

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.05034

# 大型浅水湖泊水动力特性数值分析

王 佳<sup>1,2</sup>, 冶运涛<sup>2</sup>, 雷晓辉<sup>2</sup>, 王宇晖<sup>1</sup>

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 准确模拟太湖水流动态变化特性及水动力特征对模拟、预测污染物迁移转化规律以及理解水流运动与污染物相互作用机制具有重要的实用价值。以环境流体力学(EFDC)模型为基础, 收集2009年-2010年水文、气象数据及湖区地形数据, 并考虑引江济太工程对湖区的影响, 建立符合太湖湖区水流特性的水动力模型。模型模拟结果表明最大风向、最大风速的组合方式模拟出来的流场情况最接近真实湖体流场, 引江济太工程对湖流的影响微小, 模型的水动力模拟效果良好。

**关键词:** 水动力; 太湖湖泊; EFDC模型; 流场; 水动力学模型

**中图分类号:** TV 213    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0034-04

## Numerical Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Large-scale Shallow Lake

WANG Jia<sup>1,2</sup>, YE Yuntao<sup>2</sup>, LEI Xiaohui<sup>2</sup>, WANG Yuhui<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Accurate simulation of dynamic change of water flow and hydrodynamic characteristics is of important significance for predicting the migration and transformation of pollutants and understanding the interactions between water flow and pollutants. In this study, a hydrodynamic model was developed based on the EFDC model to simulate the water flow characteristics of Taihu Lake in light of the collected hydrological, meteorological, and terrain data from 2009 to 2010 and the effects of implementation of the Water Transfer Project from Yangtze River to Taihu Lake. The model results showed that the combination of maximum wind direction and wind speed can generate the flow field close to the actual conditions, and the effects of the Water Transfer Project from Yangtze River to Taihu Lake on the water flow of Taihu Lake are insignificant. The model shows good simulated hydrodynamic results.

**Key words:** hydrodynamics; Taihu Lake; EFDC model; flow field; hydrodynamic model

太湖是长江三角洲最大的浅水湖泊, 随着经济的不断发展, 湖体环境遭到严重破坏, 太湖由草型湖泊转变成富营养化严重的藻类湖泊, 水质也由最初的Ⅲ-Ⅳ类下降到以Ⅴ类为主的水体。目前, 湖体自身的营养物质成为诱发太湖水华的主要因素, 在一定环境下, 内源营养的沉积、再悬浮为藻类的生长提供生长条件。流场状态是诱发物质再悬浮的主要因素, 所以流场对于太湖的水动力, 及水体中营养物质的迁移、转换起着至关重要的作用, 而引江济太工程的实施改变了水体边界条件, 可能会影响到太湖湖体环境。研究清楚太湖流场的状况, 对于后续的治理工作十分重要。

太湖局部地区染严重, 水华事件连年爆发, 研究较为深入<sup>[1-2]</sup>。对于太湖整个湖区的研究有待于进一步深入, 濮培民<sup>[3-5]</sup>等人采用三维风生流模型模拟了太湖夏季某日的流场, 进一步研究了围垦对于湖流的影响; 钱新<sup>[6]</sup>等研究了特定条件下高温微风对太湖湖流的影响。引江济太工程实施之后, 滑磊<sup>[7]</sup>等人研究了引江济太对湖体水龄的影响, 对于新环境下的湖体湖流情况还没有相关研究。本文收集2009年-2010年太湖湖区实测数据, 选用功能较为成熟、成功案例广泛的EFDC(ENVIRONMENTAL FLUID DYNAMICS CODE)模型<sup>[8-9]</sup>模拟太湖整个湖区的水动力环境,

收稿日期: 2013-04-26    修回日期: 2013-08-07    网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1501.005.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAB05B01); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201101026); 国家自然科学基金项目(51209223); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(2011491911)

作者简介: 王 佳(1988-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: aqurius\_j@yahoo.com.cn

通信作者: 雷晓辉(1974-), 男, 陕西澄城人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: lxh@iwhr.com

探究新环境下的流场情况,以及风场的最佳组合方式。为后续太湖水质生态模型的建立打下基础,并为太湖的预报、预警、调度、规划、治理等工作提供技术支持。

## 1 研究区概况及二维模型的构建

### 1.1 区域概况

太湖是典型的大型浅水湖泊,湖泊水面积 2 338 km<sup>2</sup>,最大水深 3.34 m,平均深度 1.89 m,平均水温为 17.1℃。太湖流域属北亚热带南部向中亚热带北部过渡区,四季分明,热量充裕。太湖地区还处于东南季风气候区,湖区风向 4月-8月以南风、东南风为多,每年 9月-10月平均遭受两次台风影响,此时短时以东北风向为主;10月至翌年 2月,则以东北、西北风向为主<sup>[2]</sup>,全年平均风速为 3.5~5.0 m/s。

