

南水北调东线工程调水潜力分析

刘为锋^{1,2}, 郭旭宁^{1,2}, 李昕阳³, 刘 婧⁴, 侯 煜⁴, 李云玲^{1,2}

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 水利部水利规划与战略研究中心, 北京 100120;
3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 4. 中国南水北调集团东线有限公司, 北京 100036)

摘要:为研究南水北调东线工程调水潜力, 分析了南水北调东线工程水源之间的源汇关系、水源与用户之间的供需关系、水源与计算单元之间的隶属关系以及输水通道上下游、左右岸之间的水量交换关系, 建立了南水北调东线工程优化调度模型, 综合考虑东线工程在变化环境和极端水文事件不确定性增加情况下的调水潜力。设置了 3 种调水潜力分析情景, 分别为沿线湖泊丰枯互补优化调度、抽江水优化调度、沿线湖泊丰枯互补与抽江水联合优化调度, 分析东线工程调水潜力。结果表明: 3 种模式调水潜力不同, 联合优化调度模式下多年平均调水潜力最大、抽江水优化调度次之、湖泊丰枯互补优化调度最小; 3 种模式在极端情况下调水潜力均较小, 最大年调水潜力仅为 0.2 亿 m³。

关键词:南水北调东线工程; 可调水量; 优化调度模型; 调水潜力

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2025)01-0042-07

Analysis of water transfer potential of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project//LIU Weifeng^{1,2}, GUO Xuning^{1,2}, LI Xinyang³, LIU Jing⁴, HOU Yu⁴, LI Yunling^{1,2}(1. General Institute of Water Conservancy Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 2. Water Resources Planning and Strategic Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 4. China South-to-North Water Diversion Eastern Route Corporation Limited, Beijing 100036, China)

Abstract: To investigate the water transfer potential of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project, this study analyzed the relationship between the source and sink of water sources of the project, the supply and demand relationship between water sources and users, the membership relationship between water sources and the calculation unit, as well as the water exchange between upstream and downstream sections and between the left and right banks along the water transfer route. An optimal scheduling model for the eastern route project was established to comprehensively consider its water transfer potential under increased uncertainty of extreme hydrological events in the changing environment. Three scenarios for water transfer potential analysis were proposed, including the optimal scheduling mode based on complementary regulation of lakes with high and low runoff along the route, the optimal scheduling mode based on water diversion from the Yangtze River, and joint optimal scheduling mode of the above two modes. The water transfer potential for the eastern route project in these scenarios was analyzed. The results show that the water transfer potential varies among the three scenarios, with the joint optimal scheduling mode demonstrating the greatest potential, followed by the optimal scheduling modes based on water diversion from the Yangtze River and complementary regulation of lakes with high and low runoff along the route. Under extreme conditions, the water transfer potential in all scenarios is relatively small, with the maximum annual water transfer potential being only 20 million m³.

Key words: the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project; adjustable water volume; optimal scheduling model; water transfer potential

我国基本水情是夏汛冬枯、北缺南丰, 水资源时空分布不均衡, 以黄淮海平原东部和山东半岛最为突出^[1]。近年来, 随着变化环境下极端水文事件不确定性增加, 跨越多个空间尺度的复合型极端事件

变得更为频繁^[2-3], 且随着经济社会发展, 需水将进一步增长, 研究南水北调东线工程可调水量挖潜模式及潜力具有重要意义^[4]。

目前国内外众多学者对南水北调东线工程展开

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202300); 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: 刘为锋(1993—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水利规划与战略研究。E-mail: weifliu@qq.com

通信作者: 李云玲(1978—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利规划与战略研究。E-mail: liyunling@gwip.org.cn

