

# 基于调度线-预调水量优化的南水北调东线工程 联合优化调度

郭旭宁<sup>1,2</sup>, 李云玲<sup>1,2</sup>, 卢庆文<sup>3</sup>, 刘奇<sup>4</sup>, 张元教<sup>5</sup>, 李昕阳<sup>6</sup>, 朱非林<sup>7</sup>, 刘为锋<sup>1,2</sup>

(1. 水利部水利水电规划设计总院; 2. 水利部水利规划与战略研究中心; 3. 江苏航运职业技术学院;  
4. 中水东北勘测设计研究有限责任公司; 5. 中国南水北调集团东线有限公司; 6. 天津大学建筑工程学院;  
7. 河海大学水文水资源学院)

**摘要:**为适应南水北调东线工程水源区径流演变特征,充分发挥多水源之间的水库库容补偿作用,建立了南水北调东线工程水资源联合优化调度模型,以调度线优化、预调水量优化和调度线-预调水量协同优化3种模式进行模型求解,得到了考虑近年径流演变规律的优化调度线和各优化模式的调度结果,并基于原调度线模拟结果进行多模式对比分析。结果表明:相较原调度线模拟结果,优化调度线能够在不损害原受水片区利益的前提下有效降低南水北调东线工程受水片区缺水量;预调水量优化模式在略微增加原受水片区缺水量的情况下,可满足南水北调东线工程受水片区所有用水需求;调度线-预调水量协同优化模式相较于仅优化调度线,进一步降低了南水北调东线工程受水片区缺水量,更为高效合理。

**关键词:**联合优化调度;调度线;预调水量;径流演变;缺水量;南水北调东线工程

**Joint optimal dispatching of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project based on dispatch lines and preallocated water volume optimization**//Guo Xuning<sup>1,2</sup>, Li Yunling<sup>1,2</sup>, Lu Qingwen<sup>3</sup>, Liu Qi<sup>4</sup>, Zhang Yuanjiao<sup>5</sup>, Li Xinyang<sup>6</sup>, Zhu Feilin<sup>7</sup>, Liu Weifeng<sup>1,2</sup>(1. MWR General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design (GWP); 2. MWR Center for Water Resources Planning and Strategic Research; 3. Jiangsu Shipping College; 4. China Water Resources Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd.; 5. China South-to-North Water Diversion Eastern Route Corporation Limited; 6. School of Civil Engineering, Tianjin University; 7. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

**Abstract:** To adapt to runoff evolution law in water source areas of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project and give full play to hydrological reservoir capacity compensation effect of multiple water sources, a joint optimal dispatching model for project is established. The model is solved under three modes: dispatching line optimization, pre-allocated water volume optimization, and joint optimization of dispatching line and pre-allocated water volume. The optimized dispatching lines considering runoff evolution law in recent years and dispatching results of each optimization mode are obtained. A comparative analysis of different modes is conducted based on simulation results of original dispatching lines. The results show that compared with simulation results of original dispatching lines, optimized dispatching lines can effectively reduce water deficit in water receiving areas without impairing interests of original water receiving areas. Pre-allocated water volume optimization slightly increases water deficit of original water receiving areas, yet fully meets all water demands in eastern route area. Compared with single dispatching line optimization, the joint optimization of dispatching line and pre-allocated water volume further cuts down water deficit in eastern route area, proving more efficient and reasonable.

**Key words:** joint optimal dispatching; dispatching line; pre-allocated water volume; runoff evolution; water deficit; South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

为顺应新时代水利高质量发展要求,我国初步构建了“四横三纵、南北调配、东西互济”的国家水

网总体格局。南水北调东线工程作为国家水网主骨架的重要组成部分,肩负着优化水资源配置的重要

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);水利部水利水电规划设计总院“揭榜挂帅”项目(水总人[2025]15号);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:**郭旭宁(1983—),男,正高级工程师,博士,主要从事水网规划与调度研究。E-mail: guoxuning@giwp.org.cn

**通信作者:**刘为锋(1993—),男,正高级工程师,博士,主要从事水网规划与调度研究。E-mail: weifliu@qq.com

使命<sup>[1]</sup>,对改善我国水资源南北分布不均现状、缓解北方地区水资源供需矛盾具有重要作用<sup>[2-3]</sup>。

南水北调东线工程涉及多个水源区和受水片区,具有规模大、构成要素多、调度流程复杂等特征。制定科学合理的调度方案,可充分发挥工程的水文补偿与库容补偿作用,是保障供水安全、最大化工程效益的必要前提<sup>[4]</sup>。跨流域调水工程联合调度需要综合考量调水时机、调水规模,以及水量在水源区和受水片区的分配方式等问题<sup>[5-8]</sup>。现阶段工程运行普遍采用调度图指导调水工作,即依托长系列调节计算确定各时段调水控制线,管理人员依据调度线划分的分区方案开展调度,以保障水源区供水效益与受水片区供水保证率。

