

小型景观湖水质模拟及应用研究

黄莉^{1,2} 何强¹ 彭述娟¹

(1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 成都 610500)

摘要 由于小型景观水体的体量和再生水补水措施的施行,其水质随环境和入水水质的变化和富营养化过程较大型水体快。由 EFDC 模型和 WASP 模型耦合建立小型浅水景观湖生态动力学模型,用实测水质数据进行参数率定与验证,可实现小型景观水体水质变化趋势的模拟,为水质管理提供决策支持。在此基础上,对民主湖在几种水质保障方案下 1 年的水质变化进行了模拟预测和对比,结果表明,作为富营养化程度表征的叶绿素 a 在空间和时间分布上均存在一定的规律性,夏季由于温度升高,叶绿素 a 浓度较高,说明藻类等浮游植物迅速增殖,是水质恶化水华暴发的高发期,而采取加大湖水水力循环和改善入口水质的控制方案,可使水质得到良好保障。

关键词 富营养化 水质模拟 景观水

中图分类号 X524 文献标识码 文章编号 1673-9108(2011)11-2453-06

Research on water quality simulation and prediction of small scenic water body

Huang Li^{1,2} He Qiang¹ Peng Shujuan¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract For size and using of gray water, the water quality of small scenic water body is relatively changed faster with environment conditions and inflows than larger and deeper water body. The eutrophication progress is also faster in small scenic water. EFDC and WASP model can be linked to establish hydro-quality model to simulate and predict the water quality variation of small scenic water body. The model was calibrated and verified by field test data and applied to Minzhu Lake under different water quality control strategies. The results showed obvious spatial and temporal distribution of chlorophyll-a concentration. At higher temperature in summer, higher chlorophyll-a concentration shows that phytoplankton such as algae grows quickly, which is the peak period of algal bloom and water quality deterioration. Strategies such as increasing the hydraulic circulation and improving the inflow water quality will achieve good effects in water quality management.

Key words eutrophication; water quality simulation; scenic water

景观水体作为一种重要的城市景观元素,在公共区域或居民小区被广泛采用。但由于景观水体通常水深较浅,稀释自净能力较弱,受冲击负荷影响较大,同时对环境变化如光照、温度等敏感度较高,容易富营养化甚至暴发水华造成水质恶化,严重影响水体的生态功能和景观效果;另一方面,《绿色建筑评价标准》将采用非传统水源补充景观用水作为绿色建筑评价的控制项要求,而《城市污水再生利用景观环境用水水质》对再生水回用的氮磷等营养物质和有机污染物浓度的要求较低,再生水回用措施进一步加大了受纳水体的水质保障难度。必须采取适当的水质保障措施,并根据湖水水质状况对其运行方式进行必要的调整。因此,利用生态动力学模

型对湖水水质演变和保障措施实施效果进行模拟预测,可为景观湖水质管理提供有效的决策支持。

1 研究对象

选取重庆大学校内的民主湖作为研究对象。民主湖为典型的小型景观湖,水面面积 0.84 hm²,平均水深约 1.6 m,总水量 1.344 万 m³,湖内各水流进出口布置见图 1。民主湖设喷泉为湖水曝气并加强水体流动,安排人员定期打捞湖面漂浮物(落叶、浮

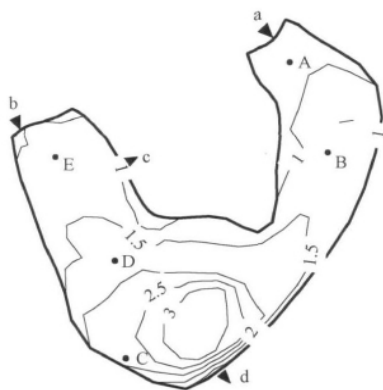
基金项目: 欧盟第六个框架计划项目(SWITCH018530)

收稿日期: 2010-03-26; 修订日期: 2010-12-29

作者简介: 黄莉(1980~),女,博士研究生,主要从事市政工程设计与技术研究工作。E-mail: girl-lily@163.com

萍等),并引附近操场、绿地的雨水径流作为自然补水。

为了解民主湖整体水质情况,2009年10—12月进行了跟踪监测,其水质指标平均浓度为:COD 28.1 mg/L,氨氮 0.78 mg/L,总磷 0.15 mg/L,总氮 1.96 mg/L,叶绿素 a 27 $\mu\text{g/L}$,透明度 68 cm。参考湖泊类水体的综合营养状态指数评价^[1],结果表明,民主湖水质已呈现中度富营养化状态。



