

应急调水对太湖北部污染物扩散的影响

匡翠萍¹, 邓凌¹, 刘曙光¹, 顾杰²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要:以太湖为研究对象,采用 Delft3D 模型建立了太湖湖区的二维水动力模型,利用 2007 年太湖污水团事件有关数据进行了验证计算.在 SE 向 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风况下,运用此模型,对太湖湖区不同的调水方案进行了模拟,对比分析了各方案对贡湖取水口处污染物扩散的影响.结果表明:在 SE 向 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风况下,望虞河枢纽进水流量越大,对污染物的应急去除效果越好,而增加太浦闸出水流量的效果甚微;贡湖水厂新取水口相比旧取水口,在地理位置、补给水源等方面占优.

关键词: 太湖; 污水团; 应急调水; 数学模型; 湖泊污染
中图分类号: X 524 **文献标识码:** A

Effect of Emergent Water Diversion on Diffusion of Pollutant in Northern Taihu Lake

KUANG Cui ping¹, DENG Ling¹, LIU Shu guang¹, GU Jie²

(1. Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on Delft3D model, a two-dimensional hydrodynamic model was established and validated against data of polluted water cluster in 2007 for Taihu Lake. Then hydrodynamic diffusion numerical experiments were performed to compare and analyze the diffusion of polluted water cluster under SE $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wind condition with different water diversion measures. The simulated results show that the larger drawing flow from Wangyu River, the better effect on pollution diluted near Gonghu Waterworks in northern Taihu Lake, however larger draining flow to Taipu River has little influence there. As for geographic location and recharged water source, new water intake of Gonghu Waterworks is better than the old one.

Key words: Taihu Lake; polluted water cluster; emergent water diversion; mathematical models; lake pollution

太湖是太湖流域内最大的湖泊,也是该流域水资源的调度中枢,兼有防洪、排涝、供水、航运、旅游及养殖等功能于一体,对当地的社会生活及经济发展起着极其重要的作用.尽管我国早在上世纪九十年代初就开始对太湖的大规模治理,但太湖周边城市的快速发展造成了日益严重的环境污染,破坏了太湖内水生态环境的平衡,因此本世纪初以来太湖水环境仍呈恶化趋势^[1].

2007 年 5 月 28 日无锡贡湖水源地出现“污水团”并引发了无锡自来水供水危机,此次事件的相关报道很多,但国内相关机理的研究较少,中国科学院南京地理与湖泊研究所^[2]对污水团的外界诱因进行了分析;陆桂华等人^[3]结合各项污水团的监测数据,分析了污水团的成分、成因等,而国外相关方面的研究也并不成熟^[4-5].

“引江济太”应急调水是解决此次污水团危机的重要力量^[6],调水稀释能在较短时间内加快湖水交换速度、提高湖内水位、稀释突发污染,是改善湖泊水环境较可行和有效的方法,国内外在调水对水质影响方面做了大量研究. Hamilton 用一维水力-生态联合模型(DYRESM)研究了 Prospect 水库调水造成的水质变化情况^[7];席燕萍用一维水质水量模型研究了不同调水方案对秦淮河水环境的改善程度^[8];华祖林等用二维水质水量模型模拟分析了调水对玄武湖水质的影响^[9].

本文以太湖为研究对象,采用二维数值模型对 2007 年污水团事件进行了水动力模拟研究,并根据

收稿日期: 2009-11-19

基金项目: 水利部太湖流域管理局项目(0230253212);“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAJ08B14 和 2007FY110300-03);同济大学“985 工程”二期建设项目(0200144005)

第一作者: 匡翠萍(1966—),女,教授,博士生导师,工学博士.主要研究方向为水文和海岸工程研究. E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 邓凌(1986—),男,硕士生.主要研究方向为水文和海岸工程研究. E-mail: dlklf@163.com

此模型对多种调水方案进行了模拟研究,着重分析调水的对比效果和贡湖水厂取水口延伸工程的效果.

