

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.026

拟建鄱阳湖水利枢纽对湖区水环境容量的影响

姚斯洋^{1,2}, 林妙丽¹, 陈诚^{1,3}, 何梦男¹, 崔桢¹, 陈求稳^{1,4}

(1. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏南京 210029; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉 430072; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 4. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098)

摘要:采用水动力水质模型模拟了鄱阳湖在极端退水年(2016年)和一般退水年(2017年)两种退水工况下拟建鄱阳湖水利枢纽建设前后的水动力水质过程,并构建湖区水环境容量模型评估了鄱阳湖拟建水利枢纽对湖区水质和水环境容量的影响。模拟结果表明:枢纽建设运行能显著增加鄱阳湖的水体体积,每月最大可增加77%;在退水初期主要降低湖泊中部的TP质量浓度,在极端退水年的退水后期会导致闸上TP质量浓度升高,在一般退水年则会导致闸上TP质量浓度降低,但对COD_{Mn}和NH₃-N质量浓度空间分布无明显影响;在极端退水年,枢纽建设运行会导致COD_{Mn}、NH₃-N和TP质量浓度增大,而在一般退水年则会导致TP的质量浓度降低;枢纽建设运行能显著提升COD_{Mn}和NH₃-N的水环境容量,在一般退水年会增大TP的水环境容量,但在极端退水年TP的水环境容量可能降低。

关键词:鄱阳湖水利枢纽;水环境容量;水质;水动力水质模型

中图分类号:TV213.3;TV61 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0200-08

Impact of the scheduled Poyang Lake Hydraulic Project on water environment capacity in lake district // YAO Siyang^{1,2}, LIN Miaoli¹, CHEN Cheng^{1,3}, HE Mengnan¹, CUI Zhen¹, CHEN Qiuwen^{1,4} (1. Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: A hydrodynamic-water quality model was applied to simulate the process of hydrodynamic and water quality of Poyang Lake before and after the construction of the scheduled Poyang Lake Hydraulic Project (PLHP) in extreme receding year (2016) and general receding year (2017). And then a water environment capacity model was constructed to assess the impact of the scheduled PLHP on the water quality and water environment capacity in the lake district. Simulation results show that the construction and operation of PLHP could significantly increase the water body volume of Poyang Lake with the maximum increase being 77% per month. It mainly reduced the TP mass concentration in the middle lake during the early period of water level recession. In the late period of water level recession, the TP mass concentration in the upstream of the gate increased in extreme receding year while the TP mass concentration in the upstream of the gate decreased in general receding year. However, there was no significant effect on the spatial distribution of mass concentration of COD_{Mn} and NH₃-N. The construction and operation of PLHP could increase the mass concentration of COD_{Mn}, NH₃-N and TP of the lake in extreme receding year, while reduce the TP mass concentration of the lake in general receding year. The construction and operation of PLHP could significantly improve the water environment capacity of COD_{Mn} and NH₃-N of the lake, while the water environment capacity of TP increased in general receding year and might decrease in extreme receding year.

Key words: Poyang Lake Hydraulic Project; water environment capacity; water quality; hydrodynamic-water quality model

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200105);国家自然科学基金创新研究群体项目(52121006);国家自然科学基金(52279071, 52070132)

作者简介:姚斯洋(1994—),男,博士研究生,主要从事湖泊水生态环境研究。E-mail: ysy2003003@163.com

通信作者:陈诚(1990—),男,工程师,博士研究生,主要从事水环境信息学研究。E-mail: chen Cheng@nhri.cn

水环境容量既是污染物总量控制的关键参数,也是经济发展与水质保护的重要参考指标^[1-5]。鄱阳湖作为中国第一大淡水湖泊,上承“五河”(赣江、抚河、信江、饶河、修河)来水,下经湖口水道汇入长江,水体容积可达2805亿m³,拥有着巨大的纳污能力^[6-7]。但是,随着气候变化和人类活动的加剧,鄱阳湖的水质持续恶化,特别是2003年三峡水利枢纽工程运行后,鄱阳湖的水文特征发生了枯水期提前和持续枯水时间加长的显著变化^[8-10],其水环境持续恶化,水资源承载能力日趋不足^[11-12]。

为解决鄱阳湖枯水造成的水环境恶化与水资源承载力不足的问题,江西省政府出台了以“江湖两利”和“调枯不调洪”为核心建设理念的鄱阳湖水利枢纽建设方案^[12-13]。目前,众多学者就鄱阳湖水利枢纽建设对湖泊水文水动力、水质、江湖关系和生态等方面的影响进行了大量的研究。赖格英等^[14-15]使用EFDC模型模拟了枢纽调度方案对丰水、枯水和平水年的鄱阳湖水文水动力以及流入长江干流流量的影响,发现枢纽将使湖泊平均水位上升2.59~4.35 m,入江流量增加2.10%~17.00%;杨中华等^[16]采用二维水动力模型耦合示踪剂研究了枢纽建设对湖泊污染物传输的影响,发现枢纽能增加湖泊1~20 d的水力停留时间;胡春华等^[17]采用二维水动力模型耦合营养盐模块研究了枢纽建设对湖泊水质的影响,发现枢纽能使湖区TN质量浓度增大13.39%~20.42%、TP质量浓度增大12.90%~20.55%;Yao等^[18]和Li等^[19]则分别评估了枢纽建设对湖泊水鸟和江豚的影响。然而,当前尚缺乏鄱阳湖水利枢纽建设对湖泊水环境容量影响的定量研究。

本文基于2010—2018年水文与水质数据,根据鄱阳湖年内退水速度,选择2016年和2017年作为模拟年,建立了鄱阳湖水动力水质模型,并结合水环境容量模型计算分析了鄱阳湖在枢纽建设前后的水质和水环境容量动态变化过程,可为鄱阳湖水利枢纽建设与鄱阳湖水环境容量管控提供参考。

