

挺水植物对湖泊水质数值模拟过程的影响

李兴¹, 李畅游², 勾芒芒³, 王勇¹

(1. 内蒙古师范大学内蒙古节水农业工程研究中心, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘要:将 environmental fluids dynamics code (EFDC) 模型和 CE-QUAL-ICM 模型相结合, 建立了内蒙古乌梁素海富营养化模型. 在建模过程中, 考虑挺水植物分布情况及其密度、高度、直径等形态指标, 并将考虑挺水植物影响与未考虑挺水植物影响的氮磷模拟过程进行计算、对比、分析. 结果表明, 考虑挺水植物影响的氮磷浓度模拟值与实测值变化趋势基本一致, 而未考虑挺水植物影响的氮磷浓度模拟值未能反映实测值的变化趋势, 可见, 湖泊挺水植物的存在对氮磷浓度的迁移转化起着关键的作用. 同时, 在模拟过程中明显提高了运算效率和模拟精度, 表明考虑挺水植物影响的富营养化模型能够较好地反映湖区内某位置氮磷浓度的动态模拟结果, 能够为湖泊管理部门提供一定的参考.

关键词:富营养化模型; 草藻型湖泊; 挺水植物; 数值模拟; 乌梁素海

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-2890-06

Influence on Emerged Plant in the Process of Numerical Simulation About Lake Water Quality

LI Xing¹, LI Chang-you², GOU Mang-mang³, WANG Yong¹

(1. Inner Mongolia Engineering Research Center for Water-Saving Agriculture, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. Hydraulic Research Institute Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

Abstract: An eutrophication model on Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia is established through combining the environmental fluids dynamics code model with CE-QUAL-ICM model. In this model, the distribution of emergent plants, density, height, diameter and other morphological indicators to be considered. At the same time, nitrogen and phosphorus are calculated, compared and analyzed by whether to consider the impact of emergent plants to nitrogen and phosphorus in the simulation process. The result shows that the trend of simulated and measured values on nitrogen and phosphorus by considering the impact of emergent plants is consistent; however simulated values can't reflect the measured values if not to considering the impact of emergent plants. It can clearly be seen that emergent plants plays a key role in migration and transformation of nitrogen and phosphorus, which improve the efficiency and simulation accuracy. Overall eutrophication model considering the impact of emergent plants can better reflect dynamic simulation results on the concentration of nitrogen and phosphorus in the region of a lake; also can provide some reference to lake management.

Key words: eutrophication model; grass-algae type lakes; emerged plants; numerical simulation; Wuliangsuhai Lake

湖泊水环境是一个受多种不确定性因素限制、参数众多、机制十分复杂的系统, 利用数学模型精确地模拟水质的动态过程一直是一个难题, 尤其在草-藻型浅水湖泊的应用中. 迄今为止, 鲜见详细系统地报道过受挺水植物影响的富营养化模型, 国内外已有很多运用数学模型模拟预测水质变化及水沙作用的报道^[1-7], 但在计算模拟过程中, 都对影响水质变化的因素做了一定程度的忽略, 尤其是对湖泊、水库等水体中存在的挺水植物因素的影响. 挺水植物的形态指标不仅影响水体水动力过程、流速、流向等, 同时, 为了自身生长的需要, 不断吸收水体内的营养物质, 因此, 挺水植物的分布情况对水质动态过程的影响十分重要.

本研究在大量实测数据和调查资料的基础上,

建立了考虑挺水植物影响的内蒙古乌梁素海富营养化模型, 该模型由自带水动力模块的 EFDC 模型和能够区别浮游植物 3 种优势藻类(蓝藻、绿藻和硅藻)的 CE-QUAL-ICM 模型构成. 模型中考虑了降解系数、大气复氧、硝化与反硝化过程、浮游植物的呼吸作用、光合作用、新陈代谢等很多因素. 因此, 本研究针对调查区域的特殊情况, 利用该模型进行了氮磷浓度动态模拟, 其成果对草-藻型湖泊富营养化研究和防治具有一定的参考价值.

