

董远恒, 徐斌, 张雨薇, 等. 跨流域调水多水源多目标水量调度模拟-优化双层耦合算法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 36-46. DONG Y H, XU B, ZHANG Y W, et al. Inter-basin water transfer multi-source multi-objective water allocation simulation-optimization twin-level coupling algorithm[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 36-46. (in Chinese)

跨流域调水多水源多目标水量调度 模拟-优化双层耦合算法

董远恒¹, 徐斌^{1,2}, 张雨薇³, 薛煜婷¹, 余莹莹⁴, 刘为锋⁵, 李江缘¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098;
3. 中国雄安集团生态建设投资有限公司, 河北 保定 071700; 4. 徐州市水务局,
江苏 徐州 221018; 5. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 跨流域调水系统的水量调度问题涉及多水源、多用户、多目标等, 关系结构复杂, 决策变量众多, 传统单一模拟方法或优化方法难以兼顾求解效率与优化性能的需求。针对此, 提出一种多水源调度模拟-优化双层耦合求解算法, 上层算法基于近似最优原则模拟本地水源调配, 下层算法引入大系统分解协调优化外调水调配, 能够在保障优化性能的同时有效降低计算复杂度。以南水北调东线工程一期及北延段为研究区域, 以受水区用户加权缺水率平方和最小与源头调水总量最小为优化目标, 构建水量调度多目标优化模型, 并采用模拟-优化双层耦合算法进行求解。结果表明: 相较于直接优化, 模拟-优化双层耦合算法优化效果近似, 但平均耗时更短; 算法将本地水与外调水的联合调配按优先次序进行模型分解, 提高了多水源调度结果的可解释性; 算法能够为求解大规模跨流域调水多水源多目标水量调度问题提供参考。

关键词: 跨流域调水; 多水源; 多目标; 模拟-优化; 大系统分解协调; 南水北调东线工程

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2025.0004

“空间均衡”是“十六字”治水思路的重要组成, 主要解决水资源空间分布与经济社会发展格局不匹配的问题^[1-4]。跨流域、跨区域调水是实现水资源空间均衡的重要措施。当前, 我国已建成南水北调东、中线工程为代表的逾百项调水工程, 形成国家水网的骨干体系, 为经济社会高质量发展提供了重要保障。调水工程与本地水资源调控工程共同构成多工程交织的多水源系统, 通过多水源实时水量调度以统筹本地水、外调水调配是提高水资源开发利用效率和综合效益的关键。

跨流域调水工程的实时调度涉及区域范围广、调水距离长、工程数量多, 尤其是开敞水域的输水工程常处于水网交织的连通系统中, 需统筹考虑多地区、多工程、多水源、多用户、多部门的协调^[5], 关

系结构复杂, 决策变量众多。实现调水的最优利用需优化调配本地水与外调水量, 减少调水量、缺水量与弃水量, 构成一类结构复杂、规模庞大、目标众多的大系统多目标非线性规划问题。对于此类问题, 一部分学者考虑到快速实时交互以及综合决策的需要, 采用模拟方法进行求解: 游进军等^[6]提出以规则控制方式实现水资源系统模拟; 侯效灵等^[7]基于 WEAP 构建雄安新区多水源联合配置模拟模型; 王宗志等^[8]在多水源受水水库运行调度研究中模拟多水源配水规则和水库调水、供水规则。然而, 模拟方法难以实现水资源利用的最优化。

考虑到水资源优化调配的要求, 部分研究^[9]采用优化方法进行求解, 早期以线性规划、非线性规划、动态规划等为主。此后, 为应对“维数灾”问题,

收稿日期: 2024-06-18 修回日期: 2024-11-07 网络出版时间: 2024-11-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20241115.1654.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000104); 国家自然科学基金项目(52279010; 52322902); 水利部重大科技项目(SKS-2022001; SKS-2022013; SKS-2022124)

作者简介: 董远恒(2000—), 男, 江苏南京人, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: dyh_hhu@hhu.edu.cn

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

逐步优化^[10]、大系统分解协调^[11-12]等降维方法得到了陆续应用。随着计算机算力的突破,启发式进化算法^[13-17]逐渐成为了求解调度模型的一种手段,王超等^[18]构建考虑湖泊调蓄的跨流域调水工程旬水量调度模型并采用遗传算法进行求解;宋志红等^[19]采用基于可行搜索的NSGA-II算法求解引江济淮工程(河南段)水量优化调度问题;Guo等^[20]提出改进多目标蛙跳算法并应用于南水北调江苏段优化调度中;Jia等^[21]提出跨流域调水多阶段水库调度和水量分配模型并基于MOEA/D算法进行优化。

传统单一模拟方法或优化方法难以兼顾求解效率与优化性能的需求,研究模拟-优化耦合算法是提升计算效率、保障水资源利用效益的可行途径。王文杰等^[22]将模拟模型与改进遗传算法相结合,分析了该方法在降低系统缺水与工作能耗方面的作用;方国华等^[23]采用模拟优化方法分析了湖泊互济运行方式对于江苏省南水北调工程综合效益的影响;王旨祥等^[24]提出了模拟模型与正反双向优化模型分层耦合的水量调度模型并应用于引江济淮工程水量调度中,能够降低湖泊弃水,提高水资源利用效率。已有研究主要聚焦于跨流域调水系统水量调度问题的多目标效益分析,而对于该复杂系统的降维方法以及系统中本地水源、外调水源的调配方式研究较少。

以南水北调东线一期工程及北延段为研究对象,构建跨流域调水多水源多目标水量调度优化模型,并采用模拟-优化双层耦合算法进行降维和求解,通过约束松弛法降低目标维数,通过推导本地水源优化调配规则建立上层算法,降低决策变量维数,以上层供需平衡及水量调度结果作为边界条件,并基于大系统分解协调思想建立下层外调水调配的优化算法,降低约束条件维数。通过实例求解,分析验证算法性能和求解效率。

1 跨流域调水水量调度多目标优化模型

图1为简化的跨流域调水系统,系统由本地水和外调水两类水源组成。本地水源指水库(湖泊、水闸)等,构成通常比较复杂,不失一般性。此外,模型中调水采用多级调水模式,调水均先调入本级水库,经调蓄后再调往下一级。由此,用户的水量需求同时由本地径流与外调水供给。为实现水量的优化调度,需要统筹水库对本地水与外调水的多

源调节,在充分利用本地水资源的条件下,结合用水缺口以确定适宜的外调水量。由于调水量的大小同时影响着调水成本与缺水损失,所以调度目标需要同时考虑减少调水和降低缺水,构成双目标的优化问题。