### 1.2 模型的建立

太湖流域河网交错复杂,与太湖连通的河道多达百条,其中大部分河道出入湖水量较小,苕溪、南溪、运河水系为太湖的主要补给河道,太浦河、吴淞江为其主要的出流河道<sup>[9]</sup>,本文选择环太湖出入流量较大的 15 条河道作为模型边界(表 1)。

表 1 太湖模拟边界输入点

Table 1 Boundary conditions of Taihu Lake

方向	边界点	方向	边界点	方向	边界点
N	犊山闸	N	白渡口	N	望亭太
N	胥口闸	N	瓜泾口	E	太浦闸
S	吴淞	S	幻楼	S	大钱闸
S	小梅口	W	长兴二	W	夹浦
W	大浦口 1	W	大浦口 2	W	大浦口 3

太湖属于大面积、形状规整的浅水湖泊,用笛卡尔直角坐标网格建立太湖水动力模型,面积为 1 km×1 km,修正后的网格个数为 2 562 个,横向  $I_{\max}$  为 63 个,纵向  $J_{\max}$  为 67 个(见图 1)。

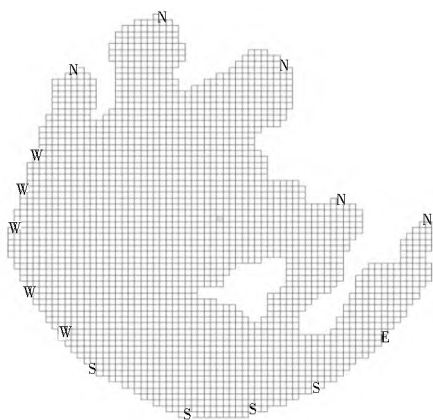


图 1 太湖网格划分及边界点

Fig. 1 Mesh discretization and boundary points of Taihu Lake

太湖湖区平均水深仅为 1.89 m,采用二维水动力模型进行模拟计算可以满足工程设计的需要,垂向设为一层。根据数据收集情况,本文建模选用水位数据为主要输入边界条件,以流量数据为辅。湖区的气象边界条件主要包括降雨、蒸发、太阳辐射、温度等。

## 2 模型参数的确定

### 2.1 湖底糙率确定

湖底糙率是影响模型稳定的重要参数之一,由于太湖湖底较为平坦,故本文计算时将糙率视为常数。参考相关文献及模型的率定情况,设置默认糙率为 0.2。

### 2.2 流场处理

太湖湖流形成原因主要有两种,出入湖泊引起的吞吐流,及湖区上方风场引起的风生流。流场对于建立水动力模型,及后续湖泊中营养物质的输移、悬浮,生态模拟准确性起到至关重要的作用。然而由于测量艰难、工作量大,流场的实测数据很难收集。国内对于太湖流场的研究众多<sup>[3,6,11-12]</sup>,多数研究过程都忽略吞吐流所造成的影响,单考虑风生流的作用。然而,近年来引江济太(利用常熟水利枢纽引长江水,通过望亭水利枢纽进入太湖,最终再从太浦闸流入太浦河,从而实现长江水稀释太湖水,改善湖水水质的目的)工程的实施,闸调度工作可能会引起湖区流场方向的改变,考虑到以上因素,本文在选用水位边界的同时,在闸调度河道还设置了流量边界,更真实的还原太湖湖区的水环境。

吞吐流可以根据水位、流量边界条件确定;风生流主要由湖区上方的风场数据确定。由于太湖湖区面积较大、检测站点有限,收集的风场数据具有一定的局限性。本文选用湖区内吴县东山气象监测站的监测数据,模型输入边界采用以天为单位的时长,收集到的气象数据有日平均风速、最大风速、极大风速、最大风向、极大风向。

本文设计 4 组方案:相同的水文、水质边界输入,相同的气象数据,不同的气象数据,根据水质数据的输出情况反推风场数据的最佳组合形式(表 2)。

表 2 方案设计

Table 2 Schematic design

方案	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向(16位)
一	平均	最大
二	平均	极大
三	最大	最大
四	极大	极大