规划设计阶段拟定的调度规则主要依托历史来水资料与调度经验制定,虽可满足工程设计标准,但仍存在以下不足:①大型跨流域调水工程建设周期长,设计采用的历史来水、需水序列无法反映工程的实际运行状况<sup>[9]</sup>,例如,刘为锋等<sup>[10]</sup>基于最新径流资料分析发现,南水北调东线工程各水源径流量变化趋势显著,且相邻水源的径流相关性存在明显的年际波动。②现有规则未充分考虑工程之间的水文补偿与库容补偿,难以实现水资源最优配置和工程效益最大化。

国内众多学者围绕水利工程联合优化调度开展了大量研究,形成了多种联合优化调度图与调度规则<sup>[11]</sup>。Liu 等<sup>[12]</sup>以降低南水北调东线工程沿线泵站能耗为目标构建调度模型,结果表明,分段函数形式的调度规则可有效减少泵站提水量、降低能源消耗;Zhong 等<sup>[13]</sup>针对南水北调东线工程江苏段,设计了兼顾供水与调水的新型联合运行规则,采用模拟-优化算法建立多目标优化运行模型以确定联合运行规则,在提升供水可靠性的同时降低了调水运行成本;王文杰等<sup>[14]</sup>建立了南水北调东线工程江苏段水量优化调度模型,针对3种不同保证率工况开展模拟计算,证实优化调度可同步减少缺水量与能耗;Cao 等<sup>[15]</sup>针对跨流域调水工程供水效益与运行成本的多目标冲突,提出了3种对应不同效益-成本差异化的调水情景,并应用于多目标优化调度模型,得到不同情景下的最优调水方案;游进军等<sup>[16]</sup>为实现跨流域调水总量分配与工程运行调度协同联动,构建了配置-调度耦合模拟模型,在外调水工程与本地水系统一体化框架下,确定调水总量分配方案与分区工程调度方案。

以上研究从多目标、多情景等方面优化了联合调度过程,改进了规划设计阶段所制定的调度规则。然而,跨流域调水追求全调度周期综合效益最优,如

何在时间上充分发挥水源调蓄库容的作用,规避后续时段缺水风险,现有研究尚未充分涉及。针对该问题,本文提出预调水概念:后续时段所需水量在本时段调入调蓄湖泊,规避后续时段因泵站提水能力受限等约束引发的供水不足问题,实现多水源时间、空间双重维度的库容补偿。

为解决南水北调东线工程现有调度图未充分考虑近年径流演变特征、未能充分发挥库容补偿作用等问题,结合水利高质量发展的行业要求,本文采用最新径流序列作为基础数据,构建南水北调东线工程水资源联合优化调度模型,通过设置调度线优化、预调水量优化、调度线-预调水量协同优化3种模式,探究调度图优化与库容补偿对调水效益的提升效果。

## 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道、湖泊、水库、渠道、泵站、水闸等构成的跨流域、跨区域复杂调水水利系统。工程主要从江苏省扬州市附近的长江干流引水,向北输送至黄淮海平原东部及胶东半岛,保障北方地区用水安全。因输水线路穿黄位置水位较长江水位高出约40m,东平湖以南地区布设13级调水梯级、22座泵站枢纽及34座泵站,通过逐级提水实现北送;东平湖以北至鲁北、胶东片区则依托地形实现自流输水。研究区域系统概化图如图1所示。

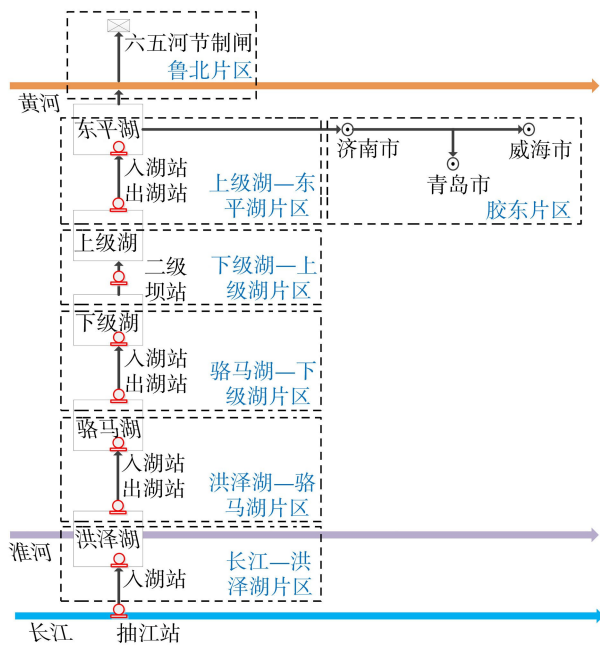


图1 南水北调东线工程系统概化

Fig. 1 Generalization diagram for South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

