

# 梅梁湖离岸蓝藻防控工程 对太湖蓝藻聚集的影响

王 勇<sup>1,2</sup>, 赵金箫<sup>1,2</sup>, 罗 露<sup>1,2</sup>, 徐世凯<sup>1,2</sup>

(1. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 无锡 214000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 采用太湖蓝藻漂移三维数学模型为主要手段, 研究梅梁湖蓝藻防控工程建成后, 是否能有效改善梅梁湾蓝藻水华问题, 以及对太湖全湖区水动力和其他水源地蓝藻暴发产生的影响。结果表明, 梅梁湖蓝藻防控工程可有效拦截进入梅梁湖口门的蓝藻, 降低梅梁湖北部沿岸和梁溪河河口蓝藻水华风险。研究评估梅梁湖蓝藻防控工程对梅梁湖蓝藻水华的改善效果, 为以后太湖蓝藻水华的治理提供理论参考和科学指导。

**关键词:** 蓝藻防控工程; 数学模型; 梅梁湖

中图分类号: X524

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2025)02-0050-0005

## The impact of the offshore cyanobacteria prevention and control project of Meiliang Lake on the aggregation of cyanobacteria in Taihu Lake

WANG Yong<sup>1,2</sup>, ZHAO Jinxiao<sup>1,2</sup>, LUO Lu<sup>1,2</sup>, XU Shikai<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of the Taihu Basin Water Treatment of Ministry of Water Resouces, Wuxi 214000, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Using the three-dimensional mathematical model of cyanobacteria drift in the Taihu Lake as the main means, this paper studies whether the completion of the Meiliang Lake cyanobacteria prevention and control project can effectively improve the problem of cyanobacteria bloom in Meiliang Bay, as well as the impact on the hydrodynamics of the whole the Taihu Lake area and the outbreak of cyanobacteria in other water sources. The results indicate that the cyanobacteria prevention and control project in Meiliang Lake can effectively intercept cyanobacteria entering the mouth of Meiliang Lake, reducing the risk of cyanobacteria blooms along the northern coast of Meiliang Lake and at the mouth of Liangxi River. Study and evaluate the improvement effect of the cyanobacteria prevention and control project in Meiliang Lake on cyanobacterial blooms in Meiliang Lake, and provide theoretical reference and scientific guidance for the treatment of cyanobacterial blooms in Taihu Lake in the future.

**Key words:** cyanobacteria prevention and control project; mathematical model; Meiliang Lake

梅梁湖位于太湖北部<sup>[1]</sup>, 是蓝藻暴发的重灾区, 也是蓝藻管控的重点区域<sup>[2]</sup>。梅梁湖景区是无锡市4个国家级景区之一<sup>[3]</sup>, 蓝藻的暴发对梅梁湖附近居

民饮用水安全、景区旅游娱乐等产生了不利甚至有害影响<sup>[4-6]</sup>。为减轻梅梁湖近岸水域的蓝藻聚集压力, 维护太湖湖滨环境形象, 无锡市实施梅梁湖蓝

收稿日期: 2024-12-10

作者简介: 王勇(1979—), 男, 正高级工程师, 博士, 研究方向为环境水力学及生态水力学。E-mail: wangyong@nhri.cn

藻防控工程。工程建成后,对太湖全湖区水动力产生的影响,是否能有效改善梅梁湖蓝藻水华问题,是否会引起太湖全湖区尤其是水源地蓝藻暴发,都是亟需验证的问题,具有重要的研究意义。国内外已有许多关于蓝藻迁移聚集的研究,蒙凌凌等<sup>[7-8]</sup>利用GOCI数据探究蓝藻的昼夜垂直迁移特征及其关键影响因素;胡明涛等<sup>[9]</sup>基于Hiamwari-8/AHI卫星遥感高频监测数据,开展了典型风力条件下和水力调度下太湖藻华生消过程的持续监测分析;杨华音等<sup>[10]</sup>利用陆基高光谱近感观测技术,精细量化风对蓝藻水华的影响。本文以太湖蓝藻漂移三维数学模型为主要研究手段,研究梅梁湖蓝藻防控工程的控藻效果,旨在为以后太湖蓝藻水华的治理提供了参考。