## 3 模拟与分析

模型选用美国 EPA 研发的 EFDC 生态动力学模型。EFDC 模型可用于一维、二维、三维流场、水动力、及生态过程的模拟。垂直方向采用  $\sigma$  坐标转换,水平方向采用直角或正交曲线坐标。动力学方程采用有限差分法求解,水平方向采用交错网格离散,时间积分采用二阶精度的有限差分以及内外模式分裂技术<sup>[8]</sup>。

本文选用 2009 年数据进行率定,2010 年实测数据验证模型的模拟效果。时间步长取为 120 s,每 720 个步长输出一个数值,即模拟输出单位为天。由于太湖湖区的水文实测数据较少,本文仅选用洞庭西山监测站点作为模型模拟输出验证点。

### 3.1 流场分析

本文设计 4 种方案,来确定最佳风场数据。太湖夏季盛

行西南风, 2009 年 8 月中旬风速方向大体一致, 在保证稳定风向的前提下, 输出 8 月 18 日的风场数据, 图 2- 图 5 依次为对应方案的流场图。

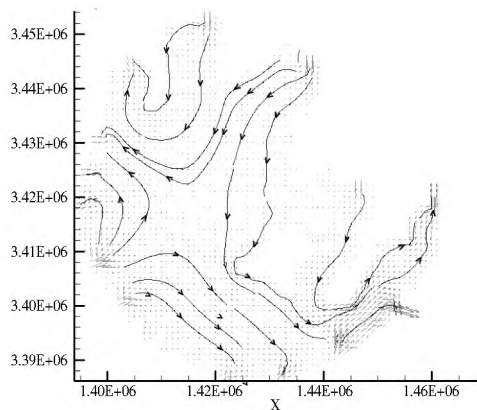


图 2 方案一流场图

Fig. 2 Flow field of scheme 1

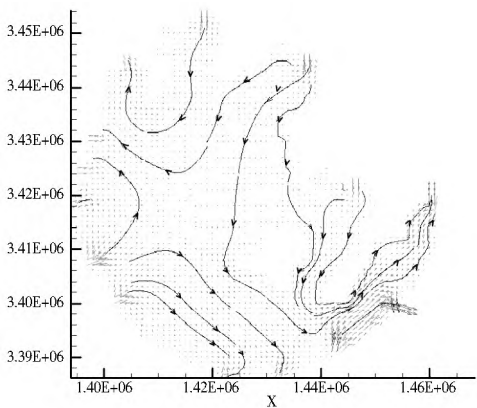


图 3 方案二流场图

Fig. 3 Flow field of scheme 2

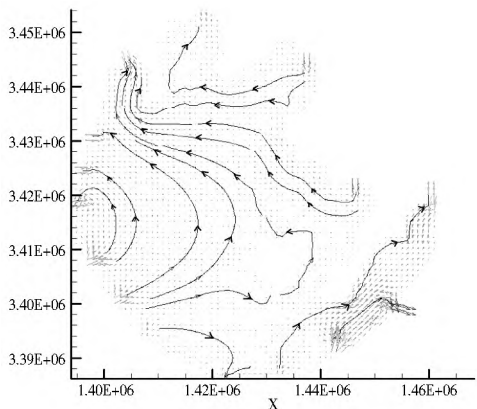


图 4 方案三流场图

Fig. 4 Flow field of scheme 3

2009 年夏季, 太湖湖区依旧是西北部水华严重, 春季猛长的藻类在夏季盛行风的作用下漂浮、聚集到湖区的北部, 由此分析, 引江济太工程的实施并没有改变湖流的大体方向, 即太湖湖区依旧是风生流为主的湖体, 综上分析图 4、图 5 符合流场方向的大体情况。根据 8 月的闸调度情况分析, 太浦闸一直处于出水状态, 水位相对较低, 图 4 的太浦闸流向符合实际情况。其次, 在参数相同的情况下, 后两种方案输出的洞庭西山水位数据结果, 方案三的输出误差为 2 cm;

