

南水北调东线二期工程江苏段对苏北地区供水模式的影响

徐纪翔¹, 马晶洁², 闻 昕¹, 代晓瞳³, 范杰斐¹, 朱春光⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省南水北调工程管理局, 江苏 南京 210029; 4. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210036)

摘要:根据江苏省南水北调工程水系和工程拓扑结构与组成特点,建立了复杂平原河网地区江-河-湖-站联合优化调度模型,提出了动态规划逐次逼近-逐步优化混合算法(DPSA-POA),通过模拟丰、平、枯典型水文年多情景以及南水北调东线二期工程建成前后多工况组合下的系统调度过程,从供水总量、供水时空分布、供水峰值等方面,评估了东线二期工程对江苏省苏北地区供水格局的影响。结果表明:东线二期工程建成后,苏北地区丰、平、枯水年可供水量分别增加约 16.5 亿、13.8 亿、10.5 亿 m³,较现状提升约 12.6%、12.5%、12.0%,连云港地区、中运河沿线和徐洪河沿线区间的供水量具有增供潜力;仅在枯水年用水高峰期(6 月)省外调水量大于 80 亿 m³ 时会影响苏北地区供水,平水年和丰水年均无不利影响。

关键词:南水北调东线工程;苏北地区;水资源优化调度;梯级泵站群;跨流域调水;供水影响评估
中图分类号:TV68 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0115-10

Effect of Jiangsu section of second phase of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project on water supply pattern in northern Jiangsu Province//XU Jixiang¹, MA Jingjie², WEN Xin¹, DAI Xiaotong³, FAN Jiefei¹, ZHU Chunguang⁴(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Water Science & Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. South-to-North Water Diversion Project Administration Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 4. Nanjing Yangtze River Administration Office, Nanjing 210036, China)

Abstract: Based on the river system and engineering topological structure and composition characteristics of the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province, a joint optimization scheduling model for river-lake-station system in complex plain river network regions was established. A hybrid model solution algorithm, named DPSA-POA (dynamic programming successive approximation-progressive optimality algorithm), was proposed. By simulating the system scheduling process under multiple scenarios, including typical high, normal, and low flow hydrological years, as well as combinations of multiple operating conditions before and after the completion of the second phase of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project, the effect of the second phase of the Eastern Route Project on the water supply pattern in northern Jiangsu Province was evaluated in terms of total water supply, spatial and temporal distributions of water supply, and water supply peaks. The results show that after the completion of the second phase of the Eastern Route Project, the available water supply in northern Jiangsu Province can increase by approximately 1.65 billion, 1.38 billion, and 1.05 billion m³ in typical high, normal, and low flow years, respectively, representing an increase of approximately 12.6%, 12.5%, and 12.0% compared to the current situation. The water supply to Lianyungang area and sections along the Grand Canal and the Xuhong River has potential for increased supply. Adverse impacts on water supply in northern Jiangsu Province occur only during the peak water use period (June) in low flow years when the volume of water diversion out of the province exceeds 8 billion m³. No negative effects are observed in normal or high flow years.

Key words: the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project; northern Jiangsu Province; optimal dispatch of water resources; cascade pumping stations; interbasin water transfer; water supply impact assessment

基金项目:江苏省水利科技项目(2019027)
作者简介:徐纪翔(2000—),男,硕士研究生,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhu-xjx@qq.com
通信作者:马晶洁(1995—),女,助理研究员,博士,主要从事水资源配置与水利调度研究。E-mail:20230507@hhu.edu.cn

南水北调东线工程是构建我国“四横三纵”水网格局的重大战略性跨流域调水工程。江苏是东线工程的起点,东线一期工程在江苏省江水北调工程基础上扩大规模并向北延伸,二者具有部分重合的调水线路和分属管理的闸泵工程,共同组成了江苏省南水北调工程体系。该体系通过运河线和运西线双线输水,以 18 个泵站枢纽为核心,串联起洪泽湖、骆马湖等沿线调蓄湖库,连续 11 年完成国家下达的调水出省任务,累计从江苏省调出水量达 71.39 亿 m^3 ,年均调入山东水量为 6.49 亿 m^3 ,为缓解胶东地区水资源短缺问题做出突出贡献;该体系还提升了江苏省水安全保障能力,省内供水量达 102.6 亿 m^3 ,占苏北地区年均用水总量的 60.1%,形成了省外调水与省内供水、国家水网水资源配置与地方水资源需求相协调^[1-2],供水、防洪、生态、航运多目标均衡的水资源调配格局^[3-4]。

为进一步缓解北方地区水资源短缺问题,南水北调东线二期工程规划于 2017 年正式启动,目前仍处于设计方案论证阶段,东线二期工程将依托一期工程线路,进一步扩大河道和泵站输水能力,增加抽江规模 61.39 亿 m^3 ,调水结束时间从 5 月延迟至 6 月 10 日。工程的建设也将紧密依托江苏省南水北调工程体系,工程建成后,出省调水量将增加约 1.4 倍,且省内农业用水高峰期(6 月)存在 1/3 时间与省外调水期重叠,而苏北地区用水高峰期供水量约占全年供水量的 30%。因此,东线二期工程建成后将打破省外和省内现状供水格局和总体平衡,改变省内与省外、流域与区域、总量与峰值等协调关系。如何量化评估东线二期工程对于江苏省苏北地区水资源调配格局的影响,是东线二期工程规划设计中各方博弈争论的焦点问题,也是未来进一步推进工程规划和建设的关键。

江苏省南水北调工程是典型的以多级湖泊为水源及调蓄节点,依托天然河网和人工渠系进行联合输水的复杂跨流域调水系统,研究其不同工况下的调度方式是评估工程综合影响的核心关键。目前调水工程优化调度研究主要集中于调度模型的构建与求解。模型目标函数一般考虑经济效益、供水保障和安全运行等因素,并逐步从单目标向多目标协同问题拓展。随着模型结构愈加复杂,高效求解难度也在增加,各类优化算法也是研究的热点问题,常用算法包括改进遗传算法等启发式算法,以及新一代人工智能算法等^[5-12]。例如:郭玉雪等^[13]改进了蛙跳算法,以受水区生活、工业以及农业用水供水量最大,梯级总抽水量最小以及调水峰值最小为优化目标,提出不同典型来水条件下的中长期水量优化