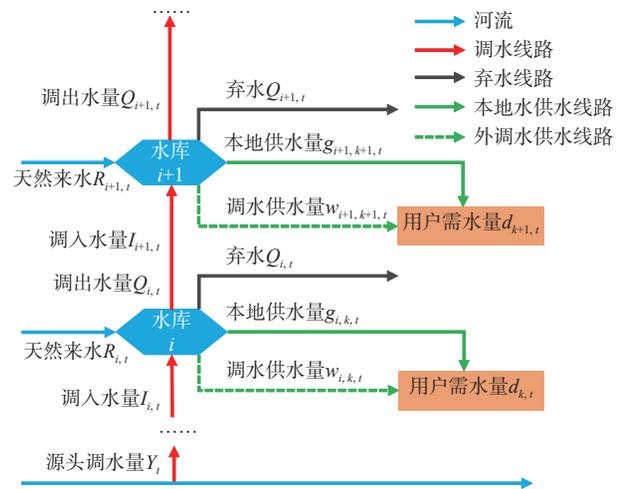


图1 典型跨流域调水系统水量源汇及供需关系结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the water source sink and supply-demand relationship structure of a typical cross basin water transfer system

1.1 目标函数

目标函数 1, 系统各受水区域用户加权缺水率平方和最小, 保证各用户各时段缺水率均匀, 公式为

$$\min f_1 = \frac{1}{m \cdot T} \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T \alpha_k \left(\frac{d_{k,t} - \sum_{i \in \Omega_{N_k}} g_{i,k,t} - \sum_{i \in \Omega_{N_k}} w_{i,k,t}}{d_{k,t}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: m 为用户数; T 为时段数; α_k 为 k 用户的重要性权重; Ω_{N_k} 为 k 用户的供水水库的集合; $d_{k,t}$ 为 k 用户 t 时段的需水量, 亿 m^3 ; $g_{i,k,t}$ 为 t 时段 i 水库给 k 用户的本地水供水量, 亿 m^3 ; $w_{i,k,t}$ 为 t 时段调水通过 i 水库供给 k 用户的水量, 亿 m^3 。实际运行过程中, 本地水、外调水经水库调蓄后难以分割出 $g_{i,k,t}$ 与 $w_{i,k,t}$, 而从水资源最优利用的角度来看, 一般需要调水时本地来水整体偏枯, 调水主要作为本地水的补源, 此时满足分割条件; 倘若有弃水也主要由于本地水过于集中所产生, 主要弃水来源于本地水, 在此假定 $g_{i,k,t}$ 与 $w_{i,k,t}$ 可近似分割。

目标函数 2, 源头调水总量最小, 公式为

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T Y_t \quad (2)$$

式中: Y_t 为 t 时段的源头调水量, 亿 m^3 。

1.2 约束条件

水量平衡约束

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + R_{i,t} + I_{i,t} - O_{i,t} - \sum_{k \in \Omega_{U_i}} g_{i,k,t} - \sum_{k \in \Omega_{U_i}} w_{i,k,t} - Q_{i,t} \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段初的蓄量, 亿 m^3 ; $R_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的本地径流, 亿 m^3 ; $I_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的调入水量, 亿 m^3 ; $O_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的调出水量, 亿 m^3 ; $Q_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的弃水量, 亿 m^3 ; Ω_{U_i} 为 i 水库供给的用户集合。

供需约束

$$\sum_{i \in \Omega_{N_k}} (g_{i,k,t} + w_{i,k,t}) \leq d_{k,t} \quad (4)$$

蓄量上下限约束

$$\underline{V}_{i,t} \leq V_{i,t} \leq \overline{V}_{i,t} \quad (5)$$

式中: $\underline{V}_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段初的蓄量下限, 亿 m^3 ; $\overline{V}_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段初的蓄量上限, 亿 m^3 。

调度期初期末蓄量约束

$$V_{i,T} = V_{i,0} \quad (6)$$

式中: $V_{i,0}$ 为 i 水库调度期初蓄量, 亿 m^3 , $V_{i,T}$ 为 i 水库调度期末蓄量, 亿 m^3 。

允许抽调本地水量约束

$$O_{i,t} - I_{i,t} \leq B_{i,t} \quad (7)$$

式中: $B_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段允许抽调的本地水量上限, 亿 m^3 , 用以满足水库下泄水量及调水控制水位的要求。
调水能力约束

$$I_{i,t} \leq M_{i,t} \quad (8)$$

式中: $M_{i,t}$ 为 t 时段经调水线路抽调至 i 水库的最大能力, 亿 m^3 。

水力联系约束, 即下一级水库的调入水量等于本级水库的调出水量减去沿线输水损失

$$I_{i+1,t} = O_{i,t} - E_{i,t} \quad (9)$$

式中: $E_{i,t}$ 为 t 时段 i 水库调水至下一级水库调水线路上的水量损失, 亿 m^3 。

源头调水总量约束

$$\sum_{t=1}^T Y_t \leq C \quad (10)$$

式中: C 为源头调水总量上限, 亿 m^3 。

所有变量满足非负约束。

2 多水源调度模拟-优化双层耦合求解算法

直接求解上述多目标优化问题的计算量非常大, 并且难以分析多水源联合调度方式。本研究采用模拟-优化方式进行简化求解: 首先, 采用约束松弛法将目标(2)转化为约束条件, 相应地将原模型转化为单目标优化模型; 然后, 假定各供水单元先不启用外调水, 根据本地水资源调配的近似最优原则建立本地水调配的模拟算法(上层算法), 求解本地水的调配方案与各单元的缺水过程; 最后, 以外调水量补充本地水供水所缺, 引入大系统分解协调方法优化调水量分配方式(下层算法), 最终求得水量调度方案。具体求解算法计算流程见图 2。

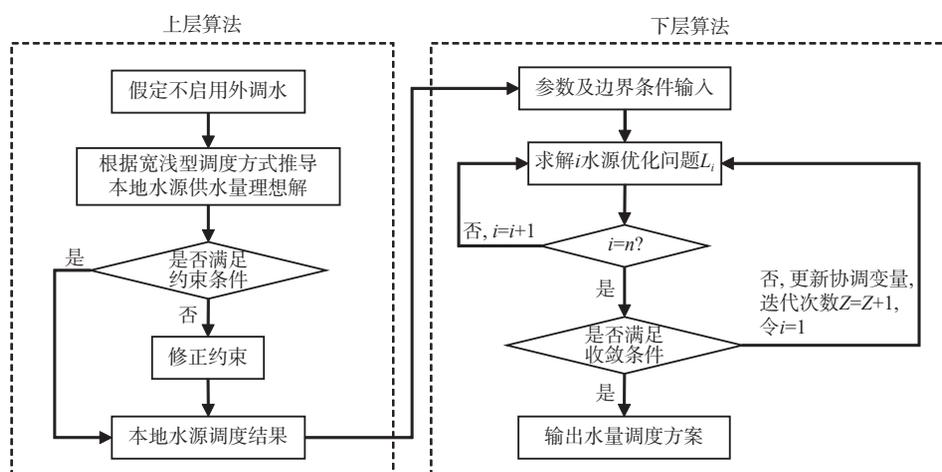


图 2 模拟-优化双层耦合算法计算流程

Fig. 2 Simulation-optimization dual layer coupling algorithm calculation flowchart

2.1 基于约束松弛法的多目标求解

约束松弛法是一种将多目标问题转化为单目标问题的降维处理方法, 其基本思路为: 在多目标中挑选最主要的目标作为目标函数, 将其他目标转化为约束条件。在本问题中, 选择目标(1)缺水率平方

