。然而,当湖泊来水充沛时,若调蓄能力受限,系统面临的主要风险转变为大量水资源无法有效利用所导致的弃水增加,造成资源浪费与调度效益损失;相反,在枯水年和特枯水年,湖泊来水严重不足,虽然几乎无弃水发生,但系统需通过增加长江抽水量来满足用水需求,导致供

水成本显著上升,供水安全风险也同步加剧。总体来看,江苏段调水效益对湖泊来水条件表现出明显的响应特征:丰水年有利于低成本水源的充分利用,降低对长江水源的依赖;枯水年则需依赖更多高成本的江水资源,提升了调水系统的运行压力。由此可见,在不考虑湖泊北调水位约束的情形下,更灵活地调控湖泊水位可有效释放系统调蓄潜力,缓解极端来水条件下的弃水或供水风险,最终实现整体调水效益的提升。

4.2 湖泊北调水位约束对湖泊利用情况的影响

表5、表6为不同典型年湖泊来水情景下两种工况洪泽湖与骆马湖的泵站入湖水量、供水量及弃水量的对比。总体来看,随着湖泊来水量的减少,两湖的供水能力有所下降,弃水量也随之减少,而泵站补水的依赖程度则显著提升,体现出在枯水年系统对人工调水的高度依赖性。从不同湖泊的特征来看,洪泽湖具有更大的入流量与调节库容,是江苏段受水区的主要淮水供水来源;相比之下,骆马湖自然来水较少,其来水主要依赖下级水源。在不同工况对比方面,工况S2的湖泊水资源利用效益明显高于工况S1。以丰水年为例,相较于工况S1,洪泽湖在工况S2下的泵站入湖水量减少了2.05亿m³,弃水量减少0.73亿m³,而供水量则略有提升(1.69亿m³);骆马湖变化更为显著,泵站入湖水量减少1.86亿m³,弃水量由24.06亿m³降至17.80亿m³(下降26.0%),供水量则增加

1.86亿m³。在平水年和枯水年,工况S2同样呈现弃水减少、供水增加的趋势,尤其是在平水年,骆马湖弃水减少比例达33.65%,供水增加3.51亿m³,充分体现了取消北调水位约束对提高湖泊调蓄能力与水源利用效率的积极作用。综上所述,相较于工况S1,工况S2能够在保障供水的同时,有效减少泵站入湖水量与湖泊弃水,提高湖泊天然来水的利用程度,进而提升系统整体运行效益。

湖泊水位变化对周边生态系统具有重要影响,因此有必要进一步评估优化调度方案对生态运行水位的保障能力。根据江苏省水利厅于2019年公布的第一批河湖生态水位,洪泽湖和骆马湖的生态水位分别为11.8m和20.5m。其中,骆马湖的生态水位低于死水位,加之其来水量较小、调蓄能力有限,故本文仅对洪泽湖的优化运行水位与生态水位之间的匹配情况进行统计分析。图4为洪泽湖在不同典型年来水情景下两种工况的优化水位,并据此计算生态水位保障率。结果表明,在特丰水年、丰水年、平水年、枯水年和特枯水年,工况S1下的生态水位保障率分别为100%、97.6%、88.1%、81.0%和78.6%,工况S2下分别为100%、95.2%、85.7%、78.6%和59.5%。可见,在一般年份两种工况的生态水位保障率差异较小,但在特枯水年,取消北调水位约束将导致生态水位保障率显著下降,加剧生态保障压力。从运行水位变化趋势来看,在特丰水年和丰水年,由于来水充沛,洪泽湖水位大部分时间维

表5 不同典型年情景下两种工况的湖泊利用情况对比

Table 5 Comparison of water resource utilization of lakes under two operating schemes in different typical year scenarios		洪泽湖/亿 m ³			骆马湖/亿 m ³		
典型年	运行工况	泵站入湖	供水	弃水	泵站入湖	供水	弃水
特丰水年	S1	0.08	172.07	532.65	10.04	27.99	170.16
	S2	0.02	174.15	530.91	3.90	30.85	165.00
丰水年	S1	2.41	174.08	167.83	14.76	30.58	24.06
	S2	0.36	175.77	167.10	7.34	32.44	17.80
平水年	S1	4.60	139.39	34.45	13.14	23.70	5.29
	S2	0.67	150.11	19.80	9.79	30.90	3.51
枯水年	S1	11.25	108.55	5.65	16.99	20.67	0
	S2	8.98	111.94	0	12.53	24.97	0
特枯水年	S1	17.53	93.51	0.02	20.04	16.67	0.47
	S2	16.74	94.37	0	15.41	20.05	0

