

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.007

太湖梅梁湾水污染及蓝藻分析计算

陈 鸣^{1,2},陆卫鲜^{1,2},郁建桥³,徐 亮³

(1.南京水利科学研究院水文水资源研究所,江苏 南京 210029;
2.水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;3.江苏省环境监测中心,江苏 南京 210036)

摘要:构建了太湖梅梁湾污染及蓝藻扩散、运移变化计算模型,模型主要由 4 个部分构成:(a)基于 GIS 构建的计算网络;(b)基于水动力学基础的水质扩散运移模型;(c)水质进程模型,包括衰减模型和溶解氧模型;(d)蓝藻浓度计算模型.实例计算结果表明:用该模型模拟梅梁湾总磷、总氮、溶解氧和蓝藻质量浓度 4 项污染指标的扩散、运移变化,精度较高,其确定性系数分别为 0.70,0.74,0.88 和 0.86.
关键词:水污染 蓝藻 计算模型 梅梁湾 太湖
中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)06-0634-05

改革开放以来,太湖流域社会经济快速发展,以占全国 0.4% 的国土面积和占全国 2.8% 的人口,创造了占全国 11.1% 的国内生产总值;且国内生产总值年增长速度保持在 10% 以上^[1-2].太湖流域在人口和经济迅速增长的同时水资源过度消耗,污染物肆意排放打破了水资源循环过程中的人类利用、生态需水和天然补给之间的平衡.太湖 75% 的水体水质级别已由 1996 年的 II 类为主变到 2007 年以 IV 类为主,富营养化水域面积达 80% 以上^[3-4].2007 年夏天太湖大面积暴发蓝藻,造成该地区重大经济损失,并严重影响居民生活秩序.
近年来,水华、蓝藻暴发已成为梅梁湖中常见自然灾害^[5].科学预报预警水华、蓝藻暴发是避免灾害发生、发展,减少灾害损失的有效途径之一.本文采用水动力学和水质模型模拟污染物随水流的运移、聚集及自身扩散衰减的时空变化,进而建立蓝藻细胞浓度与总磷、总氮间的相关关系式,从而达到预报蓝藻暴发的目的^[6-7].

1 基本资料

梅梁湾南北长 12 ~ 17 km,东西宽 7 ~ 10 km,以马山的钮头和拖山岛一线为界,面积约 123.8 km²,水位 3 m 时,平均水深 1.95 m,容积 2.41 m³.梅梁湾南部与太湖大湖区连接,东北部有梁溪河、五里湖注入,西北部与武进港、直湖港有水力联系.梅梁湾的污染主要来自这些河流,并运移变化影响整个湖湾^[8].

1.1 测站及监测项目

梅梁湾水域内现共有直湖港固定站、武进港固定站、小湾里水厂水源地预警站、马山水厂水源地预警站、马山浮标站和沙渚固定站共 6 个水质自动监测站.各水质监测站监测项目见表 1.

表 1 各水质监测站监测项目

Table 1 Items of water quality at various observation stations

测 站	pH 值	温度	盐度	溶解氧	高锰酸盐指数	氨氮	总磷	总氮	电导率	叶绿素 a	蓝绿藻
直 湖 港	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×
武 进 港	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×
小湾里水厂	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	✓	×	×
马 山 水 厂	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓
马 山 浮 标	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	×
沙 渚	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	×	×

1.2 水下数字高程模型

梅梁湾水下数字高程模型(DEM)是水污染及蓝藻运移计算体系的基础.用 2003 年梅梁湾水下地形实测资料,经扫描、拼接、校正、数字化等处理生成梅梁湾水下数字高程模型,如图 1 所示.梅梁湾水下数字高程模型表明 梅梁湾北高南低,北南向存在着 0.0063% 的水力坡降.

2 计算模型构建

梅梁湾的污染主要随直湖港、武进港入湖水流带入.梅梁湾东西两边湖岸线均较平直,湖水岸流的主要部分与岸线平行.直湖港、武进港和梁溪河进入梅梁湾河水的排放方式可认为是表面出流的连续排放方式.

