

南水北调东线工程优化调度与区段水源组成分析

李昕阳^{1,2}, 郭旭宁³, 李维雨⁴, 王银堂^{1,2}, 董甲平^{1,2}, 万新宇⁵, 刘为锋³

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354; 2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 4. 中国南水北调集团东线有限公司, 北京 100036;
5. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对南水北调东线工程运行成本较高以及水源组成划分不清的问题,构建了优化调度模型,对比分析了现状调度情景与优化调度情景下的供水量与抽江水量,并采用分水源统计方法分析了优化调度情景下各区段不同水文年型的水源组成。结果表明:与现状调度情景相比,优化调度情景在特丰水年通过增加利用水源湖泊的蓄水,减少了 5.0% 的抽江水量,在特枯水年减少了 3.6% 抽江水量的同时,还能向受水区多供水 671.7 万 m³;在优化调度情景下,各区段供水水源均以长江水为主,特枯水年各区段均增加了长江水的占比,其中骆马湖—东平湖区段在减少了洪泽湖水和骆马湖水占比的同时增加了下级湖作为供水水源,特丰水年各区段均减少了长江水的占比,增加了洪泽湖水和骆马湖水的占比。

关键词:优化调度模型;分水源统计方法;水源组成;供水量;抽江水量;南水北调东线工程

中图分类号:TV213.4;TV68 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0171-08

Optimal dispatching and section water source composition analysis of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project//LI Xinyang^{1,2}, GUO Xuning³, LI Weiyu⁴, WANG Yintang^{1,2}, DONG Jiaping^{1,2}, WAN Xinyu⁵, LIU Weifeng³(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 4. China South-to-North Water Diversion Eastern Route Corporation Limited, Beijing 100036, China; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the issues of high operational costs and unclear water source composition in the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project, an optimal dispatching model was developed. Comparative analysis was conducted on the water supply volume and pumping water volume from the Yangtze River under the current and optimal dispatching scenarios. Additionally, a source water partitioning method was employed to analyze the water source composition across different hydrological years in various sections under the optimal dispatching scenario. The results show that compared with the current dispatching scenario, the optimized dispatching scenario reduces pumping water volume from the Yangtze River by 5.0% in extremely wet years by increasing the utilization of reservoir storage from source lakes. In extremely dry years, it reduces pumping water volume from the Yangtze River by 3.6% while supplying an additional 6.717 million m³ of water supply volume to the receiving regions. Under the optimized dispatching scenario, Yangtze River water remains the primary supply source across all sections. During the extremely dry years, the proportion of Yangtze River water in each section increases, with the Luoma Lake-Dongping Lake section reducing the proportion of Hongze Lake water and Luoma Lake water while incorporating the Lower Lake as an additional water source. During the extremely wet years, the proportion of Yangtze River water has been reduced in each section, while the proportion of Hongze Lake water and Luoma Lake water has been increased.

Key words: optimal dispatching model; source water partitioning method; water source composition; water supply volume; pumping water volume from the Yangtze River; the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);国家自然科学基金项目(52009140);水利部水利水电规划设计总院“揭榜挂帅”项目;中国南水北调集团有限公司科研项目(DXZ-2023-081-ZD-ZX)

作者简介:李昕阳(1999—),女,博士研究生,主要从事水资源调度研究。E-mail:lxxyinyangli@163.com

通信作者:刘为锋(1993—),男,高级工程师,博士,主要从事水资源调配和水风光多能互补研究。E-mail:weifliu@qq.com

随着我国经济的迅速发展,水资源时空分布不均问题凸显,北方地区长期面临着水资源短缺的问题^[1-2]。自南水北调东线工程建成通水以来,改善了北方地区水资源配置格局,为受水区开辟了新的水源^[3]。在供水、灌溉、航运、防洪排涝以及改善生态环境等方面,南水北调工程均发挥了较大效益,为经济社会的可持续发展提供了有力保障^[4-7]。目前,许多学者对南水北调东线工程进行了研究,例如:方国华等^[8]将优化调度与水资源配置相结合,把工程调水量作为配置的一种水源,实现水源的动态变化捕捉,在保障南水北调东线江苏段受水区用水的基础上,提高了经济节能效益;闻昕等^[9]构建了南水北调东线江苏段工程优化调度模型,并基于组合赋权TOPISIS 进行多属性决策,其优化调度方案提高了供水保障,降低了泵站运行成本,同时发挥了湖泊的调蓄能力;郭玉雪等^[10]基于改进的多目标蛙跳算法求解了南水北调东线江苏段多目标优化模型,提出了湖泊群联合调度和水量调配方案。然而,现有的研究多集中于模型构建和优化方法的改进^[11-12],且研究范围多为局部区域,如江苏段^[13-14]、山东段^[15]等特定区段。这种研究现状导致现有成果缺乏对南水北调东线工程整条线路的系统性分析,未考虑不同区段间的相互影响与协调关系,制约了工程整体效益的提升。

