

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.002

考虑供水均衡性的南水北调东线工程 江苏段优化调度

方国华¹, 李智超¹, 钟华昱¹, 张劲松², 闻 昕¹, 孙洪滨², 黄显峰¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对南水北调东线工程江苏段向省内受水区输水时遭遇的供水时空不均衡问题, 同时为了增加工程运行的综合效益, 提高工程的供水均衡性, 建立了以受水区综合缺水率最小、泵站总抽水量最小、缺水率时间标准差最小、缺水率空间标准差最小为目标的多目标优化调度模型, 并采用 NSGA-III 算法求解优化调度模型, 运用基于层次分析法与 TOPSIS 法的组合赋权法进行方案优选。结果表明: 相较于常规调度方案, 优化调度方案的南水北调东线工程江苏段受水区的供水率得到明显改善, 在 95%、75% 和 50% 来水频率下, 综合缺水率分别下降了 9.2%、8.2% 和 10.5%; 泵站总抽水量在 95%、75% 来水频率下增加了 21.6%、15.4%, 在 50% 来水频率下下降了 39.4%; 受水区供水时空均衡性明显提高, 在 95%、75% 和 50% 来水频率下缺水率时间标准差、缺水率空间标准差均显著降低, 不同受水区不同时段缺水率分布范围更均匀集中。

关键词: 供水均衡性; NSGA-III 算法; 组合赋权法; 多目标优化调度; 南水北调东线工程

中图分类号: TV213.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)03-0010-09

Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance

FANG Guohua¹, LI Zhichao¹, ZHONG Huayu¹, ZHANG Jinsong², WEN Xin¹, SUN Hongbin², HUANG Xianfeng¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Water Resources Department of Jiangsu, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Transfer (JE-SNWT) Project is prone to encounter the problem of spatiotemporal unbalanced water supply when transferring water to the water receiving area inside the province. In order to increase the comprehensive benefits of the project operation and improve the water supply balance of the project, this paper established a multi-objective optimization scheduling model with the minimum comprehensive water shortage rate in the water receiving area, the minimum total pumping volume of the pumping station, the minimum standard deviation of the water shortage rate in each period, and the minimum standard deviation of the water shortage rate in each water receiving area. The NSGA-III algorithm was used to solve the optimization scheduling model, and the combination weighting approach based on the analytic hierarchy process and the TOPSIS method was used to optimize the scheme. The results showed that compared with the conventional scheduling scheme, the water supply rate of the water receiving area in Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project in the optimized scheduling scheme was significantly improved. Under the 95%, 75% and 50% water frequency, the comprehensive water shortage rate decreased by 9.2%, 8.2% and 10.5%, respectively. The total pumping volume of the pumping station increased slightly by 21.6% and 15.4% at 95% and 75% inflow frequencies, and decreased significantly by 39.4% at 50% inflow frequency. The spatial and temporal balance of water supply in the water receiving area was obviously improved. The standard deviation of water shortage rate in each period and the standard deviation of water shortage rate in each water receiving area were significantly reduced under 95%, 75% and 50% water frequency. The distribution range of water shortage rate in different periods in different water receiving areas was more uniform and concentrated.

Key words: water supply balance; NSGA-III algorithm; combination weighting approach; multi-objective optimal operation; eastern route of the South-to-North Water Diversion Project

基金项目: 江苏水利科技项目(2020005, 2019027)
作者简介: 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: hhufgh@163.com
引用本文: 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.

随着经济发展和人口规模的增长,水资源短缺问题愈发突出,仅靠本流域内的水资源难以完全解决资源型缺水地区的供需矛盾^[1-3]。通过跨流域调水工程将丰水地区的水资源调入缺水地区,已成为缓解水资源短缺问题的主要工程措施^[4-6],如澳大利亚的雪山工程^[7]、俄罗斯的莫斯科运河工程^[8]、中国的南水北调工程^[9]等。其中,作为全球最大的跨流域调水工程,南水北调工程能够解决我国北方水资源严重短缺的问题,为我国北方社会经济发展提供有力保障,是关乎国计民生的重要基础设施。

随着跨流域调水工程的建设和发展,如何有效运行和管理成为当前的研究热点。Matete 等^[10]利用生态经济学评价指标体系对莱索托跨流域调水进行生态用水评价,建立了莱索托跨流域调水多生态指标评价体系。Guo 等^[11]将调水规则与供水方案相结合,提出了改良后的调度策略,并运用双层模型解决跨流域调水多水库运行策略问题。方淑秀等^[12]针对滦河引水工程多水库跨流域供水系统的优化运行,采用随机动态规划方法得到了该工程多级水库之间的最优运行策略。杨柳等^[13]以引汉济渭与黑河引水工程联合供水系统为基础建立了模拟调度模型,充分发挥外调水和当地水资源联合调度的补偿作用,优化不同来水频率下的供水方案。李瑛^[14]针对引嘉济汉-引汉济渭跨流域调水工程试运行期和正常运行期的调度问题,建立了不同时期的泵站-水库-电站协同运行调度系统。