1 研究区概况

鄱阳湖是我国的第一大淡水湖^[6],位于江西省北部(图1)。受亚热带季风气候影响,鄱阳湖丰、枯水期的水面面积以及蓄水量相差极大,丰水期呈湖状,枯水期呈河状,从而形成了“高水是湖,低水似河”的奇特景观。湖区内水量以及污染物来源主要途径为“五河”的输入^[20],湖泊水质主要受到工农农业点源及生活污水排放等因素影响^[21]。

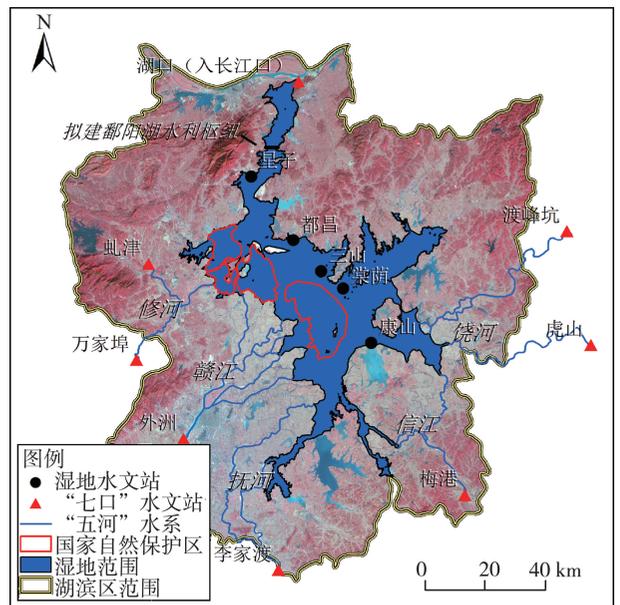


图1 研究区水系概况及水文站分布

Fig.1 River system general situation and distribution of hydrological stations of the study area

2 研究数据与研究方法

2.1 研究数据及模拟年选取

研究数据包括鄱阳湖水文、水质和地形数据。水文数据来源于水文年鉴,包括2010—2018年“五河”“七口”(图1)的日尺度水量数据和湖区内水文站(星子、都昌、棠荫和康山)的日尺度水位数据。水质数据来源于中国环境监测总站,包括2016—2018年“五河”“七口”和湖区内水文站(星子、都昌、三山(棠荫附近)和康山)月尺度的DO、COD_{Mn}、NH₃-N和TP质量浓度数据。地形数据来源于江西省水利厅,为2010年鄱阳湖实测DEM数据(精度为5 m×5 m)。

随着鄱阳湖枯水问题的加剧,其水文特征变化日趋明显,考虑到数据的可获得性,本文将2010—2018年作为典型年的选取范围。近年来鄱阳湖枯水的显著问题主要为退水时间加快^[22],因此根据退水期的退水速度进行模拟年的选取。2010—2018年的退水速度分别为2.42 m/月、1.86 m/月、2.36 m/月、1.80 m/月、1.54 m/月、1.34 m/月、3.49 m/月、1.89 m/月和1.56 m/月,平均值为2.03 m/月,因此将2016年(极端退水年)和2017年(一般退水年)选为模拟年。

2.2 水动力水质模型

考虑到鄱阳湖湿地具有周期性淹没的滩洲和复杂的地形,因此使用基于干湿判别和非结构化网格技术的二维水动力模型Mike21 FM^[23-24]模拟鄱阳湖的水动力过程。将鄱阳湖湿地范围(图1)作为模型

的建模边界,以赣江、抚河、信江、饶河、修河“五河”2016—2018年的流量作为模型的入流边界,并将流量乘以系数1.15,以概化区间入流^[25],同时将湖口(长江口)2016—2018年的水位作为模型的出流边界。模型概化的网格数为82 691个,节点数为43 987个。根据建模的时间精度要求,将月尺度的水质数据以日尺度为单位进行3次B-spline插值^[26-27]。最后,将以上DEM数据和人文数据分别转换为散点数据和时间序列文件,输入水动力模型。根据构建鄱阳湖水动力模型的相关研究^[28],使用糙率随空间变化的糙率场来设置曼宁系数 n ,从主河道的0.018过渡到植被区域的0.028。使用Mike21 FM耦合ECO Lab模块进行水质模拟,其中ECO Lab模块可模拟物理变化过程,也可模拟生物、化学以及生态过程之间的相互作用。在建立的水动力模型基础上,采用Mike21 ECO Lab模型营养盐模块进行湖泊DO、COD_{Mn}、NH₃-N和TP 4个常规水质指标的模拟。考虑到鄱阳湖年内水位与温度变化较大,因此分时段1(5—11月)和时段2(12月至次年4月)两期使用两组常量参数进行水质模型的率定,率定结果如表1所示。

水动力模型的验证采用能反映湖泊水位总体情况且水位数据完整的4个水文站(星子、都昌、棠荫和康山)的日尺度水位数据,水质模型的验证同样采用能反映湖泊水质总体情况且水质数据完整的4个水文站(星子、都昌、三山和康山)的月尺度水质指标DO、COD_{Mn}、NH₃-N和TP的质量浓度数据。选择2010—2011年作为模型的水动力参数验证时段,该时段包含了连续的典型枯水年(2011年)和丰水年(2010年),能很好地反映模型在各水位期的模拟效果。选择2016—2018年为水质模拟结果验证时段。使用纳什效率系数(NSE)验证水动力结果,使用均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)验证水质结果。