收稿日期: 2009-12-25; 修订日期: 2010-05-11

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(210044); 国家自然科学基金项目(50969005, 51069009)

作者简介: 李兴(1981~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水污染控制与污水资源化, E-mail: lixingmm@yahoo.com.cn

1 采样方法

乌梁素海(图 1)是内蒙古西部最大的淡水湖泊,也是国家八大淡水湖之一,处于黄河河套平原的末端,西临河套灌区,东靠乌拉山西麓,乌梁素海前身为黄河改道,内蒙古巴彦淖尔市河套灌区 200 km 的排水总干渠流经乌梁素海,再注入黄河. 乌梁素海是典型的草-藻型浅水湖泊,据测定,乌梁素海大型水生植物总生产力每年高达 360 万 t,根据其生产力已成为典型的重度富营养化的草藻型湖泊. 根据 2006 年卫片解译分析结果显示:湖区内芦苇面积占 ○ 面积的 44% 左右,芦苇主要分布在北部小海子区、乌梁素海中部区和湖岸附近,芦苇快速蔓延生长,最终将导致乌梁素海成为芦苇水草的沼泽区,同时也失去了湖泊的基本功能. 乌梁素海的入湖污染物除农田灌溉排水外,沿总干渠杭锦后旗、临河区、五原县等地区的工业废水与生活污水也汇入总干渠,对湖泊水质与富营养化也产生了很大的影响.

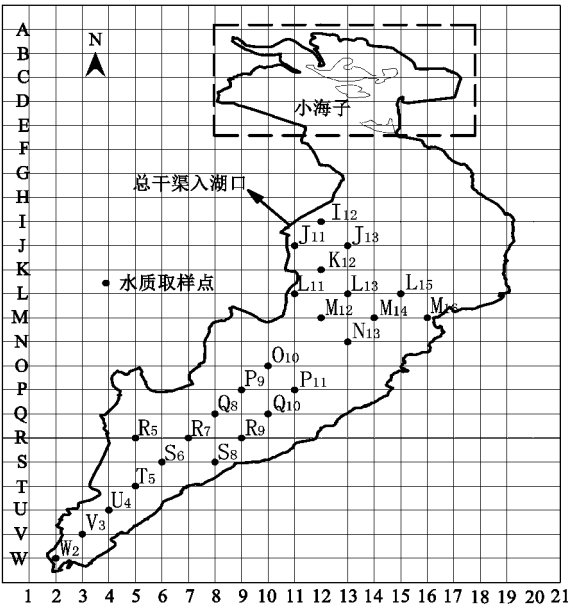


图 1 乌梁素海水质监测点分布示意
Fig. 1 Schematic graph of sampling sites of water quality in the Wuliangsu Lake

按照我国水环境及湿地生态系统调查规范^[8],根据乌梁素海污染源的分布和水动力特征,将乌梁素海在空间上以 2 km × 2 km 的正方形网格进行剖分,使用网格的交点,以梅花形布置取样监测点. 芦苇或水草密集、水深过浅处的取样点,采样船不能到达布置点进行取样,小海子芦苇密集且水深不足 50 cm,因此未布置监测点,常年监测点有 25 个,均标

识在图 1 中,占 ○ 面积的 75% 左右,其它采样点并不连续,不连续的采样点未标识. 采样时间定为每月中旬左右,每个采样点设 3 次重复,取平均值做为最终结果,采样点位置利用 GPS 定位. 各指标及具体检测方法分别为:总氮:GB/T 11891-1989;氨氮:国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》(第四版);硝态氮:GB/T 7480-1987;总磷:GB/T 11893-1989.

