

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0135

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):54-61,112. CAO M L, XU B, WANG L C, 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, 112. (in Chinese)

# 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

曹明霖<sup>1</sup>,徐斌<sup>2</sup>,王腊春<sup>1</sup>,储晨雪<sup>3</sup>,杜宝义<sup>4</sup>,李昆朋<sup>5</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院,南京 210023;2. 河海大学 水文水资源学院,南京 210098;  
3. 河海大学 研究生院,南京 210098;4. 连云港市水利规划设计院有限公司,江苏 连云港 222006;  
5. 南京市水利规划设计院股份有限公司,南京 210022)

**摘要:**含跨区域调水的多水源水库群系统调度决策中需协调保障供水效益与降低供水成本的多目标矛盾,在综合考虑本地水资源与外调水资源供水相对成本差异的基础上,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,以降低系统总缺水率为优化目标、限定外调水量为约束条件,分情景求解多水源联合供水方案并分析目标间矛盾关系。以南水北调东线受水区江苏段及洪泽湖、骆马湖为研究对象的水资源系统调度为应用实例,计算结果表明:两湖的本地水资源能满足平水及以上年型的用户用水需求;当洪泽湖遭遇偏平及以上量级来水,且相对骆马湖来水丰沛时,启用洪泽湖向骆马湖调水可降低公共用户及骆马湖周边用户缺水量;在现行协议供水量条件下,引调江水可解决洪泽湖、骆马湖枯水年型组合下的缺水问题;多年平均条件下,引调0.6倍协议引江水量是均衡考虑降低系统缺水及引江水成本的折中方案。模型可为跨区域调水系统中多种水资源工程水量联合调度决策提供决策参考。

**关键词:**跨流域调水工程;优化模型;多水源调配;多情景建模

中图分类号:TV68 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research and application of multi-scenario optimization operation model for water supply of multi-reservoir in an inter-basin water transfer system

CAO Minglin<sup>1</sup>, XU Bin<sup>2</sup>, WANG Lachun<sup>1</sup>, CHU Chenxue<sup>3</sup>, DU Baoyi<sup>4</sup>, LI Kunpeng<sup>5</sup>

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Collage of Hydrology and water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Graduate School of Hohai University, Nanjing 210098, China;  
4. Liangyungang Water Resources Planning and Designing Institute Co., Ltd, Liangyungang 222006, China;  
5. Nanjing Water Resources Planning and Designing Institute Co., Ltd, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** Policymakers should balance the cost and profit contradiction of water supply when made decisions regarding simulation and optimization of multi-reservoir operation in an inter-basin water transfer system. Considering obvious differences between the cost of local and diverted water, we established an optimization and multi-scenario model for water resources management based

收稿日期:2019-04-19 修回日期:2019-06-21 网络出版时间:2019-09-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190830.1602.002.html>

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2017YFC0405604);国家自然科学基金(51609062);中央高校基本科研业务费专项资金(2018B10514)

作者简介:曹明霖(1991—),男,江苏常州人,博士,主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail:caominglinhhu@qq.com

通信作者:徐斌(1986—),男,湖南长沙人,副教授,博士,主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail:xubin\_hhu@hhu.edu.cn

on cost of water-supply sources. In this paper, we analyzed the conditions and harmony of multi-water resources through the above model with minimum water supply shortage as an objective function, restricted diverted water as a constraint condition. In this study, Hongze Lake, Luoma Lake and the East Route of South-to-North Water Diversion Project was selected as research object. The results indicated that; Local water from Hongze Lake and Luoma Lake can meet the water demand in normal and high flow years; We could reduce the water shortages of Hongze Lake and community by diverting water from Hongze Lake to Luoma Lake, while the inflow of Hongze Lake was normal or high and inflow of the Luoma Lake was high; The water shortage problem in low flow year could be solved through an effective agreed amount of annual diverted water from Yangtze River; Under the multi-year average condition, 0.6 times of the agreed diversion volume was a compromise scheme which can balance the consideration of reducing the water shortage and diversion cost of the system. Through the above research, we can get some references for optimization operation in an inter-basin water transfer system.

**Key words:** inter-basin water transfer project; optimal operation model; joint operation model of multiple water sources; multi-scenario model

水资源短缺是制约我国社会经济可持续发展的重要问题<sup>[1-2]</sup>。在本地水资源紧缺的区域,通过兴建跨流域、跨区域调水工程引调水资源是解决水资源短缺问题的重要举措<sup>[3-4]</sup>。对于含跨区域调水的多水源水库群系统而言,通过联合优化调度技术<sup>[5-6]</sup>提升水资源开发利用效率、降低引调水经济成本具有重要科研意义与实践价值<sup>[7-9]</sup>,其关键在于如何针对用水需求协调本地水、外调水的时程、空间调配方式,解决“何时供水,供多少水”以及“何时调水,调多少水”的两类问题。

随着南水北调等调水工程的建成和投入使用,针对跨区域调水的多水源联合优化调度研究逐渐成为新的研究热点,诸多专家学者建立了大量的数学优化模型以解决上述问题。对于跨区域调水多水源系统,通常以用户最大供水保证率或者最小缺水率为目标<sup>[10-13]</sup>,通过制定具有供水和调水双重任务的水库调度规则来实现。目前,单纯考虑水量分配为目标的多水源调度研究已趋于成熟。随着调水工程的规模扩大,调水过程中涉及的成本问题已经无法忽视,基于引水边际效益以及供水保证率的多目标分析方法逐渐被应用在含跨区域调水的多水源联合优化问题之中。Harou 等<sup>[14]</sup>在水资源系统分析的基础上考虑水资源的经济价值计算,系统地评估了水资源系统和与之相关的经济活动之间的联系,以此实现水资源的高效分配,达到最佳的社会经济效益;张驰等<sup>[15]</sup>在充分考虑受水水库的供水效益与引水成本的基础上,建立跨流域调水系统调度的理论分析框架,提出了兼顾供水成本和效益的最优调水方案;闫堃等<sup>[16]</sup>针对多种供水方式分别核算成本,并采用权重系数法以区分各引水方式对系统整体成本的响应程度。基于国民经济效益最优的建模研究中常涉及调水成本的核算,这不仅需要考虑水利工

