

水源与饮用水保障

陈典坤,杨显.“引江济太”新建工程对梅梁湾总磷总氮分布的影响[J].净水技术,2022,41(2):34-39,110.

CHEN D K, YANG X. Influence of the newly-built project of "Yangtze River-Taihu Lake water diversion" on TP and TN distribution in Meiliang Bay[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2):34-39,110.



扫我试试?

“引江济太”新建工程对梅梁湾总磷总氮分布的影响

陈典坤,杨 显

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 211100)

摘 要 2016年以来,太湖水体总磷(TP)浓度上升且在2017年暴发大面积蓝藻,严重威胁了太湖水环境安全。2020年“引江济太”新建工程——新孟河延伸拓浚工程和新沟河延伸拓浚工程正式启用,将在已投入使用的望虞河引水工程基础上进一步提高进出太湖水量,为改善太湖水环境提供新的解决方案。文中通过建立太湖二维水动力-水质模型,模拟并分析“引江济太”新建工程中,太湖梅梁湾在不同季节盛行风下TP和总氮(TN)的迁移扩散规律。模拟结果表明,在夏半季与冬半季盛行风向作用下,不同引排量水对梅梁湾水域TP和TN的浓度影响与分布趋势存在差异性,当引排水量增加时,区域水体水质提升。

关键词 太湖 水动力-水质模型 盛行风 总氮 总磷

中图分类号: TU991.2; TV91 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)02-0034-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.02.005

Influence of the Newly-Built Project of "Yangtze River-Taihu Lake Water Diversion" on TP and TN Distribution in Meiliang Bay

CHEN Diankun, YANG Xian

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract Since 2016, the concentration of total phosphorus (TP) in Taihu Lake had increased and cyanophyta pollution incident broke out in 2017, which had seriously threatened the water environment of Taihu Lake. In 2020, the newly-built project of "Yangtze River-Taihu Lake water diversion", including Ximeng River extension and dredged project and Xingou River extension and dredged project would be put into operation. On the basis of Wangyu River diversion project that has been put into use, the amount of water entering and discharging Taihu Lake will be further increased, which will be new solutions to improve water environment. This paper established a two-dimensional hydrodynamic-water quality model of Taihu Lake to simulate and analyze the migration and diffusion laws of TP and total nitrogen (TN) in the Meiliang Bay of Taihu Lake under prevailing winds in different seasons in the newly-built project of "Water Diversion Project from the Yangtze River to Taihu Lake". Simulation results showed that under the effect of prevailing wind direction in summer and winter, different water entering and discharging had different effects and trends on TP and TN concentrations in the waters of Meiliang Bay. When the amount of diversion and drainage increases, the water quality of regional water body would be improved.

Keywords Taihu Lake hydrodynamic-water quality model prevailing wind total phosphorus (TP) total nitrogen (TN)

[收稿日期] 2021-03-14

[作者简介] 陈典坤(1997—),男,硕士,主要从事流体力学研究,E-mail:Cdiankun@163.com。

自 20 世纪 80 年代以来,太湖流域因水体富营养化等原因常暴发蓝藻水华^[1],严重影响了区域内的生产活动和社会经济发展。2007 年太湖流域暴发大规模蓝藻事件后,为治理太湖水环境,开始了以“引江济太”工程为核心的一系列治理工程。“引江济太”工程通过实施以“静态河网、动态水体、科学调度、合理配置”为战略目标的重大举措,适时通过望虞河将长江水引入太湖以实现改善太湖水环境的目标^[2]。太湖富营养化等水体环境问题一直受到广泛关注^[3-6]，“引江济太”工程运行以来,许多学者对工程在提升太湖水体水质与改善区域水环境等方面进行了研究,成果众多^[7-12],但目前对“引江济太”工程的研究主要集中在望虞河引水工程对贡湖与太湖水质的影响,而对 2020 年建成并投入使用的新孟河延伸拓浚工程和新沟河延伸拓浚工程的研究较少。新孟河延伸拓浚工程北起长江,沿老新孟河