2.3 有枢纽情景模拟

使用第2.2节模拟的2016—2018年水动力和水质情势作为无枢纽情景,将无枢纽情景下的模型出流边界换为枢纽边界,枢纽边界位置按照拟建枢纽实际位置(图1)进行设定,其余水动力以

及水质边界条件则保持不变。根据江西省水利厅最新出台的调度方案进行枢纽边界水位的设置^[25],其中3—9月(丰水期)闸门全开,江湖连通,枢纽不调控,因此,本文对有枢纽情景的结果分析不考虑丰水期。

2.4 水环境容量模型

考虑到鄱阳湖污染物较易降解、水体纵向混合均匀以及出湖和入湖流量大致相等,根据GB/T 25173—2010《水域纳污能力计算规程》,基于所建立的水动力水质模型,选择合田健模型^[29-30]进行COD_{Mn}、NH₃-N和TP的水环境容量计算;考虑到鄱阳湖季节性水体体积变化的悬殊,以月尺度计算水环境容量。合田健模型计算月尺度下水环境容量公式为

$$M = 2.7 \times 10^{-6} \rho_s H \left(\frac{Q_a}{V} + d \right) S \quad (1)$$

式中: M 为水环境容量,t; S 为湖面面积,km²; ρ_s 为水质目标值,mg/L; H 为全湖的平均水深,m; Q_a 为月出湖水量,m³; V 为湖水的体积,m³; d 为沉降系数,按经验公式取为计算水域平均水深的1/10。

鄱阳湖湿地范围内水质目标主要分为两类:国家自然保护区(图1)采用GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅱ类水标准,非国家自然保护区采用Ⅲ类水标准。因此,将研究区域分为国家自然保护区和非国家自然保护区分别进行水环境容量计算,最后取两个区域的水环境容量计算结果之和得到全湖区的水环境容量。

2.5 水动力水质模型验证

由鄱阳湖4个水文站的水动力模拟验证,得到星子站、都昌站、棠荫站、康山站NSE分别为0.990、0.975、0.982和0.898,4个水文站的水动力模型模拟水位精度较高,可用于后续的水质模型计算。表2为水质模拟验证结果,可以看出4个水文站DO和COD_{Mn}的RMSE和MRE数值较低,表明建立的水质模型能够较好地模拟DO和COD_{Mn}。而NH₃-N和TP的MRE数值较高,表明其模拟精度相对较低,主要原因在于Mike21 ECO Lab模型中与NH₃-N和TP有关参数仅能使用全域统一值,不能考虑空间上的差异性。

表1 水质模块主要参数率定结果

Table 1 Calibration results of the main parameters of water quality module

时段	每日氧气最大产生量/m ²	植物呼吸速率/(m ² ·d ⁻¹)	20℃时的一级衰变率(溶解)/d ⁻¹	半饱和氧质量浓度/(mg·L ⁻¹)	沉积性有机物降解释放氨氮的产出率	植物摄取氮的系数	沉积性有机物降解释放磷的产出率	植物摄取磷的系数
时段1	3	4	0.05	12	0.03	0.00	0.06	0.03
时段2	10	4	0.05	12	0.03	0.00	0.03	0.10

表 2 水质模拟验证结果

Table 2 Verification results of the water quality simulation

水文站	RMSE/(mg·L ⁻¹)				MRE/%			
	DO	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	DO	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP
星子	1.350	0.448	0.087	0.022	20.3	13.9	36.9	24.7
都昌	1.180	0.352	0.100	0.026	10.9	12.1	37.2	28.3
三山	1.010	0.431	0.106	0.048	9.8	13.6	34.7	34.4
康山	1.560	0.414	0.116	0.050	22.5	12.9	43.0	38.5

3 结果与分析

3.1 枢纽建设运行对鄱阳湖水量水质过程的影响

图 2 为有无枢纽情景下 2016—2018 年各月的鄱阳湖水体体积变化过程,可以看出,无论是一般退水年还是极端退水年,有枢纽情景下水体体积都有一定程度的增加。在极端退水年,平均每月的水体体积可增加 34.20%,月最大水体体积可增加 77.00%;在一般退水年,平均每月的水体体积可增加 16.35%,月最大水体体积可增加 36.18%。

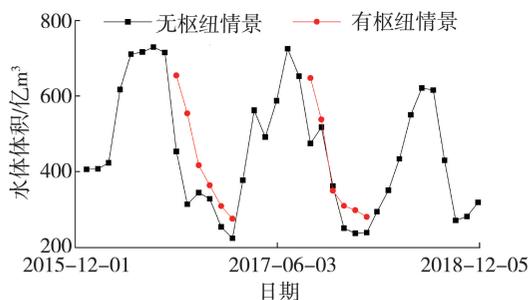
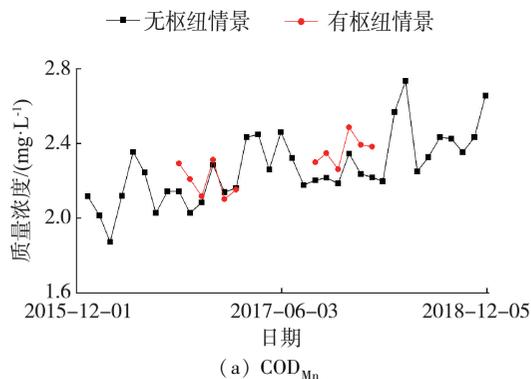
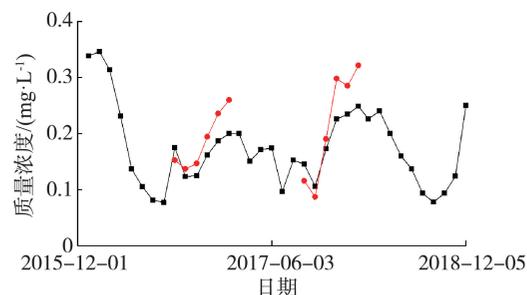
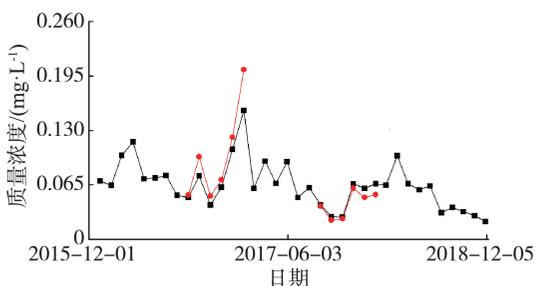