## 1 工程概况

梅梁湖蓝藻防控工程总平面布置图如图1所示。工程设置的蓝藻围隔在梅梁湖中部、太湖隧道北侧水域形成东西向防线,根据现有3条航线位置,呈4个“V”字型分布,在4个围隔中间留100 m供水流及船只通过,前后平行设置3道,间距50 m布置。同时为保证导流效果,第1道4个“V”字型防线中间位置均设置1道纵向挡臂,见图2。在太湖隧道南侧、千波桥水面水域单独设置“V”字型防线并配置纵向挡臂。工程位置水深约2.5 m,设计拦藻隔帘宽度2.5 m,完全拦截水流。

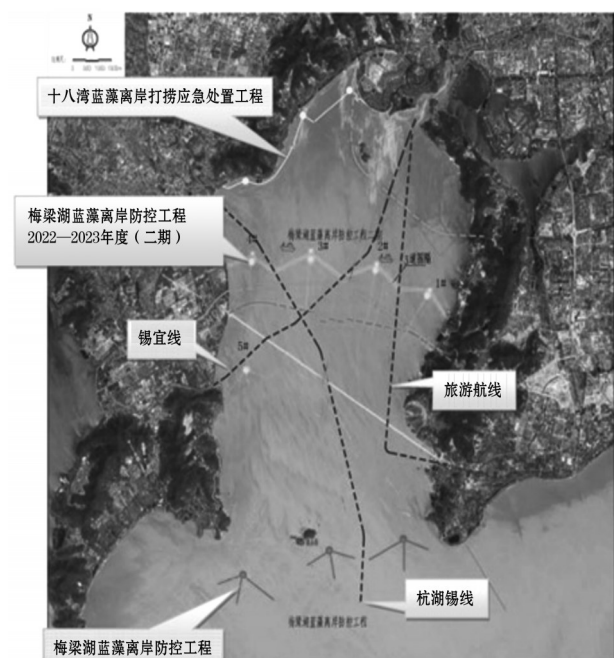


图1 梅梁湖蓝藻防控工程总平面布置

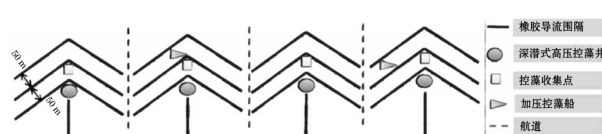


图2 梅梁湖中部防线平面布置

## 2 太湖蓝藻漂移三维数学模型

采用三维风生流数学模型进行太湖风生流水动力模拟。

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \frac{\partial\omega}{\partial\sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huu)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(hu\omega)}{\partial\sigma} = fhw - gh\frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial\sigma}$$

$$\left[ \frac{K_M}{h} \frac{\partial u}{\partial\sigma} \right] - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hvv)}{\partial y} + \frac{\partial(hv\omega)}{\partial\sigma} = fhu - gh\frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial\sigma}$$

$$\left[ \frac{K_M}{h} \frac{\partial v}{\partial\sigma} \right] - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) \quad (3)$$

$$\omega = w + u \left( \sigma \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial x} \right) + v \left( \sigma \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{z-s}{h} \quad (5)$$

式中: $s$ 为水面高度; $z$ 为水位; $h$ 为水深; $t$ 为时间; $u, v, \omega$ 分别为分层 $x, y, \sigma$ 方向的流速; $w$ 为分层 $z$ 方向流速; $K_M$ 为垂向涡黏性系数; $f=2\Omega\sin\varphi$ 为科氏力系数; $\Omega$ 为地球自转角速度; $\varphi$ 为当地地理纬度; $\rho_0$ 为水密度; $P_a$ 为空气压力; $T_{ij}$ 为横向有效剪应力; $T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, T_{xy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, A$ 为水平涡黏性系数; $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ 为底部应力,  $\frac{\tau_b}{\rho_0} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b|, c_f$ 为阻力系数,  $\bar{u}_b$ 为床底上部流速; $\tau_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ 为水面风应力,  $\tau_s = \rho_a c_d \bar{u}_w |\bar{u}_w|, \rho_a$ 为空气密度,  $c_d$ 为空气阻力系数,  $\bar{u}_w$ 为水面上空10 m处风速。