南水北调东线工程江苏段是在原江水北调工程基础上的扩大规模和向北延伸,在长江与骆马湖间原运河线外新开辟了运西输水线路,具有河道水系复杂、配置目标多样、新老泵站一体等特点。南水北调东线工程江苏段综合效益能够充分发挥的关键,除对泵站、闸门、湖泊等各工程单元进行高效的管理外,便是对工程整体进行科学的调度决策^[15]。近年来,围绕南水北调东线工程江苏段(以下简称东线工程)的相关研究逐渐增多。侍翰生等^[16]根据工程特点,将东线工程概化成“河-湖-梯级泵站”系统,以系统缺水量及抽水量最小为目标,运用离散微分动态规划法与模拟技术求解了多湖泊优化模型。王文杰等^[17]在对东线工程水资源系统分析概化的基础上,采用改进遗传算法求解了不同保证率下东线工程湖泊缺水量和泵站抽水量最小的优化模型。闻昕等^[18]针对东线工程特点,进一步提出了“两线-三湖-四水源-六区间”的水资源调配空间格局,建立了考虑受水区缺水量最小和抽江水量最小的优化模型。此外,还有很多学者通过合理的概化东线工程系统,优化各沿线泵站的抽水量^[19-21]。当前关于东线工程的优化调度研究,在考虑优化目标时,主要以系统总抽水量和缺水量最小为主对整体的经济效益进行优化,而东线工程的供水范围涉及不同市、县的多个受水区与不同的供水时段,就空间维度而言,不同受水区的供水成本与其所在的地理位置关系密切,东线工程位于南方的受水区因为距离水源近、提水高度小等原因能够得到相对充足的水量供给,位于北方的受水区因为调水线路长、提水高度大等原因使得供水成本增加,各地区的供水难易程度不同,直接导致了各受水区的供水差异性;就时间维度而言,调度时段内的不同时期,其来水量总是不均匀的,在来水较枯的时段,各受水区之间的供水竞争性更大,进一步加剧了供水成本较大的东线工程北方受水区的供水困难问题。若仅考虑东线工程的整体经济效益最大化,易造成部分受水区在某些时段严重缺水,加剧供水矛盾,有碍公平。因此,考虑东线工程在供水过程中的时空均衡性问题,使各受水区在不同时段得到相对均衡的供水具有重要意义。

本文以受水区综合缺水率最小、泵站总抽水量最小、缺水率时间标准差最小、缺水率空间标准差最小为优化目标,构建考虑受水区供水时空均衡性的南水北调东线工程江苏段多目标优化调度模型,采用 NSGA-III 算法求解,并采用基于层次分析法与 TOPSIS 法的组合赋权法进行方案优选,以期所提方案在提高工程整体运行调度效益的同时,保证不同受水区和不同时段供水的公平性。

1 研究区概况与研究资料

1.1 研究区概况

南水北调东线工程江苏段位于淮河流域下游的苏北地区,省内供水范围包括淮安、宿迁、连云港、徐州市全部辖区和扬州市内江都、高邮、宝应县(市)以及盐城市阜宁县,沿线包含有数十个大中型灌区,总土地面积 37 980 km²,耕地面积 200.5 万 hm²,供水区域见图 1。工程主要任务是利用江苏境内 2 条线路、9 个梯级泵站逐级提水北上,向沿线及省外用水户提供稳定的供水。

1.2 研究资料

将东线工程省内供水区域划分为 16 个受水区,并根据江苏省湖泊、闸门、泵站以及受水区的位置分布情况对供水系统进行概化,如图 2 所示;各受水区的需水量由江水北调沿线供水调度计划确定,本地降水按照