图 2 有无枢纽情景下鄱阳湖水体体积对比

Fig. 2 Comparison of the water body volume of Poyang Lake with and without PLHP

图 3 为有无枢纽情景下 2016—2018 年鄱阳湖的月平均水质过程,表 3 为有枢纽情景下 2016—2018 年水质变化情况。由图 3(a)(b)可知,枢纽建设运行对极端退水年和一般退水年的 COD_{Mn} 和 NH₃-N 质量浓度均具有一定的提升作用。由表 3 可知,枢纽建设运行对 COD_{Mn} 质量浓度影响较小,其质量浓度的月平均增加率和月最大增加率均在 10.00% 以内,且不会造成水质等级的改变;在极端退水年枢纽建设运行对 NH₃-N 质量浓度提升最大可达 29.91%,一般退水年则对 NH₃-N 质量浓度月平均值影响不大,但月最大增加率可达 31.87%。由图 4 可知,枢纽建设运行对极端退水年的 TP 质量浓度具有一定的提升作用,但会降低一般退水年的 TP 质量浓度;由表 3 可知,极端退水年 TP 质量浓度月最大增加率为 31.70%,可把无枢纽情景下 TP 质量浓度为 0.15 mg/L 的 V 类水降为 TP 质量浓度为 0.20 mg/L 的劣 V 类水。

(a) COD_{Mn}(b) NH₃-N

(c) TP

图 3 有无枢纽情景下鄱阳湖水水质月平均变化对比

Fig. 3 Comparison of the monthly average variation of water quality of Poyang Lake with and without PLHP

表 3 枢纽建设运行对鄱阳湖水质的影响

Table 3 Impact of the construction and operation of PLHP on the water quality of Poyang Lake

水质指标	模拟年	质量浓度月平均增加		质量浓度月最大增加	
		数值/ (mg·L ⁻¹)	增加率/ %	数值/ (mg·L ⁻¹)	增加率/ %
COD _{Mn}	极端退水年	0.06	2.75	0.20	7.24
	一般退水年	0.13	5.69	0.20	8.14
NH ₃ -N	极端退水年	0.03	15.48	0.06	29.91
	一般退水年	0.03	9.07	0.07	31.87
TP	极端退水年	0.02	19.97	0.05	31.70
	一般退水年	-0.01	-12.16	-0.01	-19.85