(a. 上游水池来水; b. 雨水进水口; c. 上游水池喷泉吸水口; d. 溢流口; A~E. 水质监测采样点)

图1 民主湖平面图及湖水水深等值线(m)

Fig.1 Plan of Minzhu Lake and isopleths of water depth(m)

2 生态动力学模型

2.1 WASP 与 EFDC 的耦合

WASP(water quality analysis simulation program)模型是一个基于质量守恒原理的多参数水质模型^[2],该模型由分别用于水力计算、有毒物质计算、富营养化计算的 DYNHYD、TOXIC 和 EUTRO 3 个主要模块构成。其 EUTRO 模块以浮游植物的生长动力学为中心,考虑了在特定光照、水温等环境条件下水体中氮磷以及有机物等营养物质的多种形态循环、溶解氧消耗等过程,适用于湖库的富营养化模拟。自 WASP4 版本发布以来,被广泛应用于河流湖泊等水体的水质模拟研究^[3-5],现已列入美国 TMDL 计划。

由于 WASP 内建的水动力模块功能简单,主要应用于河网等简单网格物理模型的水力计算,不能满足本研究对污染物分布模拟计算的要求,而由于 WASP 有方便的接口与水动力学模型 EFDC(the environmental fluid dynamics code)的水动力输出相链接^[6],本研究使用新版 WASP7 读入 EFDC 的水动力

输出文件后进行水质的模拟计算。

EFDC 模型也是美国环保局推荐的水动力学模型,该模型通过对三维的湍流动量平均自由水面方程的求解,用以模拟河流、湖泊和水库等水体的水动力情况。

2.2 水动力学模拟结果

根据对湖底及边界的测量,采用垂向拉伸、水平向正交的非均匀曲线网格,在各出入水口网格密度较高,网格规模综合考虑了模拟的空间精度和时间步长,共 297 个。参照实际流量数据和气候资料,作为 EFDC 模型的输入参数与环境变量,对民主湖的流场进行了模拟。雨水进水口 b 流量根据民主湖汇流面积与降雨量计算,喷泉开启时的流量由水泵流量决定,设为 $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由于研究水体尺度较小,网格总体尺寸较小,为保证求解的稳定收敛,选取时间步长 2 s 进行迭代计算。

从流场模拟结果(图2)可以看出,风应力和持续较小的补水流量对流态影响不大。只有在暴雨发生时一侧水流的顺序流动为明显,但由于循环水量较小,流速总体较小。喷泉每日仅定时运行 4 次,每次 30 min 且流量较小,对湖水均质化和循环曝气作用亦很有限。

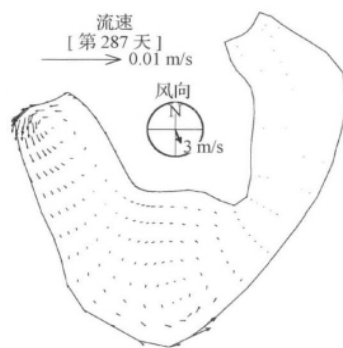


图2 暴雨时的流速分布

Fig.2 Simulated velocity distribution during a storm

2.3 水质模拟边界及初始条件

由于 EFDC 的水力模拟步长为 2 s, WASP 模拟步长默认与水力模拟相同,为在保证水质计算的稳定性前提下提高运算速度,本文 WASP 模拟步长时间间隔取为 20 s(须手动修改水力链接文件)。根据地方气象记录输入逐日环境变量,如温度、光照等。历次实测所得的进水水质数据作为模型的边界条件输入,由于进水主要为 a、b 两点汇入的雨水,监测频率受到降雨量的影响,平均频率约每周一次。

WASP 通过线性插值的方法计算各步长时间点边界处的环境变量值及水质参数值。除环境变量和边界条件外,模拟还需要设置各水质参数的初始浓度,水质参数边界及初始值的设置部分按照实测数据,部分根据相关文献参考公式或比例计算得出。边界及初始浓度设置汇总见表 1。