拓浚至京杭运河,拓浚太滬运河和漕桥河入太湖;新沟河延伸拓浚工程从长江沿现有新沟河至京杭运河后,分别疏浚直湖港、武进港至太湖(图 1)。在 2016 年以后,太湖总磷(TP)浓度出现反弹现象^[13-14]并在 2017 年暴发大面积蓝藻^[15],截至 2019 年太湖 TP 浓度没有明显下降^[16]。本研究模拟新孟河延伸拓浚工程、新沟河延伸拓浚工程、望虞河引水工程运行时,梅梁湾在盛行风向下的 TP 和总氮(TN)的迁移扩散规律,研究成果可为改善梅梁湾及太湖水质提供新的解决方案。

太湖是浅水湖泊,风场是影响其流场特征的主要因素^[17],水面的夏季盛行风和冬季盛行风是东南风和西北风^[18]。本文以太湖梅梁湾(图 1)为研究对象,模拟“引江济太”新建工程实际运行时,梅梁湾在夏半季盛行风(东南风)与冬半季盛行风(西北风)两种风向下 TP 和 TN 的迁移扩散规律。



图 1 “引江济太”工程示意图和梅梁湾观测点

Fig. 1 Sketch Map of “Yangtze River-Taihu Lake Water Diversion” and Observation Point of Meiliang Bay

1 水动力水质模型的建立

1.1 模型建立

守恒型二维浅水方程与对流扩散方程耦合的矢量表达^[6]如式(1),守恒物理向量如式(2), x 方向的通量向量如式(3), y 方向的通量向量如式(4),源汇项如式(5)。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (1)$$

$$q = [h, hu, hv, hC_i]^T \quad (2)$$

$$f(q) = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv, huC_i]^T \quad (3)$$

$$g(q) = [hv, huv, hv^2 + gh^2/2, hvC_i]^T \quad (4)$$

$$b(q) = \{0, gh(s_{0x} - s_{fx}), gh(s_{0y} - s_{fy}), \nabla [D_i \nabla (hC_i)] - \mu_i hC_i + S_i\}^T \quad (5)$$

其中: q ——守恒物理量;

t ——时间, s;

h ——水深, m;

u, v —— x 和 y 向的垂线平均流速分量, m/s;

T ——表示转置;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

C_i ——溶质垂线平均质量浓度, mg/L;

s_{0x}, s_{fx} —— x 方向的河底坡度及摩阻坡度;

s_{0y}, s_{fy} —— y 方向的河底坡度及摩阻坡度,摩阻坡度由曼宁公式估算;

D_i ——扩散系数, m^2/s ;

∇ ——梯度算子, m^{-1} ;

μ_i ——降解系数, s^{-1} ;

S_i ——源汇项, $\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{s})$, 模型中考虑风力。

模型包括两个部分:(1)应用有限体积法及黎曼近似解对耦合方程组进行数值求解;(2)根据 WASP5 模型中氮、磷等营养盐指标在湖泊生态系统中的循环规律原理编写计算污染物源汇项程序。通过模型模拟出水体的流动过程和相应的污染物输运扩散过程。

1.2 模拟区域及网格生成

本研究主要关注梅梁湖,边界输入主要考虑新孟河延伸拓浚工程、新沟河延伸拓浚工程和望虞河引水工程。本文建立的模型及计算区域是整个太湖,为模拟出“引江济太”新建工程对太湖梅梁湾区域的 TP 和 TN 影响,在工况运行过程中保持新孟河、新沟河、望虞河和太浦河共 4 个河道呈开启状

态。采用无结构四边形网格对计算区域进行剖分,计算区域内有 6 348 个计算节点和 5 943 个计算单元,总计算时长为 744 h。

1.3 模型中的基础数据

(1) 边界条件及初始条件

根据太湖小雷山气象站 2007 年 12 月—2008 年 11 月的测量资料^[18],太湖湖面风速集中在 4.0~6.0 m/s ,盛行风向为东南风和西北风。入口边界条件为 2014 年 1 月环湖河道进出太湖的流量时间过程线和浓度时间过程线,出口为水位时间过程线,浓度过程取纽曼条件,太湖初始水位 $H=3$ m。

