

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.05.005

太湖水环境功能区调整方案

胡开明¹,逢 勇²,余 辉³,李 4,王 民²

(1.江苏省环境科学研究院,江苏 南京 210036;2.河海大学环境学院,江苏 南京 210098;
3.中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地,北京 100012;4.中国长江电力股份有限公司,湖北 宜昌 443002)

摘要:基于《江苏省地表水(环境)功能区划》的主要成果,根据太湖湖体水质可达标性要求,对太湖西岸重点污染水域的功能区进行细化。通过建立太湖水环境数学模型,以太湖不利风场及污染物最大入湖通量作为最不利条件,模拟概化河流的入湖污染带,计算污染物纵向扩散距离。在此基础上,划定太湖湖体增设功能区的范围,提出基于湖体水质达标的功能区划分方法。
关键词:太湖 水环境功能区划 最不利风场条件 污染物最大入湖通量 纵向扩散距离 数学模型
中图分类号:TV142 X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)05-0503-06

Adjustment of water environmental functional zones in Taihu Lake

HU Kaiming¹, PANG Yong², YU Hui³, LI Zhe⁴, WANG Min²

(1. Jiangsu Provincial Academy of Environment Science, Nanjing 210036, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;
4. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: Based on the major results of the Surface Water (Environment) Functional Zoning of Jiangsu Province, the functional zones of seriously polluted water areas on the west bank of Taihu Lake were refined according to the accessibility requirements for the water quality of Taihu Lake. A mathematical model of the water environment of Taihu Lake was established to simulate the pollution zone of generalized inflow rivers and calculate the longitudinal dispersal distance, with the maximum pollutant flux into the lake and the adverse wind field considered to be the most adverse conditions. On this basis, the range of the additional functional zone was demarcated. A method for functional zoning is proposed on the basis that the water quality of the lake reaches the standards.
Key words: Taihu Lake; water environmental functional zoning; most adverse wind field condition; maximum pollutant flux into lake; longitudinal dispersal distance; mathematical model

江苏省人民政府于 2003 年 3 月批复了《江苏省地表水(环境)功能区划》^[1],该功能区划方案实施多年来,有力地推动了江苏省水污染防治工作的开展。近年来,随着社会经济的发展,常州市武进区及无锡市等地区污染负荷日益增大,受其影响,太湖西岸湖体已成为该湖污染严重的水域之一,特别是 TN 和 TP 超标严重。目前国家对太湖湖体考核断面共有 21 个,其中 5 个在太湖西岸湖区,该区水质难以达到功能区要求,根据功能区划分的计算要求^[2-4],应在不同水质目标的交界区域设置过渡带,因此有必要对太湖湖体功能分区做适当调整,主要是在太湖西岸湖区设置过渡带,以保障太湖湖体水质达标。
水质达标是湖泊水环境功能区划的主要目的之一^[5-6],也是湖泊科学管理与污染控制的重要抓手。基于各分区水质目标,计算其环境容量^[7],对湖泊水体进行分区管理,有利于针对性地制订湖泊不同水域的污染控制措施。美国、日本、前苏联等国家均于 20 世纪 60 年代开始进行水环境功能区定性、定量划分的工作,分

区的标准包括水资源功能、污染物化学成分及地质条件差异等^[8-9]。我国对湖泊、海湾等水体进行功能区划分的研究工作始于20世纪90年代,开创了浓度等值线分区法、污染指数分级分区法、叠加分区法和多目标决策分区法等湖泊水功能区划分方法^[9-10]。各种分区方法在确定功能区的交界区域时,为考虑水质达标,边界线实质上是划在2个区域的过渡地带,以顺利衔接水质要求不同的相邻功能区。

笔者在2003年实施的《江苏省地表水(环境)功能区划》成果的基础上,根据太湖湖体水质可达标性要求,通过建立太湖水环境数学模型,研究太湖西岸概化入湖河道污染物通量与西岸湖体污染带纵向扩散距离的响应关系,提出基于水质达标的浅水湖泊水环境功能区划分方法并给出功能区调整结果,旨在保证太湖湖体水环境功能分区管理的整体合理性与水资源开发利用的科学优化。