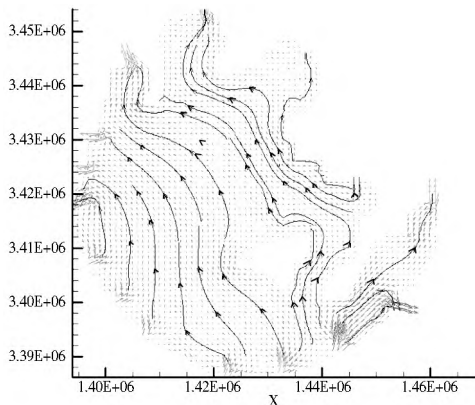


图 5 方案四流场图

Fig. 5 Flow field of scheme 4

方案四的输出误差为 5 cm, 而且数据波动幅度较大。根据以上分析, 图 4 更接近实际流场图, 即最大风速、最大风向的风场数据模拟水动力状况最为接近实际情况。后续的研究都是在方案三的基础上进行的。

望亭太水位为环湖水位监测站全年最高水位点, 太浦闸为环湖水位监测站全年最低水位点, 两者的水位差、地势等因素, 致使太湖湖流的总体方向为由北向南、由西向东。图 6 为方案三的太湖全年平均流场图, 从 6 图的模拟情况看, 模拟的流场与太湖实际流场方向相符, 模拟效果良好。

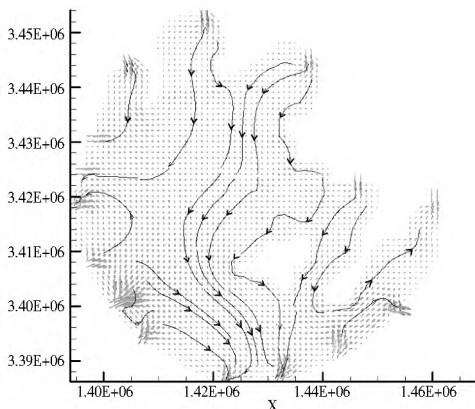


图 6 年均流场图

Fig. 6 Annual average flow field

### 3.2 水位分析

模拟率定水位为 2009 年洞庭西山日实测数据, 验证水位为 2010 年洞庭西山的实测日数据, 见图 7、图 8。由图可知, 除部分点, 计算水位与实测水位的偏差均值在 2 cm 左右, 模拟效果良好

模型选用水位输入边界, 保证了湖区水位的准确。从图中可以看出, 峰值部分的模拟效果良好, 其他时期的实测数据波动较剧烈, 模拟输出数据较为平缓, 原因可能有三点: 一是受时间步长的影响; 二是本文将湖底糙率设置为常数, 致使模拟湖区底部比实际湖底光滑, 由底部引起的水波较平稳; 三是风场因素影响模拟效果。

### 3.3 水温分析

考虑到太湖水面积大, 并且水浅、湖底较平坦, 太湖水温场分布较为均匀, 水平与垂直方向的水温差较小, 本文忽略了水体自上到下的热交换过程, 主要考虑水气间的热交换过程。