1 基本方程

由荷兰 Delft 水力研究所开发的 Delft3D 模型的核心模块——水动力模块 Delft3D-FLOW 可用于三维水动力学和物质输移的模拟,其二维的基本方程由不可压缩自由表面流的三维 Navier-Stokes 方程,采用浅水静压假定和 Boussinesq 近似,沿垂向积分推出.直角坐标下的平面二维水流方程^[10]如下:

连续方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + \zeta)v]}{\partial y} = Q \quad (1)$$

水平动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + F_x + \frac{1}{\rho H} (\tau_x^s - \tau_x^b) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + F_y + \frac{1}{\rho H} (\tau_y^s - \tau_y^b) \end{aligned} \quad (3)$$

对流扩散方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial HC}{\partial t} + \frac{\partial HuC}{\partial x} + \frac{\partial HvC}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \\ \left\{ H \epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ H \epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right\} = F_s \end{aligned} \quad (4)$$

式中: (u, v) 分别为 (x, y) 方向上的流速; Q 表示单位面积的源或汇流量; ζ 为自由水面至基准面的距离; d 为基准面下的深度; H 为总水深; f 为柯氏力参数; (F_x, F_y) 分别为 (x, y) 方向上雷诺应力; n 为曼宁系数; C 为污染物浓度; F_s 为源汇项; ρ 为水体密度; ϵ_x, ϵ_y 分别为 (x, y) 方向的扩散系数; τ_x^s, τ_y^s 分别为 (x, y) 方向上的风应力,可取经验公式(5)计算,即

$$\begin{aligned} \tau_x^s &= C_0 \rho_a U^2 \cos \beta, \\ \tau_y^s &= C_0 \rho_a U^2 \sin \beta \end{aligned} \quad (5)$$

式中: C_0 为风应力拖曳力系数; ρ_a 为大气密度; U 为风速(一般取水面以上 10 m 处的风速); β 为风向与 x 轴的夹角; τ_x^b, τ_y^b 分别为 (x, y) 方向上的底部摩擦力,可取式(6)计算,如

$$\tau_x^s = \frac{n^2}{H^{1/3}} \rho g u \sqrt{u^2 + v^2},$$

$$\tau_y^s = \frac{n^2}{H^{1/3}} \rho g v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

2 模型建立与验证

模型模拟区域为太湖全湖区,计算网格为正交网格,在梅梁湖、贡湖区域加密,间距小于 200 m,其他区域的网格间距为 300 m,总网格数为 269×274 (见图 1). 水下地形根据 2003 年太湖水下地形数据插值生成,太湖湖区的风拖曳力系数根据以前的研究,取值从 0.001 3 - 0.002 之间^[11-12],根据模拟试验率定取 0.001 8. 2007 年真实风况下的水动力数值模拟所用的风、环湖流量以及望虞河枢纽和太浦闸的调水流量分别采用太湖环湖测站的实测风、环湖各口门的实测出入流量以及相应的调水流量. 由于氨氮的浓度是污水团的一个主要指标,模拟中根据观测资料,贡湖水厂水源地附近污水团有恶臭和清晰的界限,直径约 2 km 从水面到湖底通体稠黑,氨氮浓度超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最大值达 $12.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (劣于 V 类),溶解氧下降到接近 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此,模型中污水团设在贡湖水源地处,初始氨氮平均浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、直径为 2 km.



图 1 太湖湖区计算网格、水厂位置及测风站位置

Fig. 1 Computational grid, locations of waterworks and wind measurement stations in Taihu Lake

2007 年 5 月 28 日,贡湖水厂水源地出现“污水团”;29 日,无锡市内部分自来水出现异味;6 月 1 日,贡湖水厂水源地水质开始改善;6 月 5 日,无锡市政府发布了水质达标公告.

在污水团事件中,除 5 月 28 日 6:00 外,在 5 月 31 日 12:00 之前,沙敦港测站处风速几乎都在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,见图 2;其后平均风速逐渐增大至 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上. 6 月 1 日之前主风向是南风,但其后出现一个北风过程.