梅梁湾污染物及蓝藻浓度计算模型构建基本思路 在水动力、水质变化模拟的基础上,通过相关分析建立蓝藻浓度与污染物间的关系,进而计算蓝藻浓度.

2.1 计算网络及流程

梅梁湾污染运移扩散计算网络构建以地理信息系统(GIS)图层为背景,用 Infoworks RS 软件中的节点、断面、连接等绘图工具完成.计算网络中包括上下游边界节点、排污口、取水口等特征控制断面及各断面间的连接等元素,见图 2.

污染运移扩散计算分两步进行.首先,进行水动力计算,其结果可以被一个或多个水质进程模拟使用^[9].水动力模拟与水质模拟的关系如图 3 所示.

水动力计算时,上游边界点接收直湖港、武进港和梁溪河的实测流量作为上边界输入.下游边界点设置在拖山岛以外的梅梁湾与太湖大湖区交接处.水质模拟时,将河流进入梅梁湾的实测污染物数据作为水质模拟计算的上边界输入.

2.2 水动力模型

梅梁湾中污染物随水流运移、扩散可用平流扩散方程模拟：

$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} + \frac{\partial(uCA)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(DA \frac{\partial C}{\partial x}\right) = S$$

(1)

式中： C ——污染物质量浓度， kg/m^3 ； A ——流动区域面积， m^2 ； u ——平均流速， m/s ； D ——扩散系数， m^2/s ； x ——距离， m ； t ——时间， s ； S ——源/汇项，表现衰减、增长、侵蚀以及沉积作用等， $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

式(1)是一个带有源项 S 的有效的质量守恒方程,等号左边第一项表现的是污染物在某一点的变化率；第二项为平流项,它与第一项合并在一起表现了污染物在流线上的变化率,第三项即扩散项.采用有限差分法求解上述扩散方程,近似为

$$\frac{\varphi_{i,n+1} - \varphi_{i,n}}{\Delta t} = - \frac{\mu\varphi_{i+1/2,n} - \mu\varphi_{i-1/2,n}}{\Delta x} + D \left[\frac{(A_{i+1,n} + A_{i,n})(C_{i+1,n} - C_{i,n}) - (A_{i,n} - A_{i-1,n})(C_{i,n} + C_{i-1,n})}{2(\Delta x)^2} \right] + S$$

(2)

其中^[10]

$$\varphi = CA$$

式中： n ——时间指标； i ——位置指标； Δx ——节点 i 的单元长度， m ； Δt ——时间步长， s 。

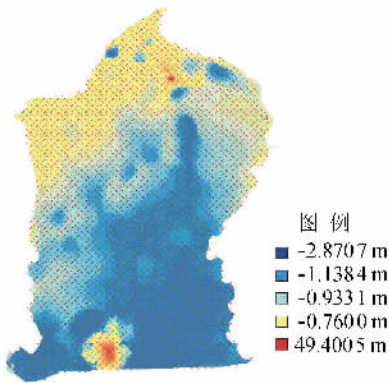


图 1 梅梁湾水下数字高程模型
Fig. 1 Underwater digital elevation model of Meiliang Bay

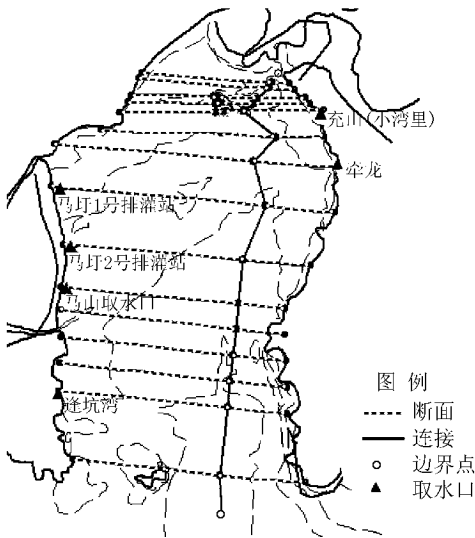


图 2 梅梁湾污染运移变化计算网络
Fig. 2 Computational grid for transport of water pollution in Meiliang Bay