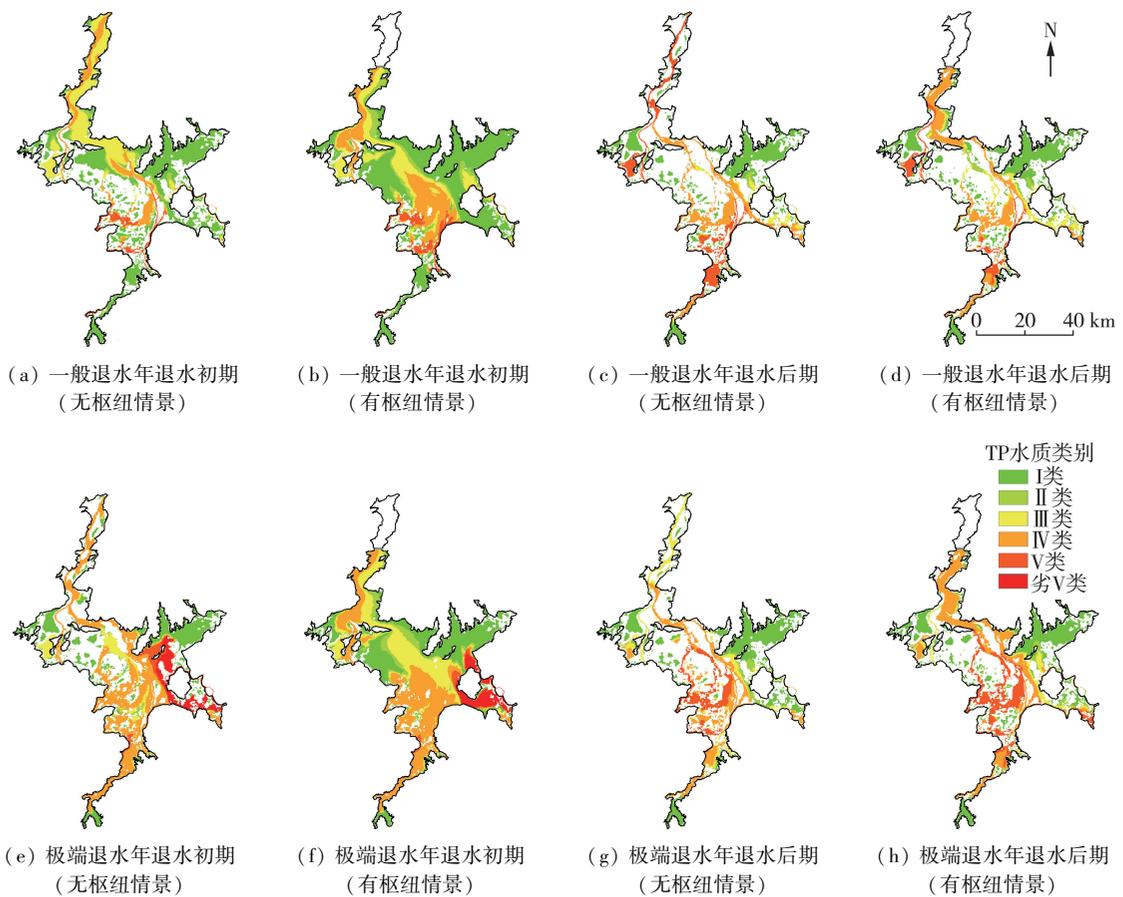


图4 枢纽建设运行对鄱阳湖 TP 水质类别空间分布的影响

Fig. 4 Impact of the construction and operation of PLHP on the spatial distribution of TP water quality classification of Poyang Lake

由于枢纽建设运行对模拟年份的 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 空间分布影响不大,因此本文仅给出有无枢纽情景下的 TP 质量浓度空间分布(图4),其中,退水初期和退水后期具体时间分别为当年10月1日和次年1月1日。由图4可知,在退水后期,极端退水年(2016年)枢纽建设运行对闸上的 TP 质量浓度具有提升作用,其水质等级可由无枢纽情景下的 III 类水降至 IV 类水;一般退水年(2017年)枢纽建设运行对闸上的 TP 质量浓度具有降低作用,其水质等级可由无枢纽情景下的 V 类升至 IV 类;在退水初期,极端退水年枢纽建设运行对湖泊中部 TP 质量浓度有一定的降低作用,其水质等级可由无枢纽情景下的 IV 类升至 II 类或 III 类;但是在一般退水年枢纽建设运行对水质质量浓度的空间分布无明显影响。

3.2 枢纽建设对鄱阳湖水环境容量的影响

图5为有无枢纽情景下2016—2018年鄱阳湖月尺度的 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 剩余水环境容量过程,表4为2016—2018年枢纽建设运行对鄱阳湖水环境容量的影响情况。由图5(a)(b)和表4可知,鄱阳湖的 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 剩余水环境容量具有较大的富余,枢纽建设运行对 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的剩余

水环境容量均有较明显的提升作用,在极端退水年,枢纽的建设运行对 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 剩余水环境容量的提升最大,分别可达56.88%和60.89%;在一般退水年,枢纽的建设运行对 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 剩余水环境容量的提升最大分别可达27.51%和35.80%。由图5(c)和表4可知,鄱阳湖 TP 的剩余水环境容量明显不足,大多数时间都为负值,在极端退水年,枢纽建设运行还降低了 TP 的剩余水环境容量,最大可降低56.16%;在一般退水年,枢纽建设运行对 TP 的剩余水环境容量具有一定的改善作用,最大可提升49.38%。

4 讨论

叶群等^[31]与杨中华等^[16]均发现鄱阳湖枢纽建设将降低湖泊的流速,增加湖泊的水体滞留时间,因此枢纽建设运行后势必会对污染物产生滞留作用,这解释了本文得到的鄱阳湖枢纽建设运行对 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均具有一定提升作用的原因。虽然枢纽建设运行对极端退水年 TP 质量浓度具有提升作用,但是在一般退水年却降低了 TP 的质量浓度,主要是由于无枢纽情景下的一般退水年 TP

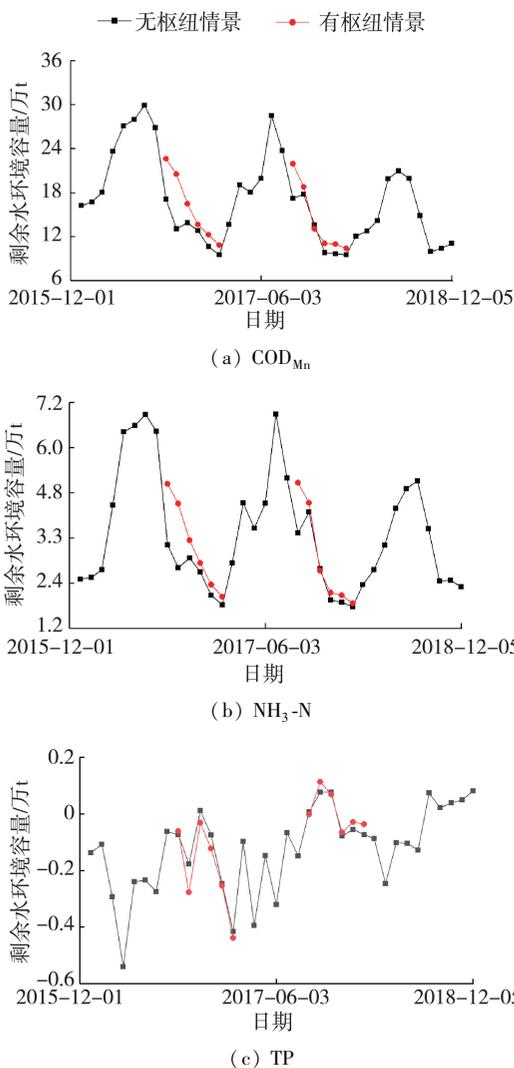


图5 有无枢纽情景下鄱阳湖剩余水环境容量变化

Fig. 5 Remaining water environment capacity variation of Poyang Lake with and without PLHP

表4 枢纽建设运行对鄱阳湖水环境容量的影响

Table 4 Impact of the construction and operation of PLHP on water environment capacity of Poyang Lake