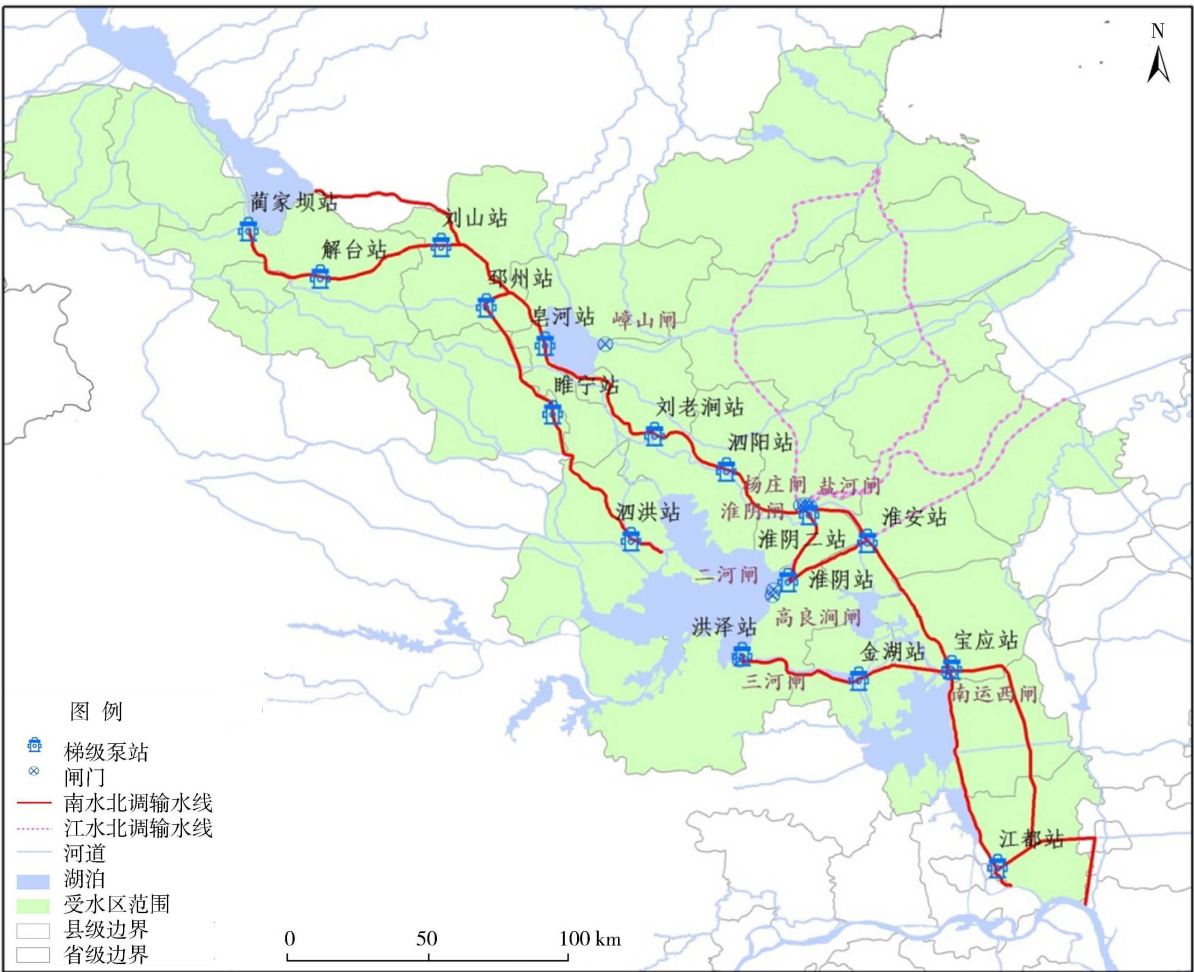


图 1 南水北调东线工程江苏段供水区域

Fig.1 Water supply area of the JE-SNWT Project

区域就近原则与外来水源一并考虑;不同来水频率下(50%、75%和95%)的湖泊来水情况由历史入湖径流量确定。相关资料均来源于江苏省水利厅。

2 优化调度模型构建

2.1 目标函数

首先,从东线工程的建设目的出发,作为一个国家投资并主导建设的跨流域调水工程,应尽可能最大程度发挥工程作用,缓解沿线受水区的缺水状况,因此应作为衡量优化效果的一个重要指标。其次,以尽量经济的方式完成省内外供水任务,能够减少水量损失、提高江苏省整体供水效率,因此将泵站总抽水量也作为优化目标。最后,由于东线工程不同受水区具有显著的供水成本差异,为了尽可能对各受水区均衡供水,需要考虑受水区供水的空间均衡性;工程在具有省外供水任务的南水北调时期(一般为12月至次年5月)与省内大用水时期(6月至8月上旬)的供水压力通常较大,需要考虑受水区供水的时间均衡性,因此最后2个指标为缺水率空间标准差与缺水率时间标准差。综上,4个目标函数分别为受水区综合缺水率最小 f_1 (式(1))、泵站总抽水量最小 f_2 (式(2))、缺水率空间标准差最小 f_3 (式(3))、缺水率时间标准差最小 f_4 (式(4))。

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \frac{Q_{Q(i,t)}}{Q_{X(i,t)}} \tag{1}$$

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J Q_{B(j,t)} \Delta T_t \tag{2}$$