南水北调东线工程从长江下游干流取水,经京杭大运河及其平行的河道双线路向北输水,黄河以南利用洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖进行调蓄^[16]。由于其输水线路复杂且涉及湖泊本地来水和外调水,导致了水源区分难度较大、工程的管理投资成本较高、不同受水区之间存在利益冲突等问题^[17]。面对多水源的复杂调度系统,如何确定水源组成并优化调水方案已成为关键挑战。鉴于此,本文基于南水北调东线一期工程和北延应急工程的物理拓扑结构,构建优化调度模型分析模拟优化调度相较于现状调度的潜力,并采用分水源统计方法分析各区段多水源在优化调度情景下的变化规律,以期在南水北调东线工程的高质量发展提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南水北调东线工程包含东线一期工程和北延应急供水工程,供水范围涉及江苏、安徽、山东、河北、天津等 5 省市、27 个地市、124 个区县。东线工程涉及长江、淮河、黄河、海河四大流域,工程从长江下游干流取水,沿线连通洪泽湖、骆马湖、下级湖、上级湖、东平湖五大湖泊,工程调水线路总长 1 467 km,

沿线共设有 13 级泵站,主要取水水源包括长江、洪泽湖、骆马湖和下级湖,目前上级湖和东平湖不作为东线工程取水水源。以山东鲁北受水区为例,如果使用长江水作为水源为其供水,则需要经过黄河以南的 13 级泵站逐级提水至东平湖,然后经穿黄隧洞自流至鲁北受水区;同样地,洪泽湖作为水源需要经 10 级泵站提水,骆马湖作为水源需要经 7 级泵站提水,下级湖作为水源需要经 4 级泵站提水,可见不同的水源组成的提水成本具有显著差异。图 1 为南水北调东线工程线路图^[18]。考虑到南水北调东线工程涉及范围广、线路长、沿线湖泊和泵站工程多等特性,为凸显沿线湖泊的调蓄能力,以湖泊为中心,将各级抽水泵站简化为出湖站和入湖站,形成串联系统。根据沿线水源、泵站以及受水区之间的拓扑关系,将南水北调东线工程分为 8 个区段:长江—洪泽湖区段(S1)、洪泽湖—骆马湖区段(S2)、骆马湖—下级湖区段(S3)、下级湖—上级湖区段(S4)、上级湖—东平湖区段(S5)、胶东区段(S6)、鲁北区段(S7)、北延应急区段(S8)。



图 1 南水北调东线工程线路图

Fig. 1 Route map of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

1.2 数据来源

湖泊的逐月入湖径流资料来源于 1980—2019 年《中华人民共和国水文年鉴》淮河卷、黄河卷部分站点的逐日监测数据及各省整编上报的月度径流数据。输水损失、泵站参数及泵站工作效率等数据均来自南水北调东线工程运行管理单位。需水数据来源于配置模型,配置模型基于外调水、本地地表

水和地下水等多种水源调控,并采用分阶段供水模式,模型优先利用本地水资源,同时对外调水和地下水的提取进行省总量控制和地下水压采原则的约束,从而确保水资源的公平、高效和可持续利用。

2 研究方法

2.1 优化调度模型

2.1.1 目标函数

南水北调东线工程作为重大跨流域调水工程,应在保证安全运行的前提下尽可能最大程度发挥工程调水能力,保障沿线受水区的用水需求。因此,优化调度模型第一个目标函数为受水区总缺水率最小:

$$O_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\alpha_{i,j,t} W_{i,j,t} - D_{i,t}) / D_{i,t} \quad (1)$$

式中: t 为时段编号; i 为受水区编号; j 为水源编号; T 为调度周期的总时段数; I 为受水区总数; J 为水源总数; $\alpha_{i,j,t}$ 为 t 时段 i 受水区从 j 水源获得的水量系数; $W_{i,j,t}$ 为 t 时段 i 受水区 j 水源的需供水量; $D_{i,t}$ 为 t 时段 i 受水区的实际供水量。

南水北调东线工程现状调度规则主要参考水利部2013年制定的《南水北调东线一期工程水量调度方案(试行)》,主要考虑受水区的需水需求,以用户最大供水保证率或最小缺水率为目标,没有过多考虑调水成本。本文考虑泵站提水耗能是工程运行成本的一项重要,因此,优化调度模型第二个目标为梯级泵站提水耗电量最小:

$$O_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K E_{k,t} = \min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \rho g Q_{k,t} H_{k,t} t / (1\,000 \eta_{p,k,t}) \quad (2)$$