1 研究区域概况

综合考虑水文边界条件及行政区域边界,确定本次研究范围如下:东至太湖西岸湖体水域,西至湖东岸,南至浙江省湖州市地界,北至京杭运河常州段。

陆域研究区域主要包括宜兴市、常州市、湖州市。宜兴市及常州市地处太湖流域西部,主要为湖荡平原地貌,地势低洼,湖荡集中,河网密布。大部分地面海拔在4 m以下(黄海基面)。该区域属于典型的平原河网地区,进、出湖河道虽多,但流量均不大,河道短、流量小。湖州市位于太湖流域西南部、杭嘉湖地区西部,地势南高北低。流经市内的东、西苕溪分别发源于天目山的南、北麓,向北流入太湖。东、西苕溪上游为丘陵区,山势相对峻峭,中下游为平原区,地形平坦,地面高程2.00~6.00 m,局部有孤山、残丘分布。东、西苕溪均属山溪性河流,源短流急,洪水暴涨暴落。

水域研究区域主要为太湖湖体。太湖面积为2338 km²,湖区整体呈椭圆形,南北长68.5 km,东西平均宽34.0 km,湖岸线全长约405.0 km,湖底地形十分平坦,平均坡度约为0°0′19.66″,平均水深为1.9 m,最大水深为3.3 m,大部分水深处于1.5~2.5 m之间(占总面积的72.3%),从湖底地形可见湖盆形态呈浅碟形^[11]。根据江苏省政府批准实施的《江苏省地表水(环境)功能区划》,目前太湖湖体水环境功能区分为竺山湖、梅梁湖、贡湖、胥湖、五里湖以及湖心区6个功能区域,见图1。

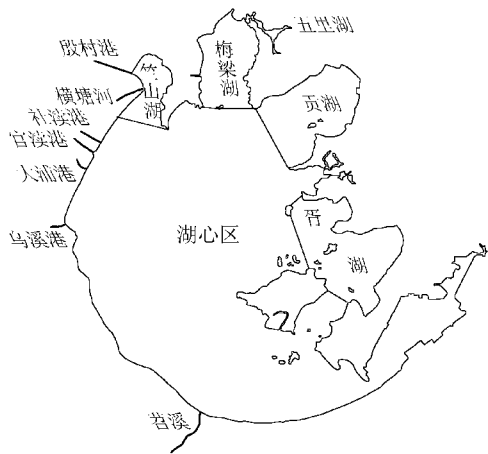


图1 太湖湖体功能区现状及概化河道示意图
Fig. 1 Schematic map of functional zones and generalized inflow rivers of Taihu Lake

2 功能区划分方法

鉴于宜兴市、常州市、湖州市入湖河道的污染物排放严重,使太湖西岸水域的水质严重低于湖心保护区的水质目标要求(太湖湖心区1735.2 km²水域划分为太湖湖心保护区,执行Ⅱ类水质标准)。在现有水环境功能分区的基础上,需在太湖西岸水域增设独立的功能区,旨在保证太湖湖体功能区划分整体达到技术及经济更加合理、可行。

对太湖西岸入湖河道进行概化。通过对概化入湖河道污染物通量与入湖污染物纵向扩散距离的响应关系进行研究,选取污染物入湖最大通量以及太湖不利风场作为最不利条件,以概化河道水量、水质数据作为湖体水环境数学模型边界条件,模拟概化河道入湖后形成的污染带,计算得到污染带的纵向扩散距离,并绘制污染带包络线,作为功能区边界划定依据。

根据太湖河网地区典型年不同水期的水文、水质资料,将水质质量浓度乘以入湖流量得出各入湖河道的污染物入湖通量。入湖通量计算公式为

$$W_i = C_i Q_i \tag{1}$$

式中: W_i ——河道入湖通量,t/a; C_i ——水质质量浓度监测值,mg/L; Q_i ——水量模拟计算值,m³/s。

3 太湖水环境数学模型建立及率定

3.1 基本方程

3.1.1 水量模型

假设湖水为均匀不可压缩流体,垂直方向上服从静水压力分布。采用笛卡尔直角坐标系。 x 轴和 y 轴位于湖水的平均水平面上, x 轴向东为正, y 轴向北为正, z 轴向下为正,得其流体动力学方程为^[12]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

$$p = \rho_w g (\eta + z) \tag{5}$$

式中: u, v, w —— x, y, z 轴方向上的流速分量; η ——竖直方向上湖面相对于平均水面的高度; ρ_w ——水的密度; A_z, A_h ——垂直和水平涡动黏滞系数; f ——柯氏参数, $f = 7.23 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; g ——重力加速度; p ——水的压强。