调度方案;郭旭宁等^[14]以水库群弃水最少和供水保证率最高为目标,提出了跨流域水库群调供水耦合优化方案,可用于分析水库群调水系统最大调供水水量;彭安邦等^[15]提出了流域多水源配置与水库群优化调度相耦合的二层结构方法,并以调水成本最低、缺水量最小和生态调节费用最低为目标函数,实现了流域水资源精细化配置。

针对南水北调东线工程,已有研究聚焦于水资源优化配置、工程优化调度方式、不确定性分析等方面^[16-17]。例如:闻昕等^[5]提出面向多工程多目标的联合调度方法,在保证用水户需水量的同时,提升苏北地区水资源利用率和工程运行效益;张平^[18]综合考虑经济效益、社会效益以及环境效益,发现东线工程受水区仅存在农业用水短缺的风险,其中苏北地区农业用水缺水率为 6.68%;宋丹丹等^[19]考虑了降雨径流、区域用水需求、工程供水能力等因素,对受水区水资源进行分配。目前相关研究多集中于南水北调东线一期工程及江水北调等现有工程体系的调度分析,而针对未来东线二期工程的优化调度及其潜在影响的研究较为缺乏。

根据江苏省南水北调工程水系和工程拓扑结构与组成特点,本文建立江-河-湖-站联合优化调度模型,采用动态规划逐次逼近-逐步优化混合算法(dynamic programming successive approximation-progressive optimality algorithm, DPSA-POA)求解,通过模拟多情景多工况组合下系统调度方式,从供水总量、峰值能力和区间供水量等方面,评估东线二期工程对苏北地区供水格局的影响。

1 研究区概况

江苏省南水北调系统由南水北调东线一期工程江苏段和江水北调工程共同组成,输水干线总长超 404 km,沿线共有 18 个大型泵站以及洪泽湖、骆马湖、南四湖等调蓄湖泊,承担向省外调水和给苏北地区供水、航运、生态等综合保障任务。该系统以长江为主要水源,通过运河线和运西线两条线路逐级向北输水,满足省内沿线用水需求和向省外调水要求;在淮河干流或沂沭泗流域来水较丰时,也可将水源切换为洪泽湖或骆马湖,以满足水资源调配需求。

东线二期工程建成后,长江—洪泽湖段由双线输水变成三线输水,抽江规模增加 370 m^3/s ,入洪泽湖规模增加 360 m^3/s ;洪泽湖—骆马湖段保持双线输水,骆南中运河维持一期原输水规模不变,扩挖徐洪河线,新建泗洪二站、睢宁三站和邳州二站,输水规模增加 345 m^3/s ,主要工程参数如表 1 所示。东线二期工程规划调水时间为 9 月 11 日至翌年 6 月 10 日,相比现状增加 1 月,与苏北地区农业用水高

峰期有约 10 d 的时间重叠。

表 1 东线二期工程建成前后调水规模和调水量

Table 1 Scale and volume of water diversion before and after completion of second phase of the Eastern Route Project

梯级	调水规模/(m ³ /s)		年调水量/亿 m ³	
	建成前	建成后	建成前	建成后
抽江	500	870	91.32	152.71
入洪泽湖	450	810	72.99	131.88
出洪泽湖	350	700	67.60	131.91
入骆马湖	275	620	46.85	108.55
出骆马湖	250	590	45.80	109.60

2 江-河-湖-站联合优化调度模型

根据江苏省南水北调工程水系和工程拓扑结构和组成特点,建立江-河-湖-站联合优化调度模型,模拟多情景(丰、平、枯水年)、多工况(东线二期工程建成前、后工况)组合下的系统调度过程,从供水总量、峰值能力和区间供水量 3 个方面,评估东线二期工程对江苏苏北地区的供水影响。

2.1 系统概化

为分析江苏省南水北调系统主要组成单元的水力特性,解析各受水区与供水水源、输水线路的空间拓扑关系,根据系统主要组成单元以及骨干河渠间的连接关系进行系统概化,概化结果如图 1 所示。

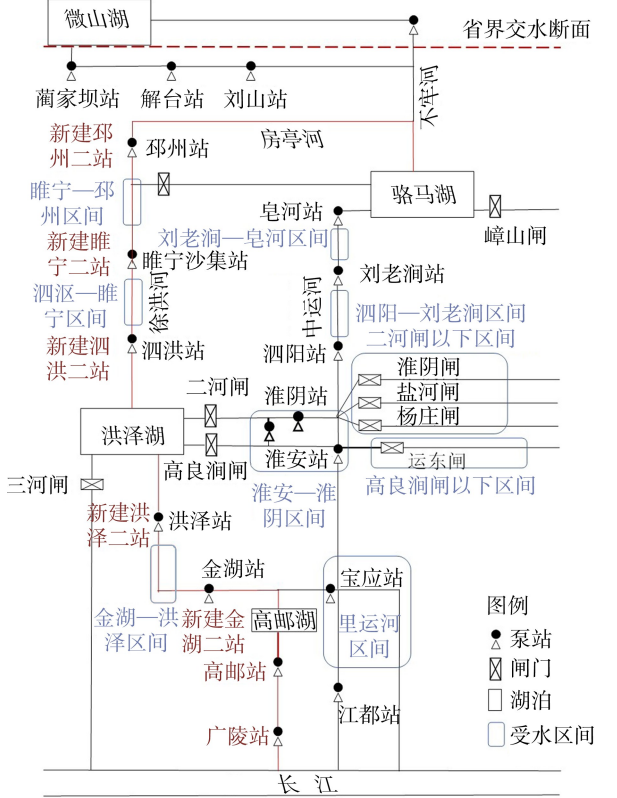


图 1 江苏省南水北调系统概化图

Fig. 1 Generalized map of the South-to-North Water Diversion System in Jiangsu Province

由于新建线路上的高邮湖采取专道输水的方式,可看作河道,故不考虑其调蓄能力。以骨干泵站和闸门为节点,将苏北地区划分为 9 个受水区间,以实际区间进出水量差值作为各区间供水量。9 个受水区间分别为二河闸以下、高良涧闸以下、里运河、淮安—淮阴、金湖—洪泽、泗阳—刘老涧、刘老涧—皂河、泗洪—睢宁、睢宁—邳州区间。