式中: k 为泵站编号; K 为泵站总数; $E_{k,t}$ 为 t 时段 k 泵站的耗电量; ρ 为水体密度; g 为重力加速度; $Q_{k,t}$ 为 t 时段 k 泵站抽水流量; $H_{k,t}$ 为 t 时段 k 泵站的扬程; $\eta_{p,k,t}$ 为 t 时段 k 泵站的工作效率,受运行工况、抽水量、工作水头等多种因素影响,为简化计算,本文取时段平均工作效率。

2.1.2 约束条件

a. 湖泊水量平衡约束:

$$S_{h,t+1} = S_{h,t} + I_{h,t} + Q_{in,h,t} - q_{out,h,t} - Q_{out,h,t} - D_{0,h,t} \quad (3)$$

式中: h 为湖泊编号; $S_{h,t}$ 、 $S_{h,t+1}$ 分别为 h 湖泊 t 时段的初、末蓄水量; $I_{h,t}$ 为 h 湖泊 t 时段来水量; $Q_{in,h,t}$ 、 $Q_{out,h,t}$ 分别为 h 湖泊 t 时段抽入、抽出水流量; $q_{out,h,t}$ 为 h 湖泊 t 时段泄水量; $D_{0,h,t}$ 为 h 湖泊 t 时段向原受水区提供的水量。

b. 湖泊调度规则约束:由于洪泽湖、骆马湖、下级湖除了为南水北调工程受水区供水,还要优先保证当地用水户的用水权益,为了避免工程调水给当地用水户带来过多影响,调度中设置了调蓄湖泊的北调控制水位。当南水北调东线工程受水区需水且湖泊水位低于北调控制水位时,停止从该湖泊抽水北调,转而切换为其他湖泊或长江水源供水;当湖泊水位高于北调控制水位但低于抽蓄控制水位时,按照北调水、当地用水、湖泊蓄水的需求进行抽水北调。调蓄湖泊控制水位如表1所示。

c. 考虑河段输水损失、受水区用水的水量平衡约束:

$$Q_{in,m+1,t} = Q_{out,m,t} + q_{inter,m,t} - D_{inter,m,t} - q_{loss,m,t} \quad (4)$$

式中: m 为河段编号; $Q_{in,m+1,t}$ 为 m 河段 t 时段上游泵站(闸门)抽(引)水量; $Q_{out,m,t}$ 为 m 河段 t 时段到达下游泵站前的水量; $q_{inter,m,t}$ 为 m 河段 t 时段的区间来水量; $D_{inter,m,t}$ 为 m 河段 t 时段的供水量; $q_{loss,m,t}$ 为 m 河段 t 时段的水量损失量,其中输水损失率在模型中纳入区间来水考虑,计算时按照区段长度占工程全长长度的比例进行分配。

d. 湖泊调蓄能力约束:

$$S_{min,h,t} \leq S_{h,t} \leq S_{max,h,t} \quad (5)$$

式中: $S_{min,h,t}$ 为 h 湖泊 t 时段的最小蓄水量; $S_{max,h,t}$ 为 h 湖泊 t 时段的最大蓄水量。

e. 泵站工作能力约束:

$$\begin{cases} Q_{r,k,t} \leq Q_{r,max,k,t} \\ Q_{c,k,t} \leq Q_{c,max,k,t} \end{cases} \quad (6)$$

表 1 调蓄湖泊控制水位
Table 1 Control water level of regulation lakes

时段	洪泽湖控制水位/m		骆马湖控制水位/m		下级湖控制水位/m	
	北调	抽蓄	北调	抽蓄	北调	抽蓄
10月上旬至11月上旬	12.0~11.9	13.0	22.1~22.2	23.0	31.5~32.9	33.0
11月中旬至3月底	12.0~12.5	13.0	22.1~23.0	23.0	31.9~32.8	33.0
4月上旬至5月底	12.5~12.0	13.0	23.0~22.5	23.0	32.3~31.8	33.0
6月上旬至6月底	12.5~12.1	12.5	23.0~22.6	22.5	32.3~31.9	32.5
7月上旬至8月底	12.0	12.5	22.2~22.1	22.5	31.8	32.5
9月上旬至9月底	12.0~11.9	12.5	22.1~22.2	22.5	31.5~32.9	32.5

式中: $Q_{r,k,t}$ 为 k 泵站 t 时段入湖抽水量; $Q_{c,k,t}$ 为 k 泵站 t 时段出湖抽水量; $Q_{r,max,k,t}$ 为 k 泵站 t 时段入湖最大抽水量; $Q_{c,max,k,t}$ 为 k 泵站 t 时段出湖最大抽水量。

f. 北调水经穿黄工程输送到南水北调东线鲁北段,因此受闸门过水能力约束:

$$F_{out,t} = \min(F_{in,t}, F_{c,t}) \tag{7}$$

式中: $F_{out,t}$ 为 t 时段穿黄工程的出流量; $F_{in,t}$ 为 t 时段穿黄工程的入流量; $F_{c,t}$ 为 t 时段穿黄工程的过水能力。

g. 需水量约束:

$$D_{i,t} \leq W_{i,t} \tag{8}$$

式中: $W_{i,t}$ 为 i 受水区 t 时段的需水量; $D_{i,t}$ 为 i 受水区 t 时段的实际供水量。

h. 抽水、下泄约束:

$$Q_{in,h,t}q_{out,h,t} = 0 \tag{9}$$

式中: $Q_{in,h,t}$ 为 h 湖泊在 t 时段的抽入水量; $q_{out,h,t}$ 为 h 湖泊在 t 时段的泄水量。

i. 决策变量非负约束。

2.1.3 求解方法

南水北调东线工程优化调度的首要目标是确保受水区的供水需求 (O_1),并在该目标下使得工程总耗电量最小 (O_2), O_1 的优先权高于 O_2 。因此,本文以 13 级泵站的提水量为决策变量,采用改进多算子差分进化 (improved multi operator differential evolution, IMODE) 算法^[19]求解目标函数 O_1 。在迭代进化搜索过程中,对每一代种群中的最优个体进行检验,验证该个体代表的决策状态是否满足目标函数 O_2 ,若不满足,则说明该决策状态仍存在可减少能源消耗的潜力。因此,优化调度模型是在不削弱本代最优个体最优特性的原则下将最优个体向目标函数 O_2 的方向修正,具体求解步骤为:首先,随机生成初始种群并进行评估,然后将初始种群分为数量均等的 3 个子种群,使用 3 种差分变异算子分别对 3 个子种群进行变异计算,对于每个解,根据其分配的变异策略生成相应的新个体;其次,每个子种群的大小基于解的质量和每个子种群的多样性两个指标进行动态更新,同时为了增强 IMODE 的收敛性,在优化过程的后期阶段引入了局部搜索;最后,在每一代结束时,所有子种群被收集起来,线性减少种群的大小,并基于新的子种群大小进行重新划分,通过循环进行种群进化,直至满足终止条件。

2.1.4 计算条件

本文研究期为 1980—2019 年,以年为调度期 (10 月至次年 9 月),以月为计算时段。以湖泊的逐月入湖径流资料作为天然来水过程,以水资源配置

模型计算的需水预测结果作为需水输入,每年的需水量通过水资源配置模型结合当年用水需求、本地来水条件及工程约束动态进行计算。

洪泽湖、骆马湖、下级湖的起调水位取正常蓄水位,湖泊北调下限水位取北调控制水位,给当地受水区供水下限水位取死水位,上限水位非汛期取正常蓄水位,汛期取汛限水位。

IMODE 算法的参数经试算确定,差分缩放因子取值的上、下限分别为 0.33、0.25,交叉概率因子取值的上、下限分别为 0.32、0.27,最小种群数量取 4,存档与种群大小比例取 2.6,种群规模取 1000,最大进化代数取 500,重复计算 20 次,取最优方案作为最终方案。

2.2 分水源统计方法

根据原始规划设计原则,南水北调东线工程中各湖泊水量分配遵循以下规则:优先满足当地发展用水,余水可用于北调;在充分利用当地水资源但供水仍不足时,逐级从上游湖泊调水补充;当各湖泊用水量无法满足整个东线系统供水需求时,调长江水补充。东线一期工程在规划设计时未将上级湖和东平湖作为水源,因此本文中南水北调东线工程主要水源包括长江水、洪泽湖水、骆马湖水、下级湖水。湖泊作为水量调蓄设施,是不同水源相互交汇的重要场所,南水北调东线工程中的 5 个湖泊位置越往北其水源构成越复杂多样,分水源统计涉及湖泊蓄水、湖泊调出水、湖泊弃水、输水区段用水 4 个方面。

a. 湖泊蓄水分水源统计。以洪泽湖为例介绍湖泊蓄水量的分水源统计方法。假定计算初始时段洪泽湖水量均为洪泽湖水,随着长江水调入,洪泽湖蓄水开始由洪泽湖水和长江水组成。每个时段末,洪泽湖中长江水量等于该时段初洪泽湖中长江水量加上从长江新调入水量减去北调长江水量。若该时段发生弃水,考虑弃水中有一定长江水量,洪泽湖中长江水量应减去相应的长江水弃水量。对于骆马湖、下级湖、上级湖和东平湖,湖泊蓄水的分水源统计方法与洪泽湖相同,只是将长江水调整为该湖泊以南几个水源构成的北调水。湖泊蓄水的蒸发渗漏损失水量甚为微小,可不分水源,以本地水量计。

b. 湖泊调出水分水源统计。以洪泽湖为例介绍湖泊调出水分水源统计方法。当洪泽湖水位低于北调控制水位时,停止抽水北调,优先保障当地用水需求。当洪泽湖蓄水量足以满足其以北地区的调水需求,且水位高于北调控制水位、低于抽蓄控制水位时,则调洪泽湖水以满足北方调水需求,若湖泊蓄水中含有长江水,北调时优先使用长江水,以避免浪费;若长江水不足以满足北方调水需求时,未满足的