水环境容量指标	模拟年	水环境容量月平均增加		水环境容量月最大增加	
		数值/t	增加率/%	数值/t	增加率/%
COD _{Mn}	极端退水年	32 040	24.96	74 318	56.88
	一般退水年	14 481	10.08	47 334	27.51
NH ₃ -N	极端退水年	7 524	28.40	17 084	60.89
	一般退水年	3 324	12.15	13 356	35.80
TP	极端退水年	-349	-21.47	-997	-56.16
	一般退水年	157	196.25	363	49.38

质量浓度要显著低于极端退水年(图3),因此,在一般退水年因枢纽建设运行对TP的滞留作用而产生的质量浓度提升效果要明显弱于极端退水年,加之枢纽蓄水后水体增加而产生对TP的稀释作用,造成了TP质量浓度的降低。由本文模拟结果可知,枢纽的建设运行对COD_{Mn}和NH₃-N的水环境容量

均具有一定的提升作用,枢纽建设运行前后鄱阳湖水体体积变化(图2)与COD_{Mn}和NH₃-N剩余水环境容量变化趋势(图5)基本一致,结合式(1),可知COD_{Mn}和NH₃-N的水环境容量增大的主要原因为随着湖泊水体体积的增加而增大的水深和水面面积。但是,在极端退水年,枢纽建设运行后将极大降低TP的剩余水环境容量(图5),主要是由于极端退水年湖区的TP质量浓度较高,污染十分严重,个别月份TP水质仅为V类,而枢纽的建设运行则极大地增加了这些高污染水体的滞留时间,而在枯水期,由于枢纽的水位抬高作用,湖区的大量滩洲被淹,导致底质氮磷的释放加快^[32],个别月份甚至可将水质由V类降为劣V类,从而导致枢纽运行后极端退水年湖区的TP水环境容量显著减小的现象。此外,枢纽蓄水导致鄱阳湖出湖流量减小,也可能使水环境容量降低的现象发生。在一般退水年,TP污染轻于极端退水年,枢纽建设运行将使水体体积增加,TP被稀释,加之湖泊水深和水面面积的增大,使得其水环境容量增大,月平均剩余水环境容量可由无枢纽情景下的负值变为正值。

由本文模拟结果可知,在大多数情况下,枢纽的建设运行将在一定程度上增大湖泊污染物的质量浓度,但一般不会引起水质等级的改变。同时,除了入湖污染特别严重的年份,枢纽的运行将增大湖泊的水环境容量,因此枢纽的调度方式具有一定的合理性。已有研究^[33-35]多数表明,大坝的蓄水会导致坝前段湖泊或河流的污染物积累,从而恶化湖泊或河流的水质。例如:Chen等^[34]认为大坝的建设是造成太湖河口TN和TP质量浓度上升的主要原因,因为大坝的蓄水加快了污染物的累积;王昱等^[35]认为筑坝导致的水动力条件改变而产生的沉积滞留效应是造成黑河水质空间差异的主要原因。而大坝的建设对河流或湖泊的水环境容量影响的研究结果^[36-37]表明,由于实际情况不同,大坝对河流或者湖泊水环境容量的影响方向也可能存在不同。例如:Feng等^[36]发现水闸的运行可能对不同季节无锡河网的水环境容量造成不同的影响,其中水闸对夏季的水环境容量具有提升的作用,其余季节作用则相反;Zhang等^[37]发现若水库和大坝的运行方式合理,可以提高太子河流域的水环境容量。以上研究与本文模拟结果基本一致。由本文模拟结果可知,若鄱阳湖输入污染过于严重,枢纽的建设可能将显著降低鄱阳湖水环境容量,因此,枢纽可执行动态调度策略,如湖区水质污染十分严重时,加快枢纽的泄水速率,以加快湖区内的水流交换速度,增强湖区水体自净能力。另外,鄱阳湖的污染物入湖主要来

源为“五河”的输入^[38],故控制“五河”污染物的输入对于枢纽建成后能否有效提升鄱阳湖水环境容量十分重要。

一般而言,枢纽的建设可能会导致湖泊水质参数发生改变,例如水库的蓄水可能导致湖泊冬季微生物的大量繁殖,从而改变微生物对营养盐的分解与吸收速率。由于无法获取枢纽建设后的实测数据进行模型参数的率定验证,因此本文在有无枢纽情景下采用同一套参数进行湖泊水质的模拟,这在一定程度上导致了模拟结果的不确定性。但本文通过构建鄱阳湖水动力水质模型和月尺度的水环境容量模型,能够有效表征枢纽建设运行前后的水质和水环境容量过程相对变化趋势,可为鄱阳湖水利枢纽建设与鄱阳湖水环境容量管控提供参考。

5 结 论

a. 枢纽的建设运行能显著增加鄱阳湖的水体体积从而提高其水资源承载能力,在极端退水年和一般退水年,平均每月鄱阳湖水体体积可分别增大34.20%和16.35%。

b. 枢纽的建设运行会导致鄱阳湖 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度一定程度的升高,但是 COD_{Mn} 质量浓度的升高范围在10.00%以内;在极端退水年, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度平均每月升高15.48%,而在一般退水年,湖泊的TP质量浓度会因枢纽蓄水的稀释作用而降低,月平均降低12.16%。

c. 虽然枢纽建设运行会导致鄱阳湖污染物质量浓度一定程度的升高,但是可显著提升 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的水环境容量, $\text{NH}_3\text{-N}$ 月尺度的水环境容量最大可提升60.89%,且在一般退水年,枢纽可显著增大TP水环境容量,月平均增大196.25%。但是在极端退水年,湖泊TP水环境容量会因枢纽的滞留作用而降低。

参考文献:

[1] 孙冬梅,程雅芳,冯平. 海河干流汛期动态水环境容量计算研究[J]. 水利学报,2019,50(12):1454-1466. (SUN Dongmei, CHENG Yafang, FENG Ping. Study on dynamic water environmental capacity of mainstream of Haihe River in flood season [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(12):1454-1466. (in Chinese))

[2] WANG Huadong, WANG Shuhua, BAO Quansheng, et al. On regional differentiation of river water environment capacity and strategies to control water environment pollution in China [J]. Chinese Geographical Science, 1995,5(2):116-124.