2.2 目标函数

江苏省南水北调系统水资源优化调度的目标主要包括:①完成供水任务,包括省外调水和省内供水任务;②保障系统安全稳定运行;③尽可能降低系统运行成本。其中,供水任务和系统安全稳定运行可转换为水量和运行等约束条件,将多目标问题转换为以系统耗电量最小为目标函数的单目标模型:

$$f(x) = \min \left(\sum_t^T \sum_k^K M_{k,t} \right) \tag{1}$$

其中 $M_{k,t} = Q_{k,t} \Delta t E_{Q_{k,t}} h_k$ 式中: $f(x)$ 为目标函数; $M_{k,t}$ 为泵站 k 在 t 时段内的耗电量; T 为全年时段总数; K 为系统内泵站总数; $Q_{k,t}$ 为泵站 k 在 t 时段内的平均流量; $E_{Q_{k,t}}$ 为泵站 k 在抽调流量 $Q_{k,t}$ 时的能源单耗; h_k 为泵站 k 的扬程; Δt 为时段时长。

2.3 约束条件

2.3.1 湖泊水位约束

为保证工程安全运行,须将湖泊水位控制在规定范围内,湖泊水位约束条件为

$$Z_{\min,it} \leq Z_{it} \leq Z_{\max,it} \tag{2}$$

式中: Z_{it} 为 t 时段湖泊 i 的水位; $Z_{\max,it}$ 、 $Z_{\min,it}$ 分别为 t 时段湖泊 i 允许达到的水位上、下限。

湖泊水位上、下限主要考虑湖泊的北调水位、正常蓄水位和死水位,见图 2。

2.3.2 泵站输水能力约束

为保证泵站安全高效运行,须控制泵站抽水流量在其输水能力范围内。泵站输水能力约束条件为

$$Q_{\min,kt} \leq Q_{kt} \leq Q_{\max,kt} \tag{3}$$

式中: Q_{kt} 为 t 时段泵站 k 的瞬时输水能力; $Q_{\max,kt}$ 、 $Q_{\min,kt}$ 分别为 t 时段泵站 k 允许达到的输水能力上、下限。

2.3.3 省外调水量约束

省外调水量主要由台儿庄泵站从骆马湖抽水北调完成,为满足省外调水量,骆马湖前期储存的出省水量与该时段抽调入骆马湖水量之和应满足该时段省外调水量的要求。省外调水量约束条件为

$$W_{\text{leu},t-1} + W_{\text{lin},t} \geq W_{\text{les},t} \tag{4}$$

式中: $W_{\text{leu},t-1}$ 为 t 时段初骆马湖储存的出省水量; $W_{\text{lin},t}$ 为 t 时段调入骆马湖的总水量; $W_{\text{les},t}$ 为 t 时段由骆马湖向省外调出的水量。

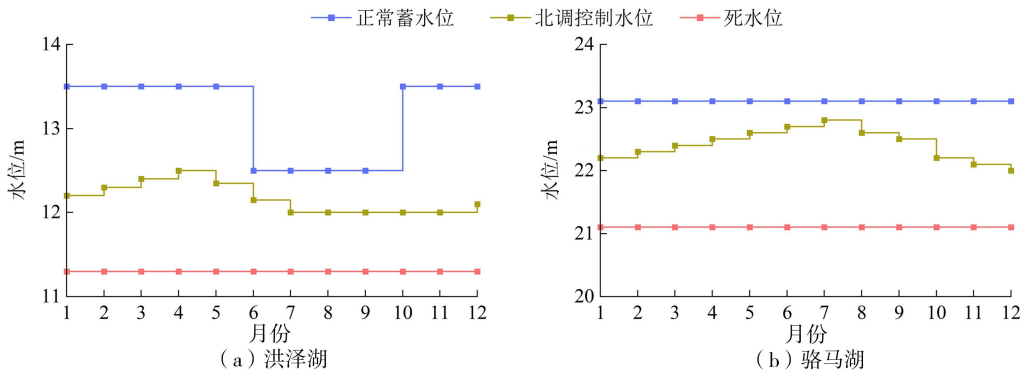


图2 调蓄湖泊逐月特征水位

Fig. 2 Monthly characteristic water level of regulation and storage lakes

2.3.4 省内供水约束

系统须承担江苏省苏北地区受水区的供水任务,即某时段内供给某受水区的总水量需满足该受水区在该时段内的总需水量。以实际调度过程中受水区区间供水量作为该区间的需水量,在模型中该约束与河道输水损失合并考虑。省内供水约束条件为

$$W_{in,at} \geq W_{u,at} \quad (5)$$

式中: $W_{u,at}$ 为 a 受水区 t 时段的总需水量; $W_{in,at}$ 为 t 时段供给 a 受水区的总水量。

2.4 求解方法

2.4.1 求解算法

针对动态规划算法在求解复杂水资源系统优化调度方案中存在的维度灾难问题,本文提出采用 DPSA-POA 进行模型求解^[20-22]。动态规划逐次逼近算法(DPSA)可将 n 维动态规划问题分解成 n 个一维子问题并求解这些子问题,计算量显著降低。逐步优化算法(POA)将多阶段问题转换为多个两阶段子优化问题,有效降低了每个阶段的遍历组合数量,同时 POA 通过采用给定离散步长的网格搜索法能保证求解子问题的收敛性。采用 DPSA-POA 求解模型,可进一步降低计算量。求解步骤为:①输入基本资料,包括区间供水量、湖泊来水数据、省外调水量等;②拟定初始轨迹,将所有输水路线划分为 6 条线路(洪泽湖至骆马湖区间 3 条,长江至洪泽湖区间 3 条),各线路初始调度轨迹的确定基于省内外调水量按旬平均分配的原则;③先对线路 1 进行优化,期间保持其他线路运行决策和状态变量不变,利用 POA 求解线路 1 的优化问题,通过调整两阶段状态变量使得目标函数最小,循环迭代多次后得到线路 1 满足精度要求的运行策略;④依次对剩余 5 条线路进行滚动优化。当对线路 n 进行优化时,线路 1~($n-1$)均采用经 POA 优化后的运行策略,线路($n+1$)~6 采用步骤②的初始运行策略;⑤将得到的所有线路运行策略作为初始轨迹,重复步骤③