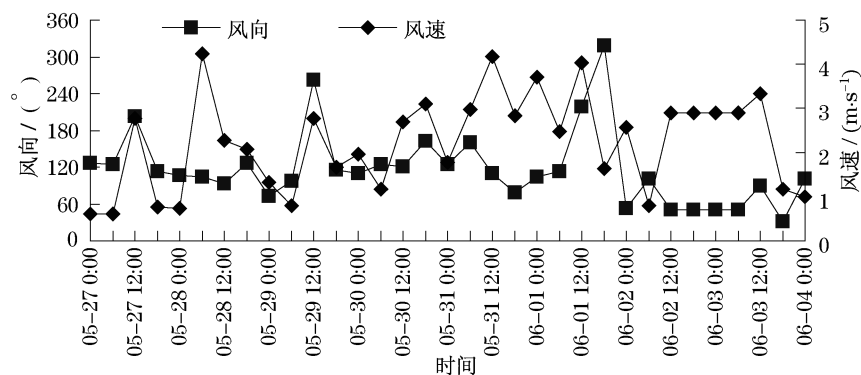


图2 2007年5月27日至6月4日沙敦港测站处风速风向图

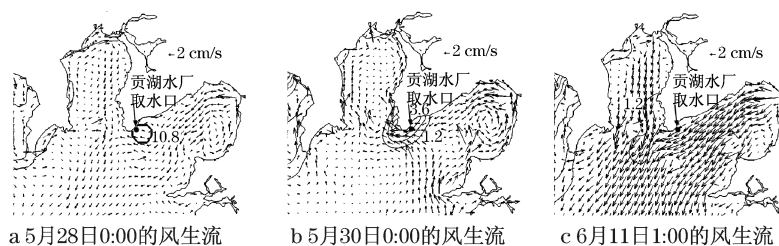
Fig.2 Time history of wind direction and speed measured at Shadungang from 27th May to 4th June, 2007.

图3为真实情况下污水团事件模拟过程中几个典型时刻的流场和氨氮浓度场.在5月28日0:00(图3a),望亭枢纽的引水流量约为 $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,贡湖水厂东部出现了一个小范围环流,此时的平均风速为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,主风向为偏南风.在流速不大外加小范围环流的作用下,贡湖水厂取水口处的水体交换非常缓慢.

从5月30日开始,“引江济太”的调水力度继续加大,望亭枢纽的入湖流量增加至 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,且水质保持为Ⅲ类.在持续的南风作用下,见图3b,入

湖水加快了贡湖出口处流场的流速,由此加速了贡湖内的污染物的稀释过程,提升了水体的交换速度,贡湖水厂取水口附近的环流消失.

5月31日之后,望亭枢纽的入湖流量达到 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,平均风速达到了 $3 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向在6月1日左右出现了一个北风过程,见图3c.在北风和持续的大流量调水的帮助下,贡湖水厂周围的水流速度持续增加,更有利于贡湖水厂附近水域的污染物的稀释.污水团沿北岸发展稀释,最终贡湖水厂水源地水质达标,此过程与相关报道描述基本一致.

图3 2007年5月28日至6月1日真实风况下北太湖湖区风生流流场及污水团氨氮浓度变化过程(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)Fig.3 Simulated wind-driven current field and concentration distribution of polluted water cluster under the real wind in northern Taihu Lake from 27th May to 1st June, 2007. (unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

3 调水效果分析

太湖湖区每年3—8月的主导风向是东南风,风力约为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,9—11月主导风向为东北风,风速约为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,12月—次年2月主导风向为西北风,风速约为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [13],由于春末夏初为太湖蓝藻暴发最严重的时期,2007年污水团也发生在此期间,故调水实验风况采用SE向 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风况.太湖应急调水的措施主要通过望虞河枢纽引进长江水,由太浦闸引出太湖水,根据两者多年的调水实际情况和预测要求,制定了具有代表性的9种应急调

水方案(见表1),引水水质采用国家Ⅲ类地表水标准(氨氮浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),研究分析各方案的效果.

表1 应急调水组合方案

Tab.1 Schemes of emergent water diversion

方案	望虞河枢纽引水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s})$	太浦河排水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
1	100	15
2	100	80
3	100	150
4	200	15
5	200	80
6	200	150
7	300	15
8	300	80
9	300	150

