

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230412001

文章编号: 1672-9331(2024)05-0001-12

引用格式: 黄草, 周楚琪, 杨忆昕, 等. 洞庭湖北部枯水位变化及其对闸泵供水影响分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(5): 1-12.

Citation: HUANG Cao, ZHOU Chuqi, YANG Yixin, et al. Analysis of water level variations during dry season and its impact on water supply of gate-pump system in northern Dongting Lake [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(5): 1-12.

洞庭湖北部枯水位变化及其对闸泵供水影响分析

黄草^{1,2}, 周楚琪¹, 杨忆昕¹, 沈宏晖³, 汤小俊³, 赵敏³

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省洞庭湖水利事务中心, 湖南 长沙 410007)

摘要:【目的】明确三峡工程运行后洞庭湖北部枯水期延长和枯水位下降对域内闸泵系统供水效率的不利影响, 并评估洞庭湖北部分片补水二期工程建成后闸泵系统供水效率的恢复情况, 为提出闸泵系统整改和新建方案, 以及优化区域重大水资源配置工程规划提供决策依据。【方法】基于1988—2017年研究区主要水文/水位站的逐日水位数据, 采用聚类分析、趋势检验等方法, 研究三峡工程运行前后研究区枯水期持续时长及枯水位的变化趋势, 对比分析洞庭湖北部分片补水二期工程建成前后各垸的水源结构、供水方式及闸泵供水效率的差异。【结果】在三峡工程运行后, 研究区枯水期整体提前并延长1.4~13.7 d, 枯水期平均水位下降约0.30~0.42 m; 在分片补水二期工程实施后, 不同供水水源的供水量将趋于均衡, 平水年、枯水年和特枯年闸群的平均供水效率将分别提高2.8%、2.1%和12.9%, 泵群的平均供水效率将分别下降74.2%、45.5%和47.3%。【结论】自三峡工程运行以来, 研究区枯水期的水文情势发生了显著变化, 分片补水二期工程的实施可较好地缓解区域缺水问题, 建议后续可撤销该区域内低效闸泵, 同时完善蓄水工程和跨垸调水工程。

关键词: 洞庭湖北部; 枯水位变化; 水资源配置; 闸泵系统; 供水效率

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

Analysis of water level variations during dry season and its impact on water supply of gate-pump system in northern Dongting Lake

HUANG Cao^{1,2}, ZHOU Chuqi¹, YANG Yixin¹, SHEN Honghui³, TANG Xiaojun³, ZHAO Min³

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Key Laboratory of Water Environment Treatment and Water Ecological Restoration in Dongting Lake, Changsha 410114, China; 3. Dongting Lake Water Conservancy Affairs Center of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to clarify the adverse effects of prolonged dry seasons and low water levels in northern Dongting Lake on the water supply efficiency of the gate-pump system within the area after the operation of the Three Gorges Project and evaluate the recovery of water supply efficiency of the gate-pump system after the completion of the second phase of the Zoned Water Refill Project in northern Dongting Lake, so as to provide a reference for the decision-making of the rectification and construction plan of the gate-pump system and the optimization of the regional major water resources allocation project planning. [Methods] Based on the daily

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-05-08; 接受日期: 2023-06-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52179004); 湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-11、XSKJ2019081-40)

通信作者: 黄草(1985—)(ORCID: 0000-0002-3299-8878), 男, 副教授, 主要从事水资源配置和水资源管理方面的研究。E-mail: huangcao@csust.edu.cn

water level data of main hydrological/water level stations in the study area from 1988 to 2017, cluster analysis and trend testing were used to study the duration and variation of low water levels during the dry season before and after the operation of the Three Gorges Project. The differences in water source structure, water supply types, and water supply efficiency of the gate-pump system of each embankment before and after the completion of the second phase of the Zoned Water Refill Project were compared. **[Findings]** After the operation of the Three Gorges Project, the dry season of the study area is advanced and extended by 1.4–13.7 d, and the average water level during the dry season decreases by about 0.30–0.42 m. After the implementation of the second phase of the Zoned Water Refill Project, the water supply of different water sources will be more balanced. The average water supply efficiency of the gate group increases by 2.8%, 2.1%, and 12.9% in normal, dry, and ultra-dry years, and the average water supply efficiency of the pump group decreases by 74.2%, 45.5%, and 47.3% respectively. **[Conclusions]** Since the operation of the Three Gorges project, the hydrological regime of the study area during the dry season has changed significantly. The implementation of the second phase of the Zoned Water Refill Project can alleviate the regional water shortage problem. It is suggested that the inefficient gate-pump system in the study area can be removed later, and the water storage project and cross-embankment water transfer project can be supplemented.

Key words: northern Dongting Lake; low water level variation; water resource allocation; gate-pump system; water supply efficiency

Foundation items: Project (52179004) supported by General Project of the National Natural Science Foundation of China; Projects (XSKJ2019081-11, XSKJ2019081-40) supported by Water Conservancy Technology Projects of Hunan Province

Corresponding author: HUANG Cao (1985—) (ORCID: 0000-0002-3299-8878), male, associate professor, research interest: water resource allocation and reservoirs operation. E-mail: huangcao@csust.edu.cn

0 引言

洞庭湖北部属于长江中下游平原地区。域内河网交错^[1],后经人们在此不断筑堤防洪,形成了若干个独特的地理结构——垸。各个垸之间的水系相对独立,与垸外水系的交互主要通过堤垸的闸泵系统进行调节,即涝时通过排水泵闸向垸外排水,旱时通过闸(泵)站从垸外进行取水。此外,由于区域内地势平坦,没有合适的条件建设骨干蓄水工程,自身水资源调蓄能力有限,因此闸泵系统在洞庭湖北部地区的水资源配置中扮演了非常重要的角色。近20年来,受江湖关系演变影响,洞庭湖北部枯水期提前及枯水位下降的现象极为明显,这导致区域内闸泵系统的实际供水能力与设计供水能力相差甚远,部分闸泵全年无水可取或河湖水位长期低于闸泵取水水位,供水能力丧失。为了全面了解洞庭湖北部垸外水系的水位变化情

况,并分析其变化对闸泵系统供水效率的不利影响,以及探讨在洞庭湖北部分片补水一期和二期工程建成后,该区域闸泵系统供水效率能否恢复,本文针对洞庭湖北部水系枯水期水位变化规律,以及不同工况下闸泵系统的供水特点和供水效率展开研究。该研究为进一步提出配套的闸泵系统整改和新建方案,以及完善洞庭湖北部地区水资源配置工程规划,提供技术支持和决策参考。