和④,直至得到满足目标收敛精度要求的结果。

2.4.2 江苏省内外供水关系

模型以实际过程的区间供水量作为苏北地区最小供水量,在满足苏北地区最小供水量的约束下获得可调水出省最大水量,然后减小省外调水量,得到相应省外调水量下的苏北地区最大可供水量。按照以下步骤计算省内最大可供水量:①在来水条件一定的约束下,将各区间实际供水值乘以相同倍率,作为该区间增加的供水量。以 0.1 倍为步长逐步增加该倍率,直至无法完成省外调水任务。②在步骤①的基础上,仍然以特定省外调水量为约束,按照均衡缺水压力、共担干旱风险的原则,分析得出由于泵站输水能力限制不能增加供水的区间,其余区间以 0.1 倍为步长逐步增加区间供水倍率,直至无法完成省外调水任务。重复步骤②直至所有泵站区间供水倍率无法增加,获得各泵站区间的最大供水量。③泵站受输水能力限制,在上述步长增加的情况下容易达到其设计流量,相比之下,闸门下泄流量远大于泵站设计流量。因此,在步骤②的基础上,以特定调水量为约束,继续增加二河闸以下区间和高良涧闸以下区间的耗水倍率,直到获得闸门处的最大可供水量。④将以上区间倍率下的供水量作为省内可供水量的最大值。

2.5 工况设置

东线二期工程建成后,省外调水时间为 9 月 11 日至次年 6 月 10 日,本文以 9 月中旬至次年 9 月上旬为一个水文年开展研究。根据苏北地区来水情况划分水文年,以 2016 年 9 月中旬至 2017 年 9 月上旬为典型平水年,2017 年 9 月中旬至 2018 年 9 月上旬为典型丰水年,2018 年 9 月中旬至 2019 年 9 月上旬为典型枯水年。

根据不同省外调水量、省内区间供水量和工程状况,本文构建了 4 种工况,分析不同工况对苏北地区供水格局的影响,工况设置如表 2 所示,表中 $W_{\max}$ 为东线二期工程建成前后满足苏北地区最小供水

表 2 模型工况设置
Table 2 Model condition settings

工况	省外调水量	省内供水	工程状况	优先级
1	$W_{\max}$	实际供水	东线二期工程建成前	省内供水约束优先于省外调水量约束
2			东线二期工程建成后	
3	$20\% W_{\max}、45\% W_{\max}、70\% W_{\max}$	增加省内供水	东线二期工程建成前	省外调水量约束优先于省内供水约束
4			东线二期工程建成后	

量的可调水出省最大水量。对比工况 1 和工况 3、工况 2 和工况 4,可分析东线二期工程建成前后省内供水总量、省内供水与省外调水的竞争关系;对比工况 3 和工况 4,可分析东线二期工程建成后对省内供水区间的影响。

3 结果与分析

3.1 模型验证

以典型枯水年(2018—2019 年)为例,采用实际来水、省内供水、省外调水量作为模型输入量,将模型调度结果与实际调度情况进行对比,分析模型优化调度合理性,验证模型的可靠性。东线二期工程建成前省外调水时间为 12 月至次年 5 月,非省外调水期为 6—11 月,故本文模型验证以 12 月至次年 11 月作为一个水文年。

在 3 大水源中,长江可视作稳定水源,骆马湖在枯水期间一般来水较少,淮河干流来水(洪泽湖入湖流量)是决定工程调度方式的关键。12 月上旬至次年 3 月中旬洪泽湖来水相对较多,水位由 12.65 m 逐渐上升至 13.5 m,2 月下旬至 4 月上旬均在淮水可利用水位之上,洪泽湖产生弃水。4 月下旬至 7 月中旬洪泽湖来水偏少,水位逐渐下降至 11.35 m。8 月上旬至 9 月上旬来水增加,水位回升至 12.5 m。9 月中旬至 11 月下旬,洪泽湖来水极少,水位逐渐下降至 11.84 m。典型枯水年洪泽湖逐旬入湖水量和水位过程如图 3 所示。

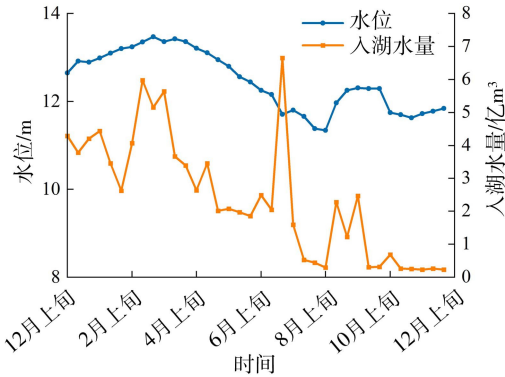


图 3 枯水年洪泽湖逐旬入湖水量和水位过程
Fig.3 Inflow and water level processes of Hongze Lake for each ten-day period in low flow year

结果显示,该模型可根据不同水源来水情况,科学决策水源、线路切换时机以及运用策略,通过充分利用淮水,在满足调水量前提下降低运行成本。在淮水可利用前,预计洪泽湖 2 月下旬将产生弃水,故该时段较实际调度减少了抽江水量。在淮水可利用时(2 月下旬至 4 月上旬),实际调度以徐洪河线最大能力抽淮水北调出省,洪泽湖产生弃水;实施优化调度后,徐洪河、中运河双线抽淮水北调出省,与实际调度情况相比,向骆马湖多存储水量 2.8 亿 m³,将减少洪泽湖弃水量 1.27 亿 m³,洪泽湖不产生弃水。淮水不可利用后,优化调度 4 月上旬即可完成省外调水任务,较实际情况提前 1 月结束。模型优化调度选取的时机合理,且符合调度规则。优化调度与实际调度结果对比如图 4 和图 5 所示。

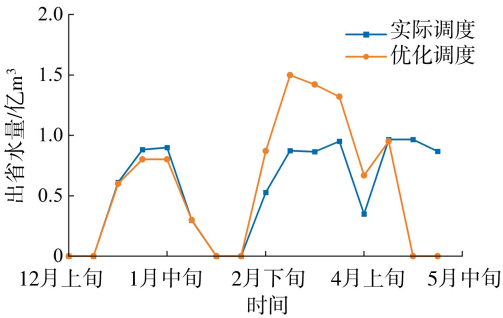


图 4 枯水年优化调度与实际调度下出省水量对比
Fig.4 Comparison of out-of-province water diversion under optimal and actual scheduling in low flow year