和最小作为主要目标, 将目标(2)源头调水总量最小转化为对应的约束条件。

2.2 本地水调配的模拟算法

在水库最大可供给的水量无法完全满足用水需求的情况下, 目标(1)缺水率平方和最小的调度方案

对应的理想解为“宽浅型”调度^[25],即水库通过灵活运用调蓄空间,优化供水的时程分配方式,从而保证用户各时段缺水深度较小,最终的结果为均匀余缺。首先,先推求供水量的理想最优解;然后,在逐时段调节计算中对不满足约束的解进行修正。具体步骤如下:

步骤一,推求本地水源供水的理想最优解。如图3所示,典型跨流域调水系统中的供需关系都可由单水库-单用户、单水库-多用户、多水库-单用户、多水库-多用户4种类型组合而成。因此,分别针对4种关系类型推求本地水源调配的理想最优解。显然,当水量充足时,水库供水量即为用户需水量;而当水量不足时,根据供水公平性原则,水库供给各用户的水量应根据最大可供供给的水量与需求量的缺口进行折算。以下重点推导总水量不能完全满足需水的情况。

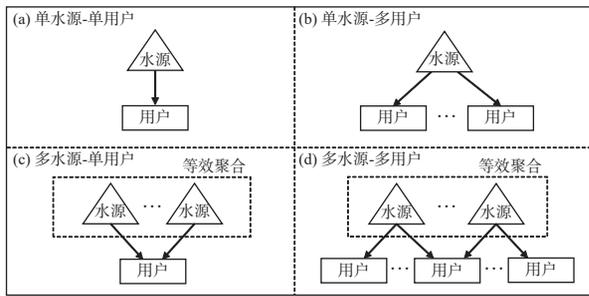


图3 水源-用户供需关系及分类

Fig. 3 Water source user supply and demand relationship and classification

单水库-单用户的子系统水量分配主要结合用户需求确定水量分配过程,水量不足时采用“宽浅型”供水方式均化缺水率为

$$g_{i,k,t} = \frac{\sum_t S_{i,t}}{\sum_t d_{k,t}} d_{k,t} \quad (11)$$

式中: $\sum_t S_{i,t}$ 为*i*水库调度期内最大可供供给的水量,即蓄量变化量与总径流量之和,亿 m^3 。

单水库-多用户的子系统水量分配需要保障用户分水的公平性,如图3(b)所示,当用户*k*重要性权重为 α_k 时,理想最优解应保障各用户加权缺水率一致,即各用户的加权缺水率均等于一共同量值 η :

$$\frac{d_{1,t} - g_{i,1,t}}{d_{1,t}} \cdot \alpha_1 = \frac{d_{2,t} - g_{i,2,t}}{d_{2,t}} \cdot \alpha_2 = \dots = \frac{d_{k,t} - g_{i,k,t}}{d_{k,t}} \cdot \alpha_k = \eta \quad (12)$$

由上式可得

$$\sum_k \sum_t g_{i,k,t} = \sum_k \sum_t d_{k,t} \left(1 - \frac{\eta}{\alpha_k} \right) = A_i \quad (13)$$

式中: A_i 为水库调度期内估算的总可供水量,亿 m^3 。

联立式(12)、(13),可求得水库*t*时段供给*k*用户的水量为

$$g_{i,k,t} = \frac{d_{k,t}(\alpha_k - \eta)}{\alpha_k} = d_{k,t} \left(1 - \frac{\sum_k \sum_t d_{k,t} - A_i}{\alpha_k \sum_t \frac{d_{k,t}}{\alpha_k}} \right) \quad (14)$$

多水库-单用户的子系统水量分配需要考虑水库供水效率的差异。如图3(c)所示,首先将多个水库聚合,再调用(a)单水库-单用户子系统进行水量调配求得等效聚合水库的供水量,最后将聚合水库供水量分配给各水库。

等效聚合水库的供水量为

$$\sum_i g_{i,k,t} = \frac{\sum_i \sum_t S_{i,t}}{\sum_t d_{k,t}} d_{k,t} \quad (15)$$

分配给各水库的供水量为

$$g_{i,k,t} = \frac{\sum_t S_{i,t}}{\sum_t \sum_t S_{i,t}} \frac{\sum_i \sum_t S_{i,t}}{\sum_t d_{k,t}} d_{k,t} = \frac{\sum_t S_{i,t}}{\sum_t d_{k,t}} d_{k,t} \quad (16)$$

多水库-多用户的子系统水量分配需要同时考虑用户分水的公平性与水库供水的经济性。如图3(d)所示,同样先将多个水库聚合,然后调用(b)单水库-多用户子系统,求得等效聚合水库供给各用户的水量后再按照各水库最大可供供给水量的比例进行分配:

等效聚合水库供水量为

$$\sum_i g_{i,k,t} = d_{k,t} \left(1 - \frac{\sum_k \sum_t d_{k,t} - \sum_i A_i}{\alpha_k \sum_k \frac{d_{k,t}}{\alpha_k}} \right) \quad (17)$$

分配给各水库的供水量为

$$g_{i,k,t} = \frac{\sum_t S_{i,t}}{\sum_i \sum_t S_{i,t}} d_{k,t} \left(1 - \frac{\sum_k \sum_t d_{k,t} - \sum_i A_i}{\alpha_k \sum_k \frac{d_{k,t}}{\alpha_k}} \right) \quad (18)$$

步骤二,修正约束。基于上述方法推求的供水理想最优解可能违反蓄量上下限约束。比如,当

水库调度期内来水主要集中于个别时段时,根据调度期内最多可供给水量计算的时段供水量可能会超过枯水期的实际可供水量,从而导致供水后蓄量低于蓄量下限,也可能在丰水期因供水量计算太小导致算出缺水和弃水同时存在的情况,因此需要将供水量理想最优解代入水量平衡方程进行逐时段检验和修正。

当供水后本时段蓄量低于蓄量下限时,根据本时段最大可供给的水量修正供水量为

$$\sum_{k \in \Omega_{U_i}} g'_{i,k,t} = \min \left(\sum_{k \in \Omega_{U_i}} g_{i,k,t}, V_{i,t-1} + R_{i,t} - \underline{V}_{i,t} \right) \quad (19)$$

式中: $\sum_{k \in \Omega_{U_i}} g'_{i,k,t}$ 为修正后的 i 水库 t 时段供水量, 亿 m^3 。

当本时段缺水与弃水同时存在时,根据该水库承担的需水任务与本时段最大可供给的水量修正供水量和弃水量为

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{k \in \Omega_{U_i}} g'_{i,k,t} &= \min \left(\frac{\sum_t S_{i,t}}{\sum_i \sum_t S_{i,t}} \sum_{k \in \Omega_{U_i}} d_{k,t}, V_{i,t-1} + R_{i,t} - \underline{V}_{i,t} \right) \\ a_{bt_{i,t}} &= \max \left(V_{i,t-1} + R_{i,t} - \sum_{k \in \Omega_{U_i}} g'_{i,k,t} - \bar{V}_{i,t}, 0 \right) \end{aligned} \right. \quad (20)$$