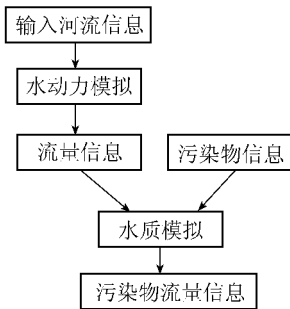


图 3 水动力模拟与水质模拟关系
Relationship between flow and quality simulations

2.3 水质变化模型

水体中的污染物除了跟随水流运移扩散外自身还存在水质变化过程. 与蓝藻相关的水质变化模拟主要有污染物衰减模型、溶解氧模型和生物耗氧量模型^[11].

a. 污染物衰减模型:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -KC \tag{3}$$

式中 K 为衰减率, s^{-1} .

b. 溶解氧(DO)模型. 梅梁湾水体中的溶解氧的外部来源有: 大气复氧, 光合作用, 支流与污水中的溶解氧. 水体内部产生的溶解氧有: 碳化废弃物的氧化耗氧, 氧化废弃物的氧化耗氧, 底泥耗氧, 水生植物呼吸作用耗氧. 两者结合可用平衡式表示:

$$\frac{d\rho(\text{DO})}{dt} = k_{\text{air}}[\rho(\text{DOS}) - \rho(\text{DO})] + (g_v - d_v)\rho_p - k_{\text{sw}}\rho(\text{BOD}) - \frac{\rho(\text{SOD})}{z} \tag{4}$$

式中: $\rho(\text{DO})$ ——溶解氧质量浓度, mg/L ; k_{air} ——大气复氧系数; $\rho(\text{DOS})$ ——饱和溶解氧质量浓度, mg/L ; g_v, d_v ——浮游生物的生长率、死亡率; ρ_p ——浮游生物质量浓度, mg/L ; k_{sw} ——生物耗氧系数; $\rho(\text{BOD})$ ——生物耗氧量质量浓度, mg/L ; $\rho(\text{SOD})$ ——底泥耗氧量质量浓度, mg/L ; z ——水深, m .

c. 生物耗氧量模型. 最终生物耗氧量 $\rho(\text{BOD}_u)$, 用 5 d 生化需氧量 $\rho(\text{BOD}_5)$ 表示, 即用 5 d 以上的污染物降解的耗氧量表示:

$$\rho(\text{BOD}_u) = \frac{\rho(\text{BOD}_5)}{1 - [(1 - \alpha)\exp(-5K_f) + \alpha\exp(-5K_s)]} \tag{5}$$

式中: α ——慢速生物耗氧量质量浓度与全部生物耗氧量质量浓度的比值; K_f ——快速生物耗氧量的反应率; K_s ——慢速生物耗氧量的反应率.

2.4 蓝藻浓度计算模型

蓝藻的暴发是水生植物过度生长现象, 造成这一现象的一个重要因素为水体中过量的营养物质. 多项研究表明: 蓝藻与总磷、总氮呈明显的线性关系^[11-12]. 应用马山水厂站监测资料, 回归分析建立蓝藻与溶解氧、总磷、总氮的多元回归预报模型如下:

$$\rho_{A_t} = 0.886\rho_{A_{t-1}} + 0.374\rho(\text{DO}_t) + 0.121\frac{\rho(\text{TN}_t)}{\rho(\text{TP}_t)} \tag{6}$$

式中: ρ_{A_t} ——时间 t 时蓝藻浓度, mg/L ; $\rho_{A_{t-1}}$ ——时间 $t-1$ 时蓝藻浓度, mg/L ; $\rho(\text{DO}_t)$ ——时间 t 时溶解氧质量浓度, mg/L ; $\rho(\text{TN}_t)$ ——时间 t 时总氮质量浓度, mg/L ; $\rho(\text{TP}_t)$ ——时间 t 时总磷质量浓度, mg/L . 回归方程的相关系数 $R = 0.86$.

3 计算实例

取 2008 年 1—4 月时间段的资料, 对梅梁湾水质模型(衰减模型、溶解氧模型)进行参数率定; 2008 年 10 月至 2009 年 2 月时间段的资料进行验证模拟计算.