南水北调东线一期工程主要依托湖泊作为水量

调节枢纽,以泵站作为输水节点,忽略输水河道的调蓄作用,因此概化模型以湖泊为中心,将湖泊之间的复杂河网简化为单一输水河道,梯级泵站统一概化为入湖泵站与出湖泵站,各湖泊之间构成串联输水系统。工程共划分为7个片区,自南至北依次为:长江—洪泽湖片区、洪泽湖—骆马湖片区、骆马湖—下级湖片区、下级湖—上级湖片区、上级湖—东平湖片区、胶东片区和黄河以北鲁北片区。

### 1.2 数据来源

本文采用1980—2020年长系列实测径流资料进行模型计算,13级泵站规模特征参数如表1所示。

表1 南水北调东线一期工程泵站规模特征参数

Table 1 Characteristic parameters of pump station scale for phase I of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

片区	梯级	梯级规模/ (m <sup>3</sup> /s)	泵站名称	设计规模/ (m <sup>3</sup> /s)
长江— 洪泽湖	一	500	江都	400
			宝应	100
	二	450	淮安	300
			金湖	150
	三	450	淮阴	300
			洪泽	150
洪泽湖— 骆马湖	四	350	泗阳	230
			泗洪	120
	五	340	刘老涧	230
			睢宁	110
六	275	皂河	175	
		邳州	100	
骆马湖— 下级湖	七	250	刘山	125
			台儿庄	125
	八	250	解台	125
			万年闸	125
	九	200	蔺家坝	75
韩庄			125	
下级湖— 上级湖	十	125	二级坝	125
上级湖— 东平湖	十一	100	长沟	100
	十二	100	邓楼	100
	十三	100	八里湾	100

沿线调蓄湖泊主要通过北调控制水位和抽蓄控制水位进行引调水调度。其中,北调控制水位是为保障湖泊原有用水户权益而确定的水位值,当湖泊水位低于该值时,停止北调输水并留存湖区原有蓄

表2 南水北调东线一期工程湖泊北调与抽蓄控制水位

Table 2 North diversion and pumping storage control water levels of lakes in Phase I of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

湖泊	北调控制水位/m				抽蓄控制水位/m	
	7月上旬至8月底	9月上旬至11月上旬	11月中旬至3月底	4月上旬至6月底	非汛期	汛期
洪泽湖	12.0	12.0~11.9	12.0~12.5	12.5~12.0	13.0	12.5
骆马湖	22.2~22.1	22.1~22.2	22.1~23.0	23.0~22.5	23.0	22.5
下级湖	31.8	31.5~31.9	31.9~32.8	32.3~31.8	33.0	32.5

水量<sup>[17]</sup>;抽蓄控制水位则为北调输水过程中抽水补湖的最高控制水位。3座湖泊北调与抽蓄控制水位见表2。

## 2 南水北调东线工程水资源联合优化调度模型

### 2.1 目标函数

以南水北调东线工程受水区调水成本与总缺水量的双目标最小化为优化目标,构建单目标优化模型。其中,调水成本以全调度周期各泵站的提水电费总和表征,电费由电价、提水功率(由水体密度、重力加速度、抽水流量、扬程共同决定,并经泵站效率修正)及运行时长计算得到;总水量则通过引入惩罚系数转化为等效成本项,与提水电费合并,形成可直接求解的单目标函数。模型中,泵站总数、长系列调度时段总数、电价、水体密度、抽水流量、扬程、泵站效率、惩罚系数、受水区总数及各受水区不同时段的水量,均为模型的关键参数与变量。

### 2.2 约束条件

a. 湖泊水量平衡约束。基于南水北调东线工程沿线五大湖泊的出入湖水量、湖泊水量损失和湖泊水位之间的水量平衡关系建立约束:

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

式中: $S_{jt}$ 、 $S_{j(t+1)}$ 分别为j湖泊时段t初、末蓄水量; $I_{jt}$ 为j湖泊时段t上游来水量; $Q_{in,jt}$ 和 $Q_{out,jt}$ 分别为j湖泊时段t泵站调入、调出湖水量; $q_{out,jt}$ 为j湖泊时段t泄水量; $D_{jt}$ 为j湖泊时段t东线供水量; $D_{0,jt}$ 为j湖泊时段t原受水区供水量; $E_{jt}$ 为j湖泊时段t蒸发渗漏损失。

b. 泵站提水能力约束:

$$\begin{cases} Q_{R,kt} \leq Q_{Rmax,kt} \\ Q_{C,kt} \leq Q_{Cmax,kt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{R,kt}$ 、 $Q_{C,kt}$ 分别为k泵站时段t入湖和出湖抽水量; $Q_{Rmax,kt}$ 、 $Q_{Cmax,kt}$ 分别为k泵站时段t入湖和出湖最大抽水能力。

c. 渠道过流能力约束:

$$Q_{H,gt} \leq Q_{Hmax,gt} \quad (3)$$

式中: $Q_{H,gt}$ 为第g河段时段t的水量; $Q_{Hmax,gt}$ 为第g

河段时段  $t$  最大过流能力。

d. 湖泊上下限水位约束:

$$Z_{\min,jt} \leq Z_{jt} \leq Z_{\max,jt} \quad (4)$$

式中:  $Z_{jt}$  为  $j$  湖泊时段  $t$  的水位;  $Z_{\min,jt}$ 、 $Z_{\max,jt}$  分别为  $j$  湖泊时段  $t$  最低和最高限制水位。

e. 渠道水量平衡约束。系统中, 相邻泵站间的河道构成独立河段。考虑到小尺度产汇流过程在中长期调度中会被显著坦化, 模型暂不考虑该河段的调蓄能力, 仅将河段输水损失与受水片区用水纳入水量平衡约束:

$$Q_{\text{in},(g+1)t} = Q_{\text{out},gt} + q_{\text{inter},gt} - D_{\text{inter},gt} - q_{\text{loss},gt} \quad (5)$$

式中:  $Q_{\text{in},(g+1)t}$  为第  $g$  河段时段  $t$  上游泵站(闸门)抽(引)水量;  $Q_{\text{out},gt}$  为第  $g$  河段时段  $t$  到达下游泵站前的水量;  $q_{\text{inter},gt}$  为第  $g$  河段时段  $t$  区间来水量;  $D_{\text{inter},gt}$  为第  $g$  河段时段  $t$  的供水量;  $q_{\text{loss},gt}$  为第  $g$  河段时段  $t$  的水量损失量。

f. 北调控制水位约束。洪泽湖、骆马湖、下级湖除承担南水北调东线工程受水片区供水任务外, 还需优先保障原用水户的用水权益。为了避免工程调水对原用水户造成不利影响, 为各湖泊设置了北调控制水位(表 2)。当南水北调东线工程受水片区存在需水需求, 但湖泊水位低于其北调控制水位时, 将停止从该湖泊取水北调, 向北供水水源切换为其他湖泊或长江水源。

g. 抽蓄控制水位约束。洪泽湖、骆马湖、下级湖在抽蓄过程中, 水位需满足表 2 所示的抽蓄控制水位要求, 控制标准分汛期与非汛期设定。当湖泊水位高于抽蓄控制水位时, 该湖泊服从防汛抗旱调度要求, 或按照北调水需求优先的原则抽水北送。

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

$$F_{\text{out}} \leq F_C \quad (6)$$

式中:  $F_{\text{out}}$  为穿黄工程的出流量;  $F_C$  为穿黄工程的过水能力。

i. 其他非负约束。

### 2.3 优化模式设置

设置调度线优化、预调水量优化、调度线-预调水量协同优化 3 种模式, 采用粒子群算法 (PSO) 进行模型求解。计算以月为时间步长, 基准调度线沿用南水北调东线工程规划设计成果, 包含各水源湖泊死水位、北调控制水位、抽蓄控制水位及最高水位等控制指标。

a. 调度线优化: 以最新径流实测资料对原有调度线进行优化调整。选取洪泽湖、骆马湖、下级湖各

时段北调控制水位与抽蓄控制水位作为决策变量, 在水位允许区间内生成初始粒子种群, 通过不断迭代寻优, 得到种群最优位置, 即为最优调度线。

b. 预调水量优化: 充分利用湖泊库容的调蓄补偿能力, 在原有调度线的基础上, 通过提前调配后续时段用水量, 削减总缺水量。以各湖泊各个时段预调水量为决策变量, 依据预调水量控制范围构建初始种群, 不断迭代得到种群最优位置, 即为最优预调水量过程。

c. 调度线-预调水量协同优化: 通过调度线优化模式得到优化后的湖泊北调控制水位和抽蓄控制水位, 将优化调度线输入预调水量优化模型中再进行预调水量优化计算, 得到调度线、预调水量协同优化的调度结果。

粒子群算法迭代流程如下:

**步骤 1** 输入南水北调东线工程沿线湖泊、泵站特征参数及相关曲线, 湖泊入流量、受水片区需水量等基础数据;

**步骤 2** 根据 3 种优化模式对应的决策变量上下限范围生成初始种群。初始种群包括  $N$  个粒子, 每个粒子为  $D$  维向量, 分别对应粒子位置与运动速度。

**步骤 3** 以优化模式中设置的调度线为依据, 迭代计算各粒子的适应度(目标)值。首次迭代时, 粒子初始位置即为个体最优位置; 根据各粒子适应度值, 选取最优值对应的位置作为当前种群最优位置。

**步骤 4** 更新粒子速度与位置。对于每个粒子, 将其当前适应度与历史最优适应度进行比较, 重新计算每个粒子的适应度值。若当前结果更优, 则同步更新个体最优位置与种群最优位置。

**步骤 5** 循环执行步骤 4 开展迭代运算, 当适应度值随着迭代次数的增加不再变化, 或迭代次数达到设定上限时, 停止运算并输出计算结果。

## 3 结果与分析

为对比 3 种优化模式的优化效果, 以原调度线为依据进行长系列模拟计算, 将得到的模拟结果与调度线优化、预调水量优化和调度线-预调水量协同优化 3 种模式模拟结果进行对比分析。

### 3.1 原调度线模拟

长江—洪泽湖、洪泽湖—骆马湖和骆马湖—下级湖片区的多年平均供水量较多(表 3), 合计占总供水量的 69%。各片区均存在一定程度的缺水, 其中, 洪泽湖—骆马湖片区多年平均缺水量最大。从水量来源情况(表 4)看, 自南向北各片区长江水使用比例呈逐渐降低趋势, 其中长江—洪泽湖片区长江供水量占比高达 92%。这是由于长江水北调距

表 3 南水北调东线工程受水片区供、缺水量

Table 3 Water supply and deficit in water-receiving areas of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

片区	多年平均供水量/亿 m <sup>3</sup>				多年平均缺水量/亿 m <sup>3</sup>			
	原模式	调度线优化模式	预调水量优化模式	调度线-预调水量协同优化模式	原模式	调度线优化模式	预调水量优化模式	调度线-预调水量协同优化模式
长江—洪泽湖	31.70	31.86	32.45	32.45	0.75	0.59	0	0
洪泽湖—骆马湖	20.16	20.42	21.09	21.06	0.93	0.66	0	0.03
骆马湖—下级湖	10.34	10.44	10.77	10.76	0.43	0.33	0	0.01
下级湖—上级湖	13.78	14.02	14.57	14.55	0.79	0.55	0	0.02
上级湖—东平湖	2.52	2.55	2.60	2.60	0.08	0.05	0	0
胶东段	7.30	7.36	7.46	7.46	0.16	0.10	0	0
鲁北段	3.71	3.74	3.79	3.79	0.08	0.05	0	0

表 4 南水北调东线工程受水片区水源组成

Table 4 Water source composition in water-receiving areas of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

片区	水源组成/%															
	原模式				调度线优化模式				预调水量优化模式				调度线-预调水量协同优化模式			
	长江	骆马湖	洪泽湖	下级湖	长江	骆马湖	洪泽湖	下级湖	长江	骆马湖	洪泽湖	下级湖	长江	骆马湖	洪泽湖	下级湖
长江—洪泽湖	92	8	0	0	92	8	0	0	79	21	0	0	86	14	0	0
洪泽湖—骆马湖	81	16	3	0	82	15	3	0	70	23	7	0	73	21	6	0
骆马湖—下级湖	76	15	9	0	77	15	9	0	75	8	17	0	74	11	16	0
下级湖—上级湖	74	13	7	5	73	13	8	7	86	0	5	9	84	4	4	8
上级湖—东平湖	71	15	9	6	71	14	9	6	92	0	4	4	89	3	3	4
胶东段	68	15	10	7	69	15	10	5	93	0	3	4	91	3	3	3
鲁北段	68	15	10	7	69	15	10	5	93	0	3	4	91	3	3	3

离越长,提水电费越高,优先在南边受水片区使用长江水源可有效降低整体用水成本。同时,洪泽湖、骆马湖、下级湖等湖泊水源在其北边受水片区均有一定比例的供水贡献,且占比随受水片区北移逐步降低。

### 3.2 调度线优化

调度线优化模式下,洪泽湖、骆马湖与下级湖的优化调度线与原调度线对比结果如图 2 所示。可见,优化后的北调控制水位和抽蓄控制水位均较原水位线发生了不同程度的调整,整体表现为:北调控制优化水位在汛期(5—7月)低于原水位值,而在非汛期相较原水位有一定的抬高,这是由于汛期北边