表6 不同典型年情景下两种工况的湖泊利用情况指标变化率

Table 6 Comparison of water resource utilization of lakes under two operating schemes in different typical year scenarios						
典型年	洪泽湖泵站入湖变化率/%	洪泽湖供水变化率/%	洪泽湖弃水变化率/%	骆马湖泵站入湖变化率/%	骆马湖供水变化率/%	骆马湖弃水变化率/%
特丰水年	-75.0	1.2	-0.3	-61.2	10.2	-3.0
丰水年	-85.1	1.0	-0.4	-50.3	6.1	-26.0
平水年	-85.4	7.7	-42.5	-25.5	30.4	-33.7
枯水年	-20.2	3.1	-100.0	-26.3	20.8	0
特枯水年	-4.7	0.9	-100.0	-23.1	20.3	-100.0

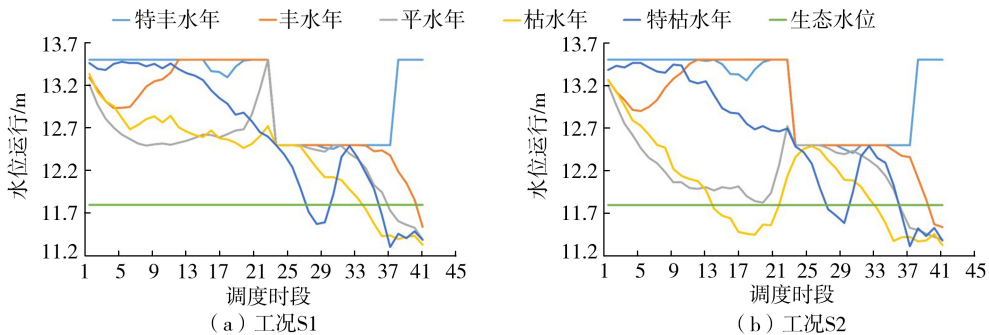


图 4 两种工况下洪泽湖的优化运行水位

Fig. 4 Optimized operating water levels of Hongze Lake under two operating schemes

持在较高水平,生态水位要求基本能够满足。而随着来水量减少,湖泊运行水位逐渐降低,生态水位满足时段明显缩短,特枯水年时保障能力最弱。

综上所述,洪泽湖在不同典型年来水情景下均承担系统主要的供水任务,表明其不仅是工程的重要淮水利用来源,更是调蓄能力突出的关键节点。在实际调度中,应优先利用其天然来水,尤其在丰水年应充分发挥其供水潜力,减轻泵站抽水压力,降低长江高能耗水源的依赖。在来水不足年份,则应通过前期蓄水、分期补水等方式保障其生态水位和基本供水能力。骆马湖来水规模相对较小,但供水能力稳定,可作为系统的辅助水源,发挥其在高需水期的调蓄补水功能。建议在运行管理中,动态调整其调蓄与供水比例,提升水资源调配效率,避免水资源浪费。此外,取消北调水位约束在多数年份可提升调度效益,但在特枯水年生态保障能力下降显著。因此建议在实际运行中采用情景分类管理策略:丰水年可适度放宽水位约束以提高水源利用效率,枯水年则应强化生态保障刚性约束,保持水位稳定,保

障湖泊生态安全。

4.3 需水条件对水量调度和利用能力的影响

保障供水是跨流域调水工程长期运行的核心目标之一,而用水需求的变化将显著影响其最优调度效果。为深入评估湖泊北调水位约束在不同用水需求条件下对南水北调东线工程江苏段调度效益的影响,本文以江苏省当前用水水平为基准,以丰水年为例设置了 5 种典型需水情景:50%需水、75%需水、125%需水、150%需水和 200%需水。图 5 为丰水年不同需水情景下两种工况的优化调度结果。结果表明,工况 S2 在各类需水情景下的调度效率均明显优于工况 S1,可见取消湖泊北调水位约束对提升系统整体运行性能具有稳定且显著的促进作用。