$$f_3 = \min \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

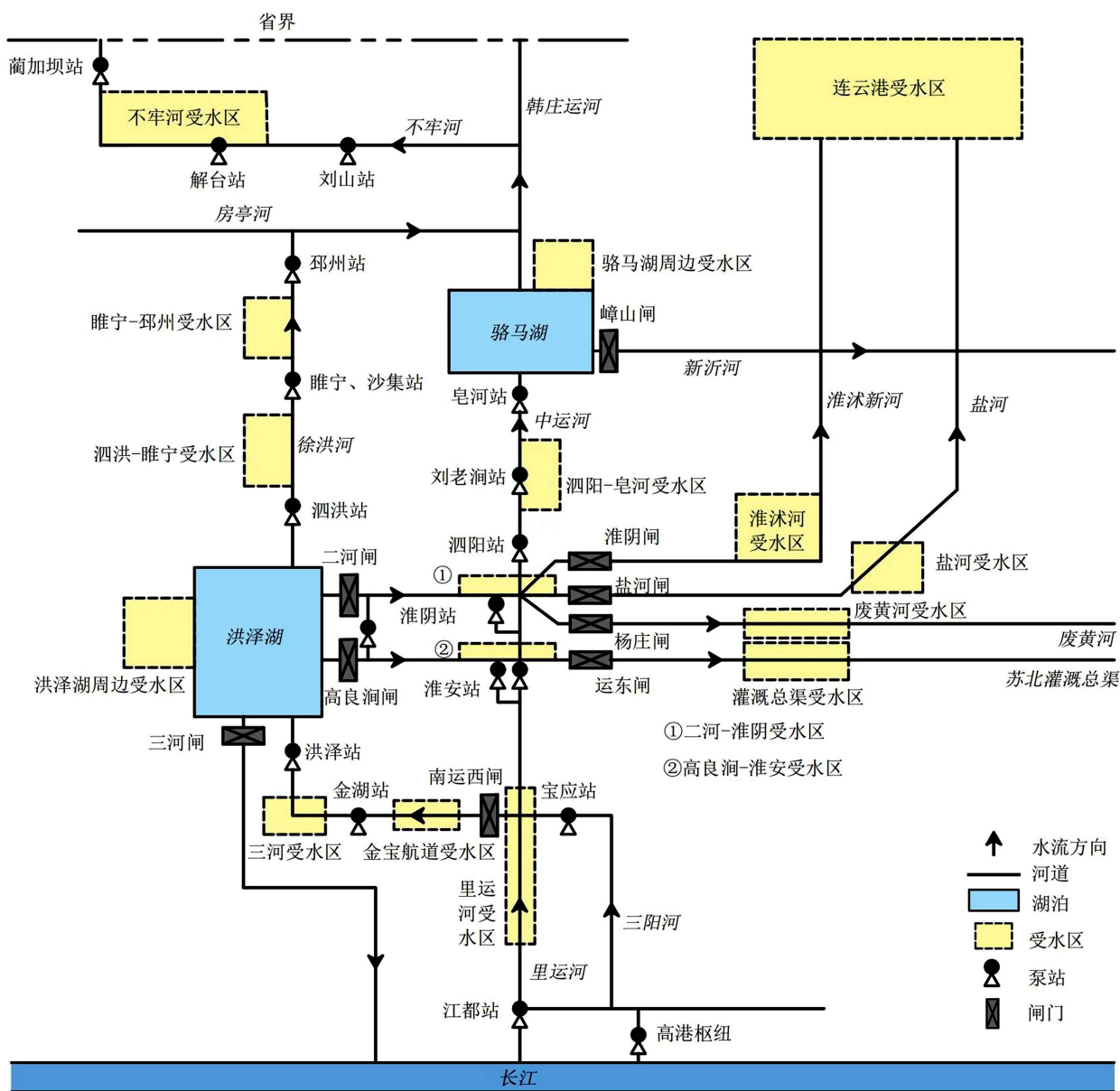


图 2 南水北调东线工程江苏段系统概化

Fig. 2 Generalization diagram of the JE-SNWT system

$$f_4 = \min \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: t 为时段序号; T 为时段总数; i 为受水区序号; N 为受水区总数; j 为泵站序号; J 为泵站总数; $Q_{Q(i,t)}$ 为 t 时段 i 受水区的实际缺水量, 亿 m^3 ; $Q_{X(i,t)}$ 为 t 时段 i 受水区的需水量, 亿 m^3 ; $Q_{B(j,t)}$ 为 t 时段 j 泵站抽水流量, m^3/s ; ΔT_t 为 t 时段时长, s ; Y_i 为 i 受水区年平均缺水率; $\bar{Y}$ 为 N 个受水区的年平均缺水率; X_t 为 t 时段缺水率; $\bar{X}$ 为 T 个时段的平均缺水率。

2.2 约束条件

系统中每个工程单元都有其特定的约束条件, 同时工程中某些调度目标也会转化为相应的约束条件, 模型约束包括湖泊水量平衡约束(式(5))、湖泊调蓄能力约束(式(6))、泵站工作能力约束(式(7))、闸门最大过流能力约束(式(8))、非负约束。

$$S_{(k,t+1)} = S_{(k,t)} + Q_{(k,t)} + P_{r(k,t)} + F_{r(k,t)} - P_{c(k,t)} - F_{c(k,t)} - W_{(k,t)} \quad (5)$$

$$S_{\min(k,t)} \leq S_{(k,t)} \leq S_{\max(k,t)} \quad (6)$$

$$P_{r(k,t)} \leq P_{r\max(k,t)} \quad P_{c(k,t)} \leq P_{c\max(k,t)} \quad (7)$$

$$F_{r(k,t)} \leq F_{rmax(k,t)} \qquad F_{c(k,t)} \leq F_{cmax(k,t)} \tag{8}$$

式中: $S_{(k,t)}$ 为 t 时段 k 湖泊的蓄水量,亿 m^3 ; $Q_{(k,t)}$ 为 t 时段 k 湖泊的自然来水量,亿 m^3 ; $P_{r(k,t)}$ 为 t 时段泵站抽入 k 湖泊的水量,亿 m^3 ; $P_{c(k,t)}$ 为 t 时段 k 湖泊由泵站抽出的水量,亿 m^3 ; $F_{r(k,t)}$ 为 t 时段闸门泄入 k 湖泊的水量,亿 m^3 ; $F_{c(k,t)}$ 为 t 时段 k 湖泊通过闸门泄出的水量,亿 m^3 ; $W_{(k,t)}$ 为 t 时段 k 湖泊的输水损失,亿 m^3 ; $S_{min(k,t)}$ 和 $S_{max(k,t)}$ 分别为 t 时段 k 湖泊的最小蓄水量和最大蓄水量,亿 m^3 ; $P_{cmax(k,t)}$ 、 $P_{rmax(k,t)}$ 分别为应泵站出入湖的泵站最大抽水能力,亿 m^3 ; $F_{cmax(k,t)}$ 、 $F_{rmax(k,t)}$ 分别为闸门出入湖的最大过流能力,亿 m^3 。

2.3 优化调度方式

东线工程常规调度方式假定时段内调蓄湖泊不进行补水或弃水,根据上游来水情况和周边用水户的需水情况,依据水量平衡计算时段末湖泊水位,再根据该水位做出抽(泄)水量决策,决策如下:①当大于骆马湖上限水位时,停止洪泽湖北调抽水;②当洪泽湖、骆马湖在北调控制水位与湖泊上限水位之间时,停止湖泊泄水并进行补湖;③当洪泽湖、骆马湖低于北调控制水位时,停止湖泊泄水与北调抽水并进行补湖。

显然,常规调度方式没有充分考虑水源的来水特性,且未能合理利用湖泊的调蓄能力。因此,本文针对东线工程的水源、线路、湖泊特点,提出了合理的优化调度方式。优化调度方式下湖泊库容不再作为抽(泄)水的决策依据,而是仅作为模型的约束条件。优化调度方式以洪泽湖、骆马湖作为调蓄工程,以水量平衡为基本原理,将泵站的抽水流量与受水区综合缺水率作为决策变量,依据湖泊对东线工程进行南北分区,继而由北向南依次推求各闸站的抽(泄)水过程,最终通过优化算法得出供水系统整体的优化配置。