缺水较多,模型通过降低湖泊北调控制水位保证北调水量,而非汛期为优先保障湖泊原受水片区用水权益,通过抬高北调控制水位以减少原受水片区缺水量,同时增加长江水源供给南水北调东线工程受水片区,在兼顾原受水片区用水保障的前提下,尽可能降低东线受水片区的缺水量。抽蓄控制水位在全时段均低于或等于原水位值,这是模型在尽量满足受水片区需水的前提下,通过降低泵站提水成本、控制抽水补湖水量而得到的优化结果。

调度线优化模式下南水北调东线工程受水片区多年平均供、缺水量及用水水源组成情况分别如

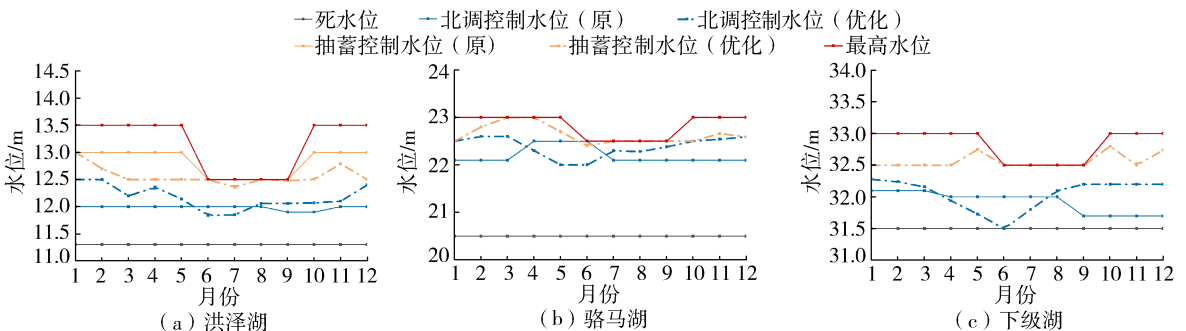


图 2 水源湖泊优化调度线与原调度线对比

Fig. 2 Comparison of optimized and original operation lines for water source lakes

表3和表4所示。与原模式结果相比,7个片区的多年平均缺水均有不同程度降低,其中长江—洪泽湖、洪泽湖—骆马湖及下级湖—上级湖片区缺水降低幅度最为显著。从水量来源组成情况看,调度线优化模式与原模式结果相差不大。

### 3.3 预调水量优化

由表3可见,预调水量优化模式下,7个受水片区缺水均为0,表明预调水量优化模式能够充分发挥湖泊北调库容的调蓄补偿能力,通过预调水量优化,保障各受水片区用水需求。

相较于原模式,预调水量优化模式各片区水源组成(表4)差异较大。下级湖—上级湖、上级湖—东平湖、胶东及鲁北等北方片区,长江供水占比显著提升,平均占比达91%,而各湖泊水源主要服务于就近片区,如洪泽湖供水在洪泽湖—骆马湖片区占比最高,骆马湖供水在骆马湖—下级湖片区占比最高。这是由于预调水量模式通过充分利用湖泊调蓄库容,将长江水预调至湖泊暂存以供后期使用,缓解了用水高峰时泵站提水能力限制问题。

### 3.4 调度线-预调水量协同优化

相较于调度线优化模式,南水北调东线工程引入预调水量优化调度后,各片区多年平均缺水显著降低,仅洪泽湖—骆马湖、骆马湖—下级湖和下级湖—上级湖3个受水片区还存在缺水(表3),多年平均缺水分别为0.03亿、0.01亿、0.02亿 $m^3$ 。从各受水片区的水源组成情况(表4)来看,北边受水片区的长江供水占比明显增加,其中下级湖—上级湖、上级湖—东平湖、胶东及鲁北片区的长江水源平均占比为89%,较仅调度线优化模式增加18%,说明通过预调水量优化调度,可充分利用湖泊调蓄库容,提高长江水北调水量的利用率,以空间调蓄优势补齐时间维度的用水缺口,充分发挥南水北调东线工程的调水效益。

### 3.5 多模式对比分析

表5为南水北调东线工程7个受水片区不同调

度模式的单方水提水电费,可见所有调水模式的单方水提水电费均随着受水片区北移而递增,表明调水距离越远,泵站提水成本越高。

与原模式相比,调度线优化模式下各片区的单方水提水电费基本相同,这是由于两种模式各片区水源组成差异较小(表4),平均提水成本相近。预调水量优化模式相较原模式,在长江—洪泽湖、洪泽湖—骆马湖片区的单方水提水电费略有降低,而下级湖—上级湖、上级湖—东平湖、胶东及鲁北片区的费用反而升高。究其原因,水量预调使得骆马湖以南片区更多使用洪泽湖水源,降低了对高成本长江水的依赖;而下级湖以北片区长江水供水占比显著提升,提水成本随之增加。调度线-预调水量协同优化模式与调度线优化模式对比结果与此类似。