(2) 参数的率定

根据水质监测资料,结合 WASP5 模型提供的参考值,通过多次调试得到模型的参数值。表 1 是部分模型参数率定值。

表 1 WASP5 模型参数值
Tab. 1 Parameters of WASP5 Model

参数	符号	取值	参数	符号	取值
有机氮分解率	K_{OND}	0.003 4 d^{-1}	20 °C 有机氮的矿化率	K_{71}	0.064 d^{-1}
有机磷分解率	K_{OPD}	0.003 1 d^{-1}	20 °C 有机磷的矿化率	K_{83}	0.013 d^{-1}
温度系数	θ_{83}	1.080 0	曼宁粗糙系数	n	0.026
溶解的有机氮分数	f_{D7}	0.800 0	x 方向的扩散系数	D_{ix}	0.600 m^2/s
溶解的有机磷分数	f_{D8}	0.700 0	y 方向的扩散系数	D_{iy}	0.600 m^2/s

1.4 模型的率定

利用本模型模拟太湖在东南风风速为 4.0 m/s 时的流场,将模拟结果与实际监测的流场^[10]进行对比(图 2),发现结果一致:湖西区流场大致呈顺时针状,湖心区产生了一个逆时针流场,贡湖与梅梁湾水流呈逆时针方向流动,流速大小也与实测值接近。计算结果表明,本模型可以反映太湖实际的水动力学特性。杨显^[19]通过将该模型模拟的贡湖观测点 TP 浓度值与实测值进行对比,模拟结果符合实际情况,也验证了该模型的可靠性与实用性。

2 方案设计

因改善梅梁湾湖体水动力条件及水环境状况的需要,新沟河延伸拓浚工程设计外排流量为 150 m^3/s 。新孟河延伸拓浚工程设计最大泵引为 300 m^3/s ,为考虑经济性,日常引水流量按 100 m^3/s 考虑^[20]。为探究盛行风向下不同引排水量对梅梁湾 TP 与 TN 浓度分布的影响,在东南风与西北风下改

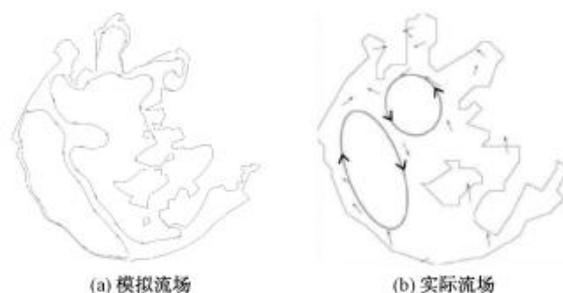


图 2 东南风下流场

Fig. 2 Flow Field under Southeast Wind

变新沟河延伸拓浚工程、新孟河延伸拓浚工程的引排水量,并将梅梁湾泵站关闭、太浦闸开启,其他观测河道在模拟期间保持关闭状态,设计多种运行工况。

模拟方案如表 2 所示。(1)模拟 4 月—6 月的太湖水环境,此时太湖盛行风向为东南风,单一工况的计算时长为 31 d(744 h)。设置工况 1、工况

2、工况3共3种运行工况,工况2与工况1为对比工况,增加新沟河延伸拓浚工程的排水量 50 m³/s;工况3与工况2为对比工况,增加新孟河延伸拓浚工程的引水量 50 m³/s。(2)模拟10月—12月的太湖水环境,此时湖面盛行风为西北风,计

算时长为31 d(744 h)。设置工况4、工况5、工况6共3种运行工况,工况5与工况4为对比工况,增加新沟河延伸拓浚工程的排水量 50 m³/s;工况6与工况5为对比工况,增加新孟河延伸拓浚工程引水量 50 m³/s。

表2 模拟方案

Tab. 2 Simulated Scheme

工况	风向	新孟河延伸拓浚 工程引水量/(m ³ ·s ⁻¹)	新沟河延伸拓浚 工程排水量/(m ³ ·s ⁻¹)	望虞河引水工程 引水量/(m ³ ·s ⁻¹)
工况1	东南风	50	50	50
工况2	东南风	50	100	50
工况3	东南风	100	100	50
工况4	西北风	50	50	50
工况5	西北风	50	100	50
工况6	西北风	100	100	50