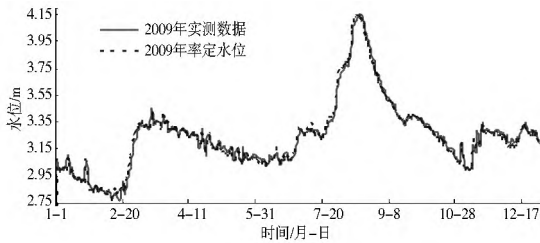


图 7 2009 年率定水位

Fig. 7 Calculated water level in 2009

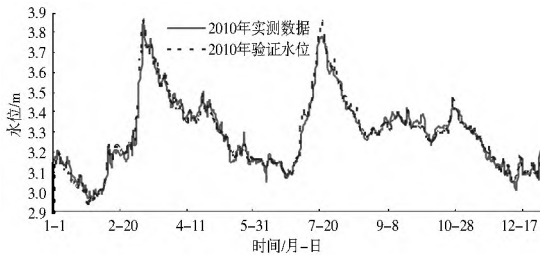


图 8 2010 年验证水位

Fig. 8 Verified water level in 2009

图 9、图 10 为率定验证水温图, 计算水温与实际水温的平均偏差为 2℃。

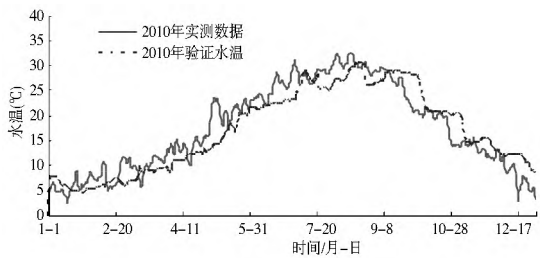


图 9 2009 年率定水温

Fig. 9 Calculated water temperature in 2009

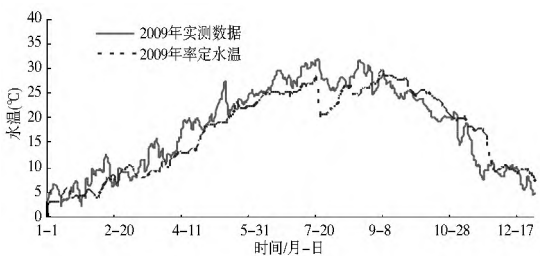


图 10 2010 年验证水温

Fig. 10 Verified water temperature in 2009

水温验证数据模拟效果较好, 模拟数据的变化趋势与实际数据变化趋势大体相一致。建模时由于缺少出入湖泊河道的水温数据, 可能是影响模型模拟水温效果的重要因素之一。

## 4 结论

根据建立的生态动力学模型, 模拟计算了 4 种情况下整个湖区的流场, 及最终选定方案的水位、水温。所得结果如下。

(1) 引江济太工程的水调度工作, 对湖区流场的影响并不是十分明显, 太湖仍然是以风生流为主的湖泊。湖区全年水流方向仍然是由北向南, 由西向东。

(2) 选用最大风向、最大风速的组合建立风场输入边界, 产生的风生流最为接近太湖实际流场情况。模拟输出的水

位数据与实际数据的平均偏差不到 2 cm, 模拟数据的波峰与实际情况基本同步, 也进一步说明了流场数据的准确度高。

(3) 模型水温模拟的平均误差为 2℃, 丰富输入水温边界数据, 以及考虑垂向热交换过程均可以提高模型水温模拟的精准度。

## 参考文献(References):

- [1] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 太湖现代沉积物中磷的沉积通量及空间差异性[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(4): 329-335. (ZHU Guangwei, QIN Boqiang, GAO Guang. Phosphorus Sedimentation Flux and Its Spatial Heterogeneity in Taihu Lake[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2007, 38(4): 329-335. (in Chinese))
- [2] Shuijing Zhai, Weiping Hu, Zecong Zhu. Ecological Impacts of Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River, China [J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 406-420.
- [3] 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): 15-25. (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): 15-25. (in Chinese))
- [4] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究 2: 典型风场风生流的数值计算[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 26-33. (HU Weiping, PU Peimin, QIN Boqiang. A Three Dimensional Numerical Simulation on the Dynamics in Taihu Lake, China(Ⅱ): The Typical Wind driven Current and Its Divergence [J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 26-33. (in Chinese))
- [5] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究-3. 马山围垦对太湖风生流的影响[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 335-342. (HU Weiping, PU Peimin, QIN Boqiang. A Three Dimensional Numerical Simulation on the Dynamics in Taihu Lake, China(Ⅲ): Influence of the Reclamation in Mashan District on Wind driven Current [J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 26-33. (in Chinese))
- [6] 王成林, 黄娟, 钱新. 高温微风条件下太湖流域风场时空特征分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 122-128. (WANG Chenglin, HUANG Juan, QIAN Xin. Spatiotemporal Characteristics of Wind field under High Temperature and Gentle Breeze in Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(1): 122-128. (in Chinese))
- [7] 郝文彬, 唐春燕, 滑磊. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 129-133. (HAO Wenbin, TANG Chunyan, HU Lei. Effects of Water Diversion from Yangtze River to Taihu Lake on Hydrodynamic Regulation of Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) 2012, 40(2): 129-133. (in Chinese))
- [8] 张庆合. 基于 EFDC 鄱阳湖水环境模型与不确定性研究[D]. 广州: 广州大学, 2011, 33(7): 31-43. (ZHANG Qinghe. Poyang Lake Water Environment Model and Its Uncertainty Research Based on EFDC [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 33(7): 31-43. (in Chinese))

(下转第 111 页)

## 4 结语

本研究过程综合考虑了工程限制因素、环境地质限制因素,以及历史地下水流场,确定了北京西郊地区地下水恢复的适宜水位为1983年枯水期流场,对指导有关部门恢复生态、地下水储存等有指导、借鉴意义。今后,北京西郊地区无论是因减采或者回灌方式恢复地下水位时,均应密切监测地下水水位动态,确保水位恢复不能超出适宜水位。