目前,已有诸多学者针对变化环境下的洞庭湖水文情势演变进行了大量研究。隆院男等^[2]、郭文献等^[3]、帅红等^[4]、穆锦斌等^[5]基于数理统计方式研究了洞庭湖区、“三口水系”(不含华容河)的水文情势变异情况与驱动因素,发现洞庭湖区水文情势受自然因素与人为因素共同影响,“三口水系”分流比在过去的60年间显著下降,属中度水文改变。徐幸仪等^[6]、钟小敏等^[7]、朱玲玲等^[8]、赖锡军等^[9]探讨了水利工程建设对洞庭湖区域特征水位变化的影响,认为三峡水库运行后,城陵矶与

洞庭湖出口段的长江干流年均水位抬高,“三口水系”的分流量总体减少。黄群等^[10]、孙思瑞等^[11]通过径流还原模拟三峡工程对城陵矶流量过程的调节作用,并指出三峡工程蓄水将引起城陵矶秋季水位显著下降。黄草等^[12]、李景保等^[13]基于趋势检验分析了“四口水系”水资源量、断流时间的演变规律,发现在三峡工程运行后,“四口水系”年径流量减少,区域断流天数呈持续性缓慢增长趋势。李景保等^[14]、贺秋华等^[15]基于径流资料统计数据 and 遥感影像,识别洞庭湖区的水资源量变化情况,认为三峡水库运行后洞庭湖区的水资源总量减少。

上述研究着重探讨了大型水利工程(群)调度运行对洞庭湖水资源和人文情势演变的影响,且取得了较好的研究进展^[16-19]。然而,与之对应的河湖水文情势的改变对洞庭湖北部供水工程影响的研究仍显不足。

受江湖关系变化及极端气候的影响,洞庭湖北部水资源演变加剧,区域水资源短缺风险增加^[20-22]。针对这一问题,湖南省实施了洞庭湖北部分片补水一期工程,启动了洞庭湖北部分片补水二期工程,规划了洞庭湖“四口水系”综合整治工程等。这些工程极大地提高了区域的水资源配置能力。文献[23]基于这些新建或规划工程,建立了以垸为基本配置单元的洞庭湖北部多闸泵系统水资源优化配置模型,研究分析了不同工况下该区域水资源优化配置方案,以及各垸的供缺水时空特征。基于此,本文通过进一步分析1988—2017年洞庭湖北部枯水位变化规律,研究区域水文情势变化对供水(闸泵)工程产生的不利影响,探讨闸泵系统的供水状况与供水变化,揭示分片补水二期工程对闸泵引水效率的补偿效果。该研究可为解决区域水资源供需矛盾,提高水资源精细化管理水平及完善区域水资源配置工程规划提供决策支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖北部松滋河、虎渡河、藕池河、华容河构成的“四口水系”不仅是连接长江与洞庭湖的重要纽带,还是长江水沙流入洞庭湖的重要通道,从

而使江湖关系变得更加复杂。这一区域不仅是我国生态环境保护的重要区域,也是湖南省生态文明建设的战略要点。自20世纪60年代以来,受人类重大活动与气候因素变化的影响,荆江与洞庭湖的江湖关系发生了深远的改变,且这一改变对“四口水系”的水文情势产生了显著影响。

本文研究区涉及岳阳君山区、华容县,益阳沅江市、南县,常德安乡县5个地区,地处澧水洪道以东,草尾河以北,东洞庭湖以西,属于湖南省境内“四口水系”地区,总面积约为4 261 km²。因研究区内河网水系复杂,闸泵众多,故本文仅选取区域内具有代表性的5个水文测站(安乡、南咀、小河咀、大湖口、罗文窖),并依据这5个站点1988—2017年间的日水位数据,分析区域河道水系的枯水位变化情况。同时,本文将研究区内的500余座引水闸(泵)站进行概化,即将同一河段向同一垸系供水的若干个功能相近的闸(泵)概化为一个虚拟闸(泵),将各虚拟闸(泵)站供水能力定义为这些闸(泵)供水能力之和,进而分析研究区枯水位变化对闸泵系统供水的影响。研究区地理位置如图1所示。

1.2 研究方法

1.2.1 枯水位持续时长分析方法

本研究基于聚类指标——和方差分析各典型测站枯水期持续时长^[24],以日平均水位为输入,将水位序列依据时间划分为枯水期及丰水期两类数据簇,计算各数据簇的聚类中心及聚类平方和,迭代丰水期的起讫时间并最小化聚类平方和,进而分析区域枯水期的持续时长。上述聚类方式的基本原理如下:

$$J = \sum_{j=1}^k \omega_j \sum_{x_i \in C_j} (x_i - u_j)^2 \quad (1)$$

式中: J 为各数据簇的聚类平方和; k 为数据簇数; ω_j 为数据簇 j 的聚类权重; C_j 为数据簇 j 的数据集; x_i 为数据点 i 的空间位置; u_j 为数据簇 j 的聚类中心。

1.2.2 枯水位变化趋势检验方法

本文基于Mann-Kendall趋势检验(MK检验)和Spearman RHO检验(SR检验)^[25],将研究区各测站1988—2017年枯水期(10月—次年4月)的持续时长、平均水位、最高月水位作为输入数据,分析研究区枯水期水位的变化规律。