3.1.2 水质模型

水质方程以质量平衡方程为基础,由于三维水质输移方程包含很多不可确定的参数,在现有条件下模型的验证存在困难,考虑到资料及模型计算工作量等因素,采用垂向平均二维水质模型。二维水质输移方程^[13]为

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + U \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) - K_i C_i + S_i \tag{6}$$

式中: C_i ——污染物(COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, TN)垂线平均浓度(质量浓度); U, V —— x, y 方向上的流速分量; E_x, E_y —— x, y 方向扩散系数; K_i ——污染物降解系数; S_i ——污染源汇项,根据大型浅水湖泊生境特性,污染源汇项主要是底质起悬引起的污染物释放。

3.2 定解条件

a. 边界条件。流量及水位边界条件: $Q = Q_0, Z = Z_0$;浓度场边界条件:进水边界 $C = C_0$,出水边界 $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ 。

b. 初始条件。水位变化幅度为 0 m,初始流速为 0 m/s,初始浓度取前 1 个月的平均浓度。

3.3 参数率定

太湖湖流运动主要是受风生流影响,1 a 内随着不同季节主导风向的变化,受风场影响的湖泊环流呈现出不同的环流方向和形式。太湖湖体水流流场计算值与实测值分别见图 2、图 3。参数率定采用的实测资料见文献^[14]。

计算结果表明 模拟计算得到的太湖流场与实测结果在态势及流速量级上基本一致。模型基本参数率定成果^[15]为:曼宁系数(湖底糙率) $n = 0.025$;风应力系数 $\gamma_a^2 = 0.0013$; x, y 方向扩散系数均为 $2.0 \text{ m}^2/\text{s}$; COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, TN 的降解系数分别为 $0.06 \text{ d}^{-1}, 0.04 \text{ d}^{-1}, 0.02 \text{ d}^{-1}, 0.04 \text{ d}^{-1}$ 。利用 2009 年 6 月监测到的竺山湖及湖西区水质质量浓度值进行水质模型参数率定工作,计算值与实测值对比见图 4,两者误差均在 20% 以内。

4 太湖湖体水功能区调整

4.1 河道概化

将太湖西岸入湖河道概化为殷村港、横塘河、社渚港、官渚港、大浦港、乌溪港和苕溪共 7 条,位置见图 1。枯、平、丰水期污染物通量以及污染物最大日通量采用式(1)计算。7 条概化河道的入湖水量数据采用太湖流域河网水量模型^[16]进行计算。模型分别对概化入湖河道典型年的枯、平、丰水期水量进行模拟,计算