3 流场及水质模拟结果

3.1 流场模拟结果

如图3所示,工况1中梅梁湾水流呈逆时针方向流动。工况2与工况1相比,湾内西部水流的流动方向发生了变化,水体从梅梁湾北部向南部流动并流向新沟河排水口,湾内水流流速增大。工况2的西部流速为0~0.01 m/s,北部流速为0.01~0.03

m/s,东部近岸流速为0.02~0.03 m/s。工况3与工况2相比,不同区域的流速大小和水流流动方向基本一致。

在西北风作用下,工况4、5、6下,梅梁湾水流整体流向未发生改变,均呈顺时针方向流动,东部近岸水流流速大于西部。工况5与工况4相比,湾内各区域的流速增加,特别是新沟河排水口附近,工况5

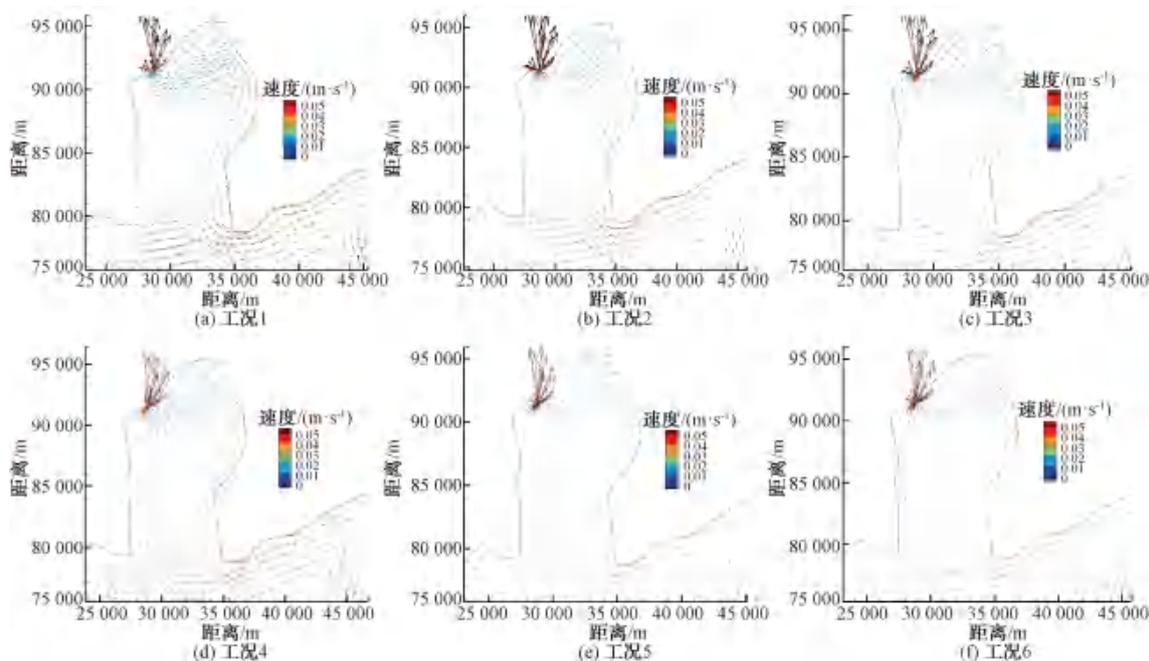


图3 梅梁湾的流场模拟结果 (工况1~工况6)

Fig. 3 Flow Field Simulation Results in Meiliang Bay (Working Condition 1~Working Condition 6)

的西部流速在 0.01~0.02 m/s, 北部流速在 0.01~0.03 m/s, 东部近岸流速在 0.02~0.03 m/s。工况 6 与工况 5 相比, 流速大小和水流流动方向基本一致。

