

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.021

走马塘排水对望虞河引水水质的影响

胡祉冰^{1,2}, 逢 勇^{1,2}, 胥瑞晨^{1,2}, 汪静娴^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为量化望虞河引水枢纽移建后其引水水质受到上游走马塘排水的影响程度,通过建立长江江苏段二维水环境数学模型,选取总磷作为研究对象,量化了不同排水量方案下走马塘排水对望虞河引水枢纽处的水质影响,并提出了后期引水水质改善的措施。结果表明:走马塘排水对望虞河引水水质影响随潮汐波动,引水枢纽外移后望虞河引水总磷质量浓度最大增幅可达 21.3%;提高走马塘排水水质可减小对望虞河引水枢纽处水质影响,采取间隔引水的方式对降低望虞河总磷质量浓度效果更为明显;在走马塘排水水质达到地表水环境Ⅳ类标准、停止排水 48 h 以后引水,可以基本控制总磷质量浓度增幅在 1% 以下。

关键词:引水水质;总磷;污染控制;水环境数学模型;走马塘;望虞河

中图分类号:TV213.4;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0135-06

Effect of Zoumatang drainage on water quality of Wangyu River diversion // HU Zhibing^{1,2}, PANG Yong^{1,2}, XU Ruichen^{1,2}, WANG Jingxian^{1,2} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To quantify the effect of Zoumatang drainage on the water quality of Wangyu River after the transfer of water diversion project, a two-dimensional mathematical model of water environment for the Jiangsu section of Yangtze River is established, and TP is selected as the research object, and the influence of Zoumatang drainage on the water quality of Wangyu River diversion entrance under different schemes is quantified. The water quality improvement measures in the later stage of diversion were put forward. The results showed that the effect of Zoumatang River drainage on the water quality of Wangyu River diversion was affected by tidal fluctuation, and the maximum increase of TP concentration of Wangyu River diversion water quality could reach 21.3% after the entrance of the diversion project was moved outside. Improving the drainage quality of Zoumatang can reduce the impact on the water quality of Wangyu River Diversion Project. It is more obvious to decrease the concentration of total phosphorus in Wangyu River by the way of interval water diversion. When the water diversion is done after the water quality of Zoumatang reaches the standard of surface water environment IV and the drainage is stopped for 48 hours, the increase of total phosphorus concentration can be basically controlled below 1%.

Key words: diversion water quality; total phosphorus; pollution control; mathematical model of water environment; Zoumatang; Wangyu River

自 2002 年“引江济太”工程实施至今^[1],在区域供水、排涝等方面取得了重要成效,但由于长期以来长江总磷指标劣于太湖东部沿岸区^[2],且望虞河沿线支流大量氮、磷污染物随引水进入湖体,该工程对太湖水质及水生态的改善作用颇有争议^[3-5]。太湖作为上海、苏州等地优质水源地,区域用水需求的

快速增长导致“引江济太”规模扩大势在必行,走马塘作为“引江济太”水源地上游最主要的规划排水河道,其排水水量、水质对望虞河引江水源地水质有直接影响。

在对走马塘排水对长江下游水源地影响的相关研究方面,纪洪燕^[6]采用指数法分析了走马塘排水

基金项目:国家自然科学基金(51879070);国家科技重大专项(2018ZX07208-003)

作者简介:胡祉冰(1996—),女,博士研究生,研究方向为水环境数值模拟。E-mail: 2876573930@qq.com

通信作者:逢勇(1958—),男,教授,博士,主要从事环境工程研究。E-mail: yypang@hhu.edu.cn

后在长江的污染带长度,但未能反映污染物随长江潮位迁移规律;王超等^[7]基于 EFDC 模型模拟了走马塘排水对“引江济太”水源地水质的影响,但其主要模拟污染物为 COD_{Mn} ,且未考虑到望虞河扩建工程建设后区域水情变化;杜德军等^[8]建立了长江物理模型模拟得到望虞河引水枢纽移至铁黄沙后,走马塘排水造成望虞河引水枢纽处 COD_{Mn} 和氨氮浓度明显上升。但河工模型并不能很好反映污染物降解的生化过程,存在一定局限性,且以往研究并未考虑到望虞河扩建方案。