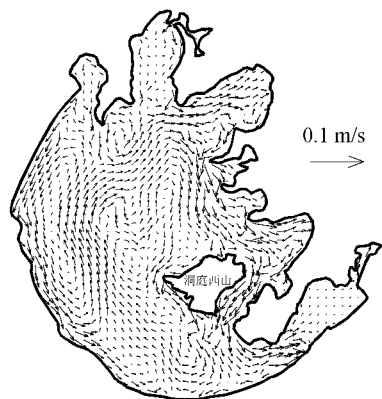


图 2 北风作用下太湖模拟流场

Fig. 2 Simulated flow field of Taihu Lake under effect of north wind



图 3 北风作用下太湖实测流场

Fig. 3 Measured flow field of Taihu Lake under effect of north wind

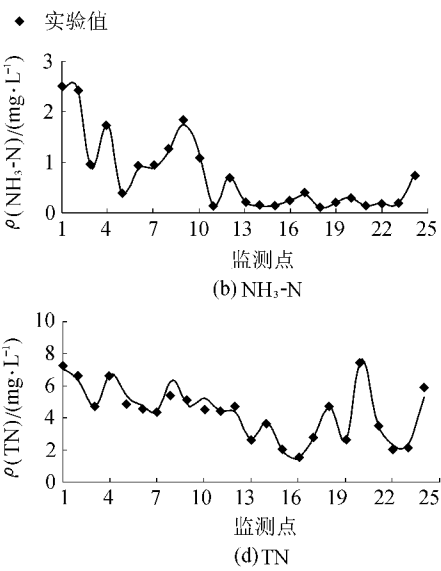
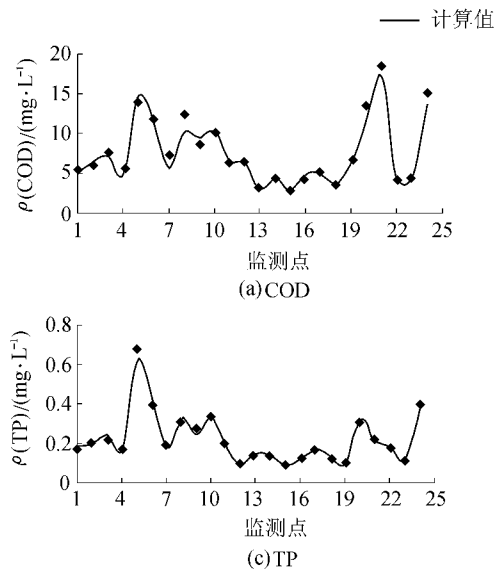


图 4 太湖水环境数学模型参数率定验证结果

Fig. 4 Comparison of calculated and measured water quality concentration of monitoring points in Taihu Lake

得各概化河道的逐日水量,并最终确定枯、平、丰水期的入湖水量 河道污染物浓度选取概化河道的水质监测资料。

4.2 污染带最大纵向扩散距离计算

以 7 条概化河道的入湖水量水质数据作为湖体水环境数学模型的边界条件,采用率定验证的太湖湖体水环境数学模型对概化河道的入湖污染带进行模拟。以达到太湖湖心区水体 II 类水质目标作为污染带边界,计算污染带的纵向扩散距离。利用模型对不利风场条件下各概化河道的污染物入湖通量与污染带纵向扩散距离的响应关系进行拟合,以大浦港为例,得出污染物通量与污染带纵向扩散距离在最不利风场条件下的响应关系曲线如图 5 所示。

通过 7 条概化河道的入湖水量水质数据计算污染物的最大日通量,其中水量计算数据采用最大日流量,水质计算数据采用水质监测资料与功能区水质目标两者之中较大的数据。

在污染物通量与污染带纵向扩散距离的响应关系曲线上查取最大日通量的纵向扩散距离,即可得最不利风场条件下的污染带纵向扩散距离。最不利风场条件下纵向扩散距离的计算结果如表 1 所示。其中,最大扩散距离是指 COD,NH₃-N,TP,TN 这 4 种污染物产生的污染带扩散距离的最大值。由表 1 计算结果可知,太湖西部沿岸水域的 TP 和 TN 污染严重,7 条概化河道的污染物最大纵向扩散距离均由这 2 类污染物产生。

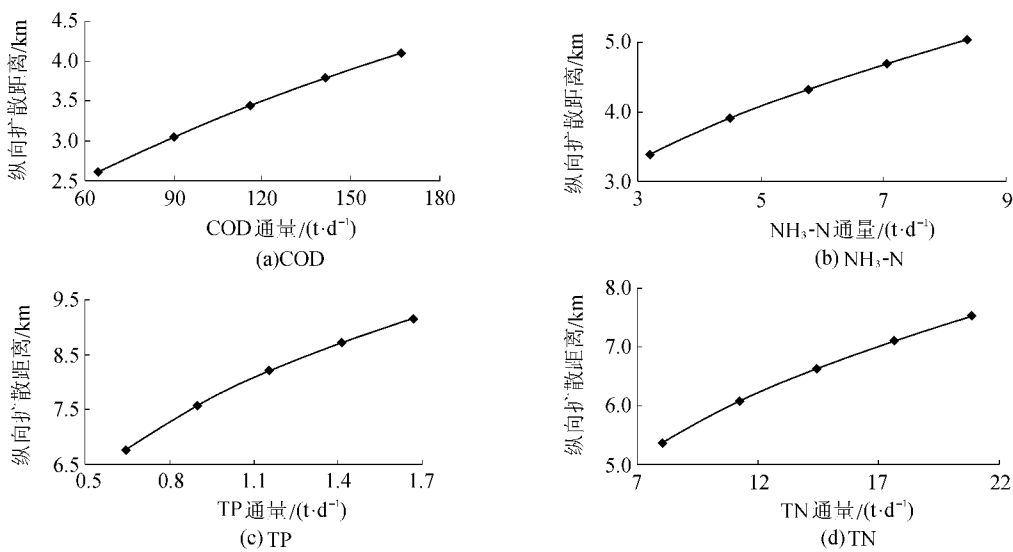


图 5 大浦港污染物通量与污染带纵向扩散距离响应关系曲线

Fig. 5 Response curves of pollutant flux and longitudinal dispersal distance in Dapugang Port