了较多研究,研究内容主要可分为两大类:一类是聚焦南水北调东线工程规划设计、调度与运行方式及相关效益等^[5-10];另一类则聚焦其径流变化、生态环境影响等^[11-16]。在调度与运行方式方面,张建云等^[17]根据东线工程特点,考虑东线工程模型中各子目标函数、不同供水目标、不同灌区和不同灌溉季节等方面的平衡协调问题,建立了模拟优化模型,并分析工程水量调度特点,确定了调度图的形式及其优化方法;曹明霖等^[18]考虑了东线工程保障供水效益与降低供水成本多目标间的矛盾,综合考虑本地水资源与外调水资源供水相对成本差异,根据引调水成本的相对高低提出供水成本递增的多情景分层优化模型,分情景揭示了多水源联合供水方案并分析目标间的关系;方国华等^[19]以受水区总缺水量最小和泵站总能耗最小为目标,建立南水北调东线江苏段水资源优化调度模型,通过模型计算得到了不同降水保证率下受水区的缺水率,在完成受水区需供水任务的前提下,优先利用了泵站单位能耗较小的运西线进行调水。在径流变化、生态环境影响方面,陶佳辉等^[20]分析了东线调水区及受水区降水径流变化特征,得出调水区水资源条件较为稳定、受水区径流量呈明显衰减态势;戴昌军等^[21]应用了二维 P-III 分布的计算方法,得到东线工程沿线各水文区年径流丰枯不一致,提出在规划设计时需充分考虑沿线调蓄工程的建设,配以相应的运行调度方式,并适时从长江引水,最大限度提高工程的经济效益及社会效益。

变化环境下极端水文事件不确定性增加,经济社会高质量发展需水也不断增大^[22],然而以往的研究较少考虑东线工程在极端情况下的调水潜力^[23-24]。本文通过分析南水北调东线工程水源之间的源汇关系、水源与用户之间的供需关系、水源与计算单元之间的隶属关系以及输水通道上下游、左右岸之间的水量交换关系,建立南水北调东线工程优化调度模型,设置 3 种调水潜力分析情景,揭示东线工程不同模式下调水潜力,为进一步提高东线工程运行效益,推动东线工程高质量发展提供重要支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南水北调东线一期工程是由河-湖-库-渠-泵-闸等组成的跨流域、跨区域、多功能综合输水系统,工程具有水源充足、取水影响较小、调蓄能力强、输水可利用现有河湖渠道、受水区天然河流和人工渠系密集等优势,可保障华北平原东部和胶东半岛地区

用水。

东线一期工程输水线路以黄河为脊背,分别向南、北倾斜,穿黄河处水位高于长江水位约 40 m,因此东平湖以南需建泵站逐级提水北送。从长江至东平湖设 13 个调水梯级、22 处泵站枢纽、34 座泵站,利用江苏省江水北调工程现有 13 座泵站,从东平湖向鲁北、胶东自流输水,工程概况如图 1 所示。



图 1 南水北调东线工程概况

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

本文以南水北调东线一期工程和北延应急工程为研究对象,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,在系统概化中,突出湖泊调节能力,反映各湖泊间的水量调配和补偿作用,忽略输水河道的调蓄作用,以湖泊为中心,将湖泊之间的复杂情况简化为单一河道,将各梯级抽水站简化为出湖站和入湖站,各湖泊间形成串联系统。将南水北调东线工程分为 8 个区段,黄河以南划分为长江至洪泽湖、洪泽湖至骆马湖、骆马湖至南四湖下级湖(以下简称下级湖)、下级湖至南四湖上级湖(以下简称上级湖)、上级湖至东平湖、胶东段,黄河以北划分为鲁北和北延应急段。概化图如图 2 所示。

1.2 数据来源

东线工程沿线湖泊来水数据取自《中华人民共和国水文年鉴》(淮河卷、黄河卷)部分站点实测径流、水位逐日数据,泵站工程特性参数如表 1 所示,沿线调蓄湖泊北调控制水位如表 2 所示。