本文基于建立的长江江苏段二维水环境数学模型,研究了走马塘不同排水情况对望虞河扩建工程前后引水 TP 质量浓度的影响,并提出减缓对望虞河引水枢纽处水质影响的调度及污染控制措施,以期减轻“引江济太”工程扩建后带来的环境影响,确保望虞河入湖断面 TP 质量浓度满足管理要求。

1 研究区概况

望虞河($120^{\circ}24'9''\text{E} \sim 120^{\circ}49'41''\text{E}$, $31^{\circ}26'42''\text{N} \sim 31^{\circ}46'55''\text{N}$)为长江中下游平原连接长江与太湖的一条骨干引排水通道(图 1),近年来其对太湖水资源的补充作用愈发明显^[9]。为改善望虞河入湖水水质,拟于望虞河西岸支流口门处设闸,西岸支流通过望虞河西北侧走马塘($120^{\circ}24'48''\text{E} \sim 120^{\circ}49'58''\text{E}$, $31^{\circ}27'55''\text{N} \sim 31^{\circ}50'54''\text{N}$)入长江,以减少“引江济太”过程中氮、磷等污染物入湖量^[10-12]。

望虞河现状引水枢纽位于福山水道内侧,距离走马塘排水口沿长江岸线 12.3 km,为解决望虞河河口处泥沙淤积带来的河口萎缩问题,望虞河扩建方案拟将望虞河引水枢纽外移至铁黄沙^[13](图 1(b)),移建后望虞河引水枢纽位于走马塘排水口下

游沿长江岸线 5.5 km 处,走马塘排水势必对望虞河引水口水质造成更显著影响。

2 研究方法

2.1 二维水动力控制方程

模拟基于二维水环境数学模型,笛卡尔坐标系下的二维水动力控制方程是不可压缩流体三维雷诺 Navier-Stokes 平均方程沿水深方向积分的连续方程(式(1))和动量方程(式(2)(3))^[14]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hQ \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

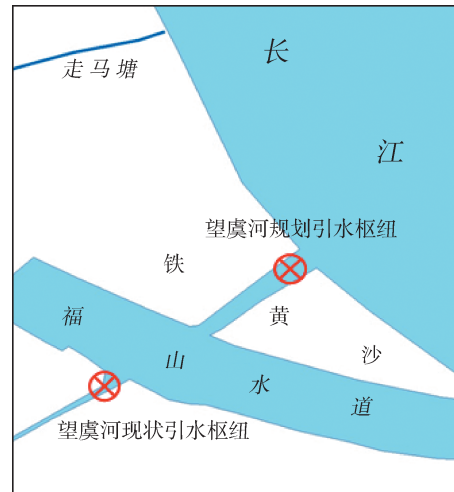
$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = & -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $h\bar{u} = \int_{\eta-h}^{\eta} u dz$ $h\bar{v} = \int_{\eta-h}^{\eta} v dz$ $f = 2\Omega \sin \varphi$

式中: t 为时间, s; h 为总水深, m; η 为水位, m; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_0 为水的相对密度; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 为沿 x 、 y 方向的流速分量 u 、 v 的平均值, m/s; u_s 、 v_s 为外界排放到环境中水体的速度, m/s; f 为柯氏力参数; τ_{sx} 、 τ_{sy} 、 τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为水面风应力和河床床面应力; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为辐射应力; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 分别为黏滞阻力、紊流摩擦阻力和差动平流摩擦阻力, $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$;



(a) 研究区域



(b) 望虞河引水枢纽位置

图 1 研究区域及望虞河引水枢纽位置

Fig. 1 The study area and location of Wangyu River water diversion hub

Q 为点源的排放量, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; p_a 为大气压; Ω 为地球自转的角速度; φ 为地理纬度。

2.2 二维水质控制方程

污染物扩散考虑二维平面扩散过程, 水质控制方程采用污染物对流扩散基本方程^[15]:

$$\frac{\partial h\bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{\rho}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{\rho}}{\partial y} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] \bar{\rho} + S + S_k \tag{4}$$

式中: $\bar{\rho}$ 为水深平均的污染物质量浓度, mg/L ; E_x 、 E_y 为 x 、 y 方向的扩散系数, m^2/s ; S 为源(汇)项, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; S_k 为动力转换项, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.3 模型建立及参数率定

水动力模型将长江马鞍山至堡镇段作为模拟区域, 模型岸线及水下高程采用长江航道地形数据, 采用非结构网格(三角形)对模拟区域进行离散, 共划分网格数 42 991 个, 平均网格边长 250 m, 模型计算