3.2 水质模拟结果

根据实测^[21], 梅梁湾初始 TP 质量浓度为 0.29 mg/L, 初始 TN 质量浓度为 5.01 mg/L, 引水水体的 TP 质量浓度为 0.08 mg/L, TN 质量浓度为 0.98 mg/L。如图 4 所示, 盛行风为东南风时, 在工况 1 下, 经过 31 d 后, 梅梁湾水体 TP 质量浓度为 0.07~

0.17 mg/L, 下降 41%~76%, 梅梁湾的 TN 质量浓度为 1.30~3.35 mg/L, 下降 33%~74%, 湾区水体水质大幅度提升。在工况 2 下, 与工况 1 相比, 梅梁湾东部水域 TP 与 TN 浓度明显下降, 以 TP 作为衡量指标, IV 类水体面积增大。工况 3 与工况 2 相比, 梅梁湾东部水域 TP 与 TN 浓度出现小幅度升高, 说明在东南风作用下保持新沟河排水量不变, 大幅度增加新孟河引水量时, 可能会导致营养盐随水流沉积在湾区东部。

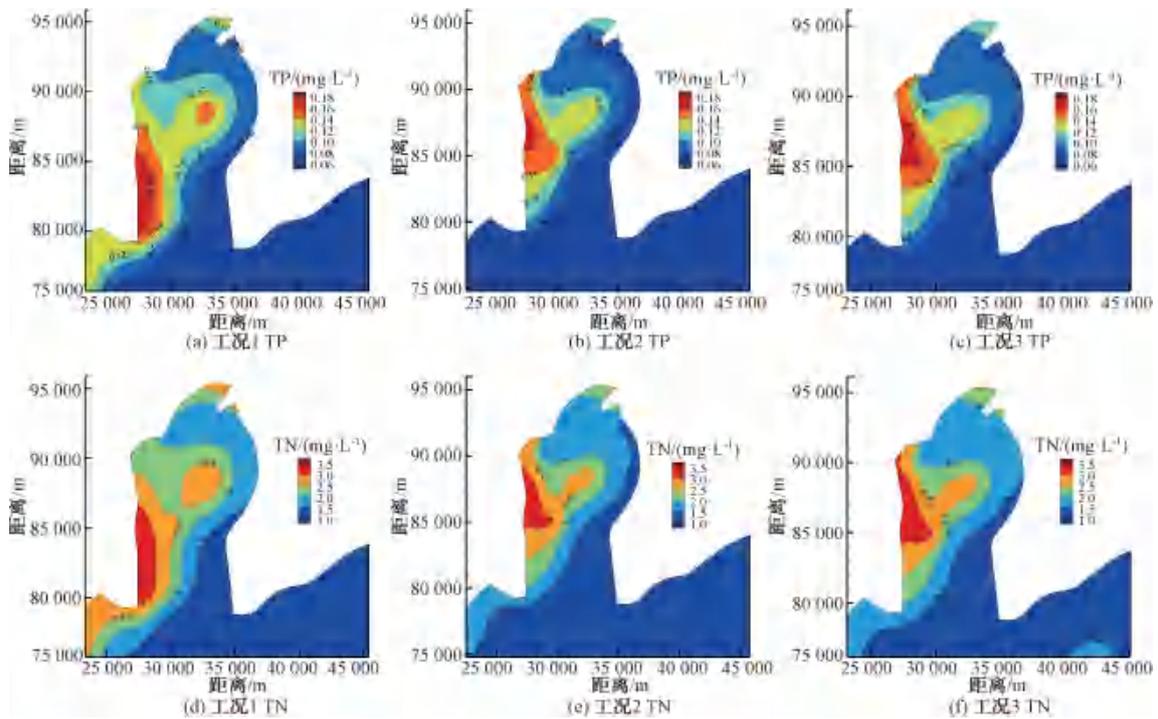


图 4 东南风向下湖湾 TP 与 TN 浓度 (工况 1~工况 3)

Fig. 4 Concentrations of TP and TN in Meiliang Bay under Southeast Wind (Working Condition 1~Working Condition 3)