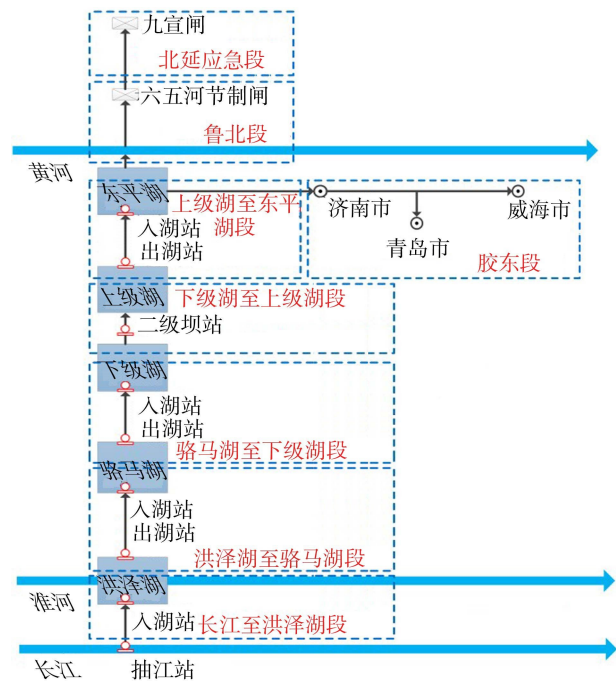


图 2 南水北调东线工程概化图

Fig. 2 Generalization of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project

表 1 南水北调东线一期工程泵站规模特征参数

Table 1 Pumping station size characteristic parameters of first phase of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project

区段	梯级	梯级规模/ (m^3/s)	泵站名称	泵站编号	设计规模/ (m^3/s)
长江至 洪泽湖	一	500	江都 宝应	1 2	400 100
	二	450	淮安 金湖	3 4	300 150
	三	450	淮阴 洪泽	5 6	300 150
	四	350	泗阳 泗洪	7 8	230 120
洪泽湖至 骆马湖	五	340	刘老涧 睢宁	9 10	230 110
	六	275	皂河 邳州	11 12	175 100
	七	250	刘山 台儿庄	13 14	125 125
	八	250	解台 万年闸	15 16	125 125
骆马湖至 下级湖	九	200	蔺家坝 韩庄	17 18	75 125
	十	125	二级坝	19	125
下级湖至 上级湖	十一	100	长沟	20	100
上级湖至 东平湖	十二	100	邓楼	21	100
	十三	100	八里湾	22	100

2 南水北调东线工程优化调度模型

以东线水源工程可调水量最大为目标函数,考虑湖泊水量平衡、渠道水量平衡、湖泊调蓄能力、泵

表 2 南水北调东线一期工程湖泊北调控制水位 单位:m

Table 2 Controlled water level for northward diversion of lake water in first phase of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project unit: m

阶段	洪泽湖	骆马湖	下级湖
7 月上旬至 8 月底	12.0	22.2~22.1	32.0
9 月上旬至 11 月上旬	12.0~11.9	22.1~22.2	31.7~32.1
11 月中旬至 3 月底	12.0~12.5	22.1~23.0	32.1~33.0
4 月上旬至 6 月底	12.5~12.0	23.0~22.5	32.5~32.0

站工作能力、北调控制水位、穿黄工程过水能力、决策变量非负等约束条件,建立南水北调东线工程优化调度模型。

2.1 目标函数

以东线水源工程可调水量最大为目标函数:

$$Q = \max \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N W_{n,t} \quad (1)$$

式中: Q 为最大可调水量; $W_{n,t}$ 为 t 时段第 n 个水源可调水量; T 为时段总数; N 为水源个数。

2.2 约束条件

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

$$S_{t+1} = S_t + I_t + Q_{\text{in},t} - q_{\text{out},t} - Q_{\text{out},t} - D_t - D_{0,t} - E_t \quad (2)$$