为评估取消湖泊北调水位约束对东线工程江苏段的综合运行效益提升作用的鲁棒性,采用 CECG-VIKOR 决策方法,从 5 种需水情景中选取工况 S2 的最优“河-湖-闸-泵”联合调度方案,并与在相同受水区综合缺水率条件下的工况 S1 进行对比分析,调度指标综合权重如表 7 所示,比较结果如表 8、表 9

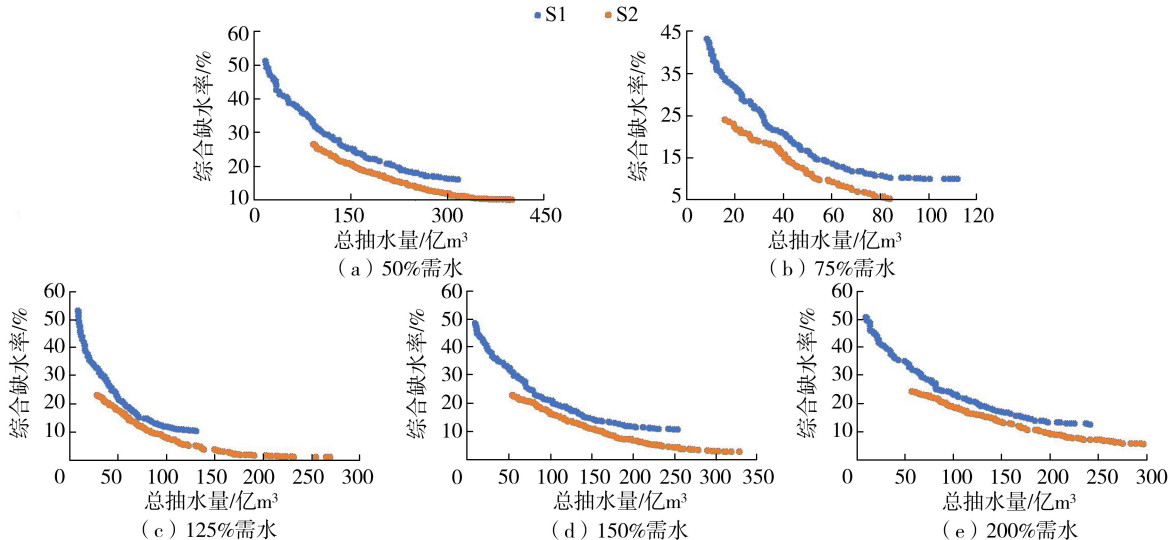


图 5 不同需水情景下两种工况的优化调度结果

Fig. 5 Optimized scheduling results for two operating schemes under different water demand scenarios

表 7 不同需水情景下调度指标综合权重

Table 7 Dispatching indicator comprehensive weight under different water demand scenarios

需水情景	受水区综合缺水率	总抽水量	总弃水量	抽江水量
50%需水	0.2328	0.4091	0.2536	0.1045
75%需水	0.2565	0.4361	0.1874	0.1200
125%需水	0.2248	0.4123	0.2295	0.1334
150%需水	0.2402	0.4055	0.2072	0.1472
200%需水	0.2585	0.4177	0.1797	0.1441