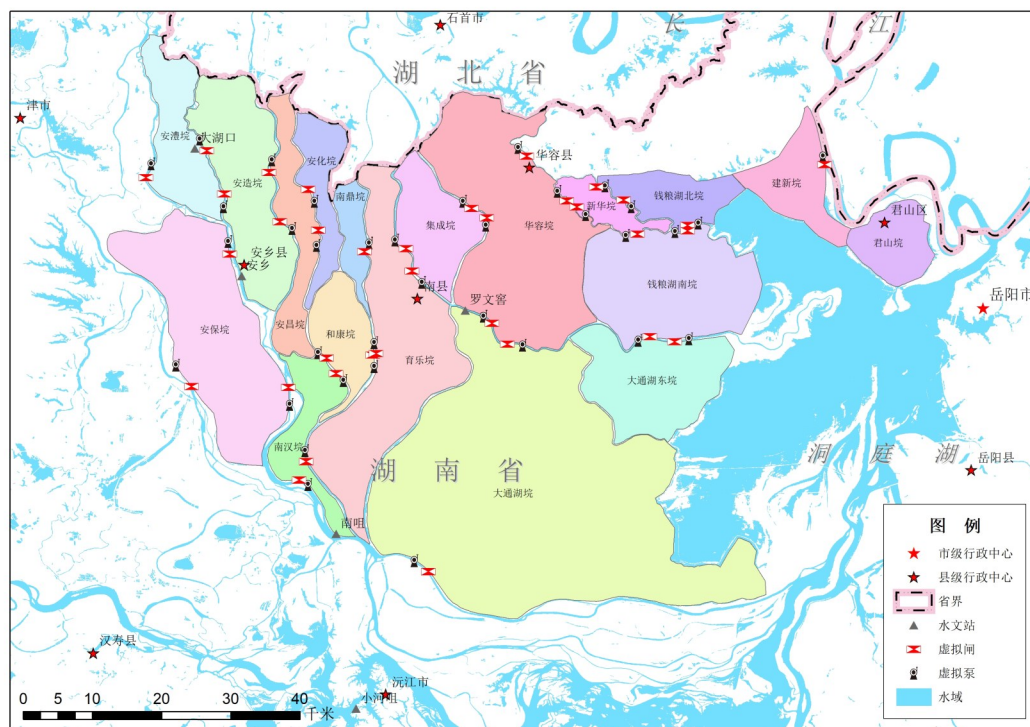


图1 研究区地理位置及水系图

Fig. 1 Geographical location and water system map of study area

1.2.3 闸泵系统供水效率分析方法

在水资源配置领域,有学者认为渠道供水效率应充分考虑渠道设计流量与实际过流间的差异^[26]。本文将闸(泵)供水效率定义为闸门(泵站)的实际年引水量与设计年引水能力的比值,即

$$\eta_i = \frac{W_i}{W_{i\text{设}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η_i 为闸*i*或泵*i*的供水效率; W_i 为闸*i*或泵*i*的实际年引水量; $W_{i\text{设}}$ 为闸*i*或泵*i*的设计年引水能力。

文献[23]模拟分析了现状工程、远期工程(分片补水二期工程完工)条件下的区域水资源优化配置方案。本文选取现状工程平水年(来水频率 $P=50\%$)、现状工程枯水年($P=75\%$)、现状工程特枯年($P=90\%$)、远期规划平水年、远期规划枯水年及远期规划特枯年的水资源优化配置成果,进一步分析不同工况下各站的供水来源及水位变化对闸泵系统供水效率的影响。

2 结果分析

2.1 枯水期持续时长分析

本文基于研究区水文站 1988—2017 年逐日水

位数据,采用聚类方法分析各站点枯水期的持续时长。各测站枯水期持续时长年际变化过程如图 2 所示。

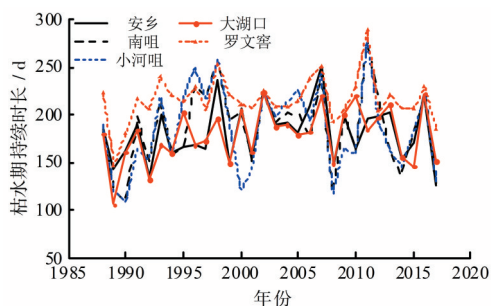


图2 研究区枯水期持续时长变化过程

Fig. 2 Variation of dry season duration in study area

由图2可以看出,研究区枯水期持续时长存在显著的年际变化:小河咀站历年枯水期持续时长为108~280 d,年际变化较大;而大湖口站历年枯水期持续时长为106~224 d,年际变化相对稳定。本研究进一步采用MK检验及SR检验方法对研究区历年枯水位持续时长进行趋势分析,见表1。由表1可知,在 $\alpha=0.1$ 的显著性水平下,近30年来研究区枯水期持续时长总体呈上升趋势。其中,安乡、大湖口站在两类检验方法下变化趋势均呈显著上升,罗文窖站枯水期持续时长则无明显变化趋势。

表1 研究区枯水期时长变化趋势分析

Table 1 Dry season duration variation trend in study area

测站	不同检验方式下的变化趋势	
	MK 检验	SR 检验
安乡	显著上升	显著上升
南咀	不显著上升	不显著上升
小河咀	不显著上升	不显著上升
大湖口	显著上升	显著上升
罗文窖	无明显变化趋势	无明显变化趋势

本研究将上述水位序列划分为1988—2003年(三峡工程运行前)及2004—2017年(三峡工程运行后)两个时段,分别统计其枯水期的起讫时间,见表2。结果表明,在三峡工程运行后,研究区各测站枯水期持续时长普遍延长了1.4~13.7 d;除大湖口站外,其余测站枯水期的开始时间和结束时间分别提前了10~15 d和4~8 d。这表明三峡工程运行后研究区的枯水期呈延长趋势,且开始时间整体提前。

表2 研究区枯水期变化特征

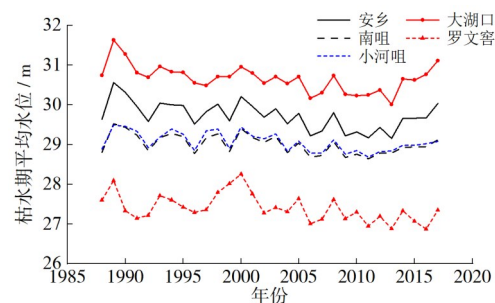
Table 2 Characteristics of dry season in study area

测站	类型	三峡运行前	三峡运行后	全系列
安乡	枯水期持续时长	177.3 d	186.9 d	181.8 d
	枯水期开始日期	11月2日	10月20日	10月27日
	枯水期结束日期	4月29日	4月25日	4月27日
南咀	枯水期持续时长	186.2 d	187.6 d	186.8 d
	枯水期开始日期	10月20日	10月10日	10月15日
	枯水期结束日期	4月25日	4月17日	4月21日
小河咀	枯水期持续时长	183.3 d	187.6 d	185.3 d
	枯水期开始日期	10月15日	10月5日	10月10日
	枯水期结束日期	4月17日	4月11日	4月14日
大湖口	枯水期持续时长	172.3 d	186.0 d	178.7 d
	枯水期开始日期	11月6日	10月25日	10月31日
	枯水期结束日期	4月28日	4月29日	4月29日
罗文窖	枯水期持续时长	212.8 d	219.8 d	216.0 d
	枯水期开始日期	10月24日	10月9日	10月17日
	枯水期结束日期	5月24日	5月18日	5月22日