二维网格如图 2 所示。

模型率定选取 2013 年 12 月南京站、镇江(二)站、营船港站、崇西闸站和大通站 5 个水文站监测资料, 模型计算值与实测值对比见图 3。采用平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)和相关系数(R^2)3 个指标对实测值与计算值做误差及相关性分析^[16-17], 结果见表 1, 可见构建的模型各站点水动力计算值与实测值的 RMSE 较小, MRE 小于 5%, $R^2 > 0.95$, 模型可以较好地反映长江水动力过程。根据率定得到模拟区域河段主槽糙率的取值范围为 0.01 ~ 0.02, 风拖曳系数为 0.001 ~ 0.001 5。

2.4 计算方案设置

在长江水动力计算基础上, 采用二维水质控制方程计算走马塘排水对“引江济太”引水水质的影响, 取 90% 水文保证率为模型计算边界水文条件, 初始水位取水文年鉴中水位平均值 2.6 m, 温度 20 ℃, 起始时刻流速设为 0 m/s。

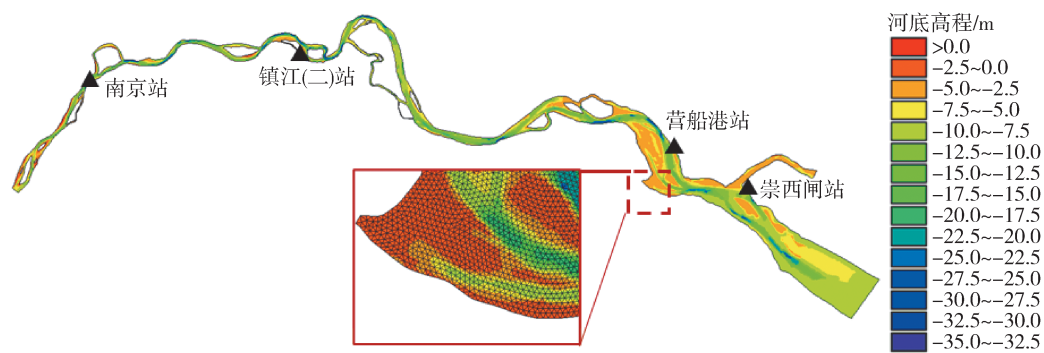


图 2 二维水环境数学模型计算范围、地形及二维网格

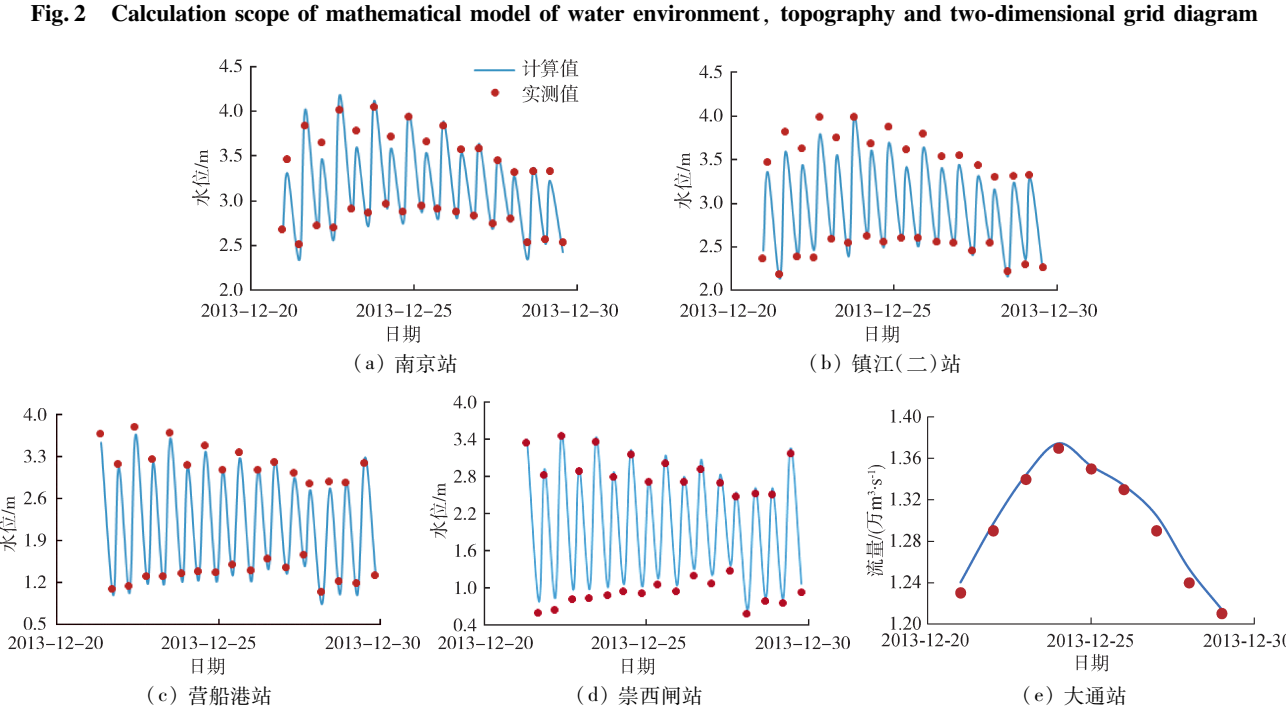


图 3 水动力模型计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between the calculated value and the measured value of hydrodynamic model

表1 水力模型计算结果评价

Table 1 Evaluation of hydrodynamic model calculation results

水文站	率定参数	RMSE	MRE/%	R ²
南 京	水位	0.071 m	1.79	0.988
镇江(二)	水位	0.061 m	1.52	0.993