3.1 模型参数率定

水动力模型计算的上、下游边界条件均采用水位过程, 模拟计算后得出各断面的流量过程. 直湖港、武进港河口作为污染源, 汇入梅梁湾. 模拟计算得衰减模型参数见表 2.

在溶解氧模型中, BOD 衰减率、COD 衰减率、氮衰减率均为 0.23d^{-1} , BOD 慢速衰减率、氮慢速衰减率均为 0.2d^{-1} , 氨标准氧化率为 0.26d^{-1} , 氮衰减温度系数、氨氧化温度系数均为 1, 亚硝酸盐氧化温度系数为 5.

3.2 模拟精度分析

水源地马山水厂站的总磷、总氮、溶解氧及蓝藻的实测与模拟过程比较见图 4.

确定性系数能够反映模拟过程与实测过程的总体差异, 常作为模拟精度评价指标, 计算公式为

表 2 衰减系数

Table 2 Attenuation coefficients			
污染物	衰减系数/ d^{-1}		
	白天	夜晚	
总 磷	0.05	0.05	
总 氮	0.50	0.40	
高锰酸盐指数	0.10	0.10	

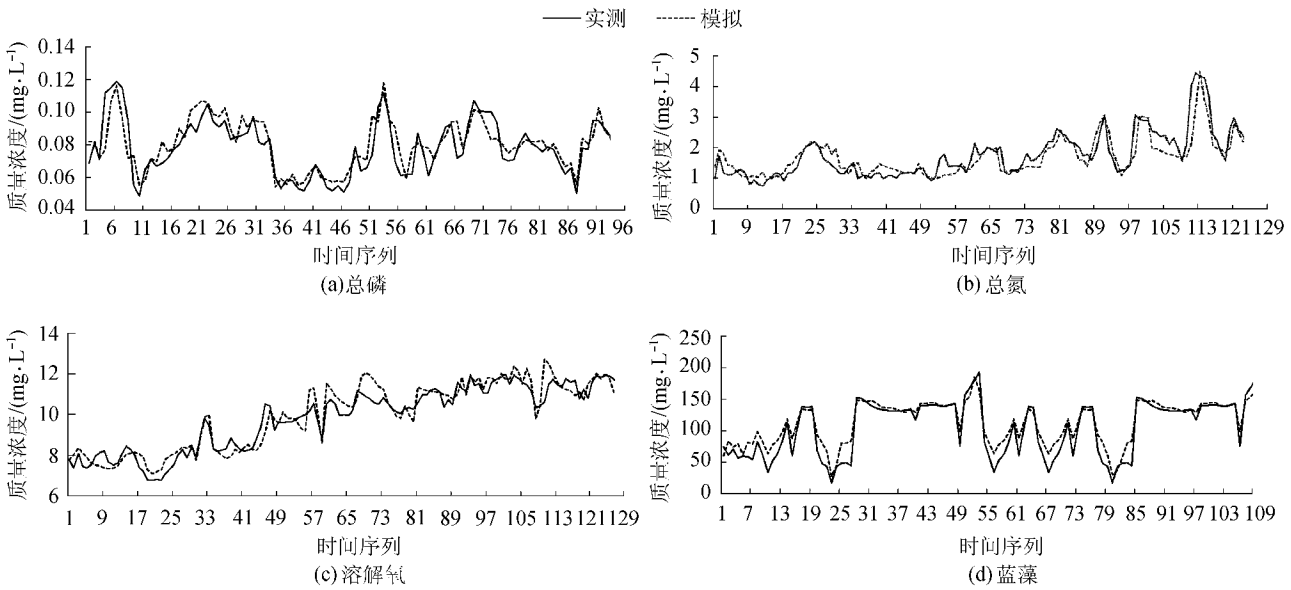


图 4 总磷、总氮、溶解氧及蓝藻模拟与实测过程

Fig. 4 Simulated and observed hydrographs of total nitrogen, total phosphorus, dissolved oxygen and blue algae

$$D_C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{im})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{7}$$