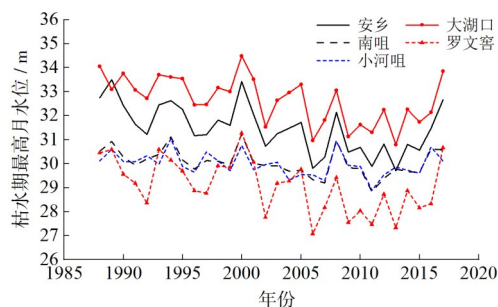
2.2 枯水期水位变化趋势分析

本文通过逐年统计研究区枯水期平均水位和最高月水位,分析各测站历年特征枯水位变化情况,如图3所示。在1988—2017年间,大湖口站的枯水期平均水位变化幅度最大,历年最高与最低的枯水期平均水位差达1.62 m;小河咀站的枯水期平均水位相对稳定,历年最高与最低水位差为0.80 m。相较枯水期平均水位,枯水期最高月水位

的年际变化幅度更大,各测站历年最高值与最低值之差均在2.00 m以上,罗文窖和安乡站的最高月水位变幅分别达4.19、3.79 m。通过分析三峡工程运行前后研究区枯水期的平均水位及最大月水位变化情况,本研究结果表明,在三峡工程运行后,研究区各测站枯水期平均水位下降0.30~0.42 m,平均下降约0.35 m;最高月水位分别下降0.39~1.15 m,平均下降约0.85 m。近30年来,研究区枯水位变化显著,枯水位下降将影响区域内闸泵系统的工作状态和工作效率。



(a) 枯水期平均水位变化



(b) 枯水期最高月水位变化

图3 研究区枯水位变化规律

Fig. 3 Variation law of low water level in study area

本研究采用MK检验和SR检验方法对各测站逐月平均水位变化趋势进行分析,分析结果如表3所示。在 $\alpha=0.1$ 的显著性水平下,研究区各测站在不同时期的枯水位变化规律不完全一致。对于多数测站而言,汛后两个月(10月、11月)及汛前一个月(3月)的月平均水位在过去30年间呈显著下降趋势,具体表现为丰水期与枯水期间的过渡期水位下降,且过渡期时长缩短,即枯水期发生时间提前。

总体而言,近30年来研究区枯水期持续时长及特征水位均存在显著变化。随江湖关系的持续调整,特别是三峡工程运行后,“四口水系”水文情势发生了较大改变。松滋、太平、藕池口分流量总体减少,研究区各测站枯水期持续时间延长,汛

表3 研究区枯水期月平均水位变化趋势分析

Table 3 Variation trend of monthly mean water level during dry season in study area

月份	安乡		南咀		小河咀		大湖口		罗文窖	
	MK 检验	SR 检验	MK 检验	SR 检验	MK 检验	SR 检验	MK 检验	SR 检验	MK 检验	SR 检验
10月	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降
11月	显著下降	显著下降	显著下降	不显著	显著下降	显著下降	不显著	不显著	显著下降	显著下降
12月	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	显著下降	不显著
1月	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	显著下降	显著下降
2月	不显著	不显著	不显著	不显著	显著下降	显著下降	不显著	不显著	显著下降	显著下降
3月	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降	显著下降
4月	不显著	不显著	不显著	不显著	显著下降	不显著	显著下降	不显著	不显著	不显著

末、汛前枯水位均呈显著下降趋势,此外,区域径流年内分布极不均匀。这些变化对于研究区枯水期水资源开发利用非常不利,极大增加了季节性和区域性干旱发生的风险。

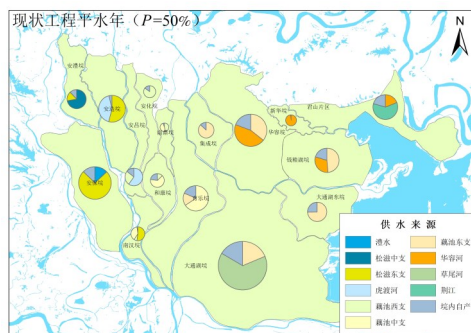
2.3 枯水期闸泵供水影响分析

为研究枯水位变化对研究区闸泵系统供水的影响,本研究选取现状工程平水年、现状工程枯水年、现状工程特枯年、远期规划平水年、远期规划枯水年及远期规划特枯年的区域水资源优化配置方案,分析闸泵系统的供水来源、供水方式及闸泵供水效率的变化情况。

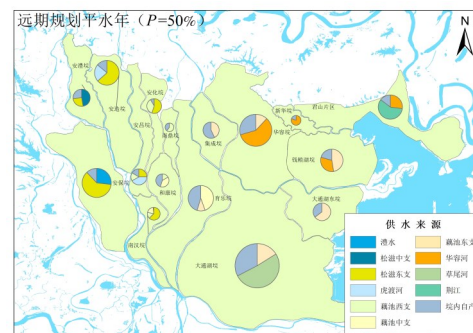
本文依据研究区的河网水系条件,绘制不同工况下各垸系供水来源占比,如图4所示。在现状工程平水年,垸外供水主要来源于松滋东支、藕池

东支及草尾河,主要供水方式为垸外河道引水,占供水总量的84.3%。随着来水总量的减少,河道水位逐步降低,研究区部分垸系的供水来源发生了显著变化。在枯水年和特枯年,安昌垸自藕池西支的引水比例由25.8%分别下降至6.0%和0.8%,钱粮湖垸自藕池东支的引水比例由48.7%分别下降至41.9%和22.6%,南汉垸在枯水年间已基本无法自藕池水系取水,和康垸的供水比例同样变化显著。分析结果表明,研究区来水总量的减少使各垸系的供水来源及供水比例发生了不同程度的变化。其中,藕池水系沿岸受影响最为显著,部分垸系供水来源单一化,供水结构韧性变差且缺水率大幅提高。