采用三维蓝藻漂移数学模型对悬浮蓝藻的运动范围进行预测与分析。

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + u \frac{\partial hC}{\partial x} + v \frac{\partial hC}{\partial y} + \frac{\partial \omega C}{\partial\sigma} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}$$

$$\left( D_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( D_\sigma \frac{\partial C}{\partial\sigma} \right) \quad (6)$$

式中: $C$ 为蓝藻浓度; $D_x, D_y, D_\sigma$ 分别为 $x, y, \sigma$ 方向的扩散系数。

计算区域为整个太湖,计算区域用三角形单元

网格剖分,共布置了12 072个节点,22 626个单元,垂直方向分了15层,梅梁湖蓝藻离岸防控工程区域进行了加密,最小网格50 m,见图3。

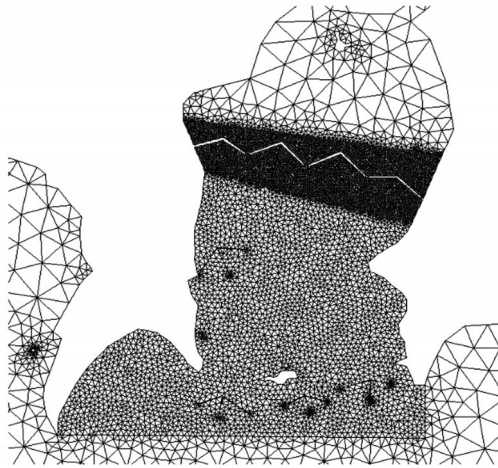


图3 数学模型梅梁湖网格布置

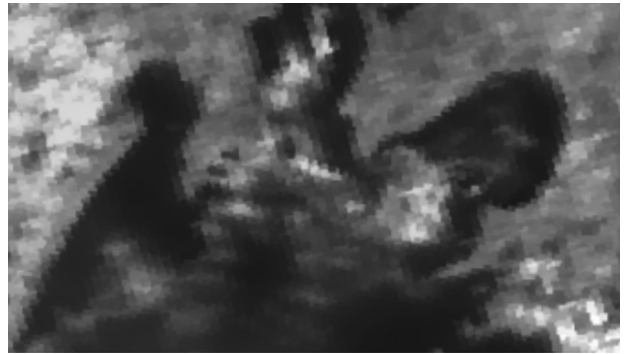


图4 2017年8月8日太湖蓝藻水华暴发分布

### 3 梅梁湖蓝藻防控工程的影响

蓝藻初始状态参照2017年8月8日太湖蓝藻水华暴发分布图,分别见图4和图5。2017年蓝藻水华程度为2007年以来10 a之最,所选蓝藻水华范围基本涵盖竺山湖、梅梁湖和贡湖口门外及贡湖中部,可用于不同风向条件下梅梁湖蓝藻防控工程对梅梁湖蓝藻水华改善效果研究。蓝藻沿水深分布约0.6 m,其中浅色代表太湖水,深色代表蓝藻。数学模型计算工况见表1,模拟风速取太湖年平均风速3 m/s。根据实测资料与已有研究结果,偏北风条件下,蓝藻的漂移方向将远离北部三湾,因此数学模型模拟风向东南风(偏北135°)、南风(偏北180°)、南东南风(偏北157.5°)、南西南风(偏北202.5°)、西南风(偏北225°)。

不同风场作用下,梅梁湖蓝藻防控工程建成前后梅梁湖蓝藻面积和梅梁湖蓝藻分布情况分别见表2和图6,其中浅色代表太湖水,深色代表蓝藻。由图6表2显示,工程建成后梅梁湖整体蓝藻面积



图5 数学模型蓝藻初始分布

表1 计算工况

编号	梅梁湖蓝藻离岸防控工程	风速/(m/s)	风向
1	无工程	3	东南风
2			南风
3			南东南风
4			南西南风
5			西南风
6	有工程	3	东南风
7			南风
8			南东南风
9			南西南风
10			西南风