如图 5 所示, 盛行风为西北风时, 在工况 4 下, 经过 31 d 后, 梅梁湾水体 TP 质量浓度为 0.08~0.19 mg/L, 下降幅度 34%~72%, 湾区 TP 浓度表现为东高西低、北高南低。水体 TN 下降至 1.50~3.75 mg/L, 下降幅度 25%~70%。工况 5 与工况 4 相比, 湖湾西部水体水质改善明显, TP 低于 0.1 mg/L, 达到 IV 类水体水质标准。工况 6 与工况 5 相比, 增加了新孟河引水流量, 梅梁湾西部水域 TP 与 TN 质量浓度继续下降, 且 TN 的下降幅度远大于 TP。

3.3 观测点水质的模拟结果

分别在梅梁湾观测区域采集 TP 与 TN 浓度, 分

析各区域在不同工况下 TP 与 TN 的扩散及分布情况, 如图 6 所示。在东南风向下, 工况 1、工况 2、工况 3 均表现为湖湾左岸浓度最高, 中部浓度次之, 右岸浓度最低。工况 2 与工况 1 相比, 新沟河段排水量增加, 梅梁湾各区域 TN 与 TP 浓度下降明显。工况 3 与工况 2 相比, 增加新孟河工程引水量, 对梅梁湾湾内侧如 L1、L2、M1、M2、M3、R1、R2、R3 处 TP 与 TN 影响较小, 而梅梁湾外侧 L3、L4、M4、M5 处浓度下降, 因此, 主要降低太湖湖心区一侧的污染物浓度。

在西北风向下, 工况 4、工况 5、工况 6 均表现为湖湾右岸浓度最高, 左岸浓度最低。工况 5 与工况

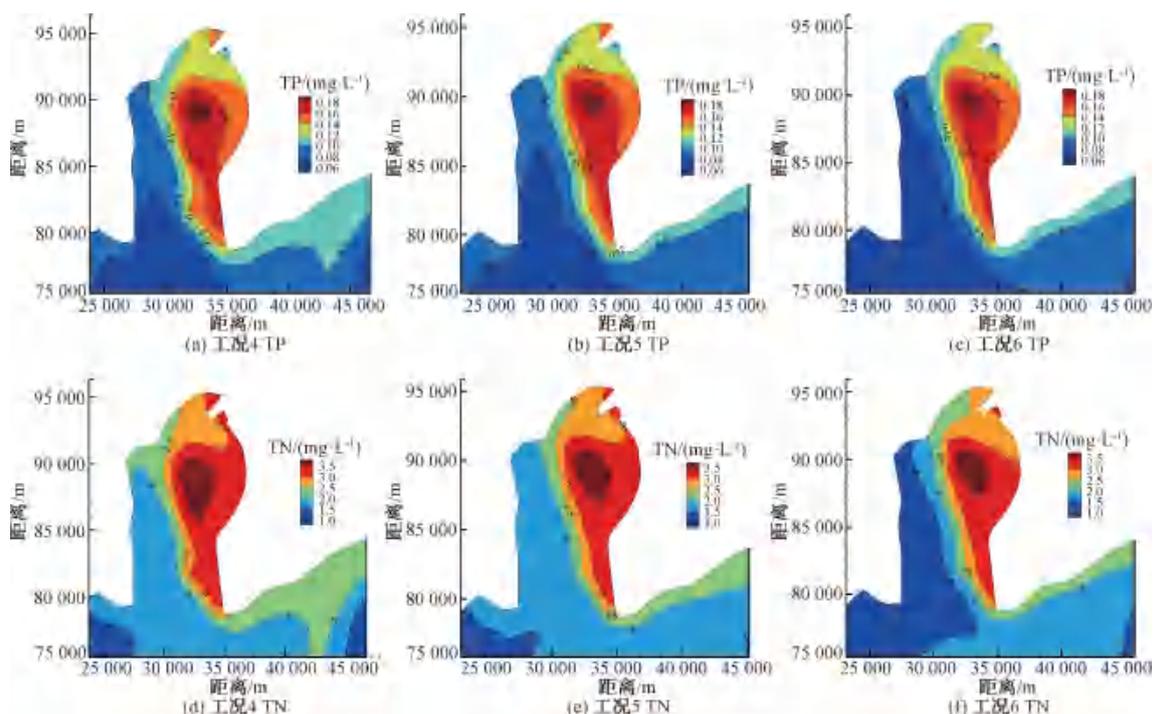


图5 西北风向下湖湾 TP 与 TN 浓度(工况 4~工况 6)