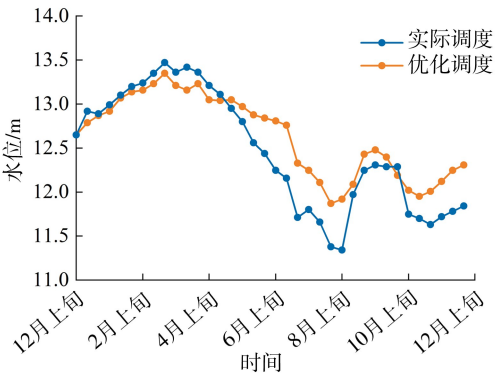


图 5 枯水年优化调度与实际调度下洪泽湖水位对比
Fig.5 Comparison of water level of Hongze Lake under optimal and actual scheduling in low flow year

3.2 供水总量

东线二期工程建成后可显著增加苏北地区供水

总量,还可优化多水源综合利用,充分挖掘湖泊调蓄能力,减少湖泊弃水。丰、平、枯典型水文年向苏北地区供水量最大可分别增加 16.5 亿、13.8 亿、10.5 亿 m^3 , 相较工程建成前分别提升约 12.6%、12.5%、12.0%。一方面,由于抽江泵站输水能力提升,利用江水向苏北地区和省外调水的能力提升;另一方面,徐洪河线工程能力提升,在洪泽湖来水丰沛时,对洪泽湖水源的利用率提高。如枯水年 11 月上旬,东线二期工程建成前可抽江水 2.39 亿 m^3 , 省内供水 1.56 亿 m^3 ; 工程建成后,可抽江水 4.41 亿 m^3 , 较工程建成前增加抽江水约 2.02 亿 m^3 , 增加省内供水量约 0.31 亿 m^3 , 增加省外调水量 1.67 亿 m^3 。再如丰水年 1 月洪泽湖来水丰沛,调水工程仅需抽洪泽湖水(淮水)即可满足供水需要;东线二期工程建成前由于洪泽湖梯级泵站工程能力限制,仅可利用 6.3 亿 m^3 淮水,产生约 8.78 亿 m^3 弃水;工程建成后,徐洪河线工程能力提升,可利用 11.6 亿 m^3 淮水用于供水,较工程建成前多利用淮水约 5.3 亿 m^3 , 减少洪泽湖弃水约 5.3 亿 m^3 。

为分析省内供水和省外调水的竞争关系,本文设置了 20% W_{max} 、45% W_{max} 、70% W_{max} 的省外调水量工况(表 2)。为提高不同工况间数据的可比性,工况 3 和工况 4 的省外调水量尽可能相同。通过计算东线二期工程建成前后 20% W_{max} 、45% W_{max} 、70% W_{max} 的省外调水量工况可知,东线二期工程建成前 45% W_{max} 与建成后 20% W_{max} 较为接近,省外调水量平均为 20 亿 m^3 ;东线二期工程建成前 W_{max} 与建成后 45% W_{max} 较为接近,省外调水量平均为 46 亿 m^3 ;东线二期工程建成后 70% W_{max} 的省外调水量为 70 亿 m^3 ,故本文采用了 20 亿、46 亿、70 亿 m^3 省外调水量工况进行分析。结果表明,东线二期工程建成后,随着省外调水量的减少,省内供水总量总体呈增加趋势(图 6),省外调水量每减少 10%,丰、平、枯水年省内供水量分别有 1.5%、1.5%和 2.6%的增

供潜力,其中,徐洪河沿线和中运河沿线区间供水量增供率均分别为 6.9%、3.1%和 3.0%,里运河沿线区间供水量增供率分别为 0.4%、7.1%和 3.8%。

无论以江水还是淮水为主要水源,省外调水和省内供水均为竞争关系。当淮水来水条件好,并以淮水为主要水源时,省外调水量减少使得省内可用淮水量增加,并使省内供水量增加;当淮水来水条件差,而以江水为主要水源或淮水利用量达到工程最大能力时,省外调水量的减少使泵站剩余能力提升,故可供给省内的水量增加。当丰水年省外调水量不足 70 亿 m^3 ,且主要水源为淮水时,随着省外调水量减少,省内可用淮水增加,且徐洪河沿线泵站有剩余能力用于省内供水,使省内供水量增加。枯水年淮水来水较少,且主要水源为江水时,省外调水量减少使得用于省内供水的泵站输水能力逐渐提升,省内供水量增加。平水年省外调水量大于 70 亿 m^3 时,淮水利用量已基本达到工程能力最大值,随着省外调水量的减少,抽江水量减少,剩余泵站输水能力可用于省内供水,使省内供水量增加。

由于区间需水过程和水源来水过程不完全匹配或泵站输水能力限制,可能存在省外调水量减少而省内供水量无法增加的情况。平水年省外调水主要依赖洪泽湖来水集中时的淮水,省外淮水利用量最大为 56.89 亿 m^3 (图 7),当省外调水量不超过 70 亿 m^3 时,省外淮水利用量为 10.61 亿~54.37 亿 m^3 ,表明淮水未能完全利用,故制约省内供水量增加的时段为洪泽湖来水较少的特定时段(6 月上旬),此时省内供水和省外调水不存在竞争关系,省外调水量减少,省内供水量不变。丰水年徐洪河沿线区间和中运河沿线区间需水量集中在洪泽湖来水丰沛的时期(淮水可利用时期),其余时段需水量接近于 0,制约这两个区间省内可供水量增长的因素是淮水可利用时期的泵站输水能力。当省外调水量为 70 亿~111.8 亿 m^3 时,省外淮水利用量均为最大值

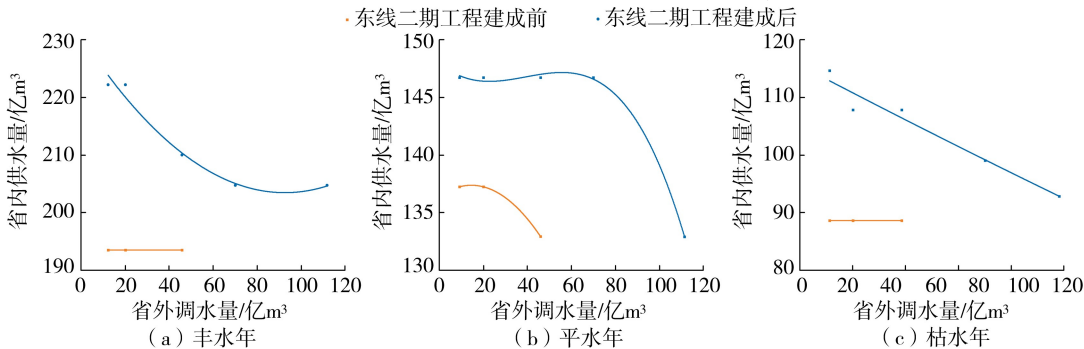


图 6 不同典型水文年省内供水量和省外调水量的关系

Fig. 6 Relationship between volumes of provincial water supply and out-of-province water diversion in different typical hydrological years