2.4 优化调度模型求解与多目标优选

2.4.1 NSGA-III 算法

南水北调东线工程江苏段优化调度是一个典型的高维多目标优化问题,因此选取能够较好解决该问题的 NSGA-III 算法进行求解。NSGA-III 算法通过对 NSGA-II 算法中的拥挤度选择算子进行替换,生成参考点后采用最小生境选择机制在快速非支配排序后选择优良个体,能够有效保证算法的多样性和收敛性^[22]。具体步骤可以参考文献[22]。

2.4.2 基于层次分析法与 TOPSIS 法的组合赋权法

在多属性决策方法中,主观赋权法的决策结果客观性较差,有较强的随意性,而客观赋权法依赖于实际的问题域,没有考虑决策者的主观意向,通用性和决策人的可参与性较差^[23]。因此,本文采用综合主观的层次分析法^[24]与客观的 TOPSIS 法^[25]的组合赋权法,对南水北调东线江苏段优化调度模型结果进行评价,先运用层次分析法取得总抽水量、综合缺水率、缺水率时间标准差、缺水率空间标准差 4 个指标的主观权重,再运用 TOPSIS 法计算各指标加权后的相对接近度。

层次分析法先构造受水区总抽水量、综合缺水率、缺水率时间标准差、缺水率空间标准差 4 个指标的判断矩阵(表 1),在判断矩阵满足一致性要求的情况下求解判断矩阵最大特征值与对应的特征向量,将特征向量归一化处理后计算指标的权重向量,从而获得 4 个指标的主观权重。表 1 的判断矩阵一致性指标为 0.012,小于 0.1,满足一致性要求。

在用层次分析法取得主观权重之后,运用 TOPSIS 法对模型求解结果进行最后的优选。TOPSIS 法的基本过程为找出基于加权后的决策矩阵的最优方案和最劣方案,然后分别计算各评价对象与最优方案和最劣方案间的加权距离,获得各评价对象与最优方案的相对接近程度,以此作为评价优劣的依据。

3 结果与讨论

3.1 非劣解集分析

本文以水文年为计算周期(10 月初至次年 9 月底),月为计算时段,初始水位设置为正常蓄水位,采用 NSGA-III 算法求解 95%、75%、50% 来水频率下的调度模型,其中,来水频率采用 1980—2020 年的洪泽湖、骆马湖湖泊来水资料,算法种群数目设置为 400,迭代次数设置为 10 000,得到的非劣解集如图 3 所示。由图 3

表 1 指标判断矩阵
Table 1 Index judgment matrix

指标	总抽水量	综合缺水率	缺水率时间标准差	缺水率空间标准差
总抽水量	1	1/3	5	5
综合缺水率	3	1	9	9
缺水率时间标准差	1/5	1/9	1	1
缺水率空间标准差	1/5	1/9	1	1

可知,综合缺水率与泵站总抽水量、缺水率时间标准差、空间标准差之间均具有密切联系,综合缺水率越小,总抽水量往往越大;在相同综合缺水率情况下,来水条件越好,非劣解越多;综合缺水率在取值范围内波动时,越接近两端取值,非劣解数量越少,缺水率时间、空间标准差越小,越向中间取值时,非劣解数量越多,缺水率时空标准差也越大;缺水率时间标准差与空间标准差呈现竞争性,时间标准差越小,空间标准差越大。在综合缺水率低于 50% 的情况下,总抽水量与综合缺水率、缺水率时空标准差呈竞争关系,综合缺水率与缺水率时空标准差呈协同关系,说明随着总抽水量上升,综合缺水率降低,不同受水区、不同时段缺水率逼近 0,取值范围缩小。

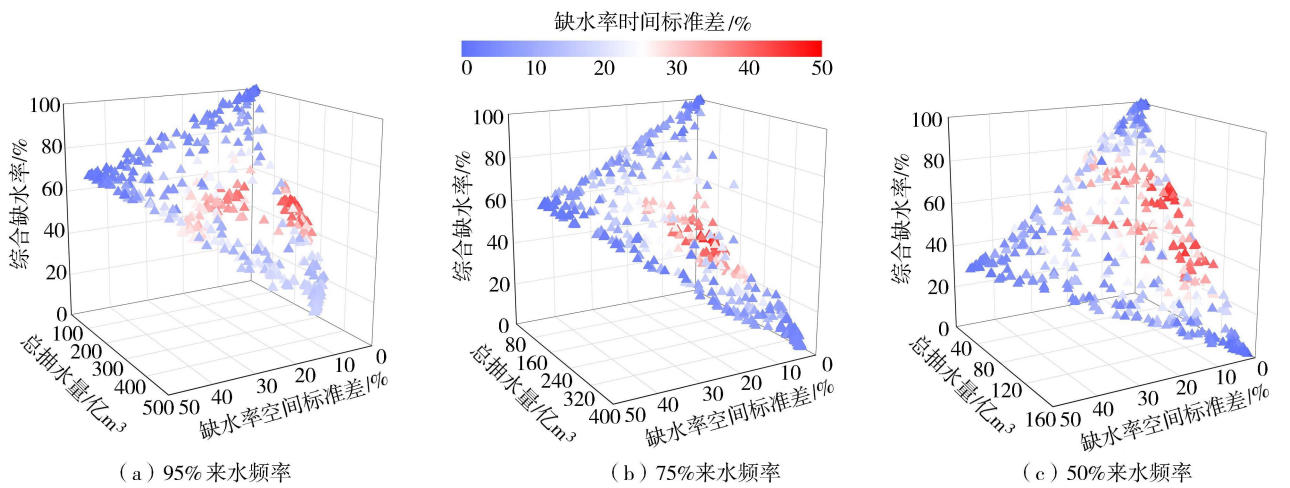


图 3 3 种来水频率下的多目标非劣解示意图

Fig. 3 Diagram of multi-objective non-inferior solution under three inflow frequencies