表 1 边界及初始浓度设置

Table 1 Boundary conditions and initial concentrations

项目	位置 ^{a)}	进水浓度 ^{b)}	初始浓度
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	a	0.7 ~ 0.9	0.81
	b	2.0 ~ 2.4	0.81
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	a	0.3 ~ 0.7	0.5
	b	1.2 ~ 1.6	0.5
有机氮 (mg/L)	a	0.40 ~ 0.43	0.42
	b	1.2 ~ 1.6	0.42
磷酸盐 (mg/L)	a	0.05 ~ 0.09	0.08
	b	0.07 ~ 0.13	0.08
有机磷 (mg/L)	a	0.04 ~ 0.12	0.1
	b	0.03 ~ 0.12	0.1
叶绿素 (μg/L)	a	25 ~ 60	30
	b	3 ~ 5	30
溶解氧 (mg/L)	a	6 ~ 8	10
	b	7 ~ 11	10
碳 BOD (mg/L)	a	10 ~ 14	12
	b	21 ~ 24	12

a) 位置见图 1 所示;

b) 进水浓度随时间变化,此处为变化范围。

2.4 参数率定及模型检验

参数率定是模型适用性调整的重要步骤,目前已有学者采用基于随机采样的统计方法或启发式搜索方法等参数自动率定方法,能取得较理想的参数后验分布^[7,8]。但该类方法需要多次(数万次或更多)调用模型计算,而小型景观湖由于空间尺度太小,入水、喷泉、风应力等扰流作用又较强,水力模拟和水质模拟计算步长需足够短,一年的水质模拟需耗时数小时,在时间上很难实现参数的自动率定,因此,本文采用手动试错法进行参数率定。

WASP 水质模型中参数众多,各参数又互相联系影响,难以全部率定,为此首先通过借鉴文献研究结果^[2,5-10]确定参数取值范围,并选定一组参数初值,再用逐一变化各参数(±10% 及 ±20%) 固定其他参数的方式对参数集合进行灵敏度分析,确定 5

个敏感参数为:浮游植物 20℃ 最大生长率、浮游植物 20℃ 呼吸率、20℃ 硝化系数、20℃ 反硝化系数、浮游植物碳与叶绿素之比。再对筛选出的敏感参数进行 5 因素 5 水平正交实验计算,对参数进行进一步率定,主要参数的率定结果如表 2 所示。

表 2 WASP 模型参数率定结果

Table 2 Result of parameter calibration of WASP

参 数	参考范围	取 值
浮游植物 20℃ 最大生长率 (d ⁻¹)	0.2 ~ 8.0	3.2
浮游植物 20℃ 呼吸率 (d ⁻¹)	0.02 ~ 0.8	0.34
浮游植物 碳/叶绿素 (C/Chl-a)	10 ~ 112	40
20℃ 硝化系数 (d ⁻¹)	0.01 ~ 5.7	0.25
20℃ 反硝化系数 (d ⁻¹)	0 ~ 0.2	0.05
磷浮游植物生长半饱和常数	0.0005 ~ 0.08	0.01
氮浮游植物生长半饱和常数	0.0014 ~ 0.4	0.03
浮游植物氮碳比 (N/mgC)	0.025 ~ 0.4	0.35
浮游植物磷碳比 (P/mgC)	0.01 ~ 0.05	0.025
20℃ 大气复氧率 (d ⁻¹)	0.1 ~ 0.2	*

* 基于流速和水深的 O'Connor 公式计算^[2]。

采用率定参数对 2009 年 11—12 月的水质进行模拟,模拟结果和实测水质间的相符性用均方根误差 (RMSE) 和偏差 (b) 表示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$$

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)$$

式中: S_i 、 O_i 为 i 监测点的模拟值和监测值, N 为监测次数。

限于篇幅,以 A 点和 E 点为例,各水质状态变量模拟结果和监测数据的对比如图 3 所示。

由于模拟采用的反应常数为固定值,为自然变化过程的近似,模拟值相较检测值波动较小,但趋势基本一致。可以看出, A、E 两点的叶绿素和溶解氧模拟值和检测值均有显著差异,这主要是由于景观湖水力扰动不大,而叶绿素和溶解氧受外界环境温度、光照等条件影响很大,所以在水体中呈现明显的空间分布;而氨氮和总磷浓度除了受水体生态过程的影响外,还在很大程度上受到降雨的影响,入湖的径流水质变化大,很难监测到其各时刻的水质变化,故在降雨量较大的时候,氨氮和总磷的检测值有较大波动。