营船港	水位	0.087 m	4.10	0.997
崇西闸	水位	0.071 m	4.46	0.998
大 通	流量	81.558 m ³ /s	0.59	0.997

由于污染物到达时间较短,仅考虑对流扩散过程,TP降解系数设为0,排水TP质量浓度取其水功能区标准质量浓度(地表水环境质量Ⅴ类,为0.4 mg/L)。考虑到走马塘目前尚未排水,计算方案采用其设计平均排水量持续排水(工况1)、现状排水泵站最大排水量持续排水(工况2)、规划排水泵站最大排水量持续排水(工况3)、规划排水泵站最大排水量持续排水7 d后停止排水(工况4)、规划排水泵站最大排水量持续排水7 d后停止排水且排水质量浓度改善为地表水环境质量Ⅳ类(工况5),工况4、5用于分析望虞河间隔引水效果,具体计算方案设置见表2。

表2 计算方案设置

Table 2 Calculation scheme setting

工况	走马塘排水量/(m ³ ·s ⁻¹)	走马塘排水TP质量浓度/(mg·L ⁻¹)
1	30	0.4
2	50	0.4
3	80	0.4
4	80(7 d后停止)	0.4
5	80(7 d后停止)	0.3

3 结果与分析

3.1 走马塘排水对“引江济太”水源水质的影响

图4为望虞河引水枢纽处TP质量浓度增量随走马塘排水时间变化过程,可见走马塘开始排水后TP质量浓度增量随长江潮汐周期性波动。不同排水量的3种工况下望虞河现状引水枢纽处TP质量浓度增量呈现先上升后稳定的趋势,涨急时刻TP质量浓度增量达到峰值,走马塘持续排水40 h后望虞河引水枢纽处水质开始明显变差,持续排水80 h后水质趋于稳定,工况1、2、3 TP质量浓度最大增量分别为0.004 mg/L、0.006 mg/L和0.008 mg/L。规划引水枢纽外移后,走马塘排水持续18 h望虞河引水枢纽处TP质量浓度便开始明显上升,落急时刻质量浓度增量达到峰值,工况1、2、3 TP质量浓度最大增量可达0.008 mg/L、0.012 mg/L和0.019 mg/L。