3.2 优化调度与常规调度比较分析

通过层次分析法得到的总抽水量、综合缺水率、缺水率时间标准差、缺水率空间标准差 4 个指标的主观权重分别为 0.265、0.616、0.060 和 0.060,并以此对 TOPSIS 法理想解距离加权,得出非劣解集中不同来水频率下经组合赋权比较后的方案优选结果,优选结果与目标为综合缺水率最小的常规调度结果的 4 个指标如表 2 所示。

表 2 不同调度方案下的指标

Table 2 Indicators under different scheduling schemes

来水 频率/%	总抽水量/亿 m ³		综合缺水率/%		缺水率时间标准差/%		缺水率空间标准差/%	
	常规调度	优化调度	常规调度	优化调度	常规调度	优化调度	常规调度	优化调度
95	390.43	474.84	33.6	24.4	20.5	14.8	24.5	10.5
75	324.04	373.87	11.8	3.6	16.8	4.4	9.7	2.4
50	253.86	152.80	10.5	0	15.5	0	9.1	0

在 95% 与 75% 来水频率下,受水区遭遇干旱缺水,由表 2 可知,相比常规调度方案,优化调度方案总抽水量分别增加了 84.41 亿 m³、49.83 亿 m³,增加量占常规调度方案的 21.6%、15.4%。受水区综合缺水率分别减少了 9.2% 与 8.2%,同时在缺水率的时空标准差方面显著小于常规调度方案,提升了不同受水区供水的均衡性。在 50% 来水频率下,由于湖泊来水相对充足,在不缺水的情况下优化调度通过更加合理的调度方式减少了 100.06 亿 m³ 总抽水量,占常规调度方案总抽水量的 39.4%,使受水区综合缺水率由 10.5% 降为 0。

绘制不同来水频率下优化调度与常规调度方案的湖泊水位调度线,如图 4 所示。由图 4 可知,在不同来水频率下,常规调度方案中洪泽湖与骆马湖全年都维持在高水位运行,未能合理运用两湖泊的调节能力。相较于常规调度方案,优化调度在 6 月省内大用水时期前,通过合理运用湖泊的调蓄能力,使得湖泊水位趋近于正常蓄水位,以保证大用水期间具有充足的水量补给;而在 6—8 月的大用水时期,优化调度充分发挥洪泽湖与骆马湖的调蓄能力,释放蓄存的库容,使湖泊水位显著低于常规调度;在大用水时期后,在 75% 与 50% 来水频率下进行持续的补湖使水位逐渐恢复,95% 来水频率由于来水的严重不足,在补湖的情况下湖泊水位依然较低,仍存在较大的水量缺口。

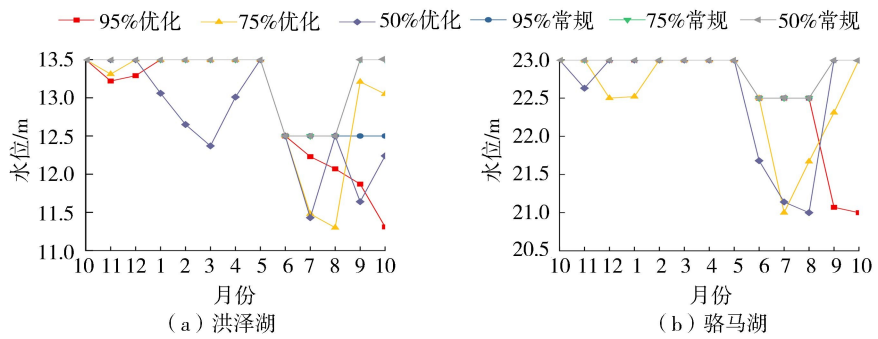


图4 不同来水频率和调度方案下的湖泊水位

Fig.4 Lake water levels under different inflow frequencies and scheduling schemes

不同来水频率不同调度方案下的水量利用情况如图5所示。在95%与75%来水频率下,优化调度总抽水量、抽江水量、出入洪泽湖量、出入骆马湖量均高于常规调度,说明相比常规调度,优化调度更能够充分发挥东线工程的抽调水能力,在合理利用湖泊调蓄能力的基础上,降低了受水区的综合缺水率,缓解苏北地区旱情。在50%来水频率下,优化调度通过合理运用湖泊调蓄能力,充分利用湖泊来水,从而降低了总抽水量、抽江水量、入洪泽湖量。

以95%来水频率为例,优化调度与常规调度方案不同受水区年内缺水率情况如图6所示。由图6可知,优化调度的供水时空均衡性远优于常规调度,在95%来水频率下位于北方的不牢河受水区、连云港受水区等受水区在6—8月大用水期间出现了明显的缺水状况,而里运河受水区至废黄河受水区在10月至次年5月供水充分,两者形成鲜明对比;而优化调度图空间尺度与时间尺度上缺水率变化均较为平缓,缺水率分布较为均匀。在75%和50%来水频率下,优化调度在6—8月显著减少了泗洪-睢宁受水区、睢宁-邳州受水区、连云港受水区等北方受水区缺水的局面。