程建设成本、运行成本等因素,还需综合考虑引水对引出区造成的生态环境影响及剩余涉水服务目标损失的补偿成本,往往难以进行准确率定<sup>[17-18]</sup>。

本研究以南水北调东线调水工程江苏段的洪泽湖-骆马湖-南水北调工程群为研究对象,结合现有的模拟优化技术,建立跨区域调水多水源水库群供水联合调度多情景分层优化模型,基于跨区域调水成本高于当地水源工程运行成本等基本原则,综合考虑跨区域调水经济成本因素,将供水按成本高低分为跨区域调水、区域内调水、本地水,选择不同供水方式的组合进行多情景供水效益分析,以求能够探索出有效的多水源高效利用的时程、空间协调策略。

## 1 研究区水资源系统概况

本文研究范围包括南水北调东线总引水口以北,江苏省境内大运河沿线受水区域,见图1。研究区面积约为43 143 km<sup>2</sup>,其中83%为农业灌溉区域。研究区内供水工程主要包括南水北调东线调水工程、洪泽湖、骆马湖,以区域内平原河网作为输水通道,共同组成连通长江、淮河以及沂沭泗水系的“洪泽湖-骆马湖-南水北调工程群”水资源调度系统<sup>[19-20]</sup>。

洪泽湖、骆马湖作为研究区域内重要的调蓄水库,承担着主要的供水任务,两湖的水资源联合优化配置对于整个供水区域水资源供给保障至关重要。骆马湖天然来水主要源自沂沭泗水系,洪泽湖天然来水源于淮河水系,两湖区间控制面积的区间入流主要由本地降雨补充;此外,由于两湖地处江淮地区南北气候过渡带,两湖产流区水文气象条件不完全同步,在来水情势异步条件下,洪泽湖、骆马湖之间可通过徐洪河、大运河两条线路双向相机互补水:洪泽湖分别沿泗洪站、睢宁站、邳州站(徐洪河线),泗

阳站、刘老涧站、皂河站(运河线)逐级抽水至骆马湖,骆马湖向洪泽湖输水则通过启闭闸门自流补给。当两湖均遭遇枯水年份导致区域需水难以通过本地水资源供给时,此时需启用南水北调东线工程从江都站抽引长江水以保障供给。

研究区经过徐州、淮安、扬州、宿迁 4 个省辖市,包括淮安、宿迁、徐州、连云港市的所有辖区、扬州市的江都、高邮、宝应县(市)和盐城市阜宁县。沿线用水户较多,本文将受水区划分成骆马湖周边、

公共、洪泽湖周边 3 个片区,将各受水片区各类用户需水进行汇总。考虑到实际运行中的输水物理通道及输水成本情况,确定供水水源与各片区供需关系如下:

- (1) 骆马湖周边用水户由骆马湖供水;
- (2) 公共用户由洪泽湖、骆马湖同时供水;
- (3) 洪泽湖周边用水户由洪泽湖供水。

根据研究区域内水源之间的源汇关系以及水源和用户之间的供需关系,绘制系统概化,见图 1。

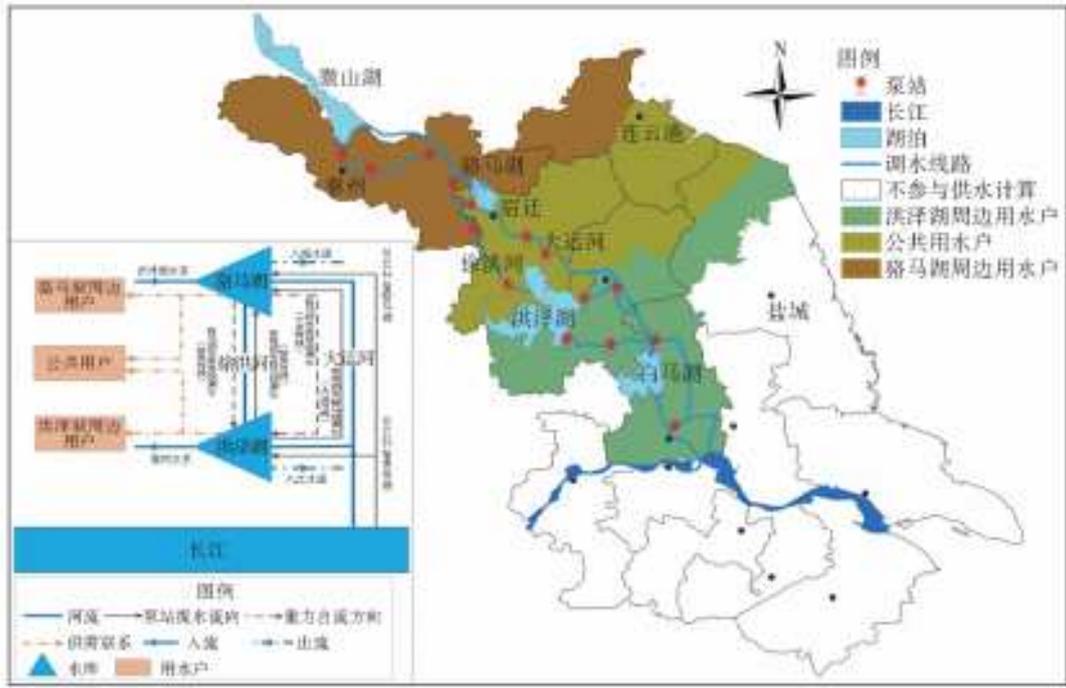


图 1 南水北调东线江苏段水资源系统概化

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

## 2 优化模型

研究系统的水库群供水联合优化调度存在以下 3 个难点问题。

(1) 跨流域、跨区域调水的高建设、运行成本导致调水经济成本明显高于当地水资源利用成本,必须在水资源调度中考虑经济成本因素。

(2) 两湖天然来水时空分布条件存在差异,跨流域调水对于不同的来水丰枯遭遇情况应用效果不一。

(3) 南水北调工程协议引水量受山东、天津等地供水的影响、受工程配套设施建设进度影响而具有一定变化性。

针对上述问题,建立多水源水库群供水联合调度多情景分层优化模型,通过设置外调水源工程启用次序的情景考虑调水成本的影响,构建两湖不同天然来水组合情景以考虑来水组合遭遇的影响,分析南水北调不同协议引水量情景对水资源供需平衡

的影响。

### 2.1 目标函数

本文研究水资源系统供水优化问题,在综合考虑缺水损失与供水经济成本的条件下,分别构建如下两个目标<sup>[21-23]</sup>。

目标 1 调度期内用户缺水深度平方和最小

$$\min SI = \frac{1}{M \times T} \times \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T \left( \frac{D_i^i - \sum_{j=1}^N R_j^{i,i}}{D_i^i} \right)^2 \quad (1)$$

目标 2 调水成本最低

$$\min Cost = \sum_{i=1}^T (k_1 \times W_i^1 + k_2 \times W_i^2 + k_3 \times W_i^3) \quad (2)$$

式中: $M$  为用户数( $i=1, 2, \dots, M, i=1$  为洪泽湖周边用户、 $i=2$  为骆马湖周边用户、 $i=3$  为公用用户); $N$  为水源数( $j=1, 2, \dots, N, j=1$  为洪泽湖、 $j=2$  为骆马湖、 $j=3$  为长江水); $T$  为调度时段数; $R_j^{i,i}$  为水源向用水户的供给水量; $D_i^i$  为用水户在时

段的需水量;  $W_t^1$ 、 $W_t^2$ 、 $W_t^3$  分别为河网自流量、本地水源利用泵站调水量、引江抽水远距离输水量,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  分别为不同水源供水相应的成本, 以上涉及水量的变量单位均为万  $m^3$ 。

为了更好地反映系统的缺水程度, 本文以综合缺水率指标反映系统中所有用户的平均缺水深度, 即将开根号使得其与传统意义上的缺水率量级上一致, 记作“ $SI^{1/2}$ ”。

## 2.2 约束条件

本研究所建立的模型包含如下约束条件: 水量平衡约束、库容约束、调水能力约束以及非负约束, 具体表示如下。

水量平衡约束

洪泽湖

$$S_{t+1}^1 = S_t^1 + I_t^1 + Tra_t^1 - Tra_t^2 + Div_t^1 - (R_t^{1,1} + R_t^{1,3}) - SP_t^1 \quad (3)$$

骆马湖

$$S_{t+1}^2 = S_t^2 + I_t^2 + Tra_t^2 - Tra_t^1 + Div_t^2 - (R_t^{2,2} + R_t^{2,3}) - SP_t^2 \quad (4)$$

库容约束

$$S_t^{j,\min} \leq S_t^j \leq S_t^{j,\max}, j=1,2 \quad (5)$$

调水能力约束

$$0 \leq Div_t^j \leq Div_t^{j,\max}, j=1,2 \quad (6)$$

$$0 \leq Tra_t^j \leq Tra_t^{j,\max}, j=1,2 \quad (7)$$

单向调水约束

$$Tra_t^1 \times Tra_t^2 = 0 \quad (8)$$

所有变量非负约束

式中:  $S_t^j$  和  $S_{t+1}^j$  分别为水库调度时段初、时段末蓄水量;  $I_t^j$  为水库控制区间的天然入库流量;  $Tra_t^1$  为骆马湖向洪泽湖的自流补水量;  $Tra_t^2$  为洪泽湖向骆马湖的调水量;  $Div_t^j$  为引江补水库  $j$  的补水量;  $SP_t^j$  为水库时段弃水量;  $Tra_t^{j,\max}$  和  $Div_t^{j,\max}$  分别为水库调水能力约束、引江补库能力约束, 以上涉及水量的变量单位均为万  $m^3$ ; 其中, 公式(8)限制两湖互济水量在同一时段只能沿一单侧方向输水。

## 3 多情景设置及模型转化

上述建立的多目标水库群供水联合优化调度模型中, 调水成本的确定对调度策略的选择至关重要。在舍外调水的供水工程实时调度运行中, 随着引水规模的逐渐增加, 引水对于引水区的生态环境影响以及引调水能耗增长往往呈非线性增长关系<sup>[24]</sup>, 成本构成复杂往往难以准确率定。因此, 本文依据不同水源供给的供水成本差异依次构造调水工程依次

启用的情景, 将引、调水量总量的目标构建为约束条件, 其中洪泽湖与骆马湖互调水量以两湖输水通道的工程能力为约束进行控制, 引江水量通过设定的协议调水量为约束进行控制, 继而将该模型转化为单目标优化模型, 并分别对不同情景下的优化模型进行求解, 以此规避调水成本的确定问题。