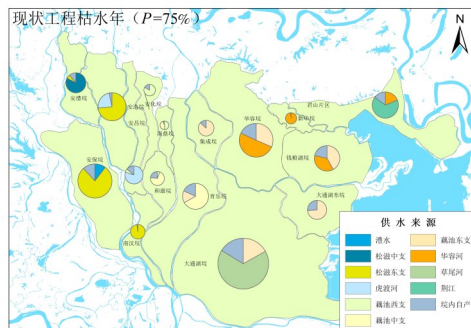
远期洞庭湖北部分片补水二期工程完工后,



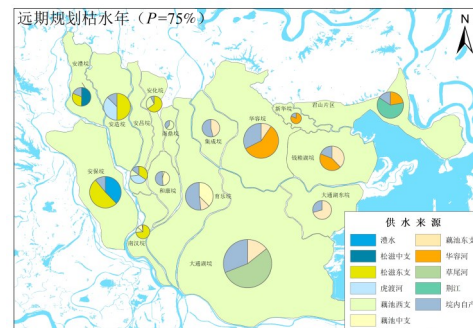
(a) 现状工程平水年



(b) 远期规划平水年



(c) 现状工程枯水年



(d) 远期规划枯水年

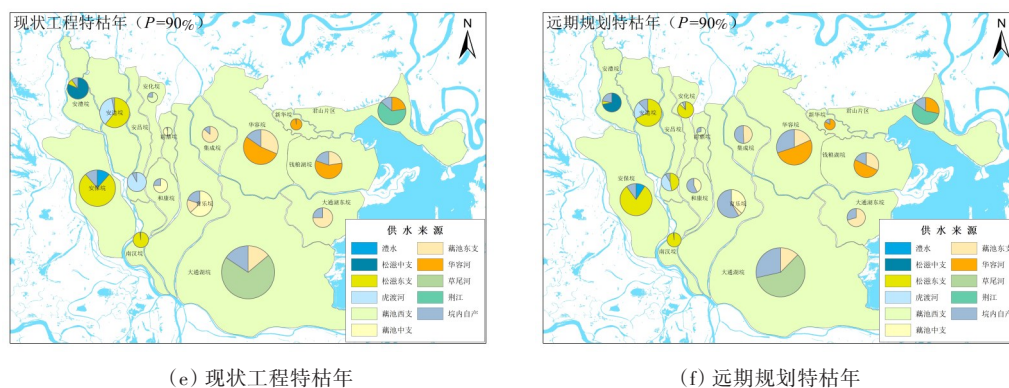


图4 不同工况下各垸系供水来源占比

Fig. 4 Proportion of water supply sources for each embankment under different working conditions

研究区供水来源总体得到改善。在远期规划平水年、远期规划枯水年和远期规划特枯年,垸内自产水占总供水量的比例分别提高了11.0%、11.4%和11.5%,这降低了闸泵系统对于垸外河道引水的依赖性。在远期规划平水年,研究区主要供水来源转变为松滋东支、藕池东支、草尾河及华容河,且不同供水来源的供水负荷更为均衡。安化垸、安昌垸通过松滋东支补充引水,能够分别提供区域55.1%、24.8%的总需水量,从而有效缓解藕池水系的水资源供需矛盾。同时,多源供水的格局提高了区域供水的韧性,各缺水垸系远期规划特枯年的缺水率较现状工程特枯年的下降了0.67%~69.81%。分片补水二期工程的实施对于缓解研究区枯水期的季节性缺水问题具有显著效果。

供水来源的优化在一定程度上降低了区域水资源短缺的风险。但受江湖关系深度演变的影响,区域内部分闸泵工程的实际引水条件与设计引水条件不一致,闸泵系统并未很好地发挥其作用和效益。为保障区域供水安全,本研究进一步针对区域泵闸系统的供水效率及其影响因素开展分析。

不同工况下各闸泵系统的供水效率如图5~6所示。在现状工程平水年,研究区闸群系统平均月供水效率为13.8%。依据供水来源的不同,闸群系统的平均月供水效率存在明显的差异性,藕池水系沿岸闸群平均月供水效率显著低于其他水系闸群平均月供水效率,仅达到区域平均月供水效率的67.6%。随着区域来水量的减少,闸群的供水效率将出现不同程度的下降,在枯水年和特枯年,研究区闸群整体的平均月供水效率将分别下降

10.3%和24.1%,其中藕池水系沿岸闸群的供水效率下降更为显著,分别高达26.4%与56.0%。区域泵群的情况有所不同,丰水时期通常不需要启用泵群供水,平水年泵群的平均月供水效率约为2.8%。但随着区域来水的减少,闸门自流引水能力逐步丧失,在枯水年和特枯年依靠泵群联合供水的比例较平水年分别提高了36.3%与170.0%,从而提高了区域枯水年份的供水成本。

在分片补水二期工程实施后,研究区闸群在平水年、枯水年、特枯年的平均月供水效率将分别提高2.8%、2.1%、12.9%。同时,闸群供水效率受极端枯水位影响减弱,特枯年下的闸群供水量仍基本维持在平水年的83.6%,供水效率的损失比例较现状工程条件下的减少7.4%,区域闸群抗旱能力有所提升。此外,因闸群供水效率恢复,研究区依靠泵站供水的比例有所下降,远期规划平水年、枯水年、特枯年泵群的平均月供水效率较现状年将分别下降74.2%、45.5%、47.3%。分片补水二期工程的实施对于降低区域供水成本同样有积极作用。

考虑到研究区闸泵群供水效率在时间分布上的不均匀性,本研究结合闸泵群最大月供水效率展开分析,以便筛选出现状供水效率较差,且在分片补水二期工程实施后供水效率不能恢复的闸泵。这些闸泵可考虑予以撤销并寻求其他可替代的供水方式。

在现状工程平水年,多数引水闸门在丰水期能够较好地发挥供水效率,但君山片区1号和华新垸1号引水闸门最大月供水效率均显著低于区域的平均水平,属低效闸门,且在二期工程实施后其