表2 不同风向条件下梅梁湖蓝藻面积

单位:km<sup>2</sup>

风向	梅梁湖			梅梁湖防控工程北部		
	工程前	工程后	面积差	工程前	工程后	面积差
东南风	41.3	33.3	-7.9	2.1	0.0	-2.1
南风	97.2	62.9	-34.3	37.6	4.6	-33.0
南东南风	88.5	59.0	-29.5	32.0	4.2	-27.8
南西南风	108.0	69.3	-38.7	42.6	9.3	-33.3
西南风	37.8	28.4	-9.4	3.9	0.0	-3.9

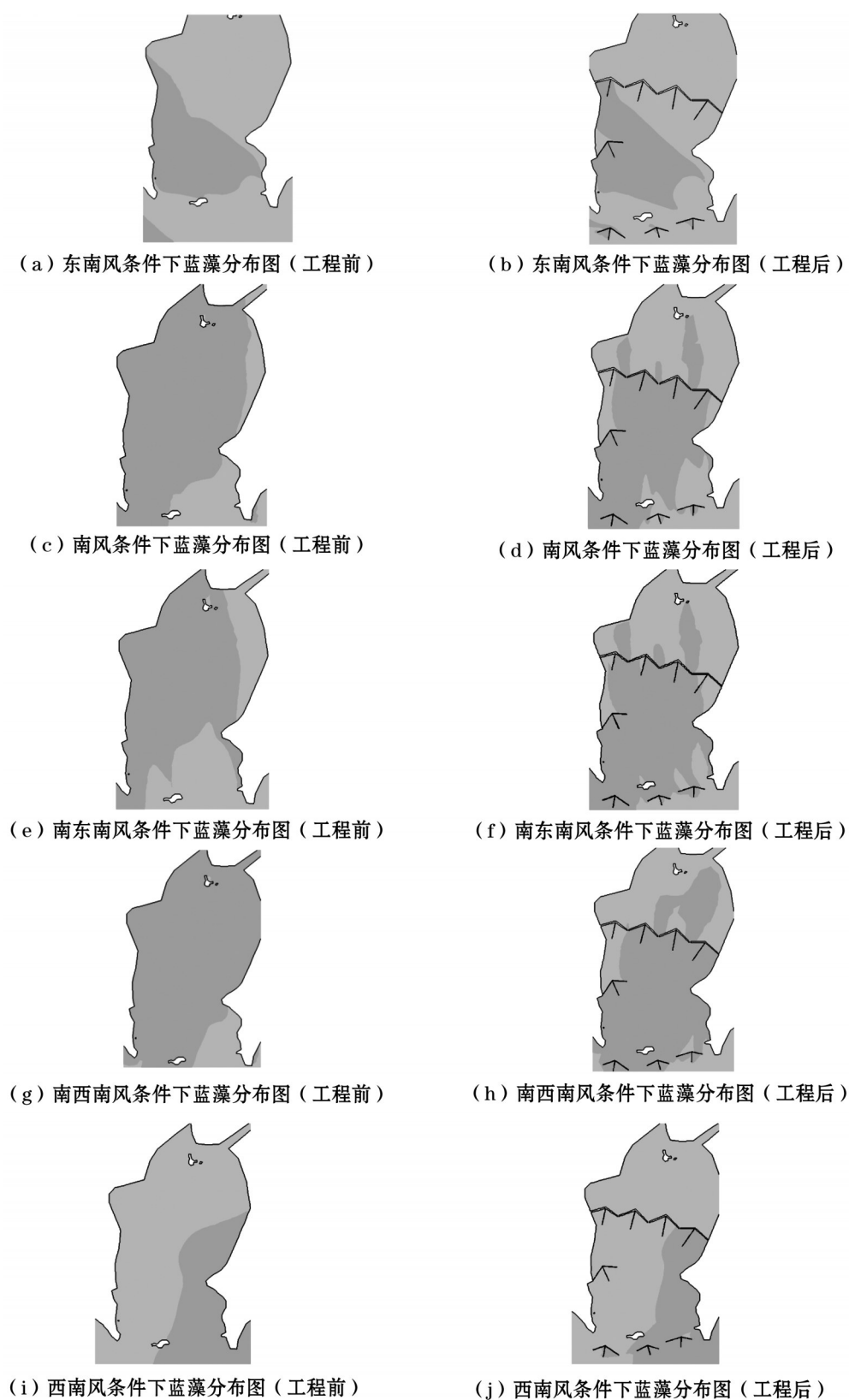


图6 不同风向工程建成前后梅梁湖蓝藻分布

减少,围隔北部有少量或无蓝藻进入,且北部蓝藻面积大幅减少,梅梁湖蓝藻防控工程可有效降低梅梁湖北部沿岸和梁溪河河口蓝藻水华风险。以东

南风风场为例,工程前梅梁湖蓝藻面积为 $41.3\text{ km}^2$ ,工程后为 $33.3\text{ km}^2$ ,蓝藻面积减少 $7.9\text{ km}^2$ ,面积减少 $19.1\%$ 。天然条件下,梅梁湖蓝藻防控工程北部蓝



藻面积为 $2.1\text{ km}^2$ ,工程后为 $0\text{ km}^2$ ,面积减少100%,工程围隔北部基本无蓝藻进入。南风、南东南风、南西南风条件下,梅梁湖蓝藻防控工程建成后,梅梁湖整体蓝藻面积减少达33.33%~35.8%,工程围隔北部有少量的蓝藻进入,但工程建设后北部蓝藻面积减少达到78.2%~87.8%。

## 4 结 论

梅梁湖蓝藻防控工程可有效拦截进入梅梁湖口门的蓝藻,降低梅梁湖北部沿岸和梁溪河河口蓝藻水华风险。不同风场条件下,梅梁湖蓝藻聚集总面积分别减小19.1%~35.8%。 $3\text{ m/s}$ 定常东南风、西南风条件下,梅梁湖蓝藻防控工程北部基本无蓝藻进入。 $3\text{ m/s}$ 定常南风、南东南风、南西南风条件下,梅梁湖蓝藻防控工程北部蓝藻聚集面积分别减小78.2%~87.8%。结果表明:梅梁湖蓝藻防控工程可有效拦截进入梅梁湖口门的蓝藻,降低梅梁湖北部沿岸和梁溪河河口蓝藻水华风险。研究评估了梅梁湖蓝藻防控工程对梅梁湖蓝藻水华的改善效果,为以后太湖蓝藻水华的治理提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 代倩子,张坤,徐彬. 2014—2018年太湖梅梁湖和东太湖水质变化特征分析[J]. 中国农村水利水电,2020(7): 82-84.