式中: S_t, S_{t+1} 分别为 t 时段初末湖泊蓄水量; I_t 为 t 时段湖泊上游来水量; $Q_{\text{in},t}, Q_{\text{out},t}$ 分别为 t 时段湖泊抽入和出水量; $q_{\text{out},t}$ 为 t 时段湖泊泄水量; D_t 为 t 时段湖泊在东线工程供水量; $D_{0,t}$ 为 t 时段湖泊对原受水区供水量; E_t 为 t 时段湖泊蒸发渗漏损失。

b. 渠道水量平衡约束。系统中两个泵站之间的河道构成一个河段,由于河段小尺度的产汇流过程会被显著坦化,在中长期尺度暂不考虑河道的调蓄能力,仅考虑该河段的输水损失、受水区用水,水量平衡约束为

$$Q_{\text{in},t,i+1} = Q_{\text{out},t,i} + q_{\text{inter},t,i} - D_{\text{inter},t,i} - q_{\text{loss},t,i} \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{in},t,i+1}$ 为第 $i+1$ 个河段 t 时段上游泵站(闸门)抽(引)水量; $Q_{\text{out},t,i}$ 为第 i 个河段 t 时段下游泵站抽水量; $q_{\text{inter},t,i}$ 为第 i 个河段 t 时段区间来水量; $D_{\text{inter},t,i}$ 为第 i 个河段 t 时段供水量; $q_{\text{loss},t,i}$ 为第 i 个河段 t 时段水量损失。

c. 湖泊调蓄能力约束:

$$S_{\min,j,t} \leq S_{j,t} \leq S_{\max,j,t} \quad (4)$$

式中: $S_{j,t}$ 为第 j 个湖泊 t 时段蓄水量; $S_{\min,j,t}, S_{\max,j,t}$ 分别为第 j 个湖泊 t 时段最小和最大蓄水量。

d. 泵站工作能力约束:

$$\begin{cases} Q_{r,k,t} \leq Q_{\max,r,k,t} \\ Q_{c,k,t} \leq Q_{\max,c,k,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Q_{r,k,t}$ 、 $Q_{c,k,t}$ 分别为第 k 个泵站 t 时段入湖和出湖抽水能力; $Q_{\max r,k,t}$ 、 $Q_{\max c,k,t}$ 分别为第 k 个泵站 t 时段入湖和出湖最大抽水能力。

e. 北调控制水位约束。由于洪泽湖、骆马湖、下级湖除了向南水北调工程受水区供水,还要优先保证原有用水户的用水权益。为了避免工程调水给当地用户带来过多影响,工程运行中设置了各湖泊的北调控制水位(表 2)。当北边南水北调东线工程用户需水时,某个湖泊水位低于北调控制水位时,停止抽取该湖泊水用于北调,切换为其他湖泊水或者长江水。

f. 穿黄工程过水能力约束。北调水经穿黄工程输送到南水北调东线鲁北段,将其概化为受闸门过水能力约束的输水通道约束条件:

$$Q_{\text{hout}} = \min(Q_{\text{hin}}, Q_c) \tag{6}$$

式中: Q_{hout} 为穿黄工程出流量; Q_{hin} 为穿黄工程入流量; Q_c 为穿黄工程过水能力。

e. 决策变量非负约束。

2.3 模型求解

差分进化(differential evolution, DE)算法具有收敛速度快、参数少、算法简单、易实现的优点,常被用于求解高维度优化问题。但在应用 DE 算法求解水库群和泵站系统优化问题时,会发现 DE 算法在进化后期寻优效率较低,容易陷入局部最优解。鉴于此,本文引入具有较强全局搜索能力的 DE/Rand/1 算子和较强局部搜索能力的 DE/Best/1 算子,将 DE 算法的变异算子改为

$$V_{k,g+1} = \gamma Z_{\text{best},g} + (1 - \gamma) Z_{r_1,g} + F(Z_{r_2,g} - Z_{r_3,g}) \tag{7}$$