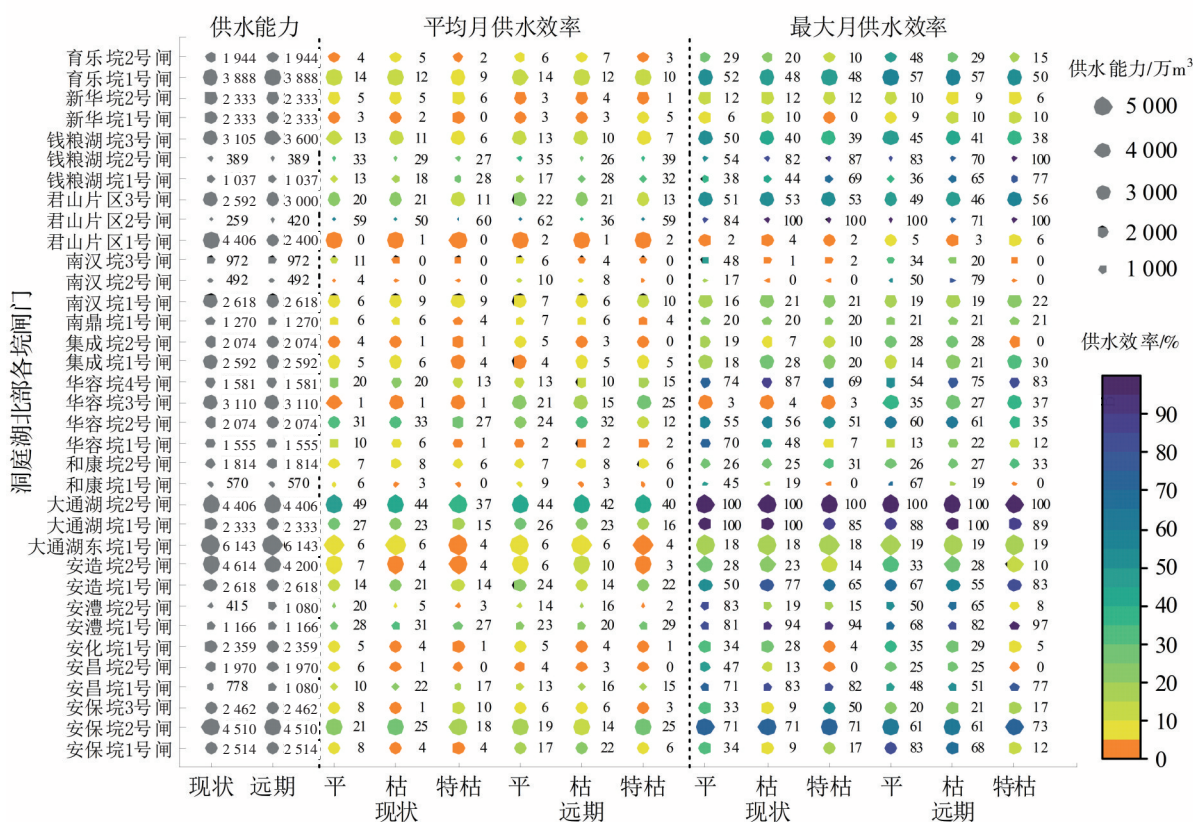


图5 洞庭湖北部各垸闸门供水效率

Fig. 5 Water supply efficiency of each gate of embankment in northern Dongting Lake

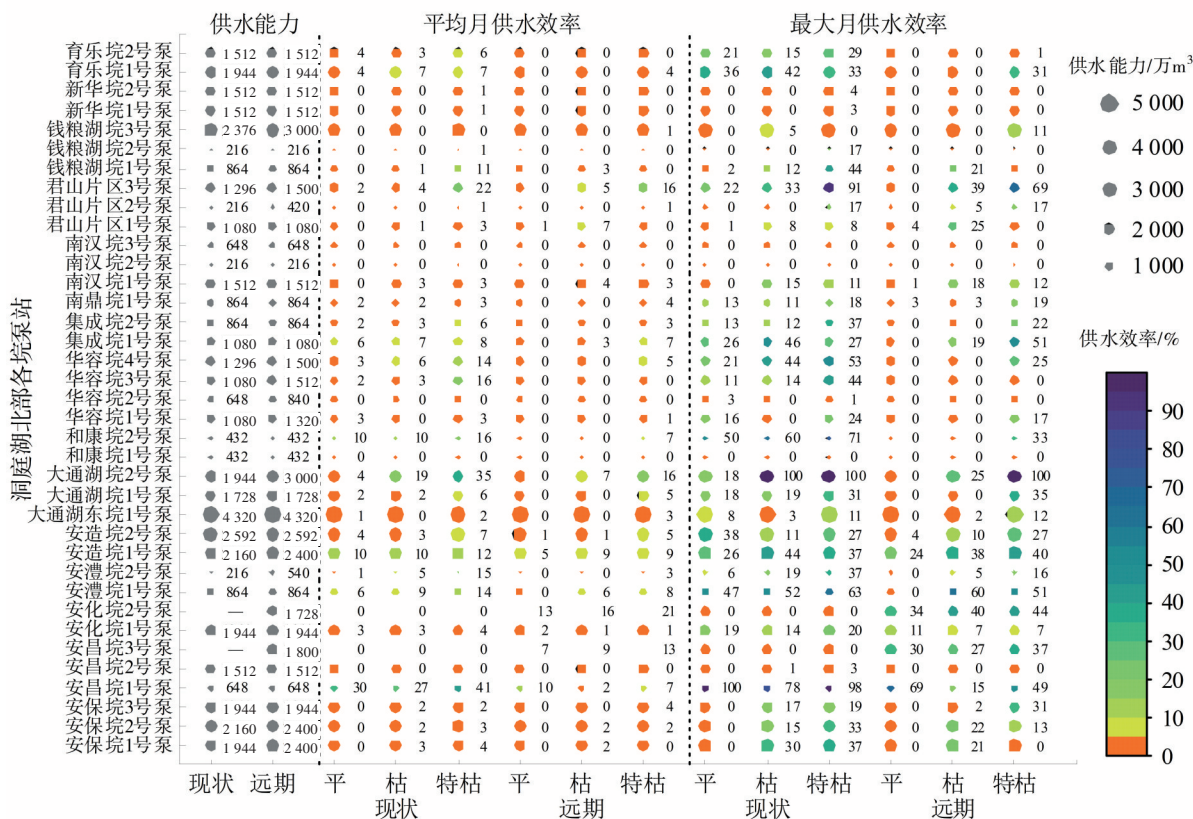


图6 洞庭湖北部各垸泵站供水效率

Fig. 6 Water supply efficiency of each pump of embankment in northern Dongting Lake

供水效率也未提升,建议予以逐步撤销。安昌垸2号、和康垸1号、华容垸2号、南汉垸2号、南汉垸3号等取水泵站,在现状工程条件下其最大月供水效率显著低于区域泵群的平均水平,建议予以逐步撤销。尽管在现状工程条件下,华容垸3号、育乐垸2号取水泵站能够发挥一定的供水效率,但由于二期工程的实施,该区域缺水状况得到缓解,因此,依靠这两个泵站进行联合供水的比例有所下降。由于这两个泵站的供水效率在二期工程实施后得不到充分发挥,故建议在二期工程实施后逐步予以撤销。

3 讨论

首先,就区域枯水位变化规律而言,已有相关研究指出^[12,13,20,21],长期以来“四口水系”呈分流比减少,累计断流日数增加,枯水期提前并延长的变化趋势。本研究进一步表明,在三峡工程运行后,研究区枯水期起讫时间有所提前且持续时间延长了1.4~13.7 d。此外,各测站枯水期平均水位和最高月水位分别平均下降了0.35和0.85 m。枯水位变化对于区域水资源利用将产生不利影响。

其次,本研究表明洞庭湖北部垸系缺水问题主要集中在藕池水系沿岸地区。该结论与施亚栋等^[27]关于“四口水系”地区的缺水垸系分布结论基本一致。一方面,上述垸系供水水源单一,供水结构韧性较差,闸泵系统供水功能更易丧失;另一方面,区域供、蓄水工程不足,藕池水系供水负荷较重,进一步增加了区域水资源短缺的风险。