式中: $a_{bt_{i,t}}$ 为修正后的 i 水库 t 时段弃水量, 亿 m^3 。

对于多用户的情形,修正后 i 水库 t 时段供给 k 用户的水量 $g'_{i,k,t}$ 可按照(b)单水库-多用户子系统再进行分配计算,此处不再赘述。

2.3 外调水调配的大系统优化算法

在外调水的调配优化中需要考虑上下级水库间调入、调出水量的耦合关联,计算复杂度较高,本研究通过引入大系统分解协调方法^[26]解除关联约束,降维求解。首先,将仅用本地水供水的结果输入进行模型初始化,确定剩余的缺水部分由外调水补充;其次,将跨流域调水系统按水库分解为多个子系统,各子系统独立寻优;最后,根据子系统的反馈进行协调层的协调迭代,直至达到最优及收敛条件。具体步骤如下:

步骤一,模型初始化。在上层算法求解时调入水量 $I_{i,t}$ 、调出水量 $O_{i,t}$ 、外调水供水量 $w_{i,k,t}$ 均为 0,根据上层算法算出的本地水供水结果 $g_{i,k,t}$,得到各水库蓄量、弃水及各用户缺水结果分别为

$$\left\{ \begin{aligned} V_{i,t+1.0} - V_{i,t.0} + Q_{i,t.0} &= R_{i,t} - \sum_{k \in \Omega_{U_i}} g_{i,k,t} \\ d_{k,t.0} &= d_{k,t} - \sum_{i \in \Omega_{N_k}} g_{i,k,t} \end{aligned} \right. \quad (21)$$

式中: $V_{i,t.0}, Q_{i,t.0}, d_{k,t.0}$ 分别为本地水供水后得到的 i 水库 t 时段初蓄量、 i 水库 t 时段弃水量、 k 用户 t 时段缺水水量,将上述变量作为优化外调水调配的边界条件并初始化下层模型,将 $V_{i,t.0}, Q_{i,t.0}$ 代入式(3),从而将水量平衡方程转化为

$$V_{i,t+1} - V_{i,t} + Q_{i,t} = (V_{i,t+1.0} - V_{i,t.0} + Q_{i,t.0}) + \left(I_{i,t} - O_{i,t} - \sum_{k \in \Omega_{U_i}} w_{i,k,t} \right) \quad (22)$$

步骤二,大系统分解及子系统寻优。通过引入拉格朗日乘子 $\lambda_{i,t}, \rho_{i,t}$,将式(22)水量平衡约束和式(9)水力联系约束写入目标函数中

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \lambda_{i,t} \left[V_{i,t+1} - (V_{i,t} - Q_{i,t} + I_{i,t} - O_{i,t} - \sum_{k \in \Omega_{U_i}} w_{i,k,t} + V_{i,t+1.0} - V_{i,t.0} + Q_{i,t.0}) \right] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{t=1}^T \rho_{i,t} (I_{i+1,t} - O_{i,t} + E_{i,t}) + f_1 \quad (23)$$

对于该目标函数,采用目标协调法^[27](非现实法),选取拉格朗日乘子 $\rho_{i,t}$ 作为协调变量,选取 $I_{i,t}, O_{i,t}$ 作为反馈变量,经过移项,可将优化问题 L 分解为多个加性可分的子优化问题之和:

$$L_i = \left\{ \begin{aligned} \sum_{t=1}^T (G_{i,t} + H_{i,t} - \rho_{i,t} \cdot O_{i,t} + \rho_{i,t} \cdot E_{i,t}) & \quad i = 1 \\ \sum_{t=1}^T (G_{i,t} + H_{i,t} + \rho_{i,t} (I_{i,t} - O_{i,t} + E_{i,t})) & \quad i = 2 \sim n-1 \\ \sum_{t=1}^T (G_{i,t} + H_{i,t} + \rho_{i-1,t} \cdot I_{i,t}) & \quad i = n \end{aligned} \right. \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{aligned} H_{i,t} &= \lambda_{i,t} \left[V_{i,t+1} - (V_{i,t} - Q_{i,t} + I_{i,t} - O_{i,t} - \sum_{k \in \Omega_{U_i}} w_{i,k,t} + V_{i,t+1.0} - V_{i,t.0} + Q_{i,t.0}) \right] \\ G_{i,t} &= \frac{1}{m \cdot T} \sum_{k \in \Omega_{U_i}} \alpha_k \left(\frac{d_{i,k,t} - g_{i,k,t} - w_{i,k,t}}{d_{i,k,t}} \right)^2 \\ & \quad \frac{1}{m \cdot T} \sum_{k \in \Omega_{U_i}} \alpha_k \left(\frac{d_{i,k,t.0} - w_{i,k,t}}{d_{i,k,t.0}} \right)^2 \end{aligned} \right. \quad (25)$$

式(24)和(25)中: $d_{i,k,t}$ 为 k 用户的需水中由 i 水库所承担的供水任务, 亿 m^3 ; $d_{i,k,t.0}$ 为本地水供水后 k 用户剩余需水量中由 i 水库承担的部分, 亿 m^3 。

对于子系统优化问题 $L_i, \rho_{i,t}$ 为常数,调用非线性优化求解器 IPOPT 进行求解,该算法基于原始对偶内点算法,并通过滤波线搜索算法^[28]和二阶校正过

滤和更正迭代点,确保迭代下降方向能够使目标函数值或约束残差有充分的改进,具有较好的收敛性。

步骤三,协调与迭代。根据拉格朗日对偶定理^[29],求解原问题 $\min f(x)$ 等价于求解 $\min_x \max_{\rho} L(x,\rho)$,可以转化为求解其对偶问题 $\max_{\rho} \min_x L(x,\rho)$ 。根据子系统求解后的反馈变量 $I_{i,t}, O_{i,t}$ 在协调层求解问题 $\max L(\rho_{i,t})$,利用梯度法更新协调变量 $\rho_{i,t}$

$$\rho_{i,t,z+1} = \rho_{i,t,z} + \mu_z \cdot \frac{\partial L_z}{\partial \rho_{i,t,z}} = \rho_{i,t,z} + \mu_z (I_{i+1,t,z} - O_{i,t,z} + E_{i,t}) \quad (26)$$

其中, μ_z 为第 Z 次迭代的步长,当满足 $\left| \frac{\partial L_z}{\partial \rho_{i,t,z}} \right| = |I_{i+1,t,z} - O_{i,t,z} + E_{i,t}| \leq \text{eps}$ 时,达到收敛精度,此时关联约束条件已满足,结束计算。否则,转步骤二迭代计算。

3 算例分析

3.1 研究区概况

南水北调东线一期工程及北延段调水线路全长1467 km,自建成通水以来,持续保障我国北方地

区生活、生产、生态用水需求,对沿线受水区产生了较大的环境、经济和社会影响^[30],调水线路途经江苏、安徽、山东、河北、天津等地区。工程主体涉及水闸、泵站、水库等水利工程,与江水北调、引黄济青等调水工程一并实施多源供水,沿线水源主要包括长江、洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖、南四湖上级湖、东平湖等,受水区主要包括5个省级行政区27个地级行政区113个县级行政区,用水部门主要包括农业、工业、生活、生态、建筑业、服务业等。