其中 $\gamma = g/g_{\max}$

式中: $V_{k,g+1}$ 为第 $g+1$ 代种群中第 k 个个体; $Z_{\text{best},g}$ 为第 g 代种群中最优个体; $Z_{r_1,g}$ 、 $Z_{r_2,g}$ 、 $Z_{r_3,g}$ 分别为第 g 代种群中第 r_1 、 r_2 、 r_3 个个体; F 为缩放因子; γ 为随进化阶段变化的自适应系数; $g_{\max}$ 为种群最大进化代数。

进化初期 γ 较小,接近于 0,式(7)表现出覆盖较广的全局搜索特性;进化后期 γ 较大,接近于 1,式(7)表现出精确与高效的局部搜索特征,以符合初期和后期的进化需求。东线工程优化调度模型的具体求解步骤为:①输入东线工程沿线湖泊和泵站的特征参数及曲线、湖泊入流、受水区需水等资料;②以进出湖泊泵站提水量和抽江水量为决策变量,根据拉丁超立方抽样在各泵站提水上下限范围内生成初始种群;③根据东线工程沿线拓扑关系、各受水区需水满足程度以及泵站提水费用,计算适应度函

数值;④对父代种群 P_g 执行 Rand-Best 变异、交叉操作产生子代种群 U_g ;⑤对父代种群和子代种群进行合并得到混合种群 R_g ,计算适应度函数值,并选择算子生成下一代种群 P_{g+1} ;⑥判断是否满足终止条件,如果满足则迭代终止,否则,返回步骤③。

2.4 调度模式设置

南水北调东线工程受水区的供水水源众多,从长江往北涉及长江、洪泽湖、骆马湖、下级湖等水源,考虑到长江大通站多年平均来水超 9 000 亿 m^3 ,而沿线湖泊多年平均来水均小于 1 000 亿 m^3 ,且洪泽湖属于淮河流域,骆马湖属于沂河流域,下级湖属于泗河流域,各湖来水具有丰枯异步特性。针对东线工程沿线供水水源不同特性,本文设置 3 种不同调水潜力分析情景:①仅实施洪泽湖、骆马湖、下级湖丰枯互补优化调度,不考虑抽江水调水潜力;②抽江水优化调度,不考虑沿线 3 个湖泊的调水潜力;③沿线湖泊丰枯互补与抽江水联合优化调度。分别计算当前模式和规划设计(1956—1997 年)情景的供水能力,将两者的差值作为相应模式下的调水潜力。

3 结果与分析

3.1 湖泊丰枯互补优化调度模式下的调水潜力

根据《南水北调东线第一期工程可行性研究总报告》,东线工程取水水源包括长江、洪泽湖、骆马湖和下级湖,上级湖和东平湖不作为东线工程供水水源,且考虑到长江来水较多,第一期工程规划不考虑避让措施,因此,本文仅考虑洪泽湖、骆马湖和下级湖的丰枯互补特征。洪泽湖与骆马湖、骆马湖与下级湖的径流丰枯遭遇分析结果如图 3 所示。从图 3 可见,随着洪泽湖入湖流量的减小,骆马湖入湖流量未呈现减小趋势,而是散乱分布;同样,随着骆马湖入湖流量的减小,下级湖入湖流量未呈现减小趋势,也是散乱分布。分析可知,洪泽湖与骆马湖、骆马湖与下级湖的径流系列存在丰枯补偿特征,在湖泊丰枯互补优化调度情景下研究调水潜力是切实可行的。

仅考虑南水北调东线工程沿线湖泊在满足本地供水情况下的调水潜力。利用南水北调东线工程优化调度模型计算湖泊丰枯互补优化调度情景下最大可调水量,与东线一期工程规划设计的 1956—1997 年调水能力相比,计算得到湖泊丰枯互补优化调度长系列的调水潜力。

从图 3 可见,相比于骆马湖和下级湖,东线工程沿线 3 个湖泊中洪泽湖来水最多,本文对洪泽湖入湖径流进行丰、平、枯水年划分,分析 1956—1997 年长系列以及在洪泽湖不同来水情况下东线工程沿线