部分统计为洪泽湖水。当洪泽湖蓄水量无法满足北方调水需求,不足部分将从长江中抽取水补充。在这种情况下,北调水的水源中的长江水量等于洪泽湖蓄水中的北调水长江水量与补充抽调长江水量之和,而洪泽湖北调水中剩余部分则统计为洪泽湖水。对于骆马湖、下级湖、上级湖和东平湖,湖泊调出水的分水源统计方法与洪泽湖相同,只是将长江水调整为该湖泊以南几个水源构成的北调水。

c. 湖泊弃水分水源统计。以洪泽湖为例介绍湖泊弃水分水源统计方法。当时段末洪泽湖蓄水量超过汛限水位或正常高水位时,将发生弃水,此时弃水量中的长江水量等于弃水量乘以该时段洪泽湖蓄水量中长江水占洪泽湖总蓄水量的比例。

d. 区段用水分水源统计。以 S2 区段为例介绍区段用水分水源统计方法。S2 区段用水水源包括长江水和洪泽湖水,设定洪泽湖以北各区段各用水户的长江水和洪泽湖水的水源组成是一致的。S2 区段用水中长江水和洪泽湖水的水源组成与洪泽湖调出水一致,该区段调入水量减去该区段供水量等于从该区段继续北调入下一水源节点或区段的水量。由于 S4 区段不存在用水户,故不作分水源统计,其他区段分水源统计方法与 S2 区段相同。调水沿程输水损失分水源方法参考区段用水分水源统计。

3 结果与分析

3.1 不同情景下的供水量和抽江水量

为了验证优化调度模型的有效性,设定现状调度情景与优化调度情景进行对比。现状调度情景基于《水利部关于印发南水北调东线一期工程水量调度方案(试行)的通知》的调度规则,优化调度情景则是在现状基础上,通过优化调度模型对调度规则进行优化。

3.1.1 供水量

图 2 为 1980—2019 年现状调度情景与优化调度情景下南水北调东线工程供水量。由图 2 可见,部分年份优化调度情景的供水量略多于现状调度情景,但两种情景的多年平均供水量均为 44.2 亿 m^3 左右,整体上差异不大,表明南水北调东线工程在规划设计时,进出湖泊泵站、渠道等工程规模较为合理。

对于调水工程而言,其供水量主要受制于水源地可调水量及工程规模,长江大通站多年平均年径流量 9050 亿 m^3 ,水源较为充足,一般情况下不会成为南水北调东线工程水源的制约因素。因此,限制东线工程供水量的主要是洪泽湖、骆马湖、下级湖等水源湖泊的可调水量。水源湖泊除了作为调水水

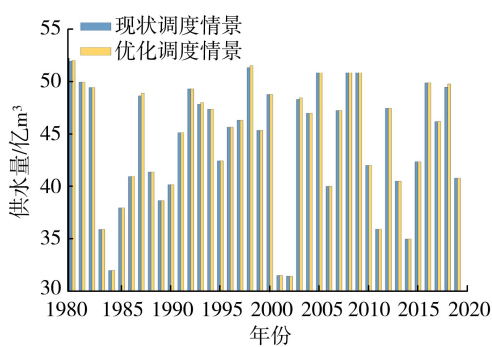


图 2 1980—2019 年现状调度情景与优化调度情景下南水北调东线工程供水量

Fig. 2 Water supply volume of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project under current and optimal dispatching scenarios from 1980 to 2019

源,其还承担着为当地用水户供水的任务,只有来水较多、湖泊水位超过北调控制水位时,才允许向北调水;当沿线湖泊来水较少,在满足了当地用水户需求后,水源湖泊水位如果降低至北调控制水位以下,此时无法向北调水。因此重点分析沿线湖泊来水的不同丰枯情景对供水量的影响,洪泽湖的水量在沿线湖泊中占比最大,这里以洪泽湖为例进行分析。采用水文经验频率法将洪泽湖来水情况进行丰枯状态分级,选取经验频率分别为 95%、50%、5% 作为阈值,分别确定特枯水年、平水年、特丰水年 3 种典型年。结果表明,在现状调度情景和优化调度情景下,洪泽湖特丰水年的供水量均为 40.0 亿 m^3 ,平水年均均为 41.3 亿 m^3 ,特枯水年分别为 51.9 亿 m^3 和 52.0 亿 m^3 。特枯水年的优化调度情景较现状调度情景多供水 671.7 万 m^3 ,其中长江水为 649.3 万 m^3 ,占比达到 96.7%。这主要是由于在特丰水年和平水年,受水区当地水量较为充足,用水户对东线工程的需求较小,这种情况下,两种调度情景均能满足受水区的需求,因此两者之间的供水量相差不大。但是在特枯水年,受水区用水户需求增加,现状调度情景仅根据湖泊的北调控制水位进行抽水,水源湖泊可调水量较少,同时长江水由于泵站规模的限制,导致供水不足;优化调度情景考虑了湖泊的调蓄功能,在特枯年份提前将长江水引入湖泊蓄水,使湖泊可调水量增加,实现较大的供水量。