3.1 出水流量恒定、不同进水流量方案

当只改变望虞河枢纽进水流量时,调水后各个阶段,在较大进水流量情况下污染物总体位置都更

偏向出贡湖方向,且峰值区域更小,见图 4. 随着望亭枢纽进水流量增加,图 5 中曲线越陡,故污染物浓度在原贡湖水厂取水口处衰减速度随望亭枢纽进水流

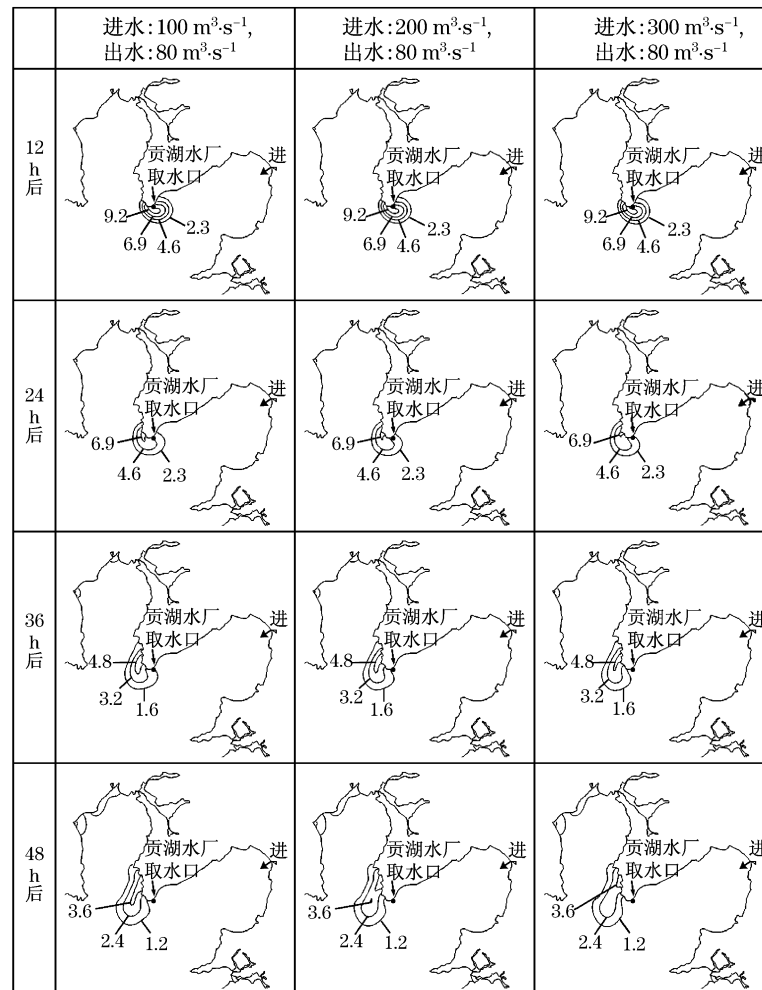


图 4 出水流量 $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 进水流量变化方案下污水团氨氮浓度分布 (单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig. 4 Simulated $\text{NH}_3 - \text{N}$ concentration distribution of polluted water cluster under different drawing flow and invariable draining flow of $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

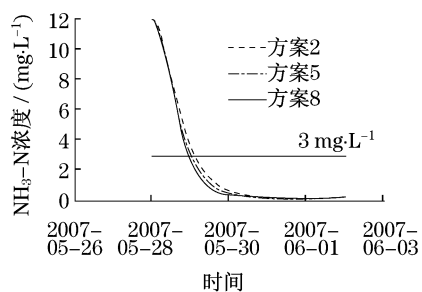


图 5 出水流量 $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 进水流量变化方案下贡湖水厂处氨氮浓度过程

Fig. 5 Time history of $\text{NH}_3 - \text{N}$ concentration at Gonghu waterworks under different drawing flow and invariable draining flow of $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

量增加而增加,当望虞河枢纽进水流量为 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,取水口处氨氮浓度降至 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 需时 27 h, 而流量为 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时分别需时 24 h 和 22 h,望虞河枢纽进水流量越大对贡湖污水团的稀释起到的作用越积极.

3.2 进水流量恒定、出水流量变化方案

当进水流量不变,出水流量增加时,三条曲线基本重合,见图 6,故随着太浦闸出水流量增加,污染物消散的速度几乎不变,提高太浦闸的出水流量在试验风况下对太湖北部污染物的应急处理效果甚微.