Fig. 5 Concentrations of TP and TN in Meiliang Bay under the Northwest Wind (Working Condition 4~Working Condition 6)

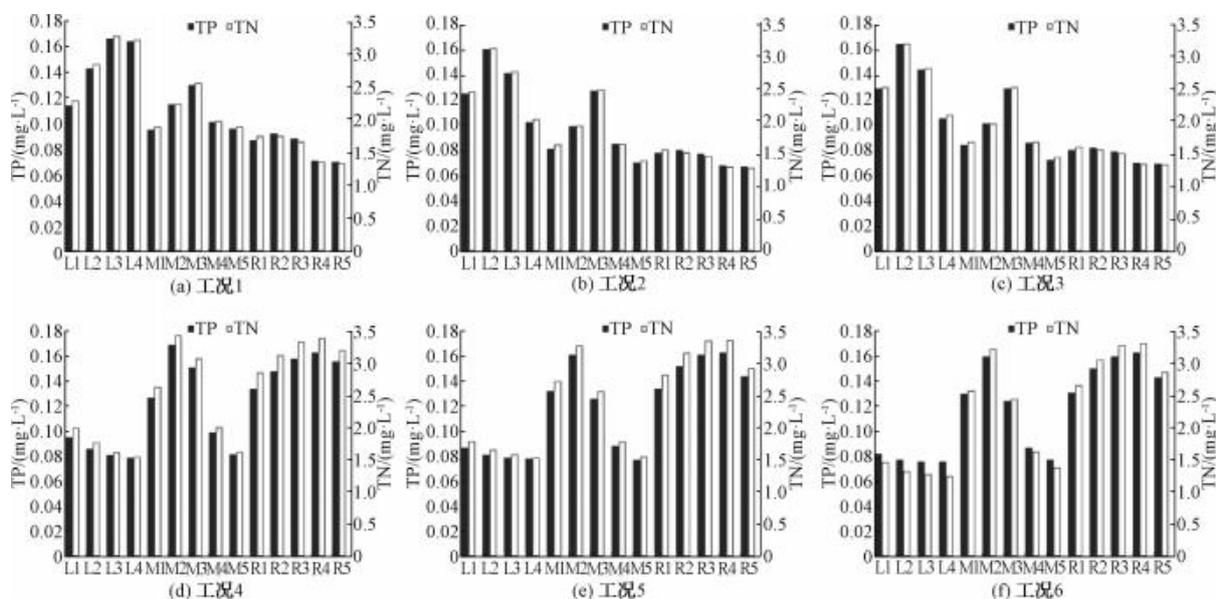


图6 湖湾观测区域 TP 与 TN 浓度

Fig. 6 Concentrations of TP and TN in Observation Areas of Meiliang Bay

4 相比,增加了新沟河排水量,梅梁湾左岸和中部 TP 与 TN 浓度下降明显。工况 6 与工况 5 相比,增加新孟河引水量,梅梁湾左岸即 L1、L2、L3、L4 处的 TP 与 TN 浓度下降,湖湾中部和右岸的 TP 与 TN 浓度无明显变化。

4 结论

(1)“引江济太”新建工程——新沟河延伸拓浚工程、新孟河延伸拓浚工程的建成投入使用,增加了进出太湖水,可以降低梅梁湾水体的 TP 与 TN 浓度 (下转第 110 页)

[22] SRIVASTAVA N, HINTON G, KRIZHEVSKAYA, et al. Dropout: A simple way to prevent neural networks from over fitting

[J]. Journal of Machine Learning Research, 2014, 15(1): 1929–1958.