考虑到研究区域的复杂性,以湖泊为主要分区依据,将整个系统概化为长江—洪泽湖、洪泽湖—骆马湖、骆马湖—下级湖、下级湖—上级湖、上级湖—东平湖、胶东、东平湖以北共7个片区。沿线受水区分为湖泊本地受水区(其中东平湖仅作为南水北调工程的调蓄水库,无本地受水区)和调水受水区,湖泊本地受水区由入湖自然水系的水量和引调水同时供给,调水受水区除本地水资源供给以外,其余由引调水供给。将沿线受水区按照地理位置划分到对应片区,系统概化见图4。

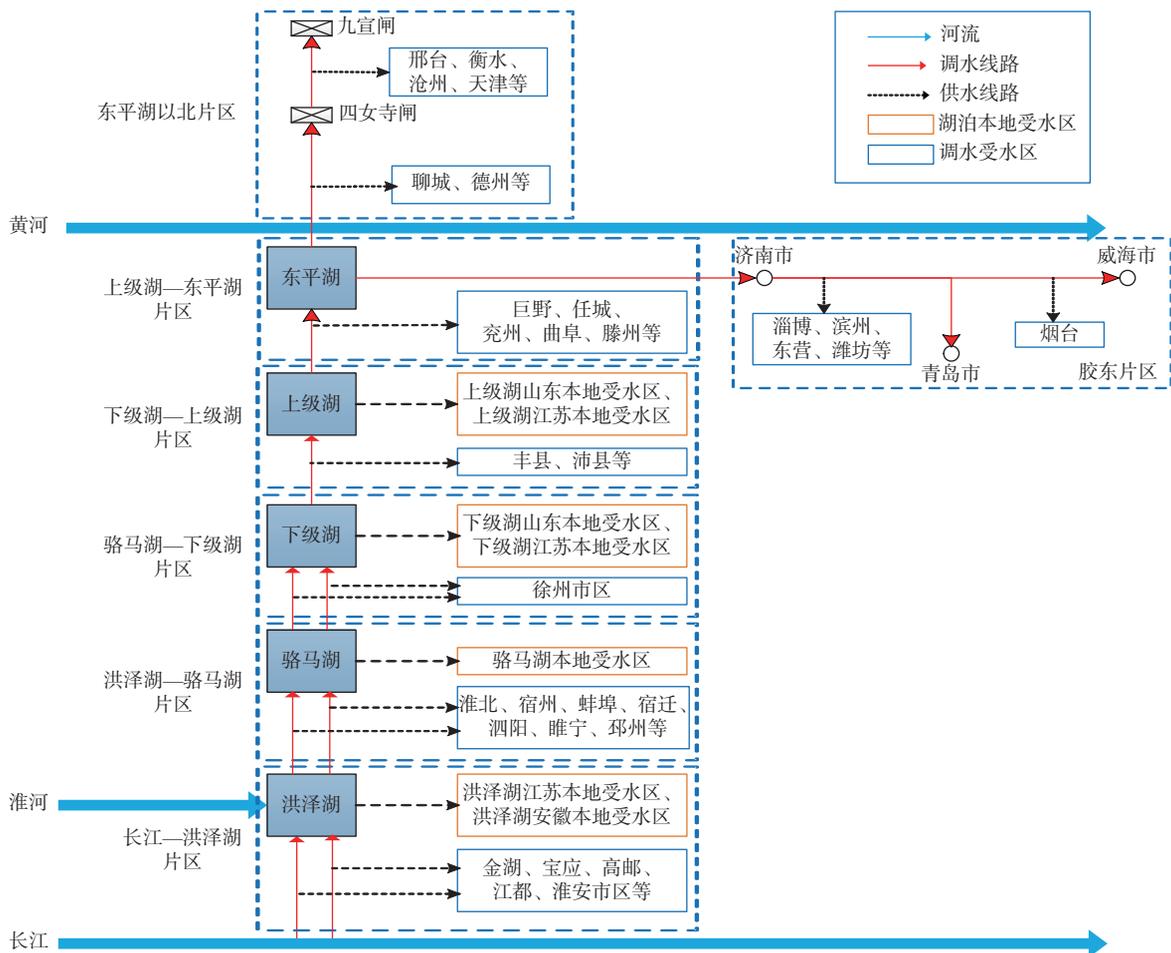


图4 研究区系统概化

Fig. 4 Overview diagram of the research area system

3.2 水量调度多目标非劣解前沿

依据沿线五大湖泊长系列来水资料进行排频,选取丰水($P=25\%$)、平水($P=50\%$)、枯水($P=75\%$)3种典型年,并将与之频率相对应的湖泊本地受水区需水资料、沿线受水区需调水量资料作为模型输入,以东线一期工程多年平均抽江水量作为模型引水边界,以月作为计算时间尺度,基于多水源调度模拟-优化双层耦合求解算法原理进行降维。降维前后模型复杂度变化见表 1。

表 1 降维前后模型复杂度变化

Tab. 1 Changes in model complexity before and after dimensionality reduction

	降维前	降维后
目标函数	2个	1个
约束条件	约800个	约752个
决策变量	约1 536个	约984个
优化问题类型	复杂的大系统优化问题	多个简单的子系统优化问题

如图 5 所示,分别采用模拟-优化(双层耦合求解算法)与直接优化(大系统分解协调算法)进行求解,通过调整模型中的引江水量量级,分析不同典型年来水情景、不同源头调水量条件下受水区综合缺水率的响应关系,生成缺水-调水非劣解集,可见:受水区综合缺水率与引江水量之间近似线性变化关系,随着引江水量的增加,综合缺水率不同程度降低,但缺水率指标的降幅逐渐放缓;模拟-优化与直接优化的结果近似,且随着引江水量的增加,两者趋于一致,但模拟优化的求解效率更高,平均耗时约 45 s,而直接优化平均耗时约 112 s。