2017年望虞河引水枢纽处TP监测质量浓度为0.09 mg/L,根据工况1、2、3条件计算得到走马塘排

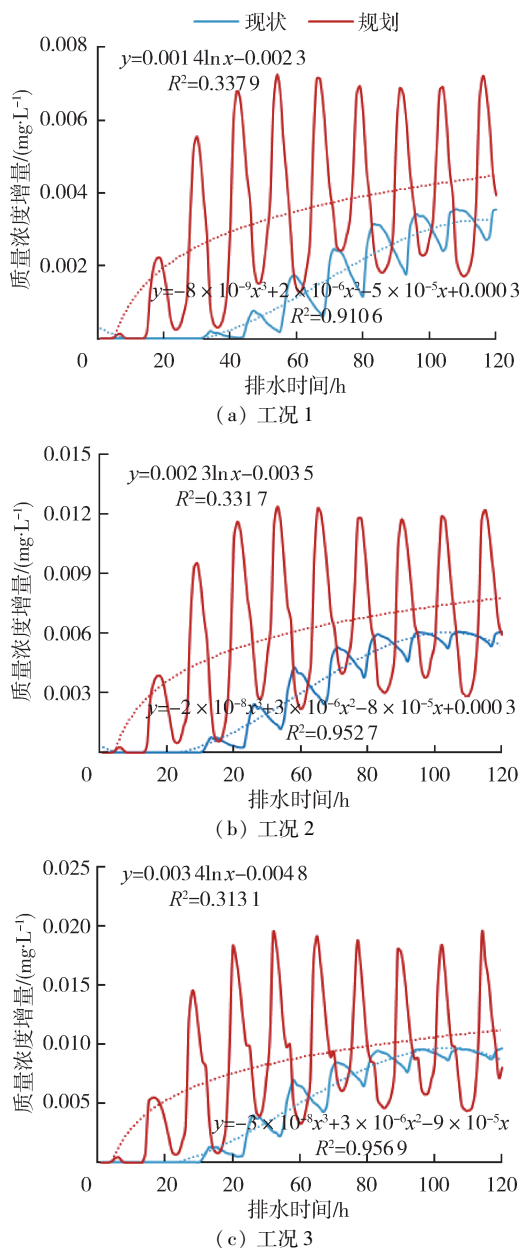


图4 望虞河引水枢纽处TP质量浓度增量随走马塘排水时间变化

Fig. 4 Variation of TP mass concentration increment at the Wangyu River water diversion project with the discharge time of Zoumatang

水对望虞河现状引水枢纽处TP最大质量浓度增幅为4.5%、6.7%和9.0%,而望虞河规划引水枢纽处受走马塘排水水质影响明显加剧,TP质量浓度增幅可达8.9%、13.5和21.3%。走马塘排水后望虞河引水枢纽处TP质量浓度最大可达0.11 mg/L,虽然满足望虞河TP质量浓度要求(0.2 mg/L),但由于望虞河引水最终进入太湖,引水水源TP质量浓度将远超出太湖TP质量浓度标准(0.05 mg/L),且随着日后望虞河引水规模的扩大,走马塘排水势必大幅增加望虞河引水的TP污染物通量,对太湖水质达标造成一定的影响^[18-19]。

3.2 “引江济太”水源水质改善措施

为减缓走马塘排水对望虞河引水枢纽处的水质影响,选取最不利工况即走马塘排水量最大时,研究望虞河引水枢纽处的水质改善措施。分别计算工况4和工况5情况下望虞河引水枢纽处水质变化。模型计算结果表明,走马塘以地表水环境质量Ⅳ类标准排水相比Ⅴ类对规划望虞河引水枢纽处TP质量浓度有一定的改善作用,但平均改善率不足5%,而望虞河间隔引水对望虞河规划引水枢纽处TP质量浓度的降低效果更为明显。

图5为望虞河引水枢纽处TP质量浓度增量随走马塘停止排水后间隔时间(走马塘停止排水到望虞河开始引水所需时间)变化过程,表3为望虞河引水水质改善所需间隔时间。结合区域地形(图1),工况4走马塘排水停止后望虞河引水枢纽处不同TP质量浓度增幅下所需间隔时间如下:①若望虞河引水枢纽处TP质量浓度增幅小于10%,现状引水枢纽处和规划引水枢纽处需分别在走马塘停止排水9h和22h后再引水,这是由于望虞河现状引水枢纽位于福山水道内侧,较外移后的规划引水枢纽受到走马塘排水水质直接影响更小;②若望虞河引水枢纽处TP质量浓度增幅小于5%,现状引水枢纽处和规划引水枢纽处分别需在走马塘停止排水53h和32h后再引水,可能是因为现状引水枢纽处