系统中主要涉及 3 种水量供给: (1) 两湖集水面积内降雨径流形成的本地水资源量; (2) 洪泽湖向骆马湖调水量; (3) 南水北调水量。其中, 本地水资源供给主要依托本地水资源供给工程调配由天然产汇流关系形成的重力自流水, 能耗较小, 因此供水成本最低; 洪泽湖向骆马湖调水量主要依靠两湖间泵站逐级引水, 需要消耗一定能源, 因此供水成本高于本地水利利用成本; 引江补给两湖供水线路长, 能耗大, 成本最高。考虑到实际运行调度中供水成本对调度决策的影响, 在保障用户相同的水量供给条件下, 不同水源的供给应依供水成本的高低而具有不同优先级别。本文分别设定不同水源利用优先次序情景模拟逐步增加调水成本对水量供给及调度策略的影响。

情景 1. 调水成本最低情景, 仅考虑两湖本地水资源量利用, 即公式 2 中变量  $W_t^1 \geq 0$ 、 $W_t^2 = 0$ 、 $W_t^3 = 0$ , 对应约束结果为

$$Tra_t^1 \geq 0, Tra_t^2 = 0, \sum_{j=1}^N Div_t^j = 0 \quad (9)$$

情景 2. 调水成本适中情景, 考虑洪泽湖向骆马湖调水补给, 变量  $W_t^1 \geq 0$ 、 $W_t^2 \geq 0$ 、 $W_t^3 = 0$ 。

$$Tra_t^1 \geq 0, Tra_t^2 \geq 0, \sum_{j=1}^N Div_t^j = 0 \quad (10)$$

情景 3. 调水成本最高情景, 除两湖相机补水外进一步考虑引江供水, 变量  $W_t^1 \geq 0$ 、 $W_t^2 \geq 0$ 、 $W_t^3 \geq 0$ 。

$$Tra_t^1 \geq 0, Tra_t^2 = 0, 0 \leq \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N Div_t^j \leq D_c \quad (11)$$

式中:  $D_c$  为南水北调工程年度调度计划中约定向研究区域协议调水量(万  $m^3$ )。

## 4 算例分析

### 4.1 多情景下水量供需平衡结果

基于上述水库群联合供水优化调度多情景模型, 以研究区 1959—2013 年两湖同期入流资料以及对应年型的需水预测结果作为模型输入, 利用 Lingo 软件<sup>[25]</sup> 计算长系列资料不同情景下的水资源优化分配方案, 得出不同情景下区域用户综合缺水率结果(图 2)。

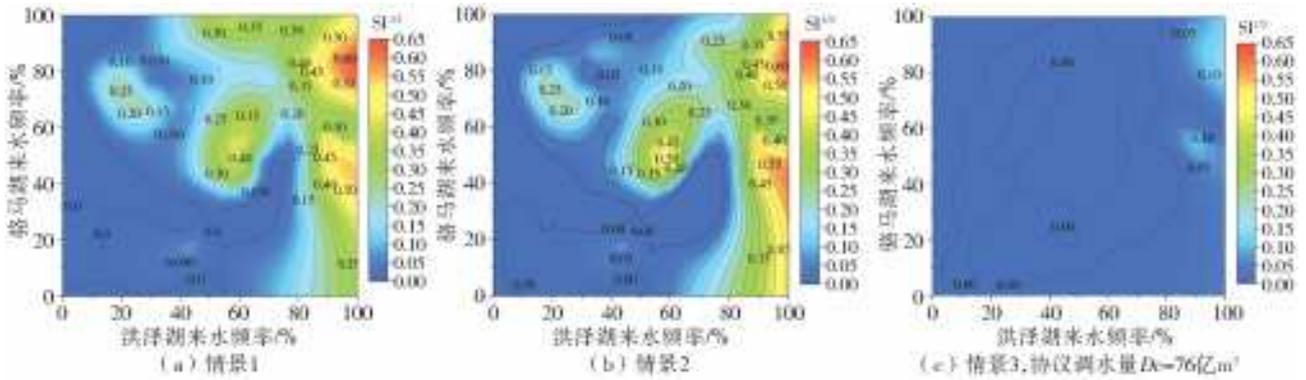


图 2 不同情景下水资源系统长系列综合缺水率等值线

Fig. 2 The contour map of the rate of water scarcity with long serious flow under different scenarios

根据多情景下水量供需平衡结果可知,情景 1 条件下,当洪泽湖来水频率大于 50%且骆马湖来水频率大于 40%时,系统缺水,综合缺水率随洪泽湖、骆马湖来水的减少(来水频率增加表明来水量减少)逐步由 0.05 增至 0.60。情景 2 条件下,综合缺水率变化规律与情景 1 相似,启用洪泽湖向骆马湖调水补给在一定程度上可降低系统缺水率,尤其是当洪泽湖来水相对骆马湖来水丰沛时(洪泽湖来水频率在 40%~60%且骆马湖频率大于 80%时),洪泽湖对骆马湖的补偿作用有助于降低公共用户及骆马湖周边用户缺水量。情景 3 条件下,限定引江水量不超过协议调水量 76 亿  $m^3$ 。引江补给极大程度改善了系统缺水情况,缺水主要集中在洪泽湖来水频率大于 90%且骆马湖来水频率大于 40%的来水年型,综合缺水率在 0.05~0.10 浮动。综合以上各情景计算结果,在不引调江水补给的条件下,仅靠两湖间的互济作用对于改善系统缺水状况作用有限,相应的缺水情况较为严重,系统缺水情况受洪泽湖来水变化影响更为敏感。水资源系统的缺水不仅供水水源的来水量大小有关,也与来水量的时程分配有关,选择 1959 年(洪泽湖来水频率 66%,骆马湖来水频率 55%)和 1967 年(洪泽湖来水频率 70%,骆马湖来水频率 71%)进行对比分析后发现,情景 1 计算条件下 1959 年系统系统综合缺水率为 0.36,而 1967 年系统的综合缺水率为 0.26,对应缺水率结果主要是全年来水频率与缺水时段来水频率不相匹配:1959 年缺水主要集中在 7 至 11 月,以该时段对应的两湖来水重新进行排频,相应的 1959 年对应的洪泽湖、骆马湖来水频率分别为 95%、86%,而 1967 年对应时段来水频率分别为 71%、68%,此时 1959 年缺水时段的总来水相对于 1967 年较枯,即缺水时段和全年的两湖来水丰枯情况正好相反。因此,对于洪泽湖与骆马湖来水频率接近 50%的特殊年份,虽然来水在整个调度期内相对充足,但是由于