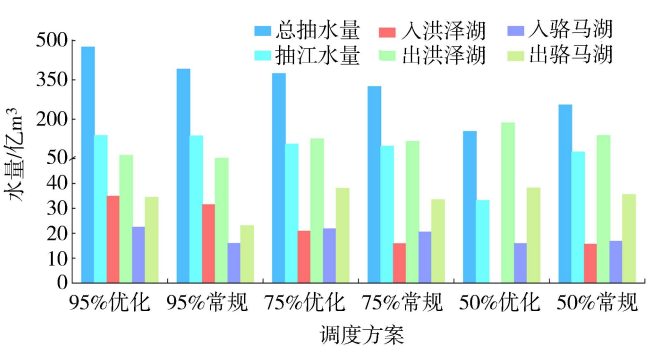


图5 不同来水频率和调度方案下的水量利用情况

Fig.5 Water utilization under different inflow frequencies and scheduling schemes

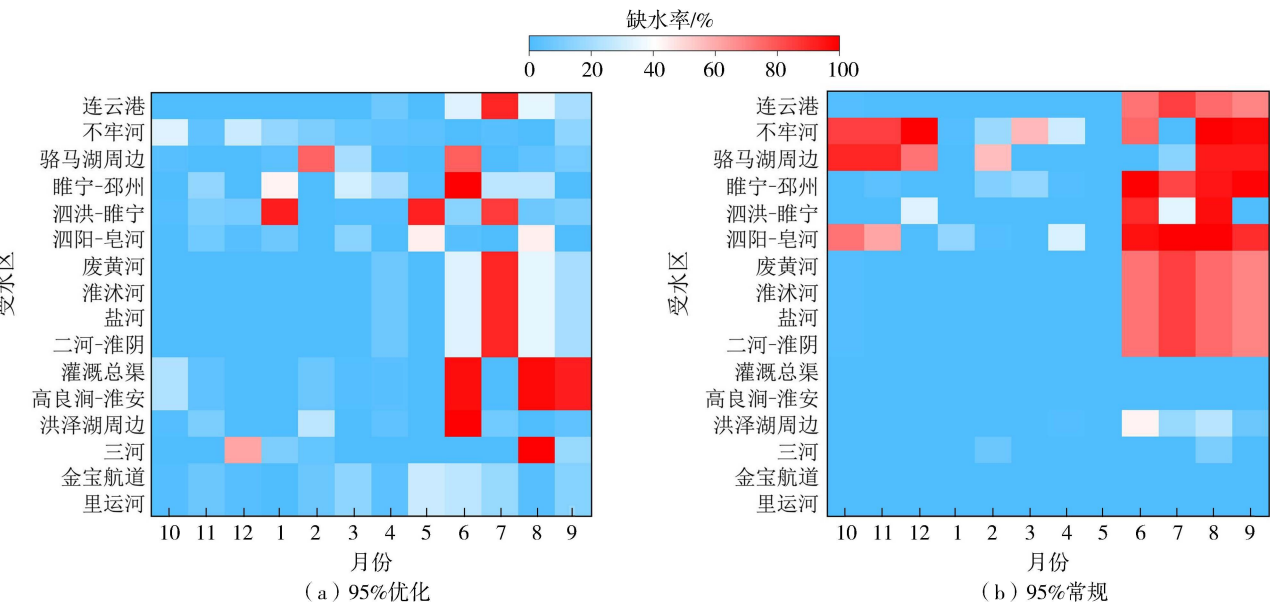


图6 95%来水频率下受水区缺水率

Fig.6 Overview of water shortage rate in water receiving area under 95% inflow frequency

具体而言,在供水空间均衡性方面,95%来水频率下,常规调度的不同受水区在不同时段缺水率差异较

大,各受水区年缺水率范围为 $[0,72.2\%]$,除部分位于供水前段的受水区外,其余受水区年缺水率普遍在40%以上;优化调度下,各受水区的年缺水率范围为 $[8.3\%,47.1\%]$,取值范围得到了显著改善,各受水区年缺水率分布更集中,差距显著减少。75%来水频率下,常规调度各受水区年缺水率范围为 $[0,31.2\%]$;优化调度由于综合缺水率降低与考虑了供水均衡等多种因素,供水的空间均衡性得到了明显的改善,年缺水率范围为 $[0.1\%,6.8\%]$,取值范围明显减少;50%来水频率下,常规调度依然存在10.5%的综合缺水率,优化调度则使得各受水区供水充分,将综合缺水率降为0,消除了受水区供水不均衡的问题。在供水时间均衡性方面,95%来水频率下,相比常规调度,优化调度小幅度提升了1—5月的缺水率,降低了其余月份约10%的缺水率;75%来水频率下,优化调度大幅降低了6月的缺水率,由60.9%降至16.5%;50%来水频率下,优化调度方案缺水率由10.5%降为0。3种来水频率缺水率时空分布情况说明随着来水的减少,受水区供水的分配与协调问题会更加突出。