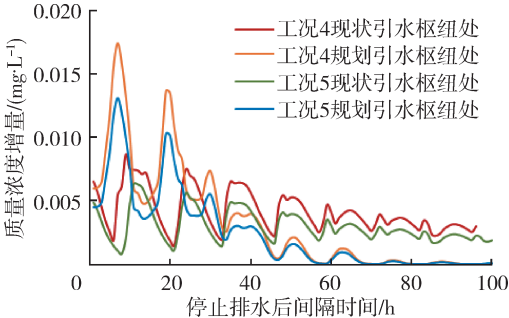


图5 走马塘停止排水后望虞河引水枢纽处TP质量浓度增量变化

Fig.5 Variation of TP mass concentration increment at the Wangyu River water diversion project after the drainage stop of Zoumatang

表3 望虞河引水水质改善所需间隔时间

Table 3 Interval time needed for improvement of water quality of Wangyu River diversion

工况	望虞河引水 枢纽位置	走马塘排 水水质	不同TP质量浓度增幅时引水 水质改善所需间隔时间/h		
			<10%	<5%	<1%
4	现状	Ⅴ类	9	53	>72
4	规划	Ⅴ类	22	32	55
5	现状	Ⅳ类	0	40	>72
5	规划	Ⅳ类	20	30	48

由于走马塘排水带来的TP污染物随长江涨落潮在福山水道内侧难以扩散,而规划引水枢纽处的污染物扩散条件较好,可随长江水流输移至下游区域,对望虞河规划引水枢纽处TP质量浓度的影响随停止排水时间变长而不断减小;③若望虞河引水枢纽处TP质量浓度增幅小于1%,现状引水枢纽处和规划引水枢纽处需分别在走马塘停止排水72h和55h后再引水。工况5走马塘以地表水环境质量Ⅳ类排放,望虞河引水枢纽处TP质量浓度增量变化规律基本与工况4相似,日后若改善走马塘排水TP质量浓度到地表水Ⅳ类,在停止排水48h后,望虞河规划引水枢纽处的TP质量浓度增幅小于1%,可保证望虞河引水水质基本不受影响。

4 结 论

a. 走马塘排水对望虞河引水枢纽处水质有一定影响,尤其在望虞河引水枢纽外移后受到走马塘排水水质影响加剧,TP质量浓度增幅最大可达21.3%。

b. 提高走马塘排水水质要求可减小对望虞河引水枢纽处水质影响,但加强两处枢纽的联合调度管理,采取间隔引水的方式对降低望虞河TP质量浓度的效果更为明显。

c. 为保障日后望虞河引水水质安全,需尽可能避免走马塘大量排水期间引水,在要求走马塘排水水质达到地表水环境质量Ⅳ类要求基础上停止排水48h后引水,可以基本控制望虞河引水枢纽处TP质量浓度增幅在1%以下。

参考文献:

[1] 高怡,毛新伟,徐卫东.“引江济太”工程对太湖及周边地区的影响分析[J].水文,2006(1):92-94. (GAO Yi, MAO Xinwei, XU Weidong. Analysis of the influence on the Taihu Lake and the area around: diversion from the Yangtze River to the Taihu Lake [J]. Journal of China Hydrology, 2006(1): 92-94. (in Chinese))

[2] 秦延文,马迎群,王丽婧,等.长江流域总磷污染:分布特征·来源解析·控制对策[J].环境科学研究,2018,31(1):9-14. (QIN Yanwen, MA Yingqun, WANG Lijing, et al. Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin: distribution characteristics, source and control strategy [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(1): 9-14. (in Chinese))

[3] 李大勇,王济干,董增川.引江调水改善太湖贡湖湾的水环境效应[J].水力发电学报,2011,30(5):132-138. (LI Dayong, WANG Jigan, DONG Zengchuan. Study on water-environmental effects of Gonghu bay water transfer