表 1 最不利风场条件下污染带纵向扩散距离计算结果

Table 1 Calculated results of longitudinal dispersal distance under most adverse wind field conditions km

河道	污染带纵向扩散距离				最大扩散距离
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	
大浦港	3.6	4.5	6.7	8.4	8.4
殷村港	4.0	9.4	10.3	11.6	11.6
社渚港	2.5	5.6	8.8	6.0	8.8
官渚港	3.6	6.5	8.6	8.2	8.6
横塘河	2.4	3.4	4.4	5.6	5.6
乌溪港	2.7	6.4	8.1	6.4	8.1
苕溪	3.7	4.7	7.0	8.5	8.5

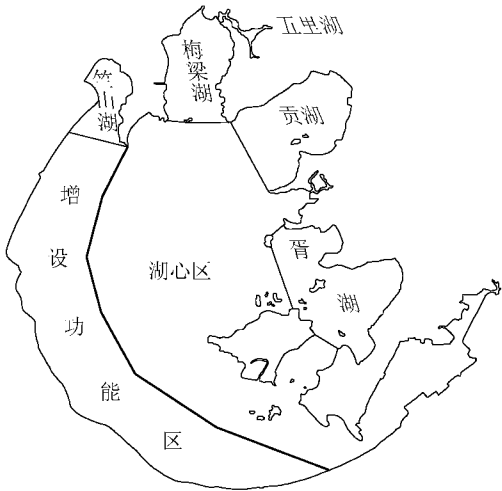


图 6 增设功能区划分结果

Fig. 6 Results of additional functional zoning in Taihu Lake

4.3 功能区调整成果

由表 1 可以得到 7 条概化河道大浦港、殷村港、社渚港、官渚港、横塘河、乌溪港、苕溪的污染带最大纵向扩散距离,分别为 8.4 km, 11.6 km, 8.8 km, 8.6 km, 5.6 km, 8.1 km, 8.5 km。以污染带最大纵向扩散距离确定入湖污染带的包络线,划定湖体增设功能区的边界。根据污染带扩散距离计算成果,利用 AutoCAD 等绘图软件绘制得太湖湖体增设功能区的范围如图 6 所示。预计增设功能区的水质要求可定为地表水Ⅲ类标准。

5 结 论

- a. 建立了太湖湖体水环境数学模型,以入湖河道水量、水质资料作为边界条件,对参数进行率定验证,结果表明计算值与实测值比较接近,说明该模型能很好地反映太湖的实际情况,具有较强的可操作性。
- b. 通过计算对比最不利风场条件下 7 条概化河道(大浦港、殷村港、社渚港、官渚港、横塘河、乌溪港、苕溪)COD,NH₃-N,TP,TN 这 4 种污染物扩散距离的最大值,得到相应的污染物最大纵向扩散距离分别为 8.4 km,11.6 km,8.8 km,8.6 km,5.6 km,8.1 km,8.5 km。在此基础上,划分太湖湖体的增设功能区边界,建议执行地表水Ⅲ类标准。基于新的分区水质目标,计算其环境容量,对湖泊水体进行分区管理,有利于针对性地制订湖泊不同水域的污染控制措施。
- c. 提出了基于太湖湖体水质达标的湖泊功能区划分方法,为类似水体提供技术支持。此方法以污染物最大日通量和太湖不利风场作为最不利条件,运用水环境数学模型模拟入湖污染物的污染带,计算污染带最