### 参考文献(References):

- [1] 刘予,孙颖,殷琨.南水北调引水进京后北京市地下水环境预测[J].水文地质工程地质,2005,(5):93-96.(LIU Yu, SUN Ying, YIN Kun. Prediction Groundwater Environment after the South to North Water Transfers in Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (5): 93-96. (in Chinese))
- [2] 李会安,窦艳兵.南水北调水进京后北京市地下水利用与保护[J].水利规划与设计,2006,(5):19-26.(LI Huān, DOU Yānbīng. Utilize and Protect Groundwater after the South to North Water Transfers in Beijing[J]. Water Resources Planning and Design, 2006, (5): 19-26. (in Chinese))
- [3] 蔡向民,何静,白凌燕,等.北京市地下空间资源开发利用规划的地质问题[J].地下空间与工程学报,2010,12(6):1105-1111.(CAI Xiangmin, HE Jing, BAI Lingyan, et al. The Geology Problem in Development and Utilization Programming of Underground Space Resources in Beijing [J]. Underground Space and Engineering, 2010, 12(6): 1105-1111. (in Chinese))
- [4] 石晓东.北京城市地下空间开发利用的历程与未来[J].地下空间与工程学报,2006,2(7):1088-1091.(SHI Xiaodong. History and Future of Underground Space Development and Utilization in Beijing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(7) 1088-1091. (in Chinese))
- [5] 崔瑜,李宇,谢振华,等.北京市平原区地下水养蓄控高水位及其约束条件下的地下水库调蓄空间计算[J].城市地质,2009,4(1):12-15.(CUI Yu, LI Yu, XIE Zheng-hua, et al. The Estimate of Groundwater Restore Space Based on Groundwater Restore Level Research in Beijing Plain [J]. Urban Geology, 2009, 4(1): 12-15. (in Chinese))
- [6] 王新娟,许苗娟,周训.北京市西郊区地表水地下水联合调蓄模型研究[J].勘察科学技术,2005,(5):16-19.(WANG Xirjuan, XU Miaojuan, ZHOU Xun. Model Research of United Dispatching of Surface Water and Groundwater in Western Urban and Outskirts of Beijing[J]. Site Investigation Science and Technology, 2005, (5): 16-19. (in Chinese))
- [7] 孙颖,叶超,韩爱果,等.北京地区水资源养蓄方案初探[J].水土保持研究,2006,13(6):129-132.(SUN Ying, YE Chao, HAN Aiguo, et al. Discussion of the Groundwater Resource Restore Plan [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, (13): 129-132. (in Chinese))
- [8] 郑佳,窦艳兵,邵景力,等.南水北调供水前后北京西郊地区地下水流场趋势预测研究[J].工程勘察,2009,(5):35-39.(ZHENG Jia, DOU Yānbīng, SHAO Jingli, et al. Prediction of Groundwater Flow Field in the West Suburb of Beijing before and After the South to North Water Diversion [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2009, (5): 35-39. (in Chinese))
- [9] 北京市地质矿产勘查开发局,北京市水文地质工程地质大队.北京地下水[M].中国大地出版社,2008.(Beijing Geology and Mineral Resources Exploration and Development Bureau, Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Groundwater of Beijing [M]. China Land Publishing House, 2008. (in Chinese))
- [9] 陈异晖.基于EFDC模型的滇池水质模拟[J].云南环境科学,2005,24(4):28-30.(CHEN Yihui. Water Quality Simulation of Dianchi Lake Based on EFDC Model[J]. Yunnan Environmental Science, 2005, 24(4): 28-30. (in Chinese))
- [10] 陈小锋,揣小明,曾巾,等.太湖氮素出入湖通量与自净能力研究[J].环境科学,2012,33(7):2309-2311.(CHEN Xiaofeng, CHUAI Xiaoming, ZENG Jin, et al. Nitrogenous Fluxes and Its Self Purification Capacity in Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2309-2311. (in Chinese))
- [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):512-518.(XU Xufeng, LIU Qingquan. Numerical Study on the Characteristics of Wind induced Current in Taihu Lake[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(4): 512-518. (in Chinese))
- [12] 罗淑葱,秦伯强.基于三维浅水模式的太湖水力数值试验盛行风作用下的太湖流场特征[J].水动力学研究与进展,2003,18(6):687-691.(LUO Liarcong, QIN Borqiang. Numerical Simulation Based on a Three Dimensional Shallow-water Hydrodynamic Model in Lake Taihu Current Circulations in Lake Taihu with Prevailing Wind forcing [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(6): 687-691. (in Chinese))

(上接第37页)