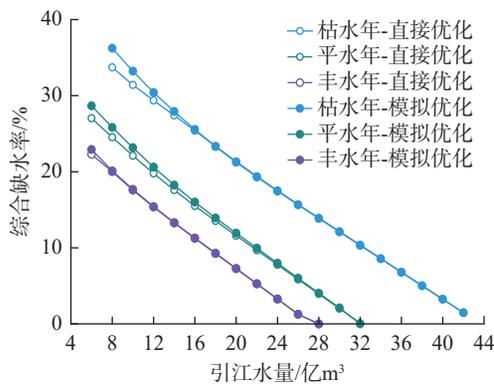


图 5 水量调度多目标非劣解前沿

Fig. 5 Frontiers of multi-objective non inferior solutions for water scheduling

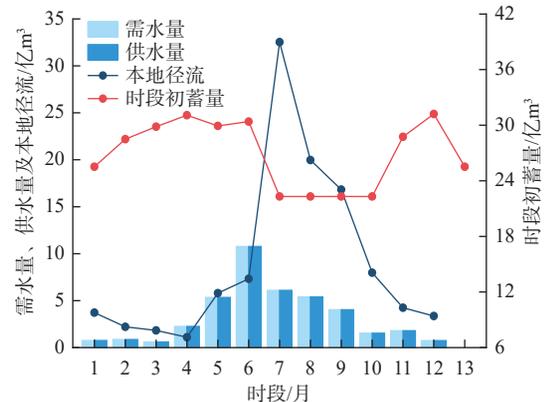
3.3 多水源水量调度方案

以枯水典型年为例计算多水源水量调度方案,沿线湖泊可供调节的本地径流(含过境水量)约 131 亿 m^3 ,本地受水区总需水量约 73 亿 m^3 (其中,洪泽

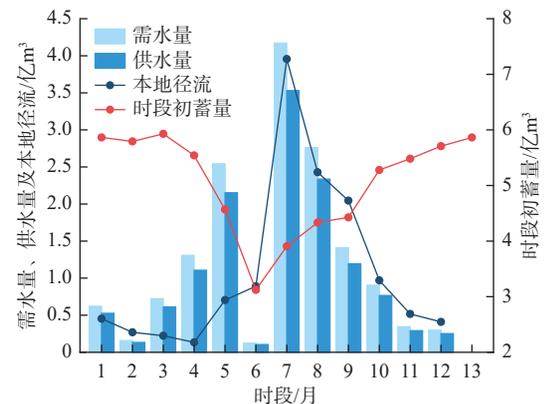
湖本地径流约 109 亿 m^3 ,本地需水量约 40 亿 m^3)。经过上层算法求解得到无调水条件下的各湖泊调蓄本地径流的调度结果。其中,各湖泊水量调度过程、本地受水区供需过程见图 6。

由图 6 可知:湖泊本地受水区缺水深度相对均匀,其中骆马湖、下级湖、上级湖受水区各时段缺水率约为 15.35%、77.59%、17.59%;算法充分发挥了蓄水工程的时程调节能力,并为下层外调水调配方式的优化提供初始方案。

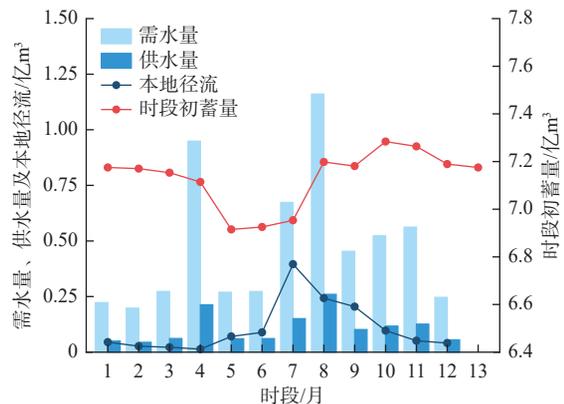
考虑到跨流域调水工程缓解缺水的主要目标,同时为分析缺水-调水矛盾关系中的折中效益,选取缺水最小方案与综合协调方案作为主要调度方案进行计算。



(a) 洪泽湖调度过程



(b) 骆马湖调度过程



(c) 下级湖调度过程

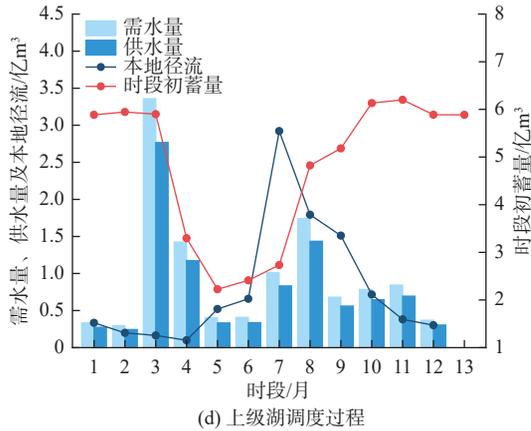


图6 调水工程沿线调蓄湖泊的本地水调度过程

Fig. 6 Local water regulation process of regulating and storing lakes along the water transfer project

方案一, 缺水最小方案。将系统用户缺水量之与引水边界取小输入下层进行外调水调配的优化: 当引江水量为 43.64 亿 m³ 时, 跨流域调水系统所有调水需求均得到满足, 此时水量调度方案见表 2。

表 2 多水源水量调度方案(缺水最小方案)

Tab. 2 Multi-source water flow scheduling plan (minimum water shortage plan) 单位: 亿 m³

片区	调入片区水量	调入湖泊水量	调出湖泊水量	本地受水区需水量	调水受水区需水量	本地水供水量	外调水区供水量
长—洪	43.64	33.67	37.27	40.16	9.97	40.16	9.97
洪—骆	37.27	26.16	23.80	15.36	11.11	13.00	13.47
骆—下	23.80	21.70	17.20	5.80	2.10	1.30	6.60
下—上	17.20	16.80	14.75	11.65	0.40	9.60	2.45
上—东	14.75	12.69	12.96	0	2.06	0	2.06
胶东	7.46	—	—	0	7.46	0	7.46
东平湖以北	5.50	—	—	0	5.50	0	5.50

由表 2 可知: 在枯水年来水条件下, 南水北调水量(包括引江水量 43.64 亿 m³、引洪泽湖水量 3.6 亿 m³、引东平湖水量 0.27 亿 m³)除了供给沿线调水受水区共计约 38.6 亿 m³ 外, 还需补充湖泊本地供水不足对应的需水缺口, 供给骆马湖、下级湖、上级湖本地受水区分别约 2.36 亿、4.5 亿、2.05 亿 m³, 基本遵循了本地水资源量与调水量的调配原则, 即优先使用本地水资源供给本地受水区, 缺水部分由调水补给, 考虑到调水成本, 由近及远逐级调水; 同时相较于常规调度方法, 该水量调度方案根据本地供水缺口优化了引江过程, 降低了因调水过多而导致的弃水风险。

方案二, 综合协调方案。从非劣解集边际变化率的结果来看, 在枯水年来水条件下, 当引江水量为 25 亿 m³ 时, 受水区综合缺水率相对较小(16.52%),

且当引江水量继续增大时综合缺水率降幅缓慢(每增大 1 亿 m³ 降低 0.89%), 基本对应于非劣解前沿的拐点。在此方案下, 各片区供水情况以及沿线湖泊调度过程线见图 7、图 8。