大纵向扩散距离,绘制入湖污染带包络线,最终划定湖体增设功能区边界,比较符合太湖的实际情况,有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 江苏省水利厅,江苏省环境保护厅.江苏省地表水(环境)功能区划[M].南京:江苏人民出版社,2003.
- [2] 王超,朱党生,程晓冰.地表水功能区划分系统的研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):7-11. (WANG Chao, ZHU Dangsheng, CHENG Xiaobing. Surface water function regionalization system[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002,30(5):7-11. (in Chinese))
- [3] 纪强,史晓新,朱党生,等.中国水功能区划的方法与实践[J].水利规划与设计,2002(1):44-47. (JI Qiang, SHI Xiaoxin, ZHU Dangsheng, et al. Method and practice of water functional zoning in China[J]. Water Resources Planning and Design, 2002(1):44-47. (in Chinese))
- [4] 袁弘任.水功能区划方法及实践[J].水利规划与设计,2003(2):19-24. (YUAN Hongren. Method and practice of water functional zoning[J]. Water Resources Planning and Design, 2003(2):19-24. (in Chinese))
- [5] 姜伟立,吴海锁,蒋永伟,等.江苏省流域水环境综合管理监控预警体系构建[J].环境监控与预警,2011,3(3):1-4. (JIANG Weili, WU Haisuo, JIANG Yongwei, et al. Preliminary construction of monitoring and early warning system for comprehensive management of water environment in Jiangsu[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2011,3(3):1-4. (in Chinese))
- [6] 周丰,刘永,黄凯,等.流域水环境功能区划及其关键问题[J].水科学进展,2007,18(2):216-222. (ZHOU Feng, LIU Yong, HUANG Kai, et al. Water environmental function zoning at watershed scale and its key problems[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2):216-222. (in Chinese))
- [7] 关卉.湛江市水环境容量测算[J].水资源保护,2006,22(3):78-91. (GUAN Hui. Calculation of water environment capacity in Zhanjiang City[J]. Water Resources Protection, 2006,22(3):78-91. (in Chinese))
- [8] 夏青,孙艳,许振成,等.水环境保护功能区划分[M].北京:海洋出版社,1989.
- [9] 庄源益,王萍,戴树桂,等.水环境保护功能区划分研究进展[J].环境科学进展,1995,3(3):21-30. (ZHUANG Yuanyi, WANG Ping, DAI Shugui, et al. Advance in the zoning of water body[J]. Advances in Environmental Science, 1995,3(3):21-30. (in Chinese))
- [10] 赵章元,宋杰远.伶仃洋海域的环境功能区及其发展趋势[J].环境科学研究,1992,5(2):23-27. (ZHAO Zhangyuan, SONG Jieyuan. The environmental functional zone of Lingding Sea and its developing tendency[J]. Research of Environmental Sciences, 1992, 5(2):23-27. (in Chinese))
- [11] 胡开明,逢勇,王华,等.大型浅水湖泊水环境容量计算研究[J].水力发电学报,2011,30(4):135-141. (HU Kaiming, PANG Yong, WANG Hua, et al. Calculation of water environment capacity for a large shallow lake[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011,30(4):135-141. (in Chinese))
- [12] 逢勇,濮培民.太湖风生流三维数值模拟试验[J].地理学报,1996,51(4):322-328. (PANG Yong, PU Peimin. Numerical simulation of three-dimensional wind-driven current in Taihu Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 1996,51(4):322-328. (in Chinese))
- [13] 李一平,逢勇,吕俊,等.水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J].湖泊科学,2004,16(4):318-324. (LI Yiping, PANG Yong, LU Jun, et al. On the relation between the release rate of TN, TP from sediment and water velocity[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(4):318-324. (in Chinese))
- [14] 余辉.基于太湖入湖污染物总量控制的湖泊水体分区研究[R].北京:中国环境科学研究院,2012.
- [15] 胡开明,逢勇,谢飞,等.直湖港、武进港关闸对太湖竺山湖水环境影响[J].湖泊科学,2010,22(6):923-929. (HU Kaiming, PANG Yong, XIE Fei, et al. Effects of Zhihugang and Wujingang closing sluices on water environment of Lake Zhushan, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2010,22(6):923-929. (in Chinese))
- [16] 罗缙,逢勇,林颖,等.太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(2):131-135. (LUO Jin, PANG Yong, LIN Ying, et al. Study on flux of pollutants discharged into Taihu Lake through main inflow river channels[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005,33(2):131-135. (in Chinese))