此外,就区域缺水成因而言,施亚栋等^[27]认为当区域年可供水量大于年需水量时,区域缺水属

调蓄工程不足引起的缺水。但从供水效率角度分析,垸系缺水受到可供水量与供水能力两类因素的制约。当区域水资源供需关系不平衡时,垸系缺水由水资源不足引起,属“资源型缺水”;当河道仍有可供水量,但因闸门实际引水条件与设计引水条件不一致(闸门底板过高),或泵站装机容量不足,使水资源无法在区域实现有效配置,此时垸系缺水主要由工程条件所引起,属“工程型缺水”。

表4为现状特枯年典型闸泵逐月供水量。由表4可知,在10月—次年5月期间,藕池水系仍基本处于枯水期,河道断流,基本无水可取,导致安化垸1号闸(泵)、南鼎垸1号闸(泵)的供水功能均已丧失。此时垸系缺水由水资源不足引起,属“资源型缺水”。而在4月—5月期间,草尾河、虎渡河逐步由枯水期进入汛期,来流有所增大,此时河道内有部分可供水量,但安昌1号闸、大通湖2号闸因水位较低,自流引水能力受限,安昌1号泵及大通湖2号泵供水能力又不足,使得安昌垸、大通湖垸需要依靠安昌2号闸(泵)与大通湖垸1号闸(泵)由藕池水系进行补充供水,导致藕池水系本就紧张的水资源供需关系进一步恶化,加剧了安化垸、南鼎垸、大通湖东垸等藕池沿岸垸系的缺水状况。因此,对于安昌垸、大通湖垸而言,区域供水主要受工程条件的制约,属“工程型缺水”。

研究区多数垸(如安化垸、南鼎垸、集成垸、育乐垸、大通湖东垸)缺水主要由非汛期水资源供需关系不平衡所引起,属“资源型缺水”。但对于安昌垸、大通湖垸、和康垸而言,因工程条件制约引发的区域“工程型缺水”问题,同样值得引起重视。对于“资源型缺水”,应主要考虑补充区域蓄水工程,或建设跨区域引调水工程,以补充非汛期

表4 现状特枯年典型闸泵逐月供水量

Table 4 Monthly water supply of typical gate-pump syatem in current ultra-dry years

万 m³

闸门(泵站)	供水能力	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
安昌1号闸	4 121	0	0	0	0	0	279	638	506	105	0	24	0
安昌1号泵	648	24	12	21	635	467	414	252	335	573	382	48	10
安化1号闸	2 359	0	0	0	0	0	106	8	47	0	0	0	0
安化1号泵	1 944	0	0	0	0	0	192	395	343	0	0	0	0
大通湖2号闸	11 483	5	0	62	90	975	4 035	4 406	4 406	3 534	1 592	486	50
大通湖2号泵	1 944	523	530	476	1 944	1 944	634	115	210	1 101	572	0	0
南鼎1号闸	1 270	0	0	0	0	0	99	248	203	57	0	5	0
南鼎1号泵	864	0	0	0	0	33	99	0	38	152	18	14	0

水资源的不足。而对于“工程型缺水”,其主要制约因素为工程条件不匹配,建议重新规划设计闸门引水条件或提高相应泵站供水能力。

4 结论

本研究分析了洞庭湖北部主要水文站点的枯水位变化规律,探讨了该区域枯水位变化对不同工况下闸泵系统供水方式的影响及其导致的供水效率的差异。主要结论如下:

1) 研究区枯水期持续时长存在显著的年际波动,多数测站的枯水期持续时长在过去的30年里均呈上升趋势。在三峡工程运行后,研究区枯水期持续时长延长1.4~13.7 d,且枯水期起讫时间整体提前。

2) 研究区枯水期平均水位、最高月水位在三峡工程运行后分别平均下降了0.35、0.85 m,10月、11月和3月的月平均水位在30年内呈显著下降趋势,季节性和区域性干旱发生的风险增大。

3) 在现状工程条件下,研究区主要供水方式为闸泵引水,主要供水来源为藕池东支、草尾河及松滋东支,区域来水的减少对于藕池沿岸垸系供水来源的影响较大。研究区闸泵供水效率存在明显的差异性,以藕池水系为供水来源的闸泵供水效率较低。分片补水二期工程的实施能够显著改善区域缺水情况,提高闸群整体供水效率并减小泵群运用比例。对于部分低效闸泵,建议在二期工程实施后逐步予以撤销。

4) 区域各垸缺水分为“资源型缺水”及“工程型缺水”两种。对于“资源型缺水”,建议补充区域蓄水和跨区域引调水工程;对于“工程型缺水”,建议重新规划闸门引水条件或提高泵站供水能力。

[参考文献]

- [1] 黄草,陈叶华,李志威,等.洞庭湖区水系格局及连通性优化[J].水科学进展,2019,30(5):661-672. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.05.006.
HUANG Cao, CHEN Yehua, LI Zhiwei, et al. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake area [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 661-672. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.05.006.
- [2] 隆院男,吕倩,闫世雄,等.洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):55-69. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220517001.
LONG Yuannan, LYU Qian, YAN Shixiong, et al. Analyses of evolution characteristics and driving factors of water and sediment in Dongting Lake at different stages [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(2): 55-69. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220517001.
- [3] 郭文献,金耀广,王鸿翔,等.近60年以来洞庭湖水文情势变异及生态效应[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(1):24-37. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.01.003.
GUO Wenxian, JIN Yaoguang, WANG Hongxiang, et al. Hydrological regime alteration and ecological effects of Dongting Lake during the past 60 years [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(1): 24-37. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.01.003.
- [4] 帅红,李景保,何霞,等.环境变化下长江荆南三口径流变化特征检测与归因分析[J].水土保持学报,2016,30(1):83-88. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.01.017.
SHUAI Hong, LI Jingbao, HE Xia, et al. Feature detection and attribution analysis of runoff variation in the three outlets of southern Jingjiang River under environmental changes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 83-88. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.01.017.
- [5] 穆锦斌,张小峰,许全喜.荆江三口分流分沙变化研究[J].水利水运工程学报,2008(3):22-28. DOI: 10.3969/j.issn.1009-640X.2008.03.004.
MU Jinbin, ZHANG Xiaofeng, XU Quanxi. Study on variation of runoff and sediment diversion from three outfalls [J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(3): 22-28. DOI: 10.3969/j.issn.1009-640X.2008.03.004.
- [6] 徐幸仪,伍佑伦,盛东,等.1960—2015年洞庭湖水资源演变特征分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):57-62. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.08.
XU Xingyi, WU Youlun, SHENG Dong, et al. Evolution characteristics of water resources at Dongting Lake from 1960 to 2015 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(4): 57-62. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.08.
- [7] 钟小敏,帅红,李景保,等.水利工程群对洞庭湖城陵矶特征水位的综合影响[J].水资源与水工程学报,2022,33(5):72-80. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.09.
ZHONG Xiaomin, SHUAI Hong, LI Jingbao, et al. Comprehensive effect of group hydrological projects on characteristic water level of Chenglingji in Dongting