南水北调东线工程受水片区与原受水片区不同调度模式多年平均缺水量与平均单方水提水电费对比如表6所示。由表6可见:①调度线优化模式。受水片区多年平均缺水量较原模式降低0.87亿 $m^3$ (降低27%),且原受水片区多年平均缺水量同步降低0.25亿 $m^3$ (降低5.5%),说明优化调度线可以在不损害原受水片区用水权益的前提下,显著提高南水北调东线工程的调水效益。②预调水量优化模式。受水片区多年平均缺水量较原模式降低3.21亿 $m^3$ (降低100%),但原受水片区多年平均缺水量增加了0.02亿 $m^3$ 。分析其原因,在预调水量优化模式中,外调水源的预调配水挤占了湖泊部分调蓄库容,导致原受水片区供水能力受到轻微影响。总体来看,该模式在基本保障原受水片区用水效益的前提下,可完全满足南水北调东线工程受水片区的用水需求,最大化发挥工程调水效益。③调度线-预调水量协同优化模式。受水片区多年平均缺水量较仅优化调度线结果降低2.27亿 $m^3$ (降幅97%),且原受水片区多年平均缺水量同步降低0.17亿 $m^3$ (降幅3.9%),说明在优化调度线的基础上引入预

表5 南水北调东线工程受水片区各调度模式单方水提水电费

Table 5 Water lifting cost per cubic meter of water in different operation modes for water-receiving areas of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project

片区	单方水提水电费/元			
	原模式	调度线优化模式	预调水量优化模式	调度线-预调水量协同优化模式
长江—洪泽湖	0.03687	0.03710	0.02964	0.03337
洪泽湖—骆马湖	0.09364	0.09436	0.08416	0.08666
骆马湖—下级湖	0.13171	0.13274	0.12679	0.12629
下级湖—上级湖	0.15927	0.15689	0.16706	0.16571
上级湖—东平湖	0.16432	0.16405	0.18629	0.18432
胶东段	0.24783	0.25204	0.28392	0.28203
鲁北段	0.24783	0.25204	0.28392	0.28203

调水量优化,实现调度线与预调水量的协同优化调度,可充分发挥湖泊库容的调蓄补偿作用,同时缓解南水北调东线工程受水片区与原受水片区的用水短缺问题。④4种模式的平均单方水提水电费均为0.11元,这是由于各模式均需通过泵站将南方水源逐级送到北方受水片区,尽管不同模式的水源组成差异导致各受水片区电费成本存在波动,但综合所有片区计算的平均电费基本一致。

表6 各调度模式多年平均缺水量、单方水提水电费对比

Table 6 Multi-mode comparison of average annual water shortage and electricity cost per cubic meter for water transfer

模式	多年平均缺水量/亿 m <sup>3</sup>		平均单方水提水电费/元
	南水北调东线工程受水片区	原受水片区	
原模式	3.21	4.57	0.11
调度线优化模式	2.34	4.32	0.11
预调水量优化模式	0.00	4.59	0.11
调度线-预调水量协同优化模式	0.07	4.15	0.11

## 4 结论

a. 调度线优化模式下,南水北调东线工程受水片区多年平均缺水量较原模式降低了27%,原受水片区多年平均缺水量同步下降5.5%,可见调度线优化模式可在不损害原受水片区用水权益的前提下,有效降低南水北调东线工程受水片区的缺水量。结合最新径流资料更新原有调度线,对适配当下径流变化规律、提升工程调水效益具有重要现实意义。

b. 预调水量优化模式可将南水北调东线工程受水片区多年平均缺水量降为0,仅造成原受水片区缺水量小幅增加。可见,该模式在基本保障原受水片区用水效益的前提下,能够全面满足南水北调东线工程受水片区的用水需求,最大化发挥南水北调东线工程的调水效益。

c. 调度线-预调水量协同优化模式下,南水北调东线工程受水片区多年平均缺水量较仅优化调度线结果下降了97%,原受水片区缺水量下降3.9%,说明在优化调度线基础上叠加预调水量调控,进行调度线-预调水量协同优化调度,可进一步缓解南水北调东线工程受水片区用水缺口,是更为高效、合理的调度模式。

d. 3种优化模式下,各受水片区提水成本随着水源结构变化存在差异,但所有受水片区综合平均提水电费与原模式基本持平。

## 参考文献:

[1] 郭旭宁,刘为锋,邢西刚,等. 国家水网的理论内涵与战

略策略关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1055-1063. (Guo Xuning, Liu Weifeng, Xing Xigang, et al. National water network theoretical connotation and its relationship between strategy and tactics[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023,21(6):1055-1063. (in Chinese))