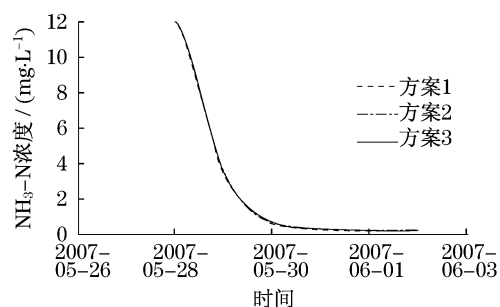


图6 进水流量恒定 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 出水流量变化方案下贡湖水厂处氨氮浓度过程

Fig.6 Time history of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration at Gonghu Waterworks under different draining flow and invariable drawing flow of $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

4 新旧贡湖水厂取水口优劣对比

在SE向 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风况下的流场中(见图7), 贡湖水厂原取水口东面岸线的凹处容易形成环流, 造成污染物的积聚, 且在沿岸流的作用下, 污染物容易沿岸边流经贡湖水厂水源地, 造成污染; 贡湖新取水口比旧取水口离岸更远, 达 3 km 以上, 能较有效地保证不受沿岸流携带的污染影响, 且位于补给水源主流动区的中部位置, 有利于得到望虞河枢纽入湖水源的补给。

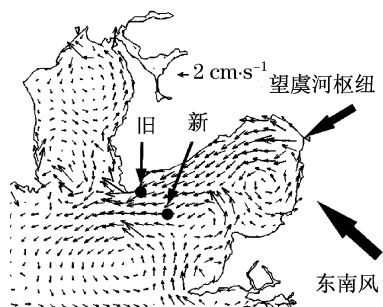


图7 新旧取水口位置及东南风作用下流场

Fig.7 Locations of new and old water intakes and wind-driven current field under SE wind

在正北向 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风况下的流场中(见图8), 贡湖水厂处形成离岸流, 原取水口的来水主要来自东面凹岸区和贡湖, 水质较差, 而新取水口的来水主要来自湖心区, 水质较优。

5 结论

以太湖为研究对象, 应用 Delft3D 模型, 在蓝藻

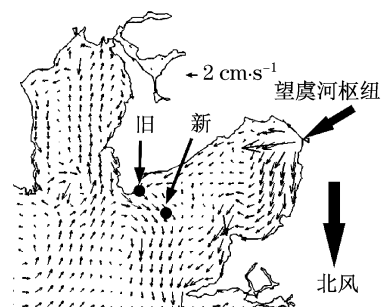


图8 新旧取水口位置及北风作用下流场

Fig.8 Locations of new and old water intakes and wind-driven current field under N wind

暴发时期盛行的SE向 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风况下, 模拟分析了望虞河枢纽和太浦闸九组不同的调水流量方案对“污水团”事件中污染物扩散的影响, 主要结论如下:

(1) 对于太湖湖区北部贡湖水厂处的污染物的应急处理, 望虞河枢纽进水流量越大, 稀释效果越好, 但提高太浦闸的出水流量对其影响甚微。

(2) 贡湖水厂新取水口与旧取水口相比, 其优势主要有: 在蓝藻暴发期间的盛行东南风的作用下, 离东岸环流较远, 其位置不容易受环流及沿岸流携带污染物的影响, 且处于调水补给主流区, 调水去污效果好; 在北风下, 补给水质更优。

因此, 当贡湖水厂水源地受污染时, 增大望虞河枢纽进水流量是解决危机的有效办法之一, 但是应该看到, 只有从污染源头抓起, 减排治污、逐步恢复太湖水环境生态, 才是解决太湖环境问题的根本之道。

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.
ZHU Guangwei. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu, China[J]. Journal of Lake Science, 2008, 20(1):21.
- [2] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4):357.
Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, On the cause of cyanophyta bloom and pollution in water intake area and emergency measures in Meiliang Bay, Lake Taihu in 2007 [J]. Journal of Lake Science, 2007, 19(4):357.
- [3] 陆桂华, 马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 438.
LU Guihua, MA Qian. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 438.