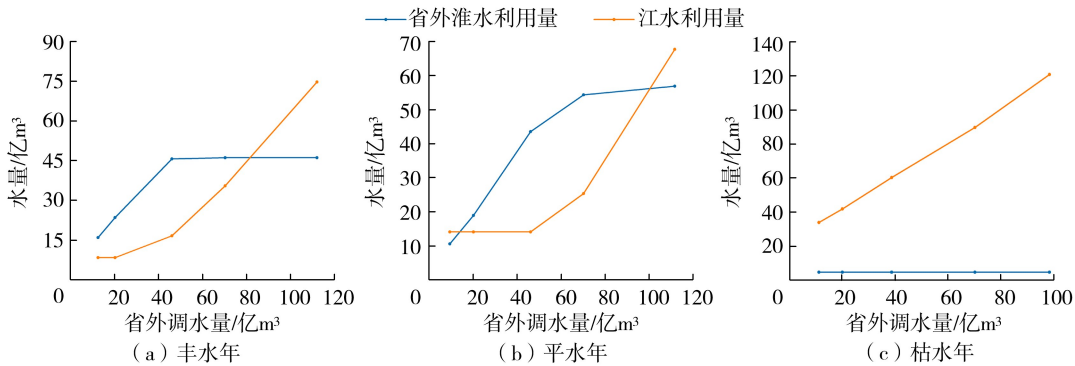


图 7 东线二期工程建成后典型水文年江水和淮水利用量

Fig. 7 Utilization of water from the Yangtze River and the Huaihe River in typical hydrological years after completion of second phase of the Eastern Route Project

46.18 亿 m^3 (图 7), 表明淮水可利用时期的泵站输水能力已经达到最大值, 因此这两个区间的供水量没有变化; 丰水年洪泽湖以南区间供水量受 10 月上旬江都站和宝应站泵站输水能力限制而不能增加, 省内供水总量不变。

3.3 峰值能力

每年 6 月是江苏省内农业用水高峰时期, 正值枯汛转换时段, 洪泽湖来水存在较大不确定性, 因此该时段也是省内用水矛盾最为突出的阶段。典型丰、平、枯水年苏北地区 6 月实际供水量为 32.43 亿、35.17 亿、25.37 亿 m^3 , 各受水区区间供水量如表 3 所示。二河闸以下、高良涧闸以下、里运河和淮安—淮阴区间在不同典型水文年调水工程供水量变化较大, 枯水年供水更依赖于泵站抽调长江水。里运河和淮安—淮阴区间供水量主要用于里下河片区灌溉, 丰水年本地水源能满足部分农业用水, 需要抽调长江水较少, 而枯水年该区间用水对江水依赖大, 因此, 里运河和淮安—淮阴区间枯水年调水工程供水量远大于丰水年。枯水年由于洪泽湖水位较低, 为保证生态需水, 二河闸以下和高良涧闸以下区

间供水量较其余年份供水量大幅减少。经调度模型计算, 现状工程能力下, 丰、平、枯水年苏北地区 6 月可供水量最大分别可以达到 52.73 亿、45.89 亿、26.68 亿 m^3 。

东线二期工程建成后, 枯水年省外调水量小于 80 亿 m^3 时以及在丰水年和平水年将不影响现状用水高峰期省内用水。东线二期工程规划调水时间与苏北地区农业用水高峰期在 6 月上旬存在 10 d 重合期。为腾出库容迎接汛期来水, 当洪泽湖来水较为丰沛时, 6 月上旬洪泽湖需弃水至汛限水位, 此时东线二期工程省外调水量主要来自洪泽湖弃水量, 且仍可维持洪泽湖的水位, 不影响高峰期用水。如图 8 所示, 丰水年省外调水量为 46 亿 m^3 时, 东线二期工程建成后 6 月上旬可多利用 1.8 亿 m^3 洪泽湖弃水进行省内供水, 并维持洪泽湖水位 12.75 m 不变, 该工况下不影响省内高峰期用水。省外调水量较小或者洪泽湖来水较少时, 可以利用东线二期工程新增加的泵站输水能力抽江水进行省外调水, 也不影响省内用水高峰期供水。

表 3 典型水文年苏北地区 6 月各受水区区间实际供水总量

Table 3 Total actual water supply volume of each water-receiving section in northern Jiangsu Province in June of typical hydrological years			
受水区间	供水总量/亿 m^3		
	平水年	丰水年	枯水年
二河闸以下	14.11	15.68	10.76
高良涧闸以下	7.65	6.49	0.14
里运河	8.43	3.75	8.57
淮安—淮阴	0.87	0.10	2.20
金湖—洪泽	0.00	0.13	0.28
泗阳—刘老涧	1.26	2.04	1.53
刘老涧—皂河	2.60	2.21	1.38
泗洪—睢宁	0.00	0.00	0.26
睢宁—邳州	0.00	2.04	0.61
总计	35.17	32.43	25.73

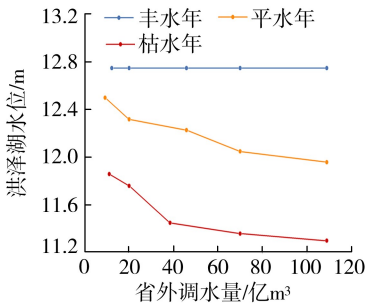


图 8 不同典型水文年不同工况下 6 月上旬洪泽湖水位
Fig. 8 Water level of Hongze Lake in early June under different working conditions in different typical hydrological years

东线二期工程建成后, 随着省外调水量的减少, 省内用水高峰期供水总量总体呈现增加趋势, 省外调水量每减少 10%, 丰、平、枯水年省内高峰期供水

量分别具有 12.7%、9.7% 和 10.0% 的增供潜力,如图 9 所示。省外调水期与省内用水高峰期存在 10 d 重合期,即存在用水竞争关系,因此,用水高峰期省内供水总量与省外调水量的变化趋势同供水总量类似。