- Lake [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(5): 72-80. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.09.
- [8] 朱玲玲, 许全喜, 戴明龙. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 822-831. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.06.004.
- ZHU Lingling, XU Quanxi, DAI Minglong. Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 822-831. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.06.004.
- [9] 赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 178-184.
- LAI Xijun, JIANG Jiahu, HUANG Qun. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Lake Dongting [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(2): 178-184.
- [10] 黄群, 孙占东, 姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(3): 424-428.
- HUANG Qun, SUN Zhandong, JIANG Jiahu. Impacts of the operation of the Three Gorges Reservoir on the lake water level of Lake Dongting[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3): 424-428.
- [11] 孙思瑞, 谢平, 陈柯兵, 等. 三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口水位的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1819-1826. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201808018.
- SUN Sirui, XIE Ping, CHEN Kebing, et al. Impact of different refill operation rules of the Three Gorges Reservoir on the water level of the outlet of Dongting Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1819-1826. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201808018.
- [12] 黄草, 姜万, 冯迪子, 等. 1988—2018年洞庭湖北部地区地表水资源量演变分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 37-43. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.03.06.
- HUANG Cao, JIANG Wan, FENG Dizi, et al. Evolution analysis of surface water resources in the North Dongting Lake Area from 1988 to 2018 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(3): 37-43. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.03.06.
- [13] 李景保, 何霞, 杨波, 等. 长江中游荆南三口断流时间演变特征及其影响机制[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1713-1725. DOI: 10.11849/zrzyxb.20151021.
- LI Jingbao, HE Xia, YANG Bo, et al. Temporal evolution of dried up days and the influencing mechanisms at three outlets along Jingjiang in the middle reach of Yangtze River [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1713-1725. DOI: 10.11849/zrzyxb.20151021.
- [14] 李景保, 钟一苇, 周永强, 等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1583-1593. DOI: 10.11849/ZRZYXB.2013.09.013.
- LI Jingbao, ZHONG Yiwei, ZHOU Yongqiang, et al. Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on the development and utilization of water resources of Northern Dongting Lake Area [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(9): 1583-1593. DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.09.013.
- [15] 贺秋华, 余德清, 余姝辰, 等. 三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 293-307. DOI: 10.3799/dqkx.2020.056.
- HE Qiuhua, YU Deqing, YU Shuchen, et al. Changes of water resources amount in Dongting Lake before and after the operation of the Three Gorges Reservoir [J]. Earth Science, 2021, 46(1): 293-307. DOI: 10.3799/dqkx.2020.056.
- [16] 陈晓波, 董增川, 郑国威, 等. 闸泵系统联合调度的水动力学模型研究及应用[J]. 人民黄河, 2013, 35(3): 27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2013.03.011.
- CHEN Xiaobo, DONG Zengchuan, ZHENG Guowei, et al. Study and application on hydrodynamic model of gate-pump joint operation [J]. Yellow River, 2013, 35(3): 27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2013.03.011.
- [17] 江涛, 朱淑兰, 张强, 等. 潮汐河网闸泵联合调度的水环境效应数值模拟[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 388-395. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.04.003.
- JIANG Tao, ZHU Shulan, ZHANG Qiang, et al. Numerical simulation on effects of gate-pump joint operation on water environment in tidal river network [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 388-395. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.04.003.
- [18] 李晓, 唐洪武, 王玲玲, 等. 平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 393-399. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2016.05.003.
- LI Xiao, TANG Hongwu, WANG Lingling, et al. Simulation of water environment under joint operation of gates and pumps in plain river network area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 393-399. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2016.05.003.
- [19] 梁益闻. 城市河湖闸泵群防洪排涝优化调度模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- LIANG Yiwen. Research on optimal scheduling model

- of urban river lake sluice pump group drainage system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [20] 柴泽清, 郭小虎, 朱勇辉. 三峡工程运用后荆江与洞庭湖关系变化研究进展[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(4): 17-23, 30. DOI: 10.11988/ckyyb.20220382.
- CHAI Zeqing, GUO Xiaohu, ZHU Huiyong. Research progress on the relationship between Jingjiang River and Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40 (4) : 17-23, 30. DOI: 10.11988/ckyyb.20220382.
- [21] 姚仕明, 胡呈维, 渠庚, 等. 长江通江湖泊演变及其影响效应研究进展[J]. 长江科学院院报, 2022, 39 (9): 15-23. DOI: 10.11988/ckyyb.20220304.
- YAO Shiming, HU Chengwei, QU Geng, et al. Research advances in morphological evolution of lakes connecting the Yangtze River and its influences [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39 (9) : 15-23. DOI: 10.11988/ckyyb.20220304.
- [22] 刘卡波. 调整洞庭湖区水系结构优化水资源配置[J]. 湖南水利水电, 2008(4): 33-36. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4229.2008.04.016.
- LIU Kabo. Adjusting structure of water systems in the Dongting Lake Area and optimizing allocation of its water resources [J]. Hunan Hydro & Power, 2008(4): 33-36. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4229.2008.04.016.
- [23] 黄草, 刘启, 付蔷, 等. 洞庭湖北部地区多闸泵系统水资源优化配置模型及应用研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 37-48. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.004.
- HUANG Cao, LIU Qi, FU Qiang, et al. Construction and application of the optimal water resources allocation model of the multi-gate & pump system in the northern part of Dongting Lake Area [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (2) : 37-48. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.004.
- [24] HUANG X H, YE Y M, GUO H F, et al. DSKmeans: a new kmeans-type approach to discriminative subspace clustering [J]. Knowl Based Syst, 2014, 70: 293-300. DOI: 10.1016/j.knosys.2014.07.009.
- [25] YUE S, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. Journal of Hydrology, 2002, 259 (1/2/3/4) : 254-271. DOI: 10.1016/s0022-1694(01)00594-7.
- [26] FAN Y, CHEN H R, GAO Z Y, et al. Canal water distribution optimization model based on water supply conditions [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107565. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107565.
- [27] 施亚栋, 丛振涛. 洞庭湖四口河系地区水资源需求及配置研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 35-39.
- SHI Yadong, CONG Zhentao. Water resources demand and allocation in four inlets region of the Dongting Lake [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30 (5): 35-39.

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)