- from Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 132-138. (in Chinese)
- [4] 毛新伟, 徐枫. 引江济太与环太湖主要河流对太湖水质影响的对比分析[J]. 水利发展研究, 2018, 18(1): 29-32. (MAO Xinwei, XU Feng. Comparative analysis of water quality of Taihu Lake by main rivers diverted from the Yangtze River to the Taihu Lake and around the Taihu Lake [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(1): 29-32. (in Chinese))
- [5] 沈爱春. 望虞河引江对太湖的影响研究[J]. 水资源保护, 2002, 18(1): 29-32. (SHEN Aichun. Impacts of water diversion from Yangtze River on water environment of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2002, 18(1): 29-32. (in Chinese))
- [6] 纪洪艳. 走马塘拓浚延伸工程对长江水环境影响研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 127-130. (JI Hongyan. To research the influence of Zoumatang dredging and expansion project on the water environment of Yangtze River [J]. Chinese Engineering Science, 2010, 12(6): 127-130. (in Chinese))
- [7] 王超, 黄超, 朱华刚, 等. 走马塘工程对“引江济太”水源地水环境影响研究[J]. 四川环境, 2013, 32(3): 77-84. (WANG Chao, HUANG Chao, ZHU Huagang. Influence of Zoumatang Project on the water environment of water source area of “Water Diversion from Yangtze to Taihu” Project [J]. Sichuan Environment, 2013, 32(3): 77-84. (in Chinese))
- [8] 杜德军, 夏云峰, 时惠恩, 等. 走马塘排水对望虞河引水水质影响试验研究[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 大连: 中国海洋工程学会, 2013: 1283-1290.
- [9] 汪大为, 陈红. 太湖流域沿长江及环太湖引排水量趋势分析[J]. 水利规划与设计, 2016(1): 54-56. (WANG Dawei, CHEN Hong. Analysis of the displacement trend of Taihu Basin along the Yangtze River and around Taihu Lake [J]. Water Conservancy Planning and Design, 2016(1): 54-56. (in Chinese))
- [10] 朱桂娥, 吴巍巍, 朱勇, 等. 西岸有效控制对引江济太作用的分析[J]. 中国水利, 2008(1): 26-27. (ZHU Guie, WU Weiwei, ZHU Yong, et al. Role of effective control of west bank on Yangtze-Taihu Water Diversion [J]. China Water Resources, 2008(1): 26-27. (in Chinese))
- [11] 徐慧, 韩青. 常熟市望虞河西岸地区排水通道问题[J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 72-75. (XU Hui, HAN Qing. Drainage outlet of west Wangyu River in Changshu City [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(1): 72-75. (in Chinese))
- [12] 徐凌云, 逢勇, 付浩. 保障望虞河引调水期水质的引水顶托条件研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 121-126. (XU Lingyun, PANG Yong, FU Hao. Study of diversion backwater conditions for ensuring water quality of Wangyu River during water diversion period [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 121-126. (in Chinese))
- [13] 邱训平. 长江铁黄沙整治工程水环境影响研究及保护对策[J]. 人民长江, 2014, 45(增刊2): 57-60. (QIU Xunping. Study on water environmental impact and protection countermeasures of Yangtze River Tiehuangsha Renovation Project [J]. Yangtze River, 2014, 45(Sup2): 57-60. (in Chinese))
- [14] 张虎, 徐学军, 代涛. MIKE21 FM 在引江济巢工程规划中的应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 103-106. (ZHANG Hu, XU Xuejun, DAI Tao. Application of MIKE21 FM in Water Diversion Project from Yangtze River to Chaohu Lake [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(9): 103-106. (in Chinese))
- [15] 史常乐, 牛兰花, 成金海. 水质模型中污染物衰减系数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 91-96. (SHI Changle, NIU Lanhua, CHENG Jinhai. Sensitivity analysis of pollutant attenuation coefficient in water quality model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(4): 91-96. (in Chinese))
- [16] XU Ruichen, PANG Yong, HU Zhibing, et al. Influence of water diversion on spatial and temporal distribution of flow field and total phosphorus (TP) concentration field in Taihu Lake [J]. Water Supply, 2020, 20(3): 1059-1071.
- [17] 李一平, 施媛媛, 姜龙, 等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 1-8. (LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Advances in surface water environment numerical models [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 1-8. (in Chinese))
- [18] 陈亚男, 逢勇, 赵伟, 等. 望虞河西岸主要入河支流污染物通量研究[J]. 水资源保护, 2011, 27(2): 26-28. (CHEN Yanan, PANG Yong, ZHAO Wei, et al. Study on flux of pollutants discharged into western Wangyu River Basin through main inflow river channels [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 26-28. (in Chinese))
- [19] 麻林, 刘凌, 宋兰兰, 等. 调水过程中望虞河的水质风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 13-18. (MA Lin, LIU Ling, SONG Lanlan, et al. Risk analysis of water quality of Wangyu River during water diversion [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(1): 13-18. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-11-12 编辑: 熊水斌)