- [4] Yang Min, Yu Jianwei, Li Zonglai, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. *Science*, 2008, 319(5860):158.
- [5] GUO Lucie. Doing battle with the green monster of Taihu Lake [J]. *Science*, 2007, 317(5842):1166.
- [6] 水利部太湖流域管理局,江苏省水利厅. 江苏省环境保护厅. 引江济太应急调水改善太湖水源地水质效果分析[J]. *中国水利*, 2007(11):1.
Taihu Basin Authority, Water Resources Department of Jiangsu Province, Environment Protection Bureau of Jiangsu Province. Result analysis of improving water source quality of Taihu Lake by diverting water from the Yangtze [J]. *China Water Resources*, 2007(11):1.
- [7] Hamilton DP, Schladow G, Fisher I H. Controlling the indirect effects of flow diversions on water quality in an Australian reservoir[J]. *Environment International*. 1995, 21(5): 583.
- [8] 席燕萍, 逢勇. 石臼湖引水改善秦淮河水环境研究[J]. *江苏环境科技*, 2008, 21(4):6.
XIYanping, PANG Yong. Study on improvement of Qinhuai River water environment by transferring Shijiu Lake water[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2008, 21(4):6.
- [9] 华祖林, 顾莉, 薛欢, 等. 基于改善水质的浅水湖泊引调水模式的评价指[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 623.
HUA Zulin, GU Li, XUE Huan, et al. Assessing indicators for water diversion based on improving water quality of shallow lakes[J]. *Journal of Lake Science*, 2008, 20(5): 623.
- [10] WL | Delft Hydraulics. User Manual Delft3D - FLOW[M]. WL | Delft Hydraulics. 2006.
- [11] 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*, 2009, 24(4): 512.
XU Xufeng, LIU Qingquan. Numerical study on the characteristics of wind-induced current in Taihu Lake. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2009, 24(4): 512.
- [12] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究——1. 风生流和风涌增减水的三维数值模拟[J]. *湖泊科学*, 1998, 10(4): 17.
HU Weiping, PU Peimin, QIN Boqiang. A three-dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake, China (I): the water level and the current during the 9711 Typhoon process[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(4): 17.
- [13] 田向荣, 马巍, 廖文根. 调水对梅梁湖、五里湖水环境影响研究[J]. *人民长江*, 2007, 38(2):69.
Tian Xiangrong, Ma Wei, Liao Wengen. Study on influence of water diversion on the water environment in Meiliang Bay and Wuli Lake[J]. *Yangtze River*, 2007, 38(2):69.



(上接第 394 页)

- [10] Kang K H, Shin H S, Parka H. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications[J]. *Water Research*, 2002, 36:4023.
- [11] Xia K, Skylberg U L, Bleam W F, et al. X-ray absorption spectroscopic evidence for the complexation of Hg (II) by reduced sulfur in soil organic matter[J]. *Environ Sci Technol*, 1999, 33:257.
- [12] Steelink C. Implications of elemental characteristics of humic substances [C] // *Humic Substances in Soil, Sediment and Water*. New York: Wiley, 1985. 457 - 476.
- [13] Chai Xiaoli, Takayuki Shimaoka, Cao Xiaoyan, et al. Spectroscopic studies of the progress of humification processes in humic substances extracted from refuse in a landfill [J]. *Chemosphere*, 2007, 69:1446.
- [14] Lu X Q, Hanna J V, Johnson W D. Source indicators of humic substances; an elemental composition, solid state¹³C CP/MAS NMR and Py - GC/MS study[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15:1019.
- [15] Ivana Cavoski, Valeria D'Orazio, Teodoro Miano. Interactions between rotenone and humic acids by means of FT-IR and fluorescence spectroscopies [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2009, 395:1145.
- [16] Thomas D, Gauthler W, RudoH Seltz, et al. Effects of Structural and Compositional Variations of Dissolved Humic Materials on Pyrene Koc Values[J]. *Environ Sci Technol*, 1987, 21(3):243.
- [17] 吴军. 生活垃圾填埋场腐殖垃圾腐殖质表征及重金属生物有效性初步研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
WU Jun. Characterization of humic substances and bio-availability of heavy metal in aged-refuse from Shanghai MSW landfill[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [18] Samios S, Lekkas T, Nikolaou A, et al. Structural investigations of aquatic humic substances from different watersheds [J]. *Desalination*, 2007, 210:125.
- [19] 梁重山, 党志. 核磁共振波谱法在腐殖质研究中的应用[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(4):277.
LIANG Chongshan, DANG Zhi. Application of NMR spectroscopy in research of humic materials [J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4):277.