[3] KELLER A A, CAVALLAROL. Assessing the US clean

Water Act 303 (d) listing process for determining impairment of a waterbody [J]. Journal of Environmental Management,2008,86(4):699-711.

[4] CHEN Qiuwen, WANG Qibin, LI Zhijie, et al. Uncertainty analyses on the calculation of water environmental capacity by an innovative holistic method and its application to the Dongjiang River [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014,26(9):1783-1790.

[5] 张万顺,李琳,彭虹,等. 面向水环境改善的城市河网动态水环境容量[J]. 水资源保护,2022,38(1):167-175. (ZHANG Wanshun, LI Lin, PENG Hong, et al. Dynamic water environment capacity of urban river network for water environment improvement [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 167-175. (in Chinese))

[6] YAO Siyang, LI Xinyu, LIU Chenglin, et al. New assessment indicator of habitat suitability for migratory bird in wetland based on hydrodynamic model and vegetation growth threshold [J]. Ecological Indicators, 2020,117:106556.

[7] 方豫,邢久生,谭胤静. 鄱阳湖水环境容量及水环境管理研究[J]. 江西科学,2008,26(6):977-981. (FANG Yu, XING Jiusheng, TAN Yinjing. Research on water environmental capacity and management of Poyang Lake [J]. Jiangxi Science, 2008, 26 (6): 977-981. (in Chinese))

[8] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(1):39-45. (in Chinese))

[9] YE Xuchun, ZHANG Qi, LIU Jian, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China [J]. Journal of Hydrology,2013,494:83-95.

[10] 刘剑宇,张强,邓晓宇,等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J]. 湖泊科学,2016,28(2):432-443. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, DENG Xiaoyu, et al. Quantitative analysis the influences of climate change and human activities on hydrological processes in Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2016,28(2):432-443. (in Chinese))

[11] YANG Wenjing, YOU Qinghui, FANG Na, et al. Assessment of wetland health status of Poyang Lake using vegetation-based indices of biotic integrity [J]. Ecological Indicators,2018,90:79-89.

[12] 江西省鄱阳湖水利枢纽建设办公室. 为了“一湖清水”:鄱阳湖水利枢纽工程介绍 [J]. 江西水利科技, 2013,39(2):83-91. (Construction Office of Poyang Lake

- Water Control Project of Jiangxi Province. Keep the lake water clear-introduction of Poyang Lake Water Control Project [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2013,39(2):83-91. (in Chinese))
- [13] 周建军,张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):1-12. (in Chinese))
- [14] 赖格英,王鹏,黄小兰,等. 鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水动力影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 128-140. (LAI Geying, WANG Peng, HUANG Xiaolan, et al. A simulation research of impacts of the Lake Poyang Hydraulic Project on hydrology and hydrodynamics [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1):128-140. (in Chinese))
- [15] 赖格英,张志勇,王鹏,等. 拟建鄱阳湖水利枢纽工程对长江干流流量影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3): 521-533. (LAI Geying, ZHANG Zhiyong, WANG Peng, et al. Simulation of impacts of Poyang Lake Hydraulic Project on the flow of the Yangtze River using an EFDC model [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(3):521-533. (in Chinese))
- [16] 杨中华,朱政涛,槐文信,等. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯水年水动力水质影响研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 156-167. (YANG Zhonghua, ZHU Zhengtao, HUAI Wenxin, et al. Study on the influence of Poyang Lake Hydraulic Project on hydrodynamics and water-quality in wet and dry year [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2):156-167. (in Chinese))
- [17] 胡春华,施伟,胡龙飞,等. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖区氮磷营养盐影响的模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 749-755. (HU Chunhua, SHI Wei, HU Longfei, et al. Simulation study on the impact of Poyang Lake Hydro-Junction Projects on nitrogen and phosphorus nutrient in lake region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(6):749-755. (in Chinese))
- [18] YAO Siyang, LI Xinyu, LIU Chenglin, et al. Quantitative assessment of impact of the proposed Poyang Lake Hydraulic Project (China) on the habitat suitability of migratory birds [J]. Water, 2019, 11(8): w11081639.
- [19] LI Qiyue, LAI Geying, LIU Ying, et al. Assessing the impact of the proposed Poyang lake hydraulic project on the Yangtze finless porpoise and its calves [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107873
- [20] 杨中文,张萌,郝彩莲,等. 基于源汇过程模拟的鄱阳湖流域总磷污染源解析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2493-2506. (YANG Zhongwen, ZHANG Meng, HAO Cailian, et al. Source apportionment of total phosphorus pollution in Poyang Lake Basin based on source-sink process modeling [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(11): 2493-2506. (in Chinese))
- [21] 徐丽婷,阳文静,游清徽,等. IBI 应用于湿地生态健康评价的研究进展 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 104-110. (XU Liting, YANG Wenjing, YOU Qinghui, et al. The recent advances in applications of index of biotic integrity on the assessment of wetland ecological health [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2017, 41(1): 104-110. (in Chinese))
- [22] 谢冬明,陈亚云,田磊,等. 鄱阳湖湿地 1954—2016 年水位变化分析 [J]. 江西水利科技, 2018, 44(3): 157-159. (XIE Dongming, CHEN Yayun, TIAN Lei, et al. Water level change in Poyang Lake wetlands from 1954 to 2016 [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2018, 44(3):157-159. (in Chinese))
- [23] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 21 flow model FM, hydrodynamic module, user guide [R]. Copenhagen: DHI, 2021.
- [24] 姚斯洋,刘成林,魏博文,等. 基于 MikeFlood 的组合情景洪水风险分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 61-69. (YAO Siyang, LIU Chenglin, WEI Bowen, et al. Combined scenario flood risk analysis based on MikeFlood [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 61-69. (in Chinese))
- [25] 姚斯洋,李昕禹,刘成林,等. 不同水位下拟建鄱阳湖水利枢纽对食块茎鸟类栖息地适宜性的影响研究 [J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3998-4009. (YAO Siyang, LI Xinyu, LIU Chenglin, et al. Effect of the proposed construction of Poyang Lake Hydraulic Project on the habitat suitability for tuber-eating birds at different water levels [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3998-4009. (in Chinese))
- [26] LI Bing, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Hydrodynamic and water quality modeling of a large floodplain lake (Poyang Lake) in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(35): 35084-35098.
- [27] 陆锦. 基于 MIKE 模型的鄱阳湖水动力水质模拟研究 [D]. 南京:东南大学, 2019.
- [28] 姚静,李云良,李梦凡,等. 地形变化对鄱阳湖枯水的影响 [J]. 湖泊科学, 2017, 29(4): 955-964. (YAO Jing, LI Yunliang, LI Mengfan, et al. The influence of bathymetry changes on low water level of Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(4): 955-964. (in Chinese))