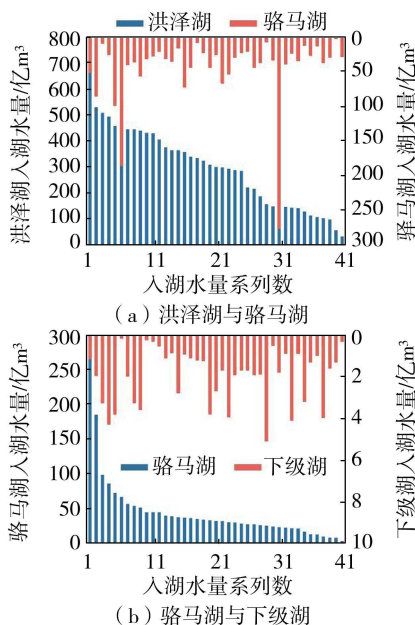


图3 径流丰枯遭遇分析

Fig. 3 Analysis of high and low runoff encountering

3大湖泊丰枯互补的调水潜力,结果如图4(a)所示。从图4(a)可见,东线工程沿线湖泊丰枯互补优化调度长系列多年平均调水潜力为14.23亿 m^3 ,最大年份可达68.47亿 m^3 ,最小年份为0。丰水年系列多年平均调水潜力大于平水年和枯水年系列,丰、平、枯水年系列平均调水潜力分别为30.96亿、8.57亿、1.04亿 m^3 ,表明东线工程沿线湖泊外调水潜力总体上与湖泊来水潜力有关。长系列调水潜力为0的年份多达16年,其中丰、平、枯水年分别为2年、4年和10年,表明沿线湖泊来水不是决定湖泊外调水潜力的唯一因素。

进一步将东线工程沿线3大湖泊入湖径流逐年累加,并以3大湖泊入湖径流之和划分丰、平、枯水年系列,结果如图4(b)所示。从图4(b)可见,以3大湖泊入湖径流之和划分丰、平、枯水年系列的调水潜力与以洪泽湖入湖径流划分丰、平、枯水年系列总体规律一致,进一步说明了东线工程沿线湖泊来水不是决定湖泊外调水潜力的唯一因素,沿线湖泊的本地用水以及沿线泵站提水能力可能也会影响其外调水潜力。

3.2 抽江水优化调度模式下的调水潜力

以大通站径流划分丰、平、枯水年系列,仅考虑南水北调东线工程抽江水优化调度在满足本地供水情况下的调水潜力,结果如图5所示。从图5可见,东线工程抽江水长系列多年平均调水潜力为70.02亿 m^3 ,最大年份可达153.50亿 m^3 ,最小年份仅为0.20亿 m^3 ,其中调水潜力小于10亿 m^3 的年份多达10年;丰、平、枯水年系列多年平均调水潜力

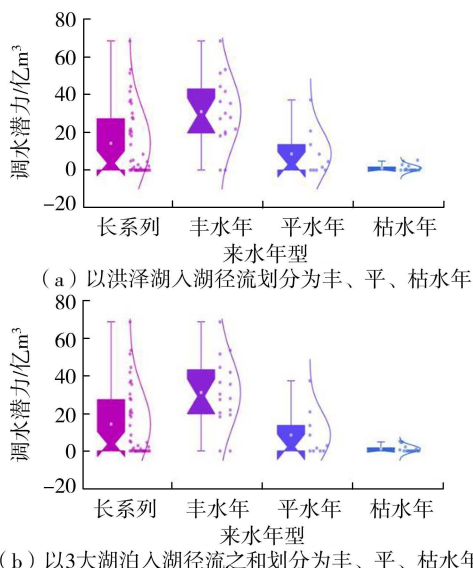


图4 湖泊丰枯互补优化调度模式下的调水潜力

Fig. 4 Water transfer potential in optimal dispatching mode based on complementary regulation of lakes with high and low runoff