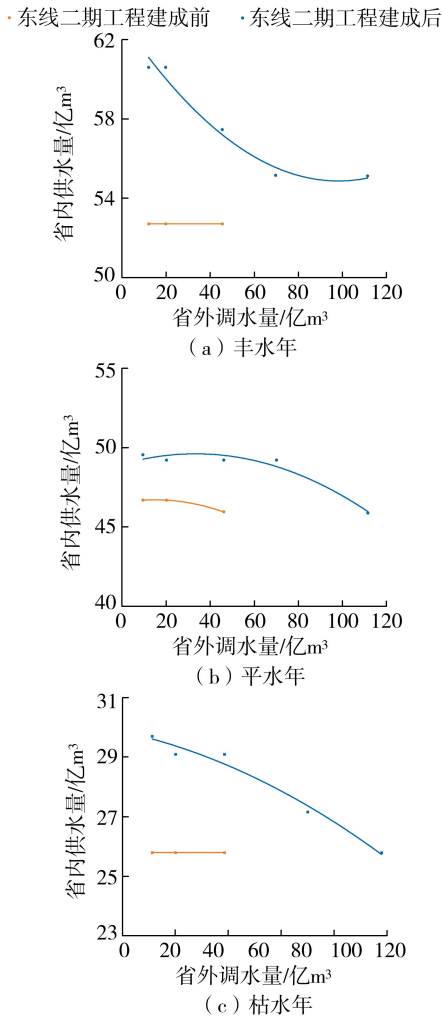


图 9 不同典型水文年 6 月用水高峰期省内供水量和省外调水量关系

Fig. 9 Relationship between volumes of provincial water supply and out-of-province water diversion during peak water demand in June in different typical hydrological years

东线二期工程建成后,在洪泽湖来水少且省外调水量较大时,省内用水高峰期可供水量减少。从图 9 可以看出,枯水年省外调水量超过 80 亿 m^3 后,省外调水量每增加 10 亿 m^3 ,省内用水高峰期可供水量将减少 0.49 亿 m^3 。供水量减少的区间为二河闸以下、徐洪河沿线和中运河沿线区间,如图 10 所示。枯水年省外调水量超过 80 亿 m^3 时,工程运行时间和输水量更大,使得洪泽湖输水损失增加约 0.54 亿 m^3 ,6 月初洪泽湖水位更低,已接近死水位 11.3 m (图 8),因此二河闸以下区间可供给水量减少。在满足省内最小供水需求的前提下,受洪泽湖

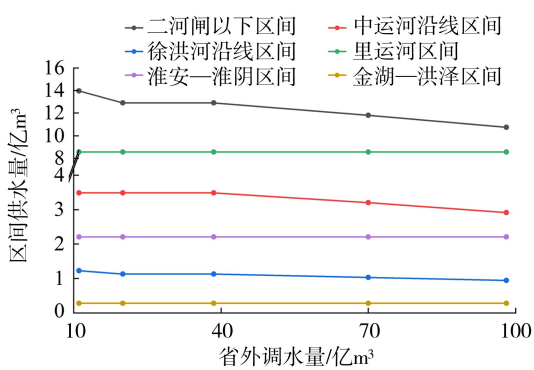


图 10 枯水年不同受水区间供水量随省外调水量变化
Fig. 10 Water supply volume to different water-receiving sections in low flow year varying with volume of out-of-province water diversion

以南泵站输水能力限制,抽引长江水北调仅能满足洪泽湖以南沿线用水,为维持洪泽湖不低于死水位,徐洪河沿线及中运河沿线区间不能增加供水,因此用水高峰期省内可供水量减少。

4 结 论

a. 从省内外供水总量变化角度分析了东线二期工程建成后省外调水和省内供水竞争关系。东线二期工程建成后能显著增加苏北地区供水总量,且随着省外调水量的减少,省内供水总量总体将呈现增加趋势。工程建成后,丰、平、枯典型水文年向苏北地区供水量最大可分别增加 16.5 亿、13.8 亿、10.5 亿 m^3 ,提升约 12.6%、12.5%、12.0%;省外调水量每减少 10%,丰、平、枯典型水文年省内可供水量分别具有 1.5%、1.5% 和 2.6% 的增供潜力。

b. 从各区间供水总量变化角度分析了东线二期工程建成后省内不同片区增供潜力。徐洪河沿线和中运河沿线区间供水总量增供率相同,丰、平、枯典型水文年分别为 6.9%、3.1% 和 3.0%,里运河沿线区间供水量增供率分别为 0.4%、7.1% 和 3.8%。

c. 从高峰期供水总量变化角度分析了东线二期工程建成后省内用水高峰期供水峰值保障能力。工程建成后,丰水年和平水年能满足现状用水高峰,枯水年当省外调水量超过 80 亿 m^3 时,省外调水量每增加 10 亿 m^3 ,省内用水高峰期可供水量将减少 0.49 亿 m^3 。

参考文献:

[1] 刘欢,甘永德,杨钦,等. 基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价[J]. 水资源保护,2024,40(5):62-68. (LIU Huan, GAN Yongde, YANG Qin, et al. Adaptability evaluation of water resources and associated elements based on perspective of water network [J]. Water