- [2] 刘峻岭,杨立明,王健. 无锡梅梁湖蓝藻离岸防控工程控藻设计探究[J]. 中华建设,2023(9):96-98.
- [3] 杨培香. 梅梁湖水利风景区建设与管理[J]. 水利发展研究,2009,9(2):69-72.
- [4] 陈笑雪,王冬梅,王智源,等. 太湖饮用水源地蓝藻中抗生素抗性基因时空分布与风险评价[J]. 环境科学学报,2023,43(7):20-36.
- [5] LIU H, ZHENG C Z, YOUNG B, et al. Three-dimensional numerical modeling of the cyanobacterium *Microcystis* transport and its population dynamics in a large freshwater reservoir[J]. *Ecological Modelling*, 2019(398):20-34.
- [6] JOHNSTON R B, JACOBY M J. Cyanobacterial toxicity and migration in a mesotrophic lake in western Washington, USA[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 495(1/2/3):79-91.
- [7] 蒙凌凌,林育青,冯韬,等. 基于GOCI数据的太湖蓝藻垂向迁移特征及关键影响因素[J]. 湖泊科学,2024,36(2):353-364.
- [8] JUNDA L, YUNMEI L, SHUN B, et al. Utilization of GOCI data to evaluate the diurnal vertical migration of *Microcystis aeruginosa* and the underlying driving factors [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022(310):114734.
- [9] 胡明涛,陈诚,李港,等. 典型风力条件及水力调度下太湖藻华高频时空动态监测[J]. 湖泊科学,2024,36(3):685-694.
- [10] 杨华音,张运林,李娜,等. 风速与太阳辐照度对蓝藻群体垂直迁移的复合影响[J]. 环境科学研究,2024,37(7):1401-1411.