2 模型原理

2.1 模型简介

EFDC 模型是在美国国家环保署资助下由威廉玛丽大学海洋学院维吉尼亚海洋科学研究所的 Hamrick 等^[9]根据多个数学模型集成开发研制的综合水质数学模型. 该模型是美国国家环保署 (USEPA)推荐的三维地表水水动力模型,可实现河流、湖泊、水库、湿地系统、河口和海洋等水体的水动力学和水质模拟,是一个多参数有限差分模型^[10,11]. EFDC 模型采用 Mellor-Yamada 2.5 阶紊流闭合方程,根据需要可以分别进行一维、二维和三维计算,模型包括水动力、水质、有毒物质、底质、风浪和泥沙模块^[12-14],用于模拟水系统一维、二维和三维流场、物质运输(包括水温、盐分、黏性和非黏性泥沙的运输)、生态过程及淡水入流,可以通过控制输入文件进行不同模块的模拟. 模型在水平方向采用直角坐标或正交曲线坐标,垂直方向采用 σ 坐标变换,可以较好地拟合固定岸边界和底部地形. 在水动力计算方面,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法,以及内外模式分裂技术,即采用剪切应力或斜压力的内部模块和自由表面重力波或正压力的外模块分开计算. 外模块采用半隐式三层时间格式计算,因传播速度快,所以允许较小的时间步长. 内模块采用了垂直扩散的隐式格式,传播速度慢,允许较大的时间步长,其在干湿交替带区域采用干湿网格技术. EFDC 模型主要包括 6 个部分:①水动力模块,②水质模块,③底泥迁移模块,④毒性物质模块,⑤风浪模块,⑥底质成岩模块. EFDC 的水质模块不仅考虑了风速、风向和蒸发对流场和污染物迁移转换的影响,也考虑了不同水生植物类型的形态分布特征及波浪对底部应力的影响,是一个比较完善的水质模型,能够真实地反映污染物质扩散降解规律^[15,16].

CE-QUAL-ICM 模型是由美国陆军工程兵团水

体试验基地的 Cerco 和 Cole 等开发,模型以浮游植物和水生生物的生长动力学为核心,以 C:N:P 这 3 个主要元素的比例反映浮游植物和水生生物与水体环境中营养盐之间的竞争转化关系. 模型不仅考虑了浮游植物的 3 种藻类(蓝藻、绿藻和硅藻)以及用不同的动力学参数、半饱和常数、新陈代谢速率等影响因子加以区别,还考虑了有机营养盐在矿化过程中根据降解速率的不同分为难分解(REFRACTORY)的营养盐、可分解(LABILE)的营养盐和溶解(DISSOLVED)的营养盐,它是目前世界上发展程度最高的三维模型之一. 由于这 2 个模型具有上述优点,同时提供了源程序,可根据需要对源程序进行修改,从而达到最佳的模拟效果. 因此,本研究将 EFDC 模型和 CE-QUAL-ICM 模型相结合对乌梁素海水质进行联合模拟计算.

2.2 模型参数率定

表 1 模型主要参数率定结果
Table 1 Results of mode main parameters

模型参数	参数含义	率定结果	参数单位
K_2	复氧系数	0.35	
KHCO _D	COD 降解所需氧的半饱和常数	1.0	mg/L
KCD	COD 降解速率	0.01	d ⁻¹
I_0	水体表面处藻类生长的最佳光照强度	1 255	J/(cm ² ·d)
RNITM	最大硝化速率(以 N 计)	0.05	g/(m ³ ·d)
Cchl	碳对叶绿素的比率(C/chl)	0.045	mg/μg
ANC	氮对碳的比率	0.3	
FPRP, FPLP FPDP, FPIP	被捕食产生的 RPOP, LPOP, DOP 和无机磷的分配系数	0.10, 0.20 0.40, 0.30	FPRP + FPLP + FPDP + FPIP = 1
FPR, FPL FPD, FPI	新陈代谢产生的 RPOP, LPOP, DOP 和无机磷的分配系数	0.0, 0.0 1.0, 0.0	FPR + FPL + FPD + FPI = 1
FNRP, FNLP FNDP, FNIP	被捕食产生的 RPON, LPON, DON 和无机氮的分配系数	0.30, 0.50 0.10, 0.10	FNRP + FNLP + FNDP + FNIP = 1
FNR, FNL FND, FNI	新陈代谢产生的 RPON, LPON, DON 和无机氮的分配系数	0.0, 0.0 1.0, 0.0	FNR + FNL + FND + FNI = 1

3 模型应用

内蒙古乌梁素海挺水植物区域与明水区域呈现出无规律的相间分布状态,给模型模拟计算效率和精度带来了很大困难,为解决这一问题,模型不仅考虑了风速、蒸发、辐射、气压等气象因素,更为重要的是考虑了挺水植物的密度、高度、直径等形态指标,根据 2006 年卫片解译结果,将存在挺水植物的区域以模型剖分后的网格代码来标识,以此来区分挺水植物和明水区域,在生长挺水植物的网格代码中以 VEGE.INP 输入文件来存放不同植被类型的各类形态特征参数. 为表明挺水植物的分布对湖内氮磷浓度的影响程度,本研究将 2006-04-16 ~ 2007-10-21