3.1.2 抽江水量

图 3 为 1980—2019 年现状调度情景与优化调度情景下南水北调东线工程抽江水量。在同样的供水条件下,如果利用长江水供水,工程运行成本至少要增加长江至洪泽湖 3 级电站的抽水费用,因此抽江水量越少,工程运行成本也越少。由图 3 可见,不同年份的抽江水量差异较大,现状调度情景下抽江水量为 22.6 亿 ~44.6 亿 m^3 ,优化调度情景下抽江

水量为 20.8 亿~43.5 亿 m³,优化调度情景比现状调度情景减少 1.5%~8.1%。现状调度情景和优化调度情景的抽江水量多年平均值分别为 35.9 亿、34.1 亿 m³,优化调度情景比现状调度情景的多年平均抽江水量少 1.8 亿 m³。从不同水文年型的角度分析,特丰水年优化调度情景比现状调度情景抽江水量减少 5.0%,平水年减少 4.3%,特枯水年减少 3.6%,特丰水年的减少比例最大。这是因为在特丰水年水源湖泊水量增加,优化调度情景调整了水源组成,更多利用了水源湖泊蓄水,减少了泵站的抽江水量,从而减少了工程的运行费用。

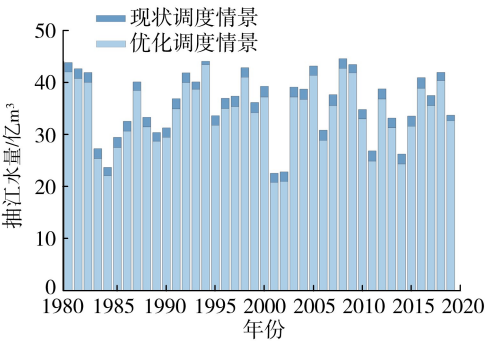


图 3 1980—2019 年现状调度情景与优化调度情景下南水北调东线工程抽江水量

Fig. 3 Pumping volume of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project under current and optimal dispatching scenarios from 1980 to 2019

3.2 优化调度情景下区段水源组成

3.2.1 各区段水源组成

图 4 为 1980—2019 年南水北调东线工程各区段水源组成。由图 4 可见,各区段供水水源主要以长江水为主,占比范围为 65%~89%,东平湖以南各区段北调水量中长江水占比总体上呈现越往北越低趋势,这主要是因为越往北可利用的湖泊水越多,优化调度模型在充分保证了当地用水户需求的基础上,尽量使用沿线湖泊为东线工程受水区供水。各

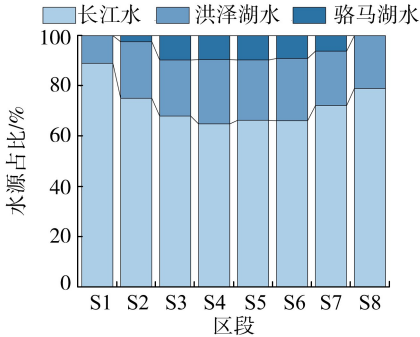


图 4 1980—2019 年南水北调东线工程各区段水源组成

Fig. 4 Composition of water sources for each section of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project from 1980 to 2019

区段的洪泽湖水占比范围为 11%~26%,骆马湖水占比范围为 2%~10%,这主要是由于洪泽湖水量远大于骆马湖水量,而下级湖水量最少,因此多用于当地供水。S7、S8 区段北调水量中长江水占比分别为 72%、79%,大于 S5、S6 区段,主要原因有两个方面:第一是 S5 和 S6 区段面临着较大的当地供水需求,骆马湖的水量较为紧张,难以满足 S7 和 S8 区段的调水需求,尤其在 S8 区段骆马湖水不作为供水水源;第二是北部受水区的需水时间为 4—5 月,属于湖泊枯水期,而此时沿线湖泊周边农业用水需求增多,无多余湖泊水量向北调水,因此 S7 和 S8 区段较多使用长江水。