时程上分布极不均匀导致部分时段缺水较为严重,继而影响整个调度期的供水效益。

从长系列计算结果中选择最不利年型情景,即两湖来水均为特枯来水年型的 1999 年(洪泽湖来水频率 95%,骆马湖来水频率 95%),进行结果分析。混合调水工程与蓄水工程的水资源调蓄系统在联合优化调度时可对水资源在时程、空间双重尺度上进行再调节:一方面通过蓄水工程调节,均化缺水时程分配避免深度缺水;另一方面通过调水工程的水资源空间调配,均化缺水的空间布局保证供水各对象之间的公平性同时避免部分片区的深度缺水。图 3 为 1999 年型情景下不同用户逐月缺水率柱状图,经分析可得:情景 3 由于可利用水量的增加,与其余情景相比缺水率较小,大部分月份缺水率在 20%左右(同月份其余情景缺水率在 60%左右),江水补给作用明显;对于骆马湖来水较少的时段,情景 1 由于不考虑洪泽湖向骆马湖的相机补水,相应的该情景下骆马湖用水户由于供水不足导致缺水率较大,1 月至 6 月情景 1 骆马湖用水户缺水率与情景 2 相比略大,缺水率多了 10%左右;对于不同用水户,当出现缺水情况时,逐月缺水率变化在某一时段内能保持均匀,避免了较大的缺水深度,符合限制供水调度的要求。图 4 为 1999 年逐月水库总天然来水、引江水与总需水过程图,其中情景 1 和情景 2 不调引江水补给,可见当不考虑引江补给时,1 月至 9 月仅依靠天然来水远远不能满足供水需求,此时缺水情况较为严重;当考虑引江补给时,在一定程度上缓解了缺水问题,但仍然存在需水缺口,上述结论与图 3 缺水率变化情况相符合。

研究区涉及水源较多,供水结构复杂,前文从不同情景分析了不同用户不同来水条件下的水资源供需平衡情况,为了进一步对供水合理性进行分析,选择 1999 年作为典型年绘制逐月水库蓄水量、调水量过程堆积图(图 5)。对于情景 1 和情景 2,由于洪泽

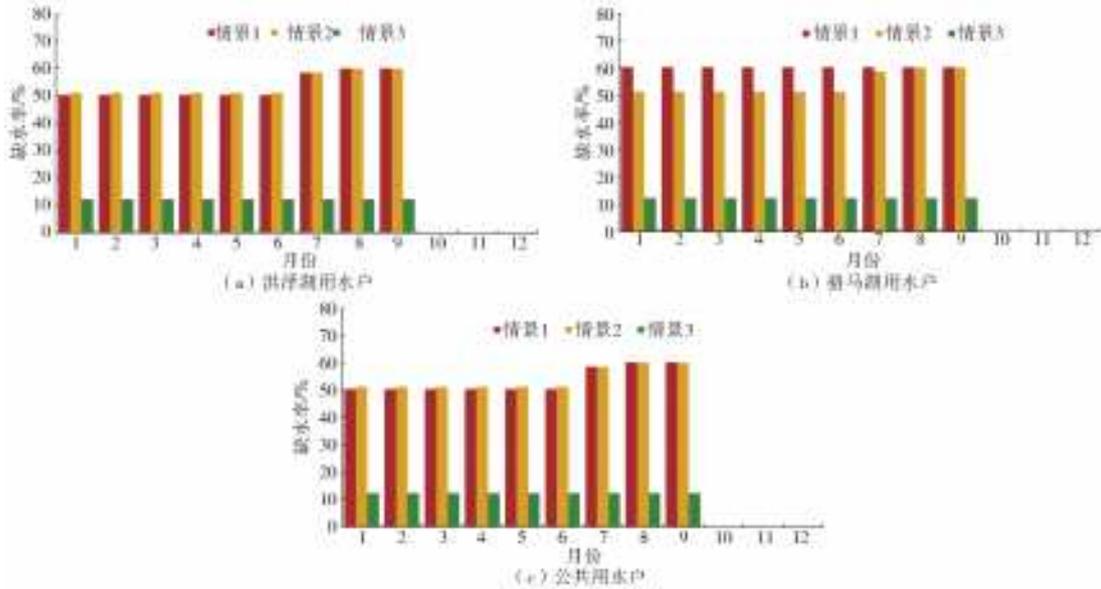


图3 1999年(特枯-特枯组合年型)不同用水户不同情景下逐月缺水率柱状图  
Fig. 3 Bar graph of monthly water scarcity rate under different users and scenarios