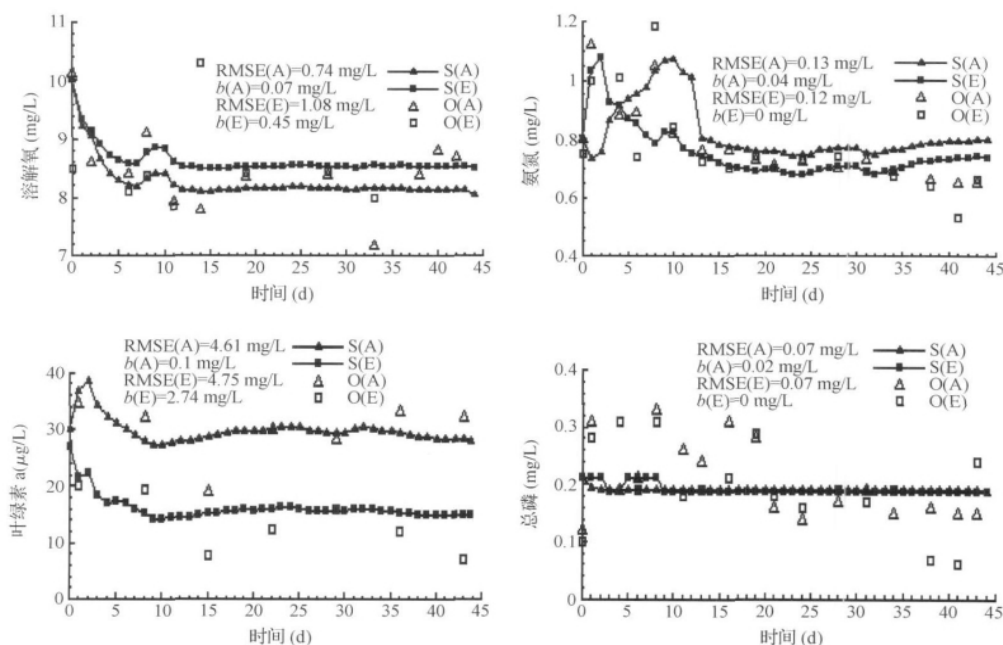


图3 A、E 采样点观测值与模拟值对比

Fig. 3 Comparisons between observed and simulated values at point A and E

各水质参数模拟和实测值间的偏差 b 值均小于测量均值的 10%, RMSE 值多在测量均值的 10% 左右, (总磷指标由于测量精度的原因波动较大, 造成 RMSE 值较大, 为测量值 25% 左右)。总体来看, 模拟结果与各采样点的实测数据在时间变化与空间分布上均较为吻合, 说明参数组的取值基本符合该水体的实际特征, 能够用来进行预测计算。

3 生态动力学模型应用

3.1 水质保障措施

由于民主湖水体已呈现中度富营养化状态, 为保证民主湖的景观效果, 抑制藻类过度繁殖产生水华等不良现象, 拟采用加大水力循环和对入水进行处理的方式保障水质。为考察方案的施行效果, 本文对方案施行后分 3 种情景进行了水质模拟预测: 方案 1: 在靠近雨水进水口 b 处设循环泵将水循环至 a 处注入, 使湖水水力停留时间缩短为 10 d; 方案 2: 在原状态下改善入水水质; 方案 3: 1 + 2 两种状态结合, 既增大循环又改善入水水质。

采用 2009 年全年的当地气温、降雨 (图 4)、风力和风向等气象资料对方案施行前后的水力水质变化进行了全年对比模拟, 重点考察富营养化的表征因子叶绿素 a 的变化及分布。