分别为79.75亿、82.38亿、52.57亿 m^3 ,平水年系列调水潜力最大、丰水年系列其次、枯水年系列最小。进一步分析大通站来水,发现东线工程基于抽江水的调水潜力与来水年型无关,主要取决于东线工程泵站剩余能力。

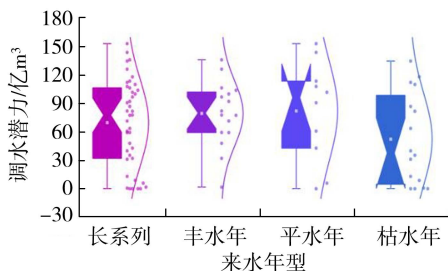


图5 抽江水优化调度模式下的调水潜力

Fig. 5 Water transfer potential in optimal dispatching mode based on water diversion from the Yangtze River

3.3 湖泊丰枯互补与抽江水联合优化调度模式下的调水潜力

考虑东线工程沿线湖泊丰枯互补与抽江水联合优化调度模式的调水潜力,结果如图6所示。东线工程联合优化调度长系列多年平均调水潜力为84.25亿 m^3 ,最大年份为204.9亿 m^3 。平水年系列调水潜力最大,丰水年系列其次,枯水年系列最小,丰、平、枯水年系列多年平均调水潜力分别为94.67亿、101.16亿、63.27亿 m^3 。与其他两种调水模式相比,联合优化调度调水潜力无论长系列还是丰、平、枯水年系列,其调水潜力均为最大。联合优化调度的调水潜力总体上与来水年型相关性不强,调水潜力主要取决于东线工程泵站剩余能力以及本

地用户用水需求,在极端情况下年调水潜力仅为0.20 亿 m³,特别是调水潜力小于 10 亿 m³ 的年份有 10 年。

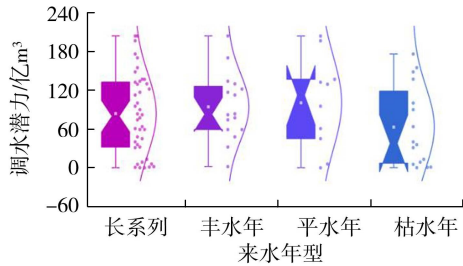


图 6 联合优化调度模式下的调水潜力
Fig. 6 Water transfer potential in joint optimal dispatching mode

4 结 语

本文通过分析南水北调东线工程水源之间的源汇关系、水源与用户之间的供需关系、水源与计算单元之间的隶属关系以及输水通道上下游、左右岸之间的水量交换关系,建立南水北调东线工程优化调度模型,在规划设计基础上,综合分析东线工程在变化环境和极端水文事件不确定性增加情况下,不同优化调度模式下的调水潜力。结果表明,3 种优化调度模式下调水潜力不同,湖泊丰枯互补和抽江水联合优化调度模式下多年平均调水潜力最大、抽江水优化调度次之、湖泊丰枯互补优化调度最小;3 种优化调度模式在极端情况下调水潜力均较小,最大年调水潜力仅为 0.2 亿 m³。未来在极端气候事件频发以及经济社会高质量发展需水量增大的情况下,东线后续工程建设应加强东线工程受水区的水安全保障。

参考文献:

[1] 何君,郦建强,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))
[2] 王煜,彭少明,郑小康,等.水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题[J]. 水科学进展,2024,35(1): 11-23. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, et al. Key scientific issues of dealing with extreme dry events in the Yellow River Basin under the layout of water network [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 11-23. (in Chinese))
[3] 张长征,沈婷,徐慎晖,等.极端天气下特大型城市"水资源-能源-粮食"安全风险研究[J]. 水利经济,2023,