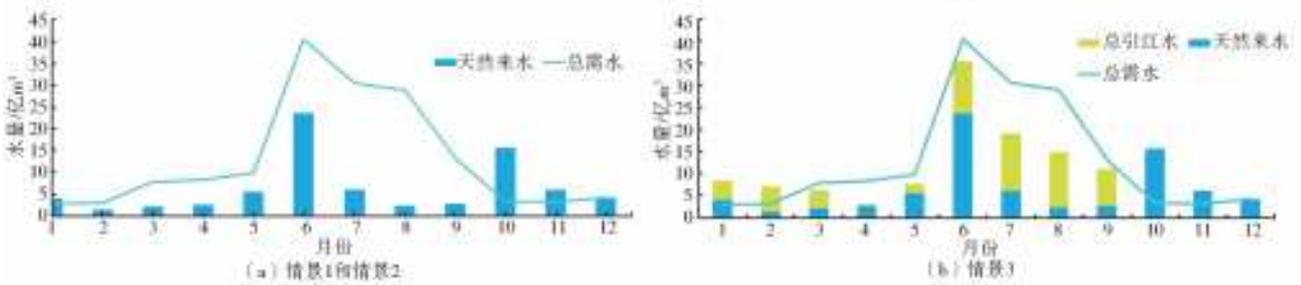


图4 1999年(特枯-特枯组合年型)逐月水库总天然来水、引江水与总需水对比过程

Fig. 4 Monthly comparison of total natural inflow, diversion and total water demand of reservoirs in 1999 (extreme dry and combined extreme dry)

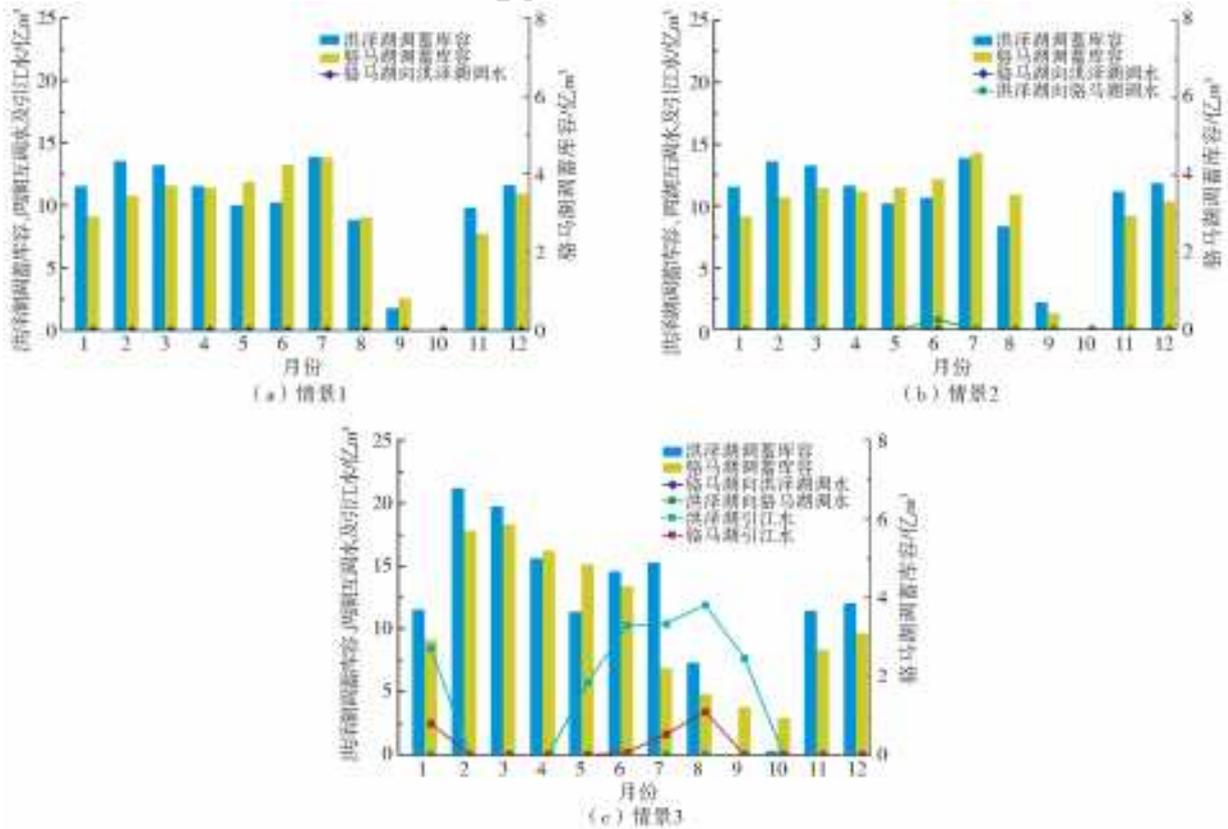


图5 1999年(特枯-特枯组合年型)逐月水库蓄水量、调水量过程图

Fig. 5 Monthly reservoir water storage and diversion process chart for 1999 (combined year of extreme dry and extreme dry)

湖和骆马湖调蓄库容变化规律相似(同丰同枯现象较为明显),因此在没有引江水补给的条件下,洪泽湖和骆马湖基本不存在两湖相机补水;对于情景 2,6 月洪泽湖向骆马湖进行了少量的调水,增加了下一时段骆马湖的调蓄库容,用于缓解骆马湖的供水压力,在一定程度上保证了供水各对象之间的公平性;情景 3 增加了引江水作为供水水源,极大地增加了系统的可供水量,整个调度过程遵循了“闲时补湖,忙时供水”的调度原则,其中 1 月份的引江作用在于补湖,目的是增加了两湖的调蓄能力,为下一时段的供水提供的一定程度的保障,6—9 月引江水量较大,而同时段两湖调蓄库容在持续减小,因此这段时间内的引江目的是保障供水。本文通过合理的两湖互调和引江补给作用,最大程度地实现了区域水资源联合供水要求。

#### 4.2 协议引水量变化情景下的水量供需平衡结果

考虑到调水的经济成本以及协议调水量受调水区水资源丰沛程度、受水区用水需求等多方面因素影响,在工程设计协议供水量基础上设置不同协议调水量情景,分析各情景下系统供需平衡状况及最优调水量结果。