表 8 不同需水情景下两种工况的调度指标对比

Table 8 Comparison of dispatching indicators for two operating schemes under different water demand scenarios											
需水情景	工况	综合运行效益指标				洪泽湖水量利用/亿 m ³			骆马湖水量利用/亿 m ³		
		受水区综合缺水率/%	总抽水量/ 亿 m ³	总弃水量/ 亿 m ³	抽江水量/ 亿 m ³	泵站入湖	供水	弃水	泵站入湖	供水	弃水
50%需水	S1	10.0	112.04	264.17	23.06	0.27	95.24	233.90	11.33	22.18	27.42
	S2	10.0	53.90	258.23	15.35	0.17	98.94	229.79	2.10	20.75	22.41
75%需水	S1	13.6	89.84	230.59	25.67	0.42	132.05	203.35	8.92	19.32	26.70
	S2	13.6	66.72	225.52	20.33	0	132.95	201.99	2.72	23.91	19.73
125%需水	S1	16.9	132.39	173.76	46.38	1.02	191.35	149.17	11.48	26.99	23.32
	S2	16.9	98.88	164.53	32.89	0.44	193.71	146.23	5.93	31.13	17.06
150%需水	S1	21.7	112.41	147.49	41.07	0.25	213.46	126.30	8.79	30.84	19.95
	S2	21.7	82.60	140.22	27.75	0.03	216.07	123.46	5.85	33.27	15.58
200%需水	S1	23.2	170.37	97.92	62.90	0.88	261.10	72.28	15.01	37.86	17.64
	S2	23.2	118.95	83.63	39.56	0	267.81	71.69	9.08	41.39	10.64

表 9 不同需水情景下两种工况的调度指标变化率

Table 9 Change rate of dispatching indicators for two operating schemes under different water demand scenarios									
需水情景	总抽水量 变化率/%	总弃水量 变化率/%	抽江水量 变化率/%	洪泽湖泵站 入湖变化率/%	洪泽湖供水 变化率/%	洪泽湖弃水 变化率/%	骆马湖泵站 入湖变化率/%	骆马湖供水 变化率/%	骆马湖弃水 变化率/%
50%需水	-51.9	-2.3	-33.4	-37.0	3.9	-1.8	-81.5	-6.5	-18.3
75%需水	-25.7	-2.2	-20.8	-100.0	0.7	-0.7	-69.0	23.8	-26.1
125%需水	-25.3	-5.3	-29.1	-56.9	1.2	-2.0	-48.3	15.3	-26.8
150%需水	-26.5	-4.9	-32.4	-88.0	1.2	-2.3	-33.0	7.9	-21.0
200%需水	-30.2	-14.6	-37.1	-100.0	2.6	-9.6	-39.5	9.3	-39.7

5 结 论

a. 为系统评估湖泊北调水位约束对工程调度效益的影响,构建了考虑该约束(S1)与不考虑该约束(S2)两种工况下的“河-湖-闸-泵”联合优化调度模型,以综合缺水率和总抽水量最小为目标。结果表明,在不同典型年湖泊来水情景下,工况 S2 的调度效益始终优于工况 S1,在相同抽水量水平下可实现更低的综合缺水率,体现出更高的调度效益。

b. 基于受水区综合缺水率、总抽水量、总弃水量和抽江水量构建评价矩阵,采用 CECG-VIKOR 决策方法选取工况 S1 和 S2 在丰水年、平水年和枯水年下的最优调度方案。结果表明,工况 S2 在各湖泊来水情景下的调度效益均优于工况 S1:丰水年总抽水量减少 60.65 亿 m³ (下降 34.9%)、弃水量减少 11.65 亿 m³ (下降 5.9%)、抽江水量减少 15.99 亿 m³ (下降 34.7%);平水年分别减少 49.35 亿 m³

所示。在相同供水保障水平下,工况 S2 相较于工况 S1 在多个调度指标上均实现优化,包括总抽水量、抽江水量、总弃水量、洪泽湖与骆马湖的泵站入湖水量及弃水量等均呈下降趋势,而两湖的供水能力则不同程度增强。随着江苏省内用水需求的不断提升,泵站总抽水量、入湖水量、抽江水量及湖泊供水量逐渐增加,而湖泊弃水量则持续减少,系统供水压力显著加大;与此同时,工况 S2 相对于工况 S1 的调度效益改善幅度也逐渐减小。