式中： D_C ——确定性系数； x_i ——实测质量浓度； x_{im} ——模拟质量浓度； $\bar{x}$ ——实测值的均值； n ——资料系列。

由图 4 根据式(7)可计算得马山水厂处总磷、总氮、溶解氧和蓝藻质量浓度的确定性系数分别为 0.70,0.74, 0.88 和 0.86,4 项污染指标的确定性系数值均大于 0.70,表明模拟过程与实测过程总体较吻合,模拟精度较高。

3.3 污染物运移变化分析

图 5 是直湖港、马山和沙渚 3 断面溶解氧模拟计算过程。由图 5 可见：马山溶解氧质量浓度峰值较直湖港溶解氧质量浓度峰值滞后，沙渚溶解氧质量浓度峰值又较马山溶解氧质量浓度峰值滞后，表明污染物从直湖港经马山向沙渚运移扩散。从直湖港至马山约 6.3 km，污染物的传播时间为 12 ~ 14 h，从直湖港至沙渚约 10.2 km，污染物传播时间为 28 ~ 30 h。污染物在运

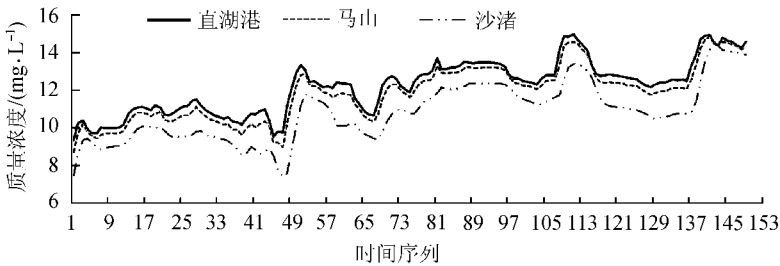


图 5 直湖港、马山和沙渚断面溶解氧模拟计算过程

Fig. 5 Simulated hydrographs of dissolved oxygen at Zhihugang, Mashan and Shazhu

移传播的同时质量浓度在衰减。在计算时段内(2008 年 10 月 1 日至 2009 年 2 月 25 日)直湖港时段平均质量浓度 12.20 mg/L,马山时段平均质量浓度 11.84 mg/L,沙渚时段平均质量浓度 10.81 mg/L,直湖港至马山溶解氧平均日衰减 0.0069 mg/L,马山至沙渚溶解氧平均日衰减 0.0024 mg/L。

4 结 论

- a. 梅梁湾水域,从湾头向太湖大湖方向即由北向南方向存在缓水力坡降,水力坡降为 0.0063%。
- b. 基于 Infoworks RS 软件构建的梅梁湾水污染计算网络结合水动力模型、水质变化模型和蓝藻浓度计算模型,模拟梅梁湾污染物运移扩散及蓝藻浓度有较高精度,其确定性系数均大于 0.70。
- c. 梅梁湾污染物随水流从直湖港经马山向沙渚运移扩散。直湖港至马山传播时间 12 ~ 14 h,直湖港至沙渚传播时间 28 ~ 30 h。直湖港至马山溶解氧日均衰减 0.0069 mg/L,马山至沙渚溶解氧日均衰减 0.0024 mg/L。梅梁湾水体中过量的营养物质如氮和磷导致蓝藻的大量繁衍。目前,由于叶绿素、蓝藻监测数据系列较

短,尚不能满足蓝藻运移变化数值计算的资料要求.本文通过溶解氧、总磷、总氮和高锰酸盐指数等相关因子的计算,间接描述蓝藻运移变化.

参考文献:

- [1] 朱广伟.太湖富营养化现状及原因分析[J].湖泊科学,2008,20(1):21-26. (ZHU Guang-wei. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu China[J]. Journal of Lake Science, 2008, 20(1): 21-26. (in Chinese))
- [2] 尹荣尧,周燕,朱晓东.江苏省太湖水污染防治对策措施[J].环境保护科学,2010,36(3):93-95. (YING Rong-yao, ZHOU Yan, ZHU Xiao-dong. Countermeasures of Taihu Lake water pollution control in Jiangsu Province[J]. Environmental Protection Science, 2010, 36(3): 93-95. (in Chinese))
- [3] 马倩,刘俊杰,高明远.江苏省入太湖污染量分析:1998—2007年[J].湖泊科学,2010,22(1):29-34. (MA Qian, LIU Jun-jie, GAO Ming-yuan. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province: 1998—2007) [J]. Journal of lake Science, 2010, 22(1): 29-34. (in Chinese))
- [4] 张红举,陈方.太湖流域面源污染现状及控制途径[J].水资源保护,2010,26(3):87-90. (ZHANG Hong-ju, CHEN Fang. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin[J]. Water Resources Protecion, 2010, 26(3): 87-90. (in Chinese))
- [5] 丰江帆,滕学伟,张宏,等.基于GIS的太湖蓝藻预警系统研究[J].环境科学与技术,2006,29(9):60-62. (FENG Jiang-fan, TENG Xue-wei, ZHANG Hong, et al. Forewarning system of blue algae for Taihu Lake based on GIS[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(9): 60-62. (in Chinese))
- [6] 王崇,孔海南,王欣泽,等.有害藻华预警预测技术研究进展[J].应用生态学报,2009,20(11):2813-2819. (WANG Chong, KONG Hai-nan, WANG Xin-ze, et al. Early-warning and prediction technology of harmful algal bloom: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2813-2819. (in Chinese))
- [7] 黄卫,陈鸣,徐亮.太湖梅梁湾水环境监控预警体系研究[J].环境监控与预警,2009,1(1):6-9. (HUANG Wei, CHEN Ming, XU Liang. A study on water environment surveillance and early warning system of Taihu Lake [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2009, 1(1): 6-9. (in Chinese))
- [8] 高香玉,崔益斌,胡长伟,等.太湖梅梁湾2008年有机污染物检测及环境影响度[J].中国环境科学,2009,29(12):1296-1300. (GAO Xiang-yu, CUI Yi-bin, HU Chang-we, et al. Detection and ambient severity evaluation of organic compounds in Meiliang Bay of Taihu Lake in 2008[J]. China Environmental Science, 2009, 29(12): 1296-1300. (in Chinese))
- [9] 徐爱兰,姚琪,王鹏,等.太湖流域水资源综合规划数模研究 水质模型的建立与率定[J].四川环境,2006,25(3):67-72. (XU Ai-lan, YAO Qi, WANG Pen, et al. Study on digifax of integrated water rrsource plan of Taihu Basin[J]. Sichuan Environment, 2006, 25(3): 67-72. (in Chinese))
- [10] 张玉清.水污染动力学和水污染控制[M].北京:化学工业出版社,2007:126-132.
- [11] 张敏,蔡庆华,王岚,等.三峡水库香溪河库湾蓝藻水华生消过程初步研究[J].湿地科学,2009,7(3):230-235. (ZHANG Min, CAI Qing-hua, WANG Lan, et al. Preliminary study on cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay Three Gorges Reservoir[J]. Wetland Science, 2009, 7(3): 230-235. (in Chinese))
- [12] 刘载文,杨斌等,黄振芳,等.基于神经网络的北京市水体水华短期预报系统[J].计算机工程与应用,2007,43(28):243-245. (LIU Zai-wen, YANG Bin, HUANG Zhen-fang, et al. Water-bloom short-time predicting system of Beijing based on neural network [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(28): 243-245. (in Chinese))

Analysis and calculation of water pollution and blue algae in Meiliang Bay of Taihu Lake

CHEN Ming^{1,2}, LU Wei-xian^{1,2}, YU Jian-qiao³, XU Liang³

(1. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

3. Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: A model was established to simulate the transport and diffusion of water pollution and blue algae in Meiliang Bay of Taihu Lake. It included 4 modules: (1) GIS-based calculation network; (2) hydrodynamics-based diffusion and transport of water quality; (3) water quality process model, including decaying pollutant and dissolve oxygen; (4) concentration model of blue algae. The calculated results of cases show that the proposed model has high precision to simulate the transport and diffusion of total nitrogen, total phosphorus, dissolved oxygen and blue algae in Meiliang Bay of Taihu Lake, and their deterministic coefficients are 0.70, 0.74, 0.88 and 0.86, respectively.

Key words: water pollution; blue algae; calculation model; Meiliang Bay; Taihu Lake