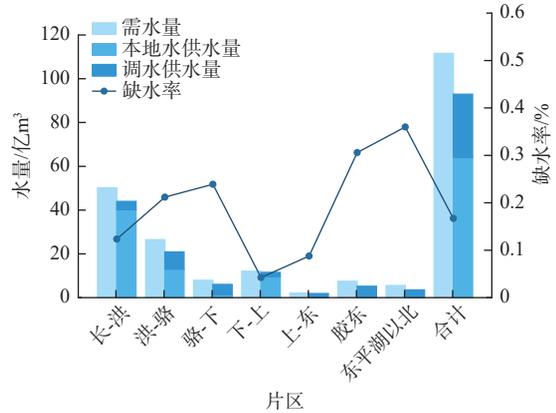
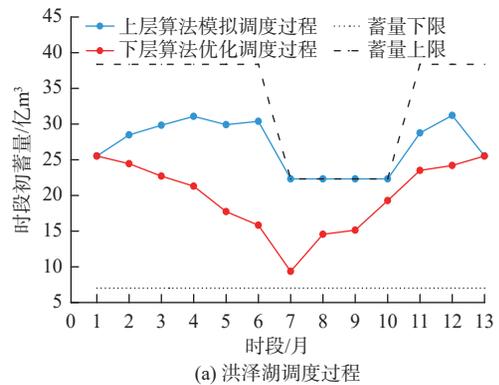
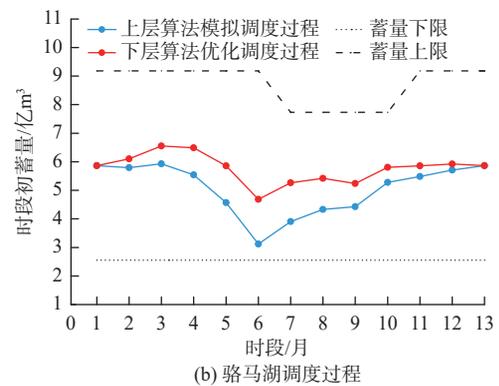


图7 综合协调解方案各片区供水情况

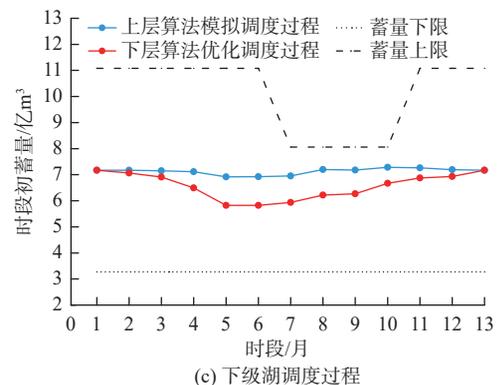
Fig. 7 Comprehensive coordinated solution plan for water supply and shortage in each area



(a) 洪泽湖调度过程



(b) 骆马湖调度过程



(c) 下级湖调度过程

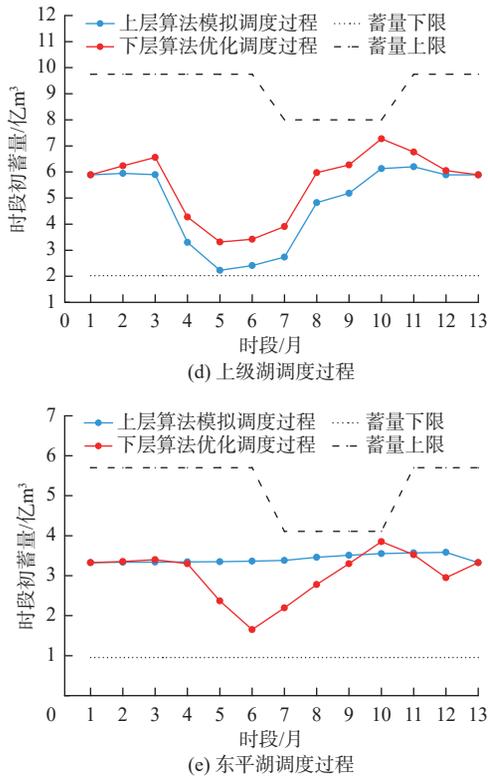


图 8 综合协调解方案湖泊调度过程

Fig. 8 Comprehensive coordinated solution plan for lake scheduling

可以看出,在上层本地水源调度过程的基础上,下层算法优化了调水、蓄水和供水的时机,充分发挥了湖泊的调蓄功能,如:骆马湖 1—3 月使用空余库容存蓄北调水量用于后续月份往北调出;下级湖 1—5 月使用本地湖水调水北上,6—12 月通过截留下游调水用于补库。模拟-优化双层耦合算法求得的综合协调解可在时空分布上调控本地水与外调水的调配关系。

4 结论

本文针对跨流域调水多水源多目标水量调度问题,以受水区用户加权缺水率平方和最小以及源头调水总量最小为目标,构建水量调度多目标优化模型,并采用模拟-优化双层耦合算法进行求解。上层算法模拟了本地水源宽浅型调度规则,能够在逼近理想优化结果的同时加快求解速度,下层算法在上层调度结果的基础上,灵活运用水库调蓄空间,对调水量进行优化分配,上下层算法的耦合能够在考虑本地水与外调水调配顺序的同时兼顾多目标调度需求。以南水北调东线一期工程为例,在丰、平、枯 3 种典型年来水情景下验证了算法性能,并对枯水年情景进行重点讨论。结果表明:模拟-优化双层耦合算法结合约束松弛法、本地水源模拟、大系统

分解协调等降维手段,在保障优化性能的同时,有效地降低了跨流域调水系统水量调度问题的计算复杂度,使求解效率得到提高;耦合算法分层计算的方式展示了本地水与外调水的联合调配关系,提高了多水源调度结果的可解释性;枯水年情景下,当引江水量为 43.64 亿 m^3 时,通过优先调用洪泽湖与东平湖富余本地径流,系统受水区用水需求完全被满足,同时,引调江水 25 亿 m^3 可将受水区综合缺水率降至 16.52%,该水量调度方案是考虑缺水与调水的协调方案。

参考文献:

- [1] MING B, ZHONG H, ZHANG W, et al. Deriving operating rules for inter-basin water transfer projects incorporating a scenario reduction strategy[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129854. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129854.
- [2] ROOZBAHANI A, GHANIAN T. Risk assessment of inter-basin water transfer plans through integration of fault tree analysis and Bayesian network modelling approaches[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356: 120703. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120703.
- [3] SHENG J, ZHANG R, YANG H. Inter-basin water transfers and water rebound effects: The South-to-North Water Transfer Project in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 638: 131516. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131516.
- [4] SUN S, ZHOU X, LIU H, et al. Unraveling the effect of inter-basin water transfer on reducing water scarcity and its inequality in China[J]. *Water Research*, 2021, 194: 116931. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116931.
- [5] 卢瑶, 马真臻, 贺华翔, 等. 基于缺水量与保证率“双控”的水资源优化配置模型及应用[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 91-103. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.08.008.
- [6] 游进军, 甘泓, 王浩, 等. 基于规则的水资源系统模拟[J]. *水利学报*, 2005, 36(9): 1043-1049. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2005.09.004.
- [7] 侯效灵, 杨瑞祥, 侯保灯, 等. 复杂不确定环境下雄安新区多水源联合配置[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(1): 45-54. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.005.
- [8] 王宗志, 谈丽婷, 耿敏, 等. 考虑调水和供水规则的水库优化调度[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 15-21. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.003.
- [9] 王浩, 王旭, 雷晓辉, 等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 25-