(25.7%)、19.09 亿 m³ (42.9%) 和 14.23 亿 m³ (23.9%);枯水年分别减少 34.56 亿 m³ (12.4%)、8.69 亿 m³ (85.5%) 和 4.26 亿 m³ (4.7%)。

c. 相较于工况 S1,工况 S2 显著增强了洪泽湖和骆马湖的水资源调节能力,提高了天然来水的利用效率,降低了对长江供水的依赖。丰水年来水情景下,洪泽湖泵站入湖水量减少 2.05 亿 m³ (下降 85.1%)、弃水量减少 0.73 亿 m³ (下降 0.4%)、供水量小幅增加 1.69 亿 m³ (提升 1.0%);骆马湖泵站入湖水量减少 7.42 亿 m³ (下降 50.3%)、弃水量减少 6.26 亿 m³ (下降 26.0%)、供水量增加 1.86 亿 m³ (提升 6.1%)。

d. 在不同需水情景下,工况 S2 的调度效益均优于工况 S1,体现在总抽水量、抽江水量、总弃水量、两湖泵站入湖水量及弃水量等指标的全面下降,洪泽湖和骆马湖的供水能力亦有不同程度提升。结果表明,在不考虑湖泊北调水位约束的条件下,湖泊

的水资源调节潜力能够得到更充分发挥,有效缓解系统的供水压力。

参考文献:

[1] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):35-41. (An Lina, Fan Guofu, Wu Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):35-41. (in Chinese))

[2] Deng Q Y, Sharretts T, Ali T, et al. Deepening water scarcity in breadbasket nations [J]. Nature Communications,2025,16(1):1110.

[3] Rosa L, Sangiorgio M. Global water gaps under future warming levels [J]. Nature Communications, 2025, 16 (1):1192.

[4] Scanlon B R,Fakhreddine S,Rateb A,et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. Nature Reviews Earth & Environment,2023,4(2):87-101.

[5] He Chunyang, Liu Zhifeng, Wu Jianguo, et al. Future global urban water scarcity and potential solutions [J]. Nature Communications,2021,12(1):4667.

[6] Wang Lichuan, He Fan, Zhao Yong, et al. Quantitative assessment and analysis of the impact of inter-basin water transfer on regional water resource stress [J]. Journal of Hydrology,2025,657:133090.

[7] 何君,酈建强,李云玲,等. 新形势下科学推进我国调水工程规划建设的若干思考 [J]. 中国水利,2023 (22): 49-53. (He Jun, Li Jianqiang, Li Yunling, et al. Scientific advancements in the planning and construction of water transfer projects in China under the new situation [J]. China Water Resources,2023(22):49-53. (in Chinese))

[8] 王梦晗,严登华,张鑫,等. 水网工程高质量发展若干关键问题的思考 [J]. 水资源保护,2025,41 (1): 35-41. (Wang Menghan, Yan Denghua, Zhang Xin, et al. Thoughts on key issues for high-quality development of water network projects [J]. Water Resources Protection, 2025,41(1):35-41. (in Chinese))

[9] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (3): 10-18. (Fang Guohua, Li Zhichao,Zhong Huayu,et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),

2023,51(3):10-18. (in Chinese))

[10] 贾丹妮,武连洲,栗晓玲,等. 跨流域调水工程“用户-枢纽”群联合优化调配 [J]. 水资源保护,2024,40 (6): 188-197. (Jia Danni, Wu Lianzhou, Su Xiaoling, et al. Joint optimization and allocation model of “user-hub” group in inter-basin water transfer project [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 188-197. (in Chinese))

[11] 肖洋,刘扬扬,王中敏,等. 引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响[J]. 水资源保护,2025,41(3):161-170. (Xiao Yang, Liu Yangyang, Wang Zhongmin, et al. Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. Water Resources Protection,2025,41(3):161-170. (in Chinese))

[12] 陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-Ⅲ 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究 [J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):111-119. (Tao Jie, Wang Peilin, Wang Hui,et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-Ⅲ algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(6):111-119. (in Chinese))

[13] 苏荟琰,李金燕,魏怡敏,等. 基于机会成本的宁夏中南部调水工程水源区生态补偿标准研究 [J]. 水利经济, 2023,41 (6): 45-50, 66. (Su Huiyan, Li Jinyan, Wei Yimin,et al. Study on ecological compensation standards in the water source area of the water diversion project in Central and Southern Ningxia based on opportunity cost [J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(6):45-50, 66. (in Chinese))

[14] 新华社. 全面通水 10 周年! 南水北调工程塑造我国水资源分配新格局 [EB/OL]. (2024-12-13) [2025-03-26]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202412/content_6992281.htm.