3.2.2 不同水文年型下各区段水源组成

选取洪泽湖特枯水年、平水年、特丰水年 3 种典型年分析不同水文年型南水北调东线工程优化调度情景下各区段的水源组成,结果如图 5 所示。由

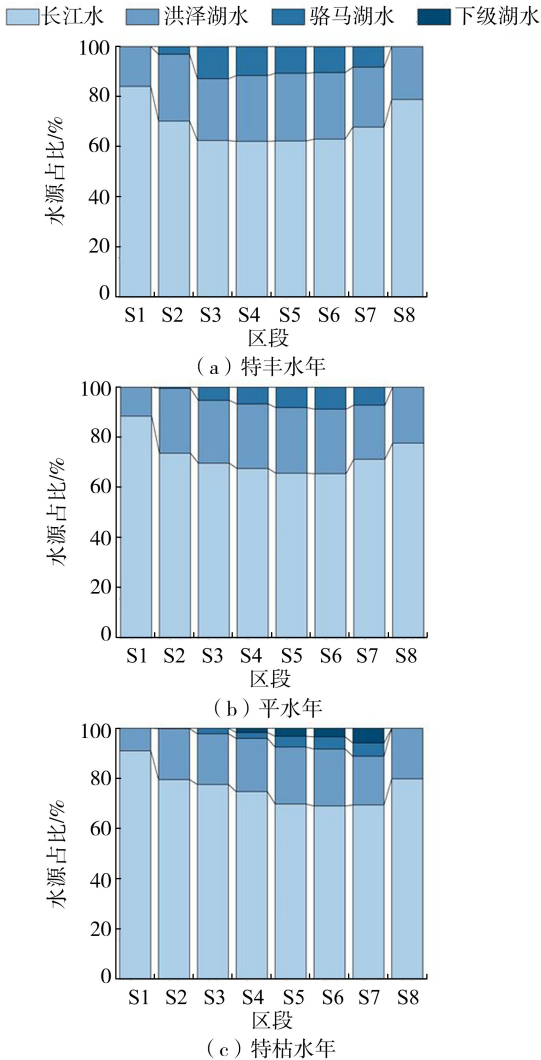


图 5 不同水文年型南水北调东线工程各区段水源组成

Fig. 5 Composition of water sources for each section of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project in different hydrological years

图 5 可见,在特丰水年,由于水源湖泊水量充足,相比于平水年,S1~S7 区段的长江水占比不同程度减小,洪泽湖水和骆马湖水占比增加,优化调度模型充分利用了湖泊来水。其中,在 S3 区段长江水占比减少最多,减少了 7.2%,洪泽湖水占比减少了 0.4%,骆马湖水占比增加了 7.6%,这是由于该时段骆马湖水量充足,优化调度模型在 S3 区段优先使用了骆马湖水源,减少了从长江和洪泽湖调水,从而减少了泵站耗能。在特枯水年,受水区遭遇干旱缺水,相比于平水年,优化调度模型在各区段均不同程度增加了抽江水的比例,减少了使用洪泽湖水和骆马湖水,同时增加下级湖作为供水水源。其中,长江水占比在 S3、S4 区段增加最多,分别增加了 7.8% 和 7.1%,洪泽湖水占比在 S2 区段减少最多,减少了 5.5%,骆马湖水占比在 S4 区段减少最多,减少了 4.3%,S7 区段由于增加了下级湖水,长江水的占比减少了 1.8%。说明优化调度模型考虑了水文年型的影响,在特枯水年为保证受水区的需水要求,充分发挥了东线工程的抽调水能力,合理利用水源湖泊的调蓄能力,尽量缓解旱情。

4 结 论

a. 基于南水北调东线一期工程和北延应急工程的物理拓扑结构,以受水区总缺水率最小和梯级泵站提水耗电量最小为目标函数,构建了优化调度模型。

b. 优化调度情景比现状调度情景的多年平均抽江水量减少 1.8 亿 m^3 ,优化调度模型在特丰水年更多地利用了水源湖泊蓄水,减少抽江水量比例达到 5.0%。在特枯水年,优化调度情景较现状调度情景在减少抽江水量比例 3.6%的同时,向受水区用水户多供水 671.7 万 m^3 ,其中长江水为 649.3 万 m^3 ,占比达到 96.7%。

c. 东线工程各区段供水水源以长江水为主,长江水多年平均占比范围为 65%~89%。对于不同水文年型,在特枯水年优化调度情景下各区段长江水占比均有所增加,其中骆马湖—下级湖、下级湖—东平湖区段的长江水占比分别增加 7.8% 和 7.1%;在特丰水年,优化调度模型合理运用水源湖泊的调蓄能力,在各个区段均减少了长江水占比,增加了洪泽湖水与骆马湖水占比,从而降低了工程的运行费用。

参考文献:

[1] 陶佳辉,卞锦宇,敖天其,等.南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征[J].水资源保护,2023,39(1):133-141.(TAO Jiahui, BIAN Jinyu, AO Tianqi, et

al. Characteristics of precipitation runoff changes in the water transfer area and the receiving area of the South-to-North Water Diversion[J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):133-141. (in Chinese))

[2] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等.基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型的应用[J].水资源保护,2024,40(5):78-85.(WEI Haoshan, WANG Hongrui, JIA Pengxin, et al. Application of water resources spatial equilibrium-based “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model [J]. Water Resources Protection, 2024,40(5):78-85. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 杨子桐,黄显峰,方国华,等.基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J].水利水电科技进展,2021,41(4):60-66.(YANG Zitong, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Benefit evaluation of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(4):60-66. (in Chinese))