41(1): 55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of "water-energy-food" in mega cities under extreme weather [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))
[4] 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. Booting high-quality development of South-to-North water diversion follow-up projects [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2021, 41(8): 1-3. (in Chinese))
[5] FU Z H, ZHAOH J, WANG H, et al. Integrated planning for regional development planning and water resources management under uncertainty: a case study of Xining, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 554: 623-634.
[6] FENG Shan, LI Lingxia, DUAN Zhigang, et al. Assessing the impacts of South-to-North Water Transfer Project with decision support systems [J]. Decision Support Systems, 2007, 42(4): 1989-2003.
[7] 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. A multi-objective joint optimal operation method for the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 118-124. (in Chinese))
[8] 杨靖仁,王超,雷晓辉,等.南水北调东线江苏段典型泵站运行效率模拟模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 388-398. (YANG Jingren, WANG Chao, LEI Xiaohui, et al. Simulation model for operational efficiency of typical pumping stations in the Jiangsu section of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 388-398. (in Chinese))
[9] 景象,张召,雷晓辉,等.非电费成本对并联泵站流量分配的影响规律研究[J]. 中国农村水利水电,2023(2): 134-140. (JING Xiang, ZHANG Zhao, LEI Xiaohui, et al. Research on the influence of non-electricity water transfer cost on the flow distribution of parallel pump stations [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(2): 134-140. (in Chinese))
[10] 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))
[11] 孙艳,张小侠,王秀茹,等.南水北调东线一期工程受水区生态水文区的划分[J]. 中国农村水利水电,2010(11): 52-55. (SUN Yan, ZHANG Xiaoxia, WANG Xiuru,

- et al. Eco-hydrological regionalization in water-accepted areas of the first part of east line in the South-to-North Water Diversion Project [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(11):52-55. (in Chinese))
- [12] 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/OL]. 水资源保护, 2025; 1-14 [2025-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20241213.0859.002.html>. (LIU Weifeng, LI Yunling, LU Qingwen, et al. Runoff evolution of the main water sources and adaptive measures for the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project under new situation [J/OL]. Water Resources Protection, 2025; 1-14 [2025-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20241213.0859.002.html>. (in Chinese))
- [13] 徐蕴韵,吴昊,李永泰,等.南水北调东线江苏段用水结构及其时空演变[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 97-102. (XU Yunyun, WU Hao, LI Yongtai, et al. Water consumption structure and its temporal and spatial evolution in Jiangsu section of east route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 97-102. (in Chinese))
- [14] 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. Study on multi-objective optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1313-1327. (in Chinese))
- [15] LI Yi, XIONG Wei, ZHANG Wenlong, et al. Life cycle assessment of water supply alternatives in water-receiving areas of the South-to-North Water Diversion Project in China[J]. Water Research, 2016, 89: 9-19.
- [16] ZHU Jie, ZHANG Zhao, LEI Xiaohui, et al. Ecological scheduling of the middle route of South-to-North Water Diversion Project based on a reinforcement learning model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126107.
- [17] 张建云,陈洁云.南水北调东线工程优化调度研究[J]. 水科学进展, 1995, 6(3): 198-204. (ZHANG Jianyun, CHEN Jieyun. Study on optimum operation of the east-route South-to-North Water Transfer Project[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(3): 198-204. (in Chinese))
- [18] 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. Research and application of multi-scenario optimization operation model for water supply of multi-reservoir in an inter-basin water transfer system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 54-61. (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] 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. Variation characteristics of precipitation and runoff in water diversion area and water receiving area of East Route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 133-141. (in Chinese))
- [21] 戴昌军,管光明,孙浩,等.南水北调东线工程优势调水频率分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 100-102. (DAI Changjun, GUAN Guangming, SUN Hao, et al. Advantaged frequency analysis of the eastern route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 100-102. (in Chinese))
- [22] 杨爱民,张璐,甘泓,等.南水北调东线一期工程受水区生态环境效益评估[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 563-571. (YANG Aimin, ZHANG Lu, GAN Hong, et al. Evaluation on eco-environmental benefits in water reception areas of the East-route Phase 1 Project of the South-to-North Water Diversion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 563-571. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 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))

(收稿日期:2024-05-07 编辑:施业)