[15] Yan Hanlu, Lin Yuqing, Chen Qiuwen, et al. A review of the eco-environmental impacts of the south-to-north water diversion: implications for interbasin water transfers [J]. Engineering,2023,30:161-169.

[16] Guo Yuxue, Tian Xin, Fang Guohua, et al. Many-objective optimization with improved shuffled frog leaping algorithm for inter-basin water transfers [J]. Advances in Water Resources,2020,138:103531.

[17] Zhong Huayu, Liao Tao, Fang Guohua, et al. Deriving water allocation schemes for interbasin water transfer projects using a novel multiobjective cuckoo search algorithm [J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2024,150(6):04024016.

information Science, 2020, 22 (11): 2152-2165. (in Chinese))

[40] 金凯,王飞,韩剑桥,等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. (Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974. (in Chinese))

[41] 陈厚兵,陈耀亮,宋清海,等. 2001—2020 年澜湄流域热带地区土地覆被变化对蒸散发的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38 (22): 113-122. (Chen Houbing, Chen Yaoliang, Song Qinghai, et al. Effects of land cover change on evapotranspiration in the tropical Lancang-Mekong River Basin from 2001 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (22): 113-122. (in Chinese))

[42] 赵勇,董义阳,翟家齐,等. 考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 78-89. (Zhao Yong, Dong Yiyang, Zhai Jiaqi, et al. A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 78-89. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 02 - 24 编辑:徐娟)

+++++

(上接第 58 页)

[18] 方国华,郭玉雪,闻昕,等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 34-41. (Fang Guohua, Guo Yuxue, Wen Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 34-41. (in Chinese))

[19] 方国华,赵文萃,李鑫,等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 1-8. (Fang Guohua, Zhao Wencui, Li Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 1-8. (in Chinese))

[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. (Wen Xin, Huang Shuyi, Tan Qiaofeng, et al. Study on joint operation of multiple projects and multiple objectives for the South-to-North Water Transfer in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 118-124. (in Chinese))

[21] 徐纪翔,马晶洁,闻昕,等. 南水北调东线二期工程江苏段对苏北地区供水模式的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 115-124. (Xu Jixiang, Ma Jingjie, Wen Xin, et al. Effect of Jiangsu section of second phase of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project on water supply pattern in northern Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 115-124. (in Chinese))

[22] 方国华,钟华昱,闻昕,等. 考虑湖泊互济互调运行的江苏省南水北调工程优化调度[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 776-787. (Fang Guohua, Zhong Huayu, Wen Xin, et al. Optimal operation of the Jiangsu Province section of the South-to-North Water Diversion Project under the operational mode of mutual transfer and diversion among lakes [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 776-787. (in Chinese))

[23] 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 Lixin, Gao Bingxiang, Xia Haoshun, 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))

[24] Zhong Huayu, Wu Shuyue, Yan Min, et al. Derivation of optimal scheduling strategies for large-scale inter-basin water transfer projects considering streamflow wet-dry encounter uncertainty of multiple reservoirs[J]. Journal of Hydrology, 2025, 662: 133784.

[25] Ming B, Zhong Huayu, Zhang Wei, et al. Deriving operating rules for inter-basin water transfer projects incorporating a scenario reduction strategy[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129854.

[26] 刘欣,赵雪花,武雯昱,等. 基于 NSGA- II + ARSBX 算法的太原市水资源优化配置[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 79-86. (Liu Xin, Zhao Xuehua, Wu Wenyu, et al. Optimal allocation of water resources based in Taiyuan City on NSGA- II + ARSBX algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 79-86. (in Chinese))

[27] Zhang Shuo, Kang Yan, Gao Xuan, et al. Optimal reservoir operation and risk analysis of agriculture water supply considering encounter uncertainty of precipitation in irrigation area and runoff from upstream[J]. Agricultural Water Management, 2023, 277: 108091.

(收稿日期:2025 - 04 - 22 编辑:王芳)