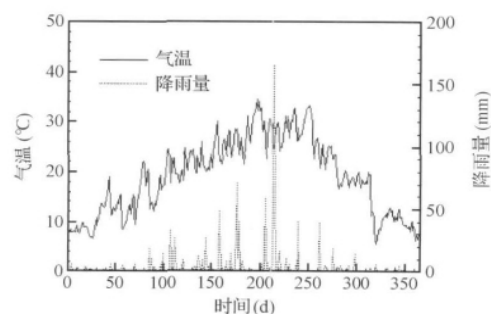


图4 2009 年民主湖降雨量和日平均水温

Fig. 4 Precipitation and daily mean water temperature of Minzhu Lake in 2009

3.2 流场变化

从同一时间点的流速矢量 (图 2 和图 5) 对比可以看出, 在采用方案 1 或 3 增大循环后, 湖体水流状况得到明显改善。缩短停留时间、加强水力循环有助于增加水体复氧和促使湖水均质化。

3.3 水质时间分布

水质指标中, 叶绿素 a 为藻类生长状况的直接表征, 是水体富营养化程度的重要标志。以水质较差的 A 点为例, 叶绿素 a 随时间的变化如图 6 所示, 其中 A、A1、A2 和 A3 分别指原状态及方案 1、2、3 施行后的 A 点叶绿素 a 浓度。

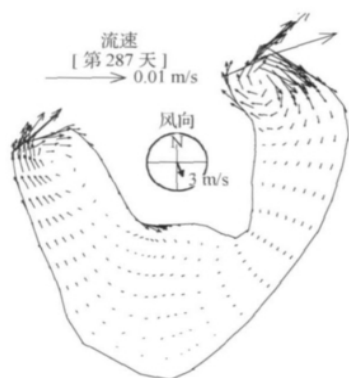


图 5 采用方案 1 或 3 后流速分布

Fig. 5 Simulated velocity distribution under strategy 1 or 3

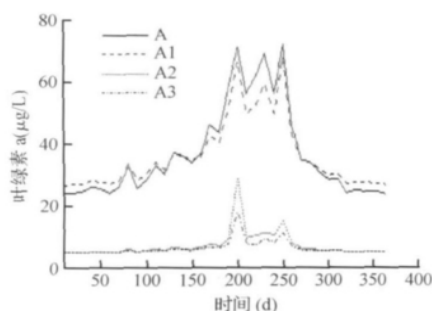


图 6 方案施行前后 A 点叶绿素 a 浓度模拟

Fig. 6 Simulated temporal variations of chlorophyll-a concentration of point A under different strategies

从对叶绿素 a 的模拟结果可以看出,夏季 7—8 月由于温度的升高及雨水径流的增加,是藻类生长最为活跃的时段,应当是湖水进行富营养化控制,防止水华的重要时期。

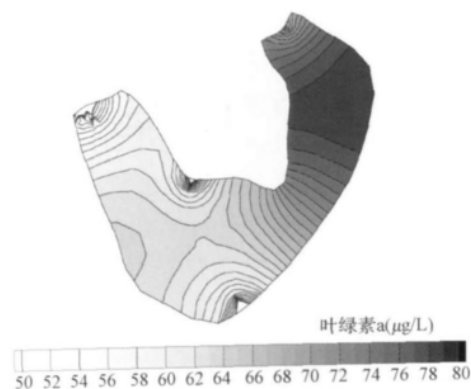
在方案 1 即水力混合加强后, A 点水质在夏季有所改善, 叶绿素 a 峰值有所降低, 说明在不采取措施控制进水浓度的情况下单纯加强水力混合对富营养化控制有一定效果, 但由于进水浓度较高, 水质没有大的改善。

在方案 2 即控制进水浓度的手段施行情况下, 湖水的叶绿素 a 有了明显降低, 波动减小, 说明控制进水浓度对控制湖水富营养化程度、保障水质具有明显效果, 若方案 1 和方案 2 同时施行(即方案 3), 将进一步减小夏季叶绿素峰值, 使水质更为稳定。

3.4 水质的空间分布

为考察叶绿素 a 空间分布, 选取时间分布中水质较差的时间点(第 200 天)做平面分布图(图 7)。

可以看出叶绿素 a 在湖中不同区域平面分布明显, 尤其是方案施行前, 浓度梯度较大, 且 E 点侧湖



(a) 原状态



(b) 方案 3 施行后

图 7 方案 3 施行前后叶绿素 a 浓度空间分布模拟

Fig. 7 Simulated spatial variations of chlorophyll-a concentration before and after the strategy 3