- Resources Protection,2024,40(5):62-68. (in Chinese))
- [2] 许继军,张晓琦,周涛,等. 引江补汉工程实施后的南水北调中线水源工程可调水量分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(4):790-799. (XU Jijun, ZHANG Xiaoqi, ZHOU Tao, et al. Analysis on the adjustable water volume of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project after the implementation of the water diversion from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2023,21(4):790-799. (in Chinese))
- [3] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))
- [4] 徐蕴韵,吴昊,李永泰,等. 南水北调东线江苏段用水结构及其时空演变[J]. 水资源保护,2022,38(2):97-102. (XU Yunyun, WU Hao, LI Yongtai, et al. Water consumption structure and its temporal and spatial evolution in Jiangsu section of east route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):97-102. (in Chinese))
- [5] 闻昕,黄抒艺,谭乔凤,等. 江苏省南水北调多工程多目标联合优化调度方法[J]. 水资源保护,2023,39(5):118-124. (WEN Xin, HUANG Shuyi, TAN Qiaofeng, et al. A multi-objective joint optimal operation method for the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):118-124. (in Chinese))
- [6] ROOZBAHANI A, GHASED H, SHAHEDANY M H. Inter-basin water transfer planning with grey COPRAS and fuzzy COPRAS techniques;a case study in Iranian Central Plateau[J]. Science of the Total Environment,2020,726:138499.
- [7] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55. (CHEN Xiaonan, JIN Yanguo, XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):46-55. (in Chinese))
- [8] 贾丹妮,武连洲,栗晓玲,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] WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang, et al. Multi-objective optimal operations based on improved NSGA-II for Hanjiang to Wei River water diversion project, China[J]. Water,2019,11(6):1159.
- [10] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):51-58. (in Chinese))
- [11] 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. (WANG Zongzhi, TAN Liting, GENG Min, et al. Reservoir optimal operation considering water transfer and supply rules[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):15-21. (in Chinese))
- [12] 刘攀,桑学锋,张思琦,等. 多水源多用户水资源时空动态适配方法研究[J]. 水资源保护,2025,41(1):123-130. (LIU Pan, SANG Xuefeng, ZHANG Siqi, et al. Research on spatiotemporal dynamic adaptation method for multi-source and multi-user water resources[J]. Water Resources Protection,2025,41(1):123-130. (in Chinese))
- [13] 郭玉雪,张劲松,郑在洲,等. 南水北调东线工程江苏段多目标优化调度研究[J]. 水利学报,2018,49(11):1313-1327. (GUO Yuxue, ZHANG Jinsong, ZHENG Zaizhou, et al. Study on multi-objective optimal operation of Jiangsu section of South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(11):1313-1327. (in Chinese))
- [14] 郭旭宁,雷晓辉,李云玲,等. 跨流域水库群最优调供水过程耦合研究[J]. 水利学报,2016,47(7):949-958. (GUO Xuning, LEI Xiaohui, LI Yunling, et al. Study on coupling of optimal water transfer and supply process for inter-basin water-transfer multi-reservoir system[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(7):949-958. (in Chinese))
- [15] 彭安帮,牛凯杰,胡庆芳,等. 永定河流域多水源配置与水库群优化调度[J]. 水科学进展,2023,34(3):418-430. (PENG Anbang, NIU Kaijie, HU Qingfang, et al. Allocation of multiple water sources and optimal operation of reservoir group in the Yongding River Basin[J]. Advances in Water Science,2023,34(3):418-430. (in Chinese))
- [16] 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. Analysis of water transfer potential of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection,

2025,41(1):42-48. (in Chinese))

[17] 唐瑜,宋献方,马英,等. 基于优化配置的南水北调受水区水资源价值研究[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(1):189-194. (TANG Yu, SONG Xianfang, MA Ying, et al. Study on water resources value in the intake area of the South-to-North Water Diversion Project based on water resources optimization[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 189-194. (in Chinese))

[18] 张平. 南水北调工程受水区资源优化配置研究[D]. 南京:河海大学,2006.

[19] 宋丹丹,杨树滩,常本春,等. 江苏省南水北调受水区水资源配置[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(3):417-421. (SONG Dandan, YANG Shutan, CHANG Benchun, et al. Research of water resources allocation of Jiangsu intake district of South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 417-421. (in Chinese))

[20] HE Zhongzheng, WANG Chao, WANG Yongqiang, et al. Dynamic programming with successive approximation and relaxation strategy for long-term joint power generation scheduling of large-scale hydropower station group [J]. Energy, 2021, 222: 119960.

[21] 邓乐乐,郭生练,何绍坤,等. 雅砻江梯级电站发电优化调度研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(2): 109-116. (DENG Lele, GUO Shenglian, HE Shaokun, et al. Optimal operation of Yalong River's cascade reservoirs [J]. Journal of Water Resources Research, 2019, 8(2): 109-116. (in Chinese))

[22] LI Shuliang, HE Zhongzheng, HUANG Wei, et al. Study on the constraint handling method for high-dimensional optimization of cascade reservoirs [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449: 141784.

(收稿日期:2024-09-24 编辑:施业)

+++++

(上接第 78 页)

[14] 方国华,金德钢,刘俊,等. 甬江流域河网水利计算模型研究及应用[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 41-45. (FANG Guohua, JIN Degang, LIU Jun, et al. Study and application of hydro-calculation model in river network of Yongjiang River Basin [J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(2): 41-45. (in Chinese))

[15] 徐贵泉,陈长太,唐迎洲. 上海市分片水资源调度方案优化[J]. 水资源保护, 2013, 29(6): 80-84. (XU Guiquan, CHEN Changtai, TANG Yingzhou, et al. Scheme optimization of water resources regionalization scheduling in Shanghai City [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(6): 80-84. (in Chinese))

[16] 吴浩云,刘敏,金科,等. 多目标驱动的太湖调度水位研究[J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 1009-1021. (WU Haoyun, LIU Min, JIN Ke, et al. Research on multi-objective driven dispatching water level of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(3): 1009-1021. (in Chinese))

[17] 刘芹,方国华,孙洪滨,等. 环状河网堰闸过流追赶系数计算方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2015, 30(5): 571-579. (LIU Qin, FANG Guohua, SUN Hongbin, et al. Study on calculation method of chasing coefficient of weir sluice flow in looped river networks [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(5): 571-579. (in Chinese))

[18] 陈鹏飞,顾世祥,谢波,等. 分解协调技术在水资源大系统优化配置中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2006(11): 44-47. (CHEN Pengfei, GU Shixiang, XIE Bo, et al. Application of decomposition-coordination technique in optimal allocation of large-scale water resources system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(11): 44-47. (in Chinese))

[19] 刘晋,胡永辉,刘夏. 多目标协同下水系连通调度模拟[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 15-23. (LIU Jin, HU Yonghui, LIU Xia. Simulation on water system connected dispatching under multi-object cooperation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(6): 15-23. (in Chinese))

[20] 杨开斌,许浩,李天庆,等. 马斯京根系列方法在金沙江“11·03”白格堰塞湖溃决洪水演进中的应用[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 71-74. (YANG Kaibin, XU Hao, LI Tianqing, et al. Application of Muskingum methods in dam-breach flood routing of “11·03” Baige Barrier Lake on Jinsha River [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 71-74. (in Chinese))

[21] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 10-18. (in Chinese))

[22] 陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 111-119. (TAO Jie, WANG Peilin, WANG Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 111-119. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-09 编辑:王芳)