[5] 黄进,王伟,田野,等.南水北调中线工程水源区环境规制对经济高质量发展的影响[J].水资源保护,2024,40(4):148-156.(HUANG Jin, WANG Wei, TIAN Ye, et al. Impact of environmental regulations on high-quality economic development in water resource area of middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 148-156. (in Chinese))

[6] 班璇,师崇文,郭辉,等.气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J].水利水电科技进展,2020,40(4):1-7.(BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(4):1-7. (in Chinese))

[7] 张怡雅,袁飞,张利敏,等.南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J].水利水电科技进展,2022,42(3):14-19.(ZHANG Yiya, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(3):14-19. (in Chinese))

- [8] 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 allocation in Jiangsu section of South-to-North Water Diversion East Route Project [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):1-8. (in Chinese))
- [9] 闻昕,王志,方国华,等.基于改进多目标粒子群算法的南水北调东线江苏段工程联合优化调度研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):110-116. (WEN Xin,WANG Zhi,FANG Guohua,et al. Joint optimal scheduling study of the Jiangsu section of the South-to-North Water Diversion East Route project based on improved multi-objective particle swarm algorithm [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2017,28(3):110-116. (in Chinese))
- [10] 郭玉雪,张劲松,郑在洲,等.南水北调东线工程江苏段多目标优化调度研究[J].水利学报,2018,49(11):1313-1327. (GUO Yuxue,ZHANG Jinsong,ZHENG Zaizhou,et al. Multi-objective optimal scheduling study of the Jiangsu section of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(11):1313-1327. (in Chinese))
- [11] 曹明霖,徐斌,王腊春,等.跨区域调水多水源水库群系统供水联合优化调度多情景优化模型研究与应用[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):54-61. (CAO Minglin,XU Bin,WANG Lachun,et al. Study and application of a multi-scenario optimization model for joint optimal scheduling of water supply in a multi-reservoir cluster system for inter-regional water transfer[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology,2019,17(6):54-61. (in Chinese))
- [12] MO R,XU B,ZHONG P A,et al. Long-term probabilistic streamflow forecast model with “ inputs-structure-parameters ” hierarchical optimization framework [J]. Journal of Hydrology,2023,622:129736.
- [13] 闻昕,李精艺,谭乔凤,等.南水北调东线工程江苏段中长期优化调度研究[J].水力发电学报,2022,41(6):65-77. (WEN Xin,LI Jingyi,TAN Qiaofeng,et al. Optimization of medium- and long-term dispatching of the Jiangsu section of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2022,41(6):65-77. (in Chinese))
- [14] 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影响研究[J/OL].水资源保护.[2024-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20241224.0921.012.html>. (XU Jixiang,MA Jingjie,WEN Xin,et al. Study on the impact of the Jiangsu section of the second phase of the South-to-North Water Diversion Project on the water supply pattern in northern Jiangsu [J/OL]. Water Resources Protection. [2024-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20241224.0921.012.html>. (in Chinese))
- [15] 彭卓越,梁煜彬,方红远,等.南水北调东线江苏-山东段受水区的碳储量时空演变与驱动因子[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(6):1080-1090. (PENG Zhuoyue,LIANG Yubin,FANG Hongyuan,et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon stock in water-receiving area of Jiangsu-Shandong section of Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology,2024,22(6):1080-1090. (in Chinese))
- [16] 刘为锋,李云玲,卢庆文,等.新形势下南水北调东线工程主要水源来水演变规律及对策建议研究[J].水资源保护,2025,41(2):165-172. (LIU Weifeng,LI Yunling,LU Qingwen,et al. Runoff evolution of the main water sources and adaptive measures for the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project under new situation [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2025,41(2):165-172. (in Chinese))
- [17] 李国英.推进南水北调后续工程高质量发展[J].水利建设与管理,2021,41(8):1-3. (LI Guoying. Promoting the high-quality development of the South-to-North Water Diversion Follow-up Project [J]. Water Resources Construction and Management,2021,41(8):1-3. (in Chinese))
- [18] 刘为锋,郭旭宁,李昕阳,等.南水北调东线工程调水潜力分析[J].水资源保护,2025,41(1):42-48. (LIU Weifeng,GUO Xuning,LI Xinyang,et al. Analysis of water transfer potential of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2025,41(1):42-48. (in Chinese))
- [19] SALLAM K M,ELSAIED S M,CHAKRABORTTY R K,et al. Improved multi-operator differential evolution algorithm for solving unconstrained problems[C]//2020 IEEE congress on evolutionary computation. London: IEEE,2020:1-8.

(收稿日期:2024-09-09 编辑:王芳)