4 结 论

a. 相较于常规调度,优化调度方案在95%、75%、50%来水频率下使受水区综合缺水率分别降低9.2%、8.2%、10.5%。在95%与75%来水频率下,优化调度方案通过对湖泊、泵站等工程单元的合理规划,充分发挥了工程能力,分别增加泵站84.41亿 m^3 、49.83亿 m^3 总抽水量,分别占常规调度方案的21.6%、15.4%,从而显著降低受水区的综合缺水率,缓解了缺水压力;在50%来水频率下,优化调度方案合理利用湖泊来水,充分发挥湖泊调蓄能力,使受水区综合缺水率由10.5%降为0,减少了100.06亿 m^3 总抽水量,占常规调度方案的39.4%,节约了抽水成本。

b. 相较于常规调度,优化调度方案受水区供水时空均衡性明显提高,在95%、75%和50%来水频率下各时段缺水率标准差、各受水区缺水率标准差均显著降低,且使不同受水区不同时段缺水率分布范围更为均匀集中,有效避免了极端情况的出现,保障了不同地区人民的基本用水。

参考文献:

[1] 孔波,付少杰,黄强.大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J].水资源保护,2020,36(6):67-72. (KONG Bo,FU Shaojie,HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):67-72. (in Chinese))

[2] GUO Y,TIAN X,FANG G,et al. Many-objective optimization with improved shuffled frog leaping algorithm for inter-basin water transfers[J]. Advances in Water Resources,2020,138:103531.

[3] MA Y,CHANG J,GUO A,et al. Optimizing inter-basin water transfers from multiple sources among interconnected river basins [J]. Journal of Hydrology,2020,590:125461.

[4] 王兴菊,孙杰豪,赵然杭,等. 基于可变模糊集理论的跨流域调水工程水资源优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):85-92. (WANG Xingju,SUN Jiehao,ZHAO Ranhang,et al. Optimal water resources dispatching of inter-basin water diversion protect based on variable fuzzy set theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(6):85-92. (in Chinese))

[5] 钟华昱,黄强,明波,等. 耦合集合预报信息的水库高效调度方法研究[J]. 水力发电学报,2021,40(5):44-55. (ZHONG Huayu,HUANG Qiang,MING Bo,et al. An efficient method for deriving reservoir operating rules by coupling ensemble forecasting information[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(5):44-55. (in Chinese))

[6] 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))

[7] SHAAN P,杨永辉,杨艳敏,等. 雪山工程—水利发电与跨流域调水综合工程[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(2):97-100. (SHAAN P,YANG Yonghui,YANG Yanmin,et al. The snowy mountain scheme-a combined hydro-electric generation and Inter-basin transfer scheme[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2007,5(2):97-100. (in Chinese))

[8] BELL W. Building stalinism;the moscow canal and the creation of soviet space[J]. Revolutionary Russia,2019,32(2):310-311.

- [9] 许继军. 新时期南水北调工程战略功能定位与发展思路研究[J]. 中国水利, 2021(11):12-14. (XU Jijun. Study on strategic function orientation and development ideas of south-to-north water diversion project in new period[J]. China Water Resources, 2021(11):12-14. (in Chinese))
- [10] MATETE M, HASSAN R. An ecological economics framework for assessing environmental flows: the case of inter-basin water transfers in Lesotho[J]. Global and Planetary Change, 2005, 47(2):193-200.
- [11] GUO X, HU T, ZHANG T, et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project[J]. Journal of Hydrology, 2012, 424:252-263.
- [12] 方淑秀, 王孟华. 跨流域引水工程多水库联合供水优化调度[J]. 水利学报, 1990, 21(12):1-8. (FANG Shuxiu, WANG Menghua. Optimal operation multi-reservoir of inter-basin diversion protect[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 21(12):1-8. (in Chinese))
- [13] 杨柳, 汪妮, 解建仓, 等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6):49-56. (YANG Liu, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. Joint water supply simulation of multiple local water sources and inter-basin water diversion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6):49-56. (in Chinese))
- [14] 李瑛. 基于引嘉济汉-引汉济渭的复杂跨流域调水工程的协同调度研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [15] 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. Study on medium and long-term optimal dispatching of Jiangsu section of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(6):65-77. (in Chinese))
- [16] 侍翰生, 程吉林, 方红远, 等. 南水北调东线工程江苏段水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):76-81. (SHI Hansheng, CHENG Jilin, FANG Hongyuan, et al. Optimal allocation of water resources for Jiangsu section of South-to-North Water Transfer East Line Project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22):76-81. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 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. Study on optimal operation of Jiangsu section of eastern route of South-to-North Water Diversion Project based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(3):110-116. (in Chinese))
- [19] 王攀, 方国华, 郭玉雪, 等. 水资源优化调度的改进量子遗传算法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(5):7-13. (WANG Pan, FANG Guohua, GUO Yuxue, et al. Research on water resources optimal scheduling based on improved quantum genetic algorithm[J]. Journal of China Three Gorges University, 2016, 38(5):7-13. (in Chinese))
- [20] 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 Zai zhou, 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))
- [21] 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))
- [22] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4):577-601.
- [23] 王昆, 宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术经济与管理研究, 2003(6):48-49. (WANG Kun, SONG Haizhou. Comparative analysis of three objective weighting methods[J]. Technoeconomics & Management Research, 2003(6):48-49. (in Chinese))
- [24] 张修宇, 秦天, 孙菡芳, 等. 基于层次分析法的郑州市水安全综合评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(6):42-45. (ZHANG Xiuyu, QIN Tian, SUN Hanfang, et al. Comprehensive evaluation of water safety in Zhengzhou City based on analytic hierarchy process[J]. Yellow River, 2020, 42(6):42-45. (in Chinese))
- [25] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3):20-25. (LI Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):20-25. (in Chinese))