[2] 杨明明,赵勇,秦长海,等. 南水北调东、中线一期工程综合效益评估及预测[J]. 水利学报,2025,56(5):659-671. (Yang Mingming, Zhao Yong, Qin Changhai, et al. Comprehensive benefit evaluation and prediction for Phase I of the East and Middle Routes of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025,56(5):659-671. (in Chinese))

[3] Zhao Zhenyu, Zuo Jian, Zillante G. Transformation of water resource management: a case study of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 136-145.

[4] 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. Scenarios and potential of adjustable water volume for Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2025,41(1):42-48. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 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 Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project considering water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(3):10-18. (in Chinese))

[7] 李昕阳,郭旭宁,李维雨,等. 南水北调东线工程优化调度与区段水源组成分析[J]. 水资源保护,2025,41(3):171-178. (Li Xinyang, Guo Xuning, Li Weiyu, et al. Optimal dispatching and section water source composition analysis of South-to-North Water Diversion Eastern Route Project [J]. Water Resources Protection, 2025,41(3):171-178. (in Chinese))

(下转第240页)

- channel catfish (*Ictalurus punctatus*) aquaculture areas of Jiangsu Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(12): 1633-1642. (in Chinese))
- [ 88 ] Chen Yuru, Guo Xingpan, Niu Zuoshun, et al. Antibiotic resistance genes ( ARGs ) and their associated environmental factors in the Yangtze Estuary, China: from inlet to outlet [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 158: 111360.
- [ 89 ] 邢月, 张雯, 程艳, 等. 西北内陆河抗生素抗性基因赋存特征及其影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(6): 3077-3086. ( Xing Yue, Zhang Wen, Cheng Yan, et al. Distribution characteristics and influencing factors of antibiotic resistance genes in inland rivers of northwest China [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(6): 3077-3086. (in Chinese))  
( 收稿日期: 2025 - 06 - 27 编辑: 胡新宇)
- 
- ( 上接第 197 页)
- [ 8 ] 贾丹妮, 武连洲, 粟晓玲, 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))
- [ 9 ] 刘万新, 刘洋, 王瑶. 南水北调中线受水区 2001—2023 年水资源量与用水量变化分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(5): 18-25. (Liu Wanxin, Liu Yang, Wang Yao. Analysis on changes of water resources quantity and water consumption in water-receiving areas of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project from 2001 to 2023 [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 53(5): 18-25. (in Chinese))
- [ 10 ] 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适应性对策 [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 Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project under new situation [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(2): 165-172. (in Chinese))
- [ 11 ] 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. Research on optimal operation of Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Advances in Water Science*, 1995, 6(3): 198-204. (in Chinese))
- [ 12 ] Liu Yueyi, Zheng Hang, Wan Wenhua, et al. Optimal operation toward energy efficiency of the long-distance water transfer project [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 618: 129152.
- [ 13 ] Zhong Huayu, Liao Tao, Fang Guohua, et al. Exploring optimal joint operating rules for large-scale inter-basin water transfer projects with multiple water sources, diversion routes, and water demand areas [J]. *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 2023, 49: 101504.
- [ 14 ] 王文杰, 吴学文, 方国华, 等. 南水北调东线工程江苏段水量优化调度研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 422-426. (Wang Wenjie, Wu Xuewen, Fang Guohua, et al. Optimal water operation in Jiangsu Section of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(3): 422-426. (in Chinese))
- [ 15 ] Cao Minglin, Liu Weifen, Xu Bin, et al. Multi-scenario optimization model for operation of inter-basin water transfer-supply systems considering cost-benefit relationships [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, 14(8): 2872-2884.
- [ 16 ] 游进军, 林鹏飞, 王静, 等. 跨流域调水工程水量配置与调度耦合方法研究 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(1): 16-22. (You Jinjun, Lin Pengfei, Wang Jing, et al. Study on method for coupling water allocation with project operation for inter-basin water transfer project [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(1): 16-22. (in Chinese))
- [ 17 ] 钟华昱, 方国华, 闻昕, 等. 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 [J]. *水资源保护*, 2026, 42(1): 49-58. (Zhong Huayu, Fang Guohua, Wen Xin, et al. Influence of water level control for north water transfer in Hongze Lake and Luoma Lake on water regulation of Jiangsu Section of Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(1): 49-58. (in Chinese))  
( 收稿日期: 2025 - 08 - 08 编辑: 胡新宇)