37. DOI: [10.13243/j.cnki.slx.20180795](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.20180795).
- [10] 黄草,王忠静,李书飞,等.长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 I:模型原理及求解[J].*水利学报*,2014,45(9):1009-1018. DOI: [10.13243/j.cnki.slx.2014.09.001](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.2014.09.001).
- [11] 马永胜,史娟,潘景辰.复杂跨流域调水系统联合优化调度研究:以陕西省引嘉入汉调水工程为例[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(5):142-148. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.20](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.20).
- [12] 苏明珍,董增川,张媛慧,等.大系统优化技术与改进遗传算法在水资源优化配置中的应用研究[J].*中国农村水利水电*,2013(11):52-56. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2013.11.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2013.11.014).
- [13] 康艳,高轩,李俊杰,等.供水水库群蓄供水次序与调度图双层优化研究[J].*水利学报*,2022,53(10):1240-1250. DOI: [10.13243/j.cnki.slx.2022.0025](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.2022.0025).
- [14] 彭方旭,汪妮,魏霞.基于改进粒子群算法的多水库复杂联合供水优化调度研究[J].*水资源与水工程学报*,2022,33(3):143-148. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2022.03.18](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2022.03.18).
- [15] 王文君,方国华,李媛,等.基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J].*水资源保护*,2022,38(2):91-96. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.013](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.013).
- [16] LI M, YANG X, WU F, et al. Spatial equilibrium-based multi-objective optimal allocation of regional water resources[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 44: 101219. DOI: [10.1016/j.ejrh.2022.101219](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101219).
- [17] MANSOURI M, SAFAVI H R, REZAEI F. An improved MOPSO algorithm for multi-objective optimization of reservoir operation under climate change[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(4): 261. DOI: [10.1007/s10661-022-09909-6](https://doi.org/10.1007/s10661-022-09909-6).
- [18] 王超,孔令仲,朱双,等.考虑湖泊调蓄的引江济淮工程旬水量调度方案[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(6):1109-1116. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0109](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0109).
- [19] 宋志红,刘渊,江生金,等.引江济淮工程(河南段)多目标水量优化调度[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2024,22(1):39-47. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0006](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0006).
- [20] 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. DOI: [10.1016/j.advwatres.2020.103531](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103531).
- [21] JIA D, ZHANG T, WU L, et al. Multi-objective cooperative optimization of reservoir scheduling and water resources allocation for inter-basin water transfer project based on multi-stage coupling model[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130673. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2024.130673](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130673).
- [22] 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. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.006](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.006).
- [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. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.012](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.012).
- [24] 王旨祥,王超,雷晓辉,等.考虑湖泊来水结果的分层耦合水量调度模型研究[J].*中国农村水利水电*,2023(10):69-76. DOI: [10.12396/znsd.230590](https://doi.org/10.12396/znsd.230590).
- [25] 钟平安,曹明霖,万新宇,等.灌溉水库宽浅型优化调度目标函数改进及应用[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2015,43(6):7-13. DOI: [10.3876/j.issn.10001980.2015.06.002](https://doi.org/10.3876/j.issn.10001980.2015.06.002).
- [26] BARROS MARIO T L, TSAI FRANK T C, YANG S L, et al. Optimization of large-scale hydropower system operations[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(3): 178-188. DOI: [10.1061/\(asce\)0733-9496\(2003\)129:3\(178\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2003)129:3(178)).
- [27] 刘方,张粒子.基于大系统分解协调和多核集群并行计算的流域梯级水电中长期调度[J].*中国电机工程学报*,2017,37(9):2479-2490. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.160497](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160497).
- [28] WÄCHTER A, BIEGLER L T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming[J]. *Mathematical Programming*, 2006, 106(1): 25-57. DOI: [10.1007/s10107-004-0559-y](https://doi.org/10.1007/s10107-004-0559-y).
- [29] 吴慧卓,张可村.基于拉格朗日对偶的一类全局优化算法[J].*西安交通大学学报*,2008,42(8):1031-4. DOI: [10.3321/j.issn:0253-987X.2008.08.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-987X.2008.08.022).
- [30] LIU Y, XIN Z, SUN S, et al. Assessing environmental, economic, and social impacts of inter-basin water transfer in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 130008. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2023.130008](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130008).

Inter-basin water transfer multi-source multi-objective water allocation simulation-optimization twin-level coupling algorithm

DONG Yuanheng¹, XU Bin^{1,2}, ZHANG Yuwei³, XUE Yuting¹, YU Yingying⁴, LIU Weifeng⁵, LI Jiangyuan¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Ecological Construction Investment Corporation of China Xiong'an Group, Baoding 071700, China; 4. Xuzhou Water Bureau, Xuzhou 221018, China; 5. MWR General Institute of Water Conservancy Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China)

Abstract: Over a hundred water transfer projects have been implemented to address the disparity between the spatial distribution of water resources and economic and social development patterns in China, notably the Eastern and Middle Route of South-to-North Water Transfers Project. These projects are vital for supporting sustainable economic and social development. The integration of cross-basin and cross-regional water transfer projects with local water source projects forms a complex multi-water source system, which involves multiple regions, projects, users, as well as departments, which results in large-scale, multi-objective nonlinear programming challenges. Traditional simulation or optimization methods struggle to balance solution efficiency with optimization performance. Hence, studying simulation-optimization coupling algorithms is a practical approach to enhance calculation efficiency and ensure effective water resource utilization.

This study examines the allocation sequence of local and external water resources, and proposes a dual-layer coupling solution algorithm for multi-water source scheduling. The algorithm first uses simulation methods to address local water source allocation (upper-layer algorithm), employing a uniform water supply mode to calculate the ideal optimal water supply quantity and adjust constraint violations period by period. Subsequently, a large-scale system decomposition and coordination method is used to manage external water allocation (lower-layer algorithm) based on upper-layer scheduling results. By introducing coordination variables to decouple system correlation constraints, the original complex system is transformed into multiple simpler subsystems, with optimal solutions obtained through feedback and iteration between subsystems and the coordination layer.

A multi-objective optimization model for water quantity scheduling was developed in the Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project area. The optimization goals were to minimize the total weighted water shortage rates of users in the receiving area and the overall amount of water transferred from the source. The simulation-optimization dual-layer coupling algorithm was employed to solve the problem, and its effectiveness was verified. Results for the typical dry year of 1992 showed that: (1) With a Yangtze River flow of 4.364 billion m³, the water demand of the receiving area can be met by prioritizing surplus local runoff from Hongze Lake and Dongping Lake; (2) Diverting 2.5 billion m³ of water from the Yangtze River can reduce the comprehensive water shortage rate in the receiving area to 16.52%. This water quantity scheduling plan is a coordinated approach addressing both water shortage and diversion; (3) The simulation-optimization dual-layer coupling algorithm, combined with constraint relaxation, local water source simulation, and large-scale system decomposition and coordination, effectively reduces the computational complexity of cross-basin water transfer system scheduling problems while ensuring optimization performance. The layered calculation demonstrates that the joint allocation relationship between local and external water transfers, thus improving the interpretability of multi-source scheduling results. The algorithm provides a reference for solving multi-objective water quantity scheduling problems in large-scale cross-basin water transfers.

Key words: inter-basin water transfer; multi-water source; multi-objective; simulation-optimization; large system decomposition and coordination; the Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project