- the Manwan Hydropower Project [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 235-242. (in Chinese))
- [55] CHEN Liang, SUI Xin, WANG Dongsheng, et al. The ecological benefit-loss evaluation in a riverine wetland for hydropower projects: a case study of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River, China [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 96: 34-44.
- [56] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析: 以武江干流为例 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2163-2176. (JIA Jianhui, CHEN Jianyao, LONG Xiaojun, et al. Evaluating the cumulative impacts of the hydropower development on the river ecosystem services in terms of spatial and temporal aspects: a case study in the mainstream of the Wujiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2163-2176. (in Chinese))
- [57] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 443-452. (ZHAO Tongqian, OUYANG Zhiyun, WANG Xiaoke, et al. Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 443-452. (in Chinese))
- [58] 王俊, 苏巍, 杨少荣, 等. 金沙江一期工程蓄水前后绥江段鱼类群落多样性特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 394-401. (WANG Jun, SU Wei, YANG Shaorong, et al. Variation characteristics of fish biodiversity in Suijiang section before and after impoundment of first phase of Jinsha River hydropower project [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 394-401. (in Chinese))
- [59] 尹晔, 王党伟, 冯胜航, 等. 向家坝水电站库区泥沙淤积特性 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(7): 71-75. (YIN Ye, WANG Dangwei, FENG Shenghang, et al. Sedimentation characteristics in reservoir area of Xiangjiaba Hydropower Station [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(7): 71-75. (in Chinese))
- [60] 中华人民共和国文化和旅游部. 2012 年入境游客抽样调查综合分析报告 [R]. 北京: 中华人民共和国文化和旅游部, 2013. (收稿日期: 2022-01-04 编辑: 施业)

(上接第 207 页)

- [29] 区铭亮, 周文斌, 胡春华. 三峡水库调度下鄱阳湖水环境容量变化特征 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(16): 9786-9788. (OU Mingliang, ZHOU Wenbin, HU Chunhua. Variation characteristics of water environmental capacity in Poyang Lake under the scheduling of three gorges reservoir [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(16): 9786-9788. (in Chinese))
- [30] 刘晓东, 杨婷, 石佳佳, 等. 关于现行水域纳污能力计算规程中河流计算模型的探讨 [J]. *环境保护科学*, 2018, 44(2): 32-36. (LIU Xiaodong, YANG Ting, SHI Jiajia, et al. Discussion of the code of practice for computation on permissible pollution bearing capacity of water bodies in the current calculation procedures [J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(2): 32-36. (in Chinese))
- [31] 叶群, 计勇, 吴培军, 等. 鄱阳湖水利枢纽对湖区水动力及滞留时间的影响 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(2): 13-17. (YE Qun, JI Yong, WU Peijun, et al. Impacts of Poyang Lake Hydraulic Project on hydrodynamics and residence time in lake area [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(2): 13-17. (in Chinese))
- [32] 胡刚, 王里奥, 袁辉, 等. 三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟实验研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(5): 780-784. (HU Gang, WANG Liao, YUAN Hui, et al. Release of N, P from submerged soil in the bottom part of shore-area in three gorges reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(5): 780-784. (in Chinese))
- [33] WEI Guoliang, YANG Zhifeng, CUI Baoshan, et al. Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the Lancang River, China [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(9): 1763-1780.
- [34] CHEN Xi, WANG Yanhua, CAI Zucong, et al. Response of the nitrogen load and its driving forces in estuarine water to dam construction in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(25): 31458-31467.
- [35] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 梯级筑坝对黑河水质时空分布特征的影响 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1539-1551. (WANG Yu, LU Shiguo, FENG Qi, et al. Effect of cascade dam construction on the spatio-temporal variations of water quality in Heihe River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1539-1551. (in Chinese))
- [36] FENG Lan, LI Qiaoqiao, ZHANG Lei, et al. Exploring the effect of floodgates operation systems on water environmental capacity in a regulated river network of Wuxi, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 299: 126743
- [37] ZHANG Zezhong, ZHANG Fan, XU Chenguang, et al. Study on the water environment capacity for the typical watershed in Taizihe River [C] // International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. Piscataway: IEEE, 2011: 486-488.
- [38] 戴星照, 胡振鹏. 鄱阳湖资源与环境研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019. (收稿日期: 2021-10-11 编辑: 熊水斌)