区由于雨水径流进入较多水流流速较大, 叶绿素 a 浓度较 A 点侧湖区低。方案 3 施行后由于水力状况有了改善, 停留时间短, 相较不采取措施的情况, 湖水均质化作用明显, 叶绿素 a 浓度和浓度梯度均明显减小, 不易发生局部水质恶化, 湖水水质得到良好保障。

4 结 论

(1) 民主湖水水质监测表明, 该水体属中度富营养化水体, 水质易受进水水质和环境条件影响。

(2) 由 EFDC 模型和 WASP 模型耦合建立小型景观湖生态动力学模型, 可有效模拟该类景观水体的水流状态及水质演变情况, 为景观水质研究及维护管理提供决策支持。

(3) 该类小尺度湖体的生态动力学模拟, 众多参数的率定是难点, 采用手动试错法实现了参数的

率定,但由于该方法具有主观性,难以定量测量参数优化水平,有待寻找更好的参数率定方法。

(4) 民主湖水质模拟结果表明,夏季7—8月为水体浮游植物生长的旺盛时段,也是水华暴发的高危时段;污染物质在民主湖中的浓度分布呈现空间特征。通过加大循环量减小水力停留时间和改善入水水质两种方案结合可达到较好的水质保障效果。

参考文献

- [1] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, **2002**, 18(5): 47-49
Wang Mingcui, Liu Xueqin, Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. Environmental Monitoring in China, **2002**, 18(5): 47-49 (in Chinese)
- [2] Ambrose B., Wool T. A., Martin J. L. The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP6, User Manual. US EPA, **2001**
- [3] 戴京宪,闫有禄. 应用 TOXI 模型进行重金属在河流中迁移转化规律的研究. 环境科学进展, **1995**, 3(1): 70-74
Dai Jingxian, Yan Youlu. Study of transport and transformation pattern of heavy metal in rivers by using TOXI water quality model. Advances in Environmental Science, **1995**, 3(1): 70-74 (in Chinese)
- [4] 杨家宽,肖波,刘年丰,等. WASP6 预测南水北调后襄樊段的水质. 中国给水排水, **2005**, 21(9): 103-104
Yang Jiakuan, Xiao Bo, Liu Nianfeng, et al. Forecasting the influence of South-to-North Project on water quality in Xiangfan section by using WASP6. China Water & Wastewater, **2005**, 21(9): 103-104 (in Chinese)
- [5] 赵冬泉,徐速,佟庆远,等. 景观水系水质保障的规划方法研究. 环境保护科学, **2009**, 35(2): 69-80
Zhao Dongquan, Xu Su, Tong Qingyuan, et al. Research on planning method of the landscape water protection: Case study on the Olympic Park Lake. Environmental Protection Science, **2009**, 35(2): 69-80 (in Chinese)
- [6] Hamrick J. M. A Three Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 317, **1992**
- [7] 曾思育,陈吉宁,王志石. 基于不确定性分析技术的两种水质模型率定方法比较. 系统工程理论与实践, **2004**, 24(2): 138-141
Zeng Siyu, Chen Jining, Wang Zhishi. Comparison between two calibration methods for water quality model based on uncertainty analysis technique. Systems Engineering-theory & Practice, **2004**, 24(2): 138-141 (in Chinese)
- [8] 王建平,苏保林,贾海峰,等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究. 环境科学, **2006**, 27(7): 1286-1291
Wang Jianping, Su Baolin, Jia Haifeng, et al. Integrated model of nutrients for the Miyun Reservoir and its watershed. Environmental Science, **2006**, 27(7): 1286-1291 (in Chinese)
- [9] 张永祥,王磊,姚伟涛,等. WASP 模型参数率定与敏感性分析. 水资源与水工程学报, **2009**, 20(5): 28-30
Zhang Yongxiang, Wang Lei, Yao Weitao, et al. Calibration and sensitive analysis on the parameters of the WASP model. Journal of Water Resources and Water Engineering, **2009**, 20(5): 28-30 (in Chinese)
- [10] S. Geoffrey Schladow, David P. Hamilton. Prediction of water quality in lakes and reservoirs: PartII-Model calibration, sensitivity analysis and application. Ecological Modeling, **1997**, 96(1-3): 111-123