不同协议引水量会对水资源系统的供需平衡产生不同的影响,变化协议供水量进行相应的优化调度,即设置协议调水量的不同倍数(用  $K$  值表示),计算不同引江水量下水资源系统逐年的供需平衡状态,计算结果通过箱线图表示,见图 6。随着  $K$  值的增加,即引江水量增多,整个水资源系统缺水情况逐渐改善,具体体现在如下几方面:长系列计算结果( $SI^{1/2}$ )的均值随着  $K$  值增加逐渐减少;箱体范围逐渐减小且趋于 0,系统逐渐向不缺水状态过渡,相应的系统供水保证率逐渐增大。

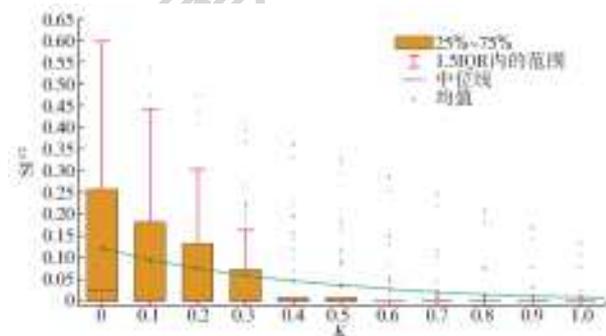


图 6 不同  $K$  值下水资源系统长系列综合缺水率箱线图  
Fig. 6 Boxplots for rate of water scarcity under different  $K$  values

对于长系列计算结果( $SI^{1/2}$ )的均值过程线(绿线),当  $K$  值增加时,均值逐渐减少,相应的变化幅度减小。当  $K$  值从 0 变化至 0.5 时,箱体范围逐渐

缩小,当  $K$  值增加至 0.6 时系统供水保证率达 78.2%,平均综合缺水率达 2.8%,此计算条件下的长系列绝大部分年型均不缺水,引、调江水对系统水资源短缺状况改善显著。当  $K$  值为 1,即引江水量达到协议供水量时,此时系统供水保证率达 89.1%,平均综合缺水率仅为 0.9%。绘制  $K$  值与长系列供水保证率的散点,见图 7,当  $K$  值从 0 变化至 0.5 时,供水保证率的边际增幅速率由 9.09%/0.1 降低至 3.64%/0.1,当  $K$  值增加至 0.6 时,供水保证率变化幅度渐缓,因此将引调 0.6 倍协议引江水量作为均衡考虑降低系统缺水及引江水成本的折中方案。

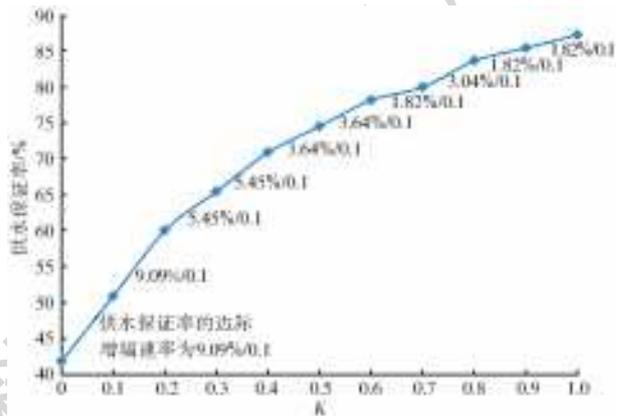


图 7 不同  $K$  值下水资源系统供水保障率散点  
Fig. 7 Scatter diagram of the guarantee rate of water supply under different  $K$  values

## 5 结论

含跨区域调水的多水源系统联合优化调度中涉及增加供水效益与降低供水成本的矛盾目标协调问题,本文以降低系统总缺水率为优化目标,以限定外调水量为约束,综合考虑不同水源调度成本差异构建逐步启用外调水供给的多情景优化模型,以南水北调东线受水区江苏段及洪泽湖、骆马湖为研究对象建模分析,主要结论如下。

(1)在不启用外调水及洪泽湖调水的情况下,两湖的本地水资源能满足平水(结果表明当洪泽湖来水频率小于 50%且骆马湖来水频率小于 40%)及以上年型的用户用水需求。当两湖来水偏枯时,研究区内用户缺水率受到洪泽湖来水影响更为敏感。

(2)当洪泽湖遭遇偏平及以上量级来水,且相对骆马湖来水丰沛时,启用洪泽湖向骆马湖调水可降低公共用户及骆马湖周边用户缺水量,一定程度上可降低系统缺水率。

(3)在现行协议供水量条件下,引调江水可解决

洪泽湖、骆马湖枯水年型组合下的缺水问题;在特枯组合来水年型下,综合缺水率在5%~10%。

(4)多年平均条件下,引调0.6倍协议引江水量可将系统供水保证率提升至78.2%,平均综合缺水率降低至2.8%,该调水方案是均衡考虑降低系统缺水及引江水成本的折中方案。