(上接第 39 页)

度,表明新孟河延伸拓浚工程、新沟河延伸拓浚工程的运行可以有效提升梅梁湾水域水质,为“2016 年太湖 TP 出现反弹”引起的水质问题提供新的解决方案。

(2)通过分析梅梁湾水体在不同季节风向下进行引排水作业时 TP 与 TN 浓度的变化情况,发现在东南风即夏半季的盛行风向下,梅梁湾的 TP 与 TN 降幅大于西北风作用下的降幅,说明在夏半季进行“引江济太”新建工程的引排水作业更有利于降低梅梁湾的营养盐浓度,提升太湖水质。

(3)分析不同工况下梅梁湾左岸、中部、右岸的 TP 与 TN 浓度,当新孟河增加引水量时,梅梁湾 TP 与 TN 下降并不明显,对梅梁湾特别是中心区域的水质影响范围较小,提升梅梁湾水质的效果有限。当新沟河增加排水量时,梅梁湾左岸、中部及右岸的 TP 与 TN 出现较大幅度下降。这说明相较于新孟河引水作业,进行新沟河排水作业时可以更快速地降低梅梁湾 TP 和 TN 的浓度,在短时期内能有效改善梅梁湾的水体环境。

参考文献

- [1] 王燕,刘宁锴,王骏飞. 太湖流域氮磷等大气沉降研究[J]. 环境科学与管理,2015,40(5):103–105.
- [2] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域综合规划[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2013.
- [3] 李一平,逢勇,吕俊,等. 太湖富营养化的驱动因子分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004(6):644–647.
- [4] 曾庆飞,谷孝鸿,周露洪,等. 东太湖水质污染特征研究[J]. 中国环境科学,2011,31(8):1355–1360.
- [5] 胡开明,李冰,王水,等. 太湖流域(江苏省)水质污染空间特征[J]. 湖泊科学,2014,26(2):200–206.

- [6] 梁文广,王冬梅,诸晓华,等. 2008~2013 年太湖蓝藻遥感监测成果分析[J]. 人民长江,2014,45(s2):76–80.
- [7] 翟淑华,张红举,胡维平,等. 引江济太调水效果评估[J]. 中国水利,2008(1):21–23.
- [8] 周小平,翟淑华,袁粒. 2007~2008 年引江济太调水对太湖水质改善效果分析[J]. 水资源保护,2010,26(1):40–43,48.
- [9] 闻欣,邱利,章双双,等. 引江济太入湖污染物通量及其对太湖水质贡献[J]. 四川环境,2014,33(5):67–71.
- [10] 王水,胡开明,周家艳. 望虞河引清调水改善太湖环境定量分析[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(7):1035–1040.
- [11] 杨倩倩,吴时强,戴江玉,等. 夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响[J]. 湖泊科学,2018,30(1):34–43.
- [12] 戴江玉,吴时强,吕学研,等. 引水对太湖贡湖湾有机污染时空变化的影响[J]. 水生生态学杂志,2016,37(1):39–46.
- [13] 朱广伟,邹伟,国超旋,等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005–2018 年)及其对未来磷控制目标管理的启示[J]. 湖泊科学,2020,32(1):21–35.
- [14] 陈华鑫,徐兆安,芦炳炎. 2010–2017 年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨[J]. 湖泊科学,2019,31(4):919–929.
- [15] 朱喜,李贵宝,王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理[J]. 水资源保护,2020,36(6):106–111.
- [16] 朱伟,薛宗璞,章元明,等. “引江济太”对 2016 年后太湖总磷反弹的直接影响分析[J]. 湖泊科学,2020,32(5):1432–1445.
- [17] 许旭峰,刘青泉. 太湖风生流特征的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2009,24(4):512–518.
- [18] 舒叶华,高晨晨. 太湖风生流及污染物输移扩散数值模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):121–127.
- [19] 杨显. 望虞河引水工程对贡湖湾水质及主要取水口总磷的影响[J]. 净水技术,2020,39(5):80–85.
- [20] 吴时强,周杰,李敏,著. 太湖流域河湖连通工程水环境改善综合调控技术[M]. 中国水利水电出版社,2015:93–94,140–141.
- [21] 吴琼. 大型浅水湖泊生态动力学特性的数值研究[D]. 南京:河海大学,2007.

因本刊为黑白印刷,文中图 3~图 5 彩图可扫描右侧二维码查看电子版。