#### 参考文献(References):

- [1] 汪党献,王浩,马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报,2000,31(11):21-27. (WANG D X, WANG H, MA J. Design principle of high head and large discharge vortex drop spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(11):21-27. (in Chinese))
- [2] 王浩,游进军. 中国水资源配置30年[J]. 水利学报,2018,47(3):265-271. (WANG H, YOU J J. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,47(3):265-271. (in Chinese))
- [3] 游进军,王忠静,甘泓,等. 国内跨流域调水配置方法研究现状与展望[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(3):1672-1683. (YOU J J, WANG Z J, GAN H, et al. Current status and prospect of study in China on water allocation of inter-basin diversion projects [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008,6(3):1672-1683. (in Chinese))
- [4] 马静,汪党献,Hoekstra A. Y. 虚拟水贸易与跨流域调水[J]. 中国水利,2004(13):37-39. (MA J, WANG D X, HOEKSTRA A. Y. Virtual water trade and water transfer across river basins [J]. China Water Resources,2004(13):37-39. (in Chinese))
- [5] XU B, ZHONG P A, ZAMBOM R C, et al. Scenario tree reduction in stochastic programming with recourse for hydropower operations [J]. Water Resources Research,2015,51(8):6359-6380.
- [6] XU B, BOYCE S Y Z, LIU Q, et al. Stochastic programming with a joint chance constraint model for reservoir refill operation considering flood risk[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2016, 143(1):4016061-4016067.
- [7] ROSENBER D E, HOWITT R E, LUND J R. Water management with water conservation, infrastructure expansions, and source variability in Jordan[J]. Water Resources Research,2008,44(11):154-171.
- [8] GAL S. Optimal management of a multireservoir water supply system[J]. Water Resources Research,1979,15(4):737-749.
- [9] MOUSAVI H, RAMAMURTHY A S. Optimal design of multi-reservoir systems for water supply [J]. Advances in Water Resources,2000,23(6):613-624.
- [10] SHERKAT V R, CAMPO R, MOSLEHI K, et al. Stochastic long-term hydrothermal optimization for a multireservoir system [J]. Power Apparatus & Systems IEEE Transactions on,1985,PAS-104(8):2040-2050.
- [11] ZENG X, HU T, GUO X, et al. Water transfer triggering mechanism for multi-reservoir operation in inter-basin water transfer-supply project [J]. Water Resources Management,2014,28(5):1293-1308.
- [12] GU W Q, SHAO D G, TAN X Z, et al. Simulation and optimization of multi-reservoir operation in inter-basin water transfer system[J]. Water Resources Management, 2017,31(11):3401-3412.
- [13] 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, 2012,424-425(4):252-263.
- [14] HAROU J J, PULIDO V M, ROSENBERG D E, et al. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects[J]. Journal of Hydrology,2009,375(3-4):627-643.
- [15] ZHANG C, LI Y, CHU J G, et al. Use of many-objective visual analytics to analyze water supply objective trade-offs with water transfer [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(8):5017006.
- [16] 闫堃,钟平安,万新宇,等. 滨海地区水资源多目标优化调度模型研究[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(1):59-66. (YAN K, ZHONG P A, WAN X Y, et al. An optimal operation model for multi-objective water resources schedule in coastal area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016,14(1):59-66. (in Chinese))
- [17] 郭潇,方国华,章哲恺. 跨流域调水生态环境影响评价指标体系研究[J]. 水利学报,2008,39(9):1125-1130. (GUO X, FANG G H, ZHANG Z K. Index system of eco-environment impact assessment for inter basin water transfer [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(9):1125-1130. (in Chinese))
- [18] 徐鑫,倪朝辉,沈子伟等. 跨流域调水工程对水源区生态环境影响及评价指标体系研究[J]. 生态经济,2018,34(7):174-178. (XU X, NI C H, SHEN Z W, et al. Research on ecological impact identification and evaluation index system in water source of inter basin water diversion project [J]. Ecological Economy, 2018,34(7):174-178. (in Chinese))
- [19] LIU C M, ZHWENG H X. South-to-north Water Transfer Schemes for China[J]. International Journal of Water Resources Development,2002,18(3):453-471.

(下转第112页)

- Y, et al. Assessment of Beibu Gulf pollution by water comprehensive pollution index and phytoplankton diversity index[J]. Guangxi Science, 2014(4): 376-380. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-9164. 2014. 04. 010.
- [29] 关伯仁. 水污染指数的综合问题[J]. 环境污染与防治, 1980(2): 13-16. (GUAN B R. The problem of water pollution index[J]. Environmental Pollution & Control, 1980(2): 13-16. (in Chinese))
- [30] 李秋元, 刘东. 组合权重模糊模型在区域地下水水质评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2014(3): 1-4. (LI Q Q Y, LIU D. Application of the fuzzy model based on the combined weight in the evaluation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(3): 1-4. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2014. 03. 001.
- [31] 王涛, 魏亚妮, 钱会. 权重对水质模糊综合评价的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 87-90. (WANG T, WEI Y N, QIAN H. Influence of different weights on fuzzy comprehensive evaluation method for water quality[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(2): 87-90. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2010. 02. 024.
- [32] 钱会, 席文娟. 基于 AHP 权重的模糊评价法在水质评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 100-103. (QIAN H, XI W J. Application of fuzzy evaluation method based on AHP to water quality evaluation[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(3): 100-103. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2012. 03. 029.

(上接第 61 页)

- [20] DU W, FAN Y, TANG X. Two-part pricing contracts under competition; the South-to-North Water Transfer Project supply chain system in China[J]. International Journal of Water Resources Development, 2016, 32(6): 895-911.
- [21] HSU N, CHENG K. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2002, 128(2): 102-112.
- [22] LI Y, ZHANG C, CHU J, et al. Reservoir operation with combined natural inflow and controlled inflow through inter-basin transfer-A case study of Biliu Reservoir in northeastern China [C]// AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2015.
- [23] AHMADIANFAR I, ADIB A, TAGHIAN M. Optimization of multi-reservoir operation with a new hedging rule: application of fuzzy set theory and NSGA-II [J]. Applied Water Science, 2017, 7(6): 3075-3086.
- [24] 张弛, 陈晓贤, 李昱, 等. 跨流域引水受水水库最优调度决策的理论分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 492-504. (ZHANG C, CHEN X X, LI Y, et al. Analytical analysis for optimal operation of the recipient reservoir in inter-basin water transfer projects [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 492-504. (in Chinese))
- [25] SHARIF M, SWAMY V S V. Development of LINGO-based optimisation model for multi-reservoir systems operation [J]. International Journal of Hydrology Science and Technology, 2014, 4(2): 126-138.