本研究以 2004-05-01 ~ 2006-04-15 时间段内的内蒙古乌梁素海 25 个常年水质监测点数据为基础,对所建模型参数进行率定,为验证模型的可靠性,以 2006-04-16 ~ 2007-10-21 时段内的 13 次实测数据用于模型检验,模拟时段总计 554 d,以 d 为单位进行模拟计算,1 440 个时间步长,每个时间步长为 60 s.

由于该耦合模型中涉及的参数众多,无法对每一个参数做实际测定和现场调查,因此,需借助相关文献提供的相关参数范围结合其它研究结果给定一个起始参数值,然后根据实际情况反复试算,直到模拟值和实测值之间的误差达到满意的效果,这样就得到了一组较好的参数值. 对于本模型中参数的确定,其取值均以文献[17]中的数值为依据,然后,在模型参数敏感性分析的基础上,经过大量反复试算,得出本模型中涉及的主要参数,如表 1 所示.

的实测数据用于模型检验,对湖内多个点进行了检验,检验结果表明,考虑挺水植物影响的模拟结果与实测值之间的误差精度基本 <30%,并选择以湖泊中心 O₁₀ 点为代表具体说明,模拟过程中将考虑挺水植物和未考虑挺水植物的模拟结果与实测结果进行了对比,如图 2 ~ 5. 从模拟结果可以看出,考虑挺水植物分布后,氮磷浓度过程线与实测浓度变化趋势基本一致,模型模拟结果与实测结果吻合较好,而未考虑挺水植物的模拟结果未能反映实测浓度的变化趋势,表明挺水植物对氮磷浓度变化过程的影响很大,所建模型必须考虑挺水植物的空间分布情况.

从图 3 和图 4 可以看出,氨氮和硝态氮模拟效果更好,基本能够反映出动态趋势,整个模拟过程

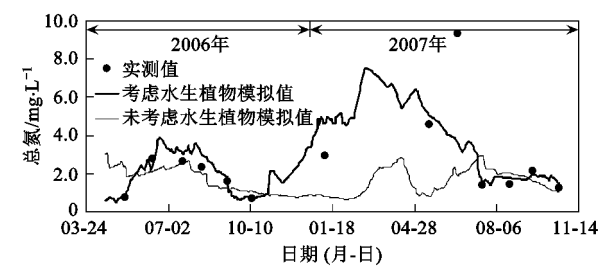


图 2 挺水植物对总氮模拟结果的影响
Fig. 2 Aquatic plants on the impact of simulation results of total nitrogen

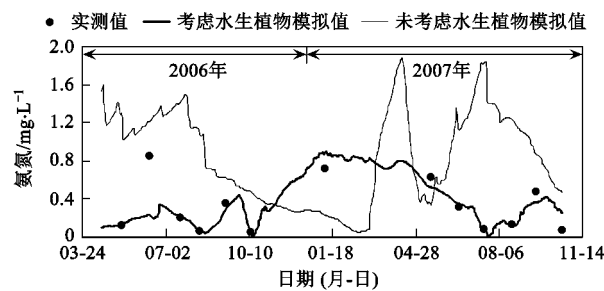


图 3 挺水植物对氨氮模拟结果的影响
Fig. 3 Aquatic plants on the impact of simulation results of ammonia nitrogen

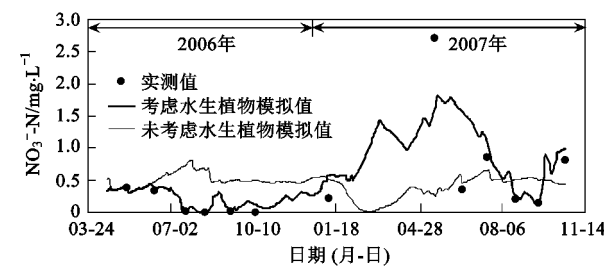


图 4 挺水植物对硝态氮模拟结果的影响
Fig. 4 Aquatic plants on the impact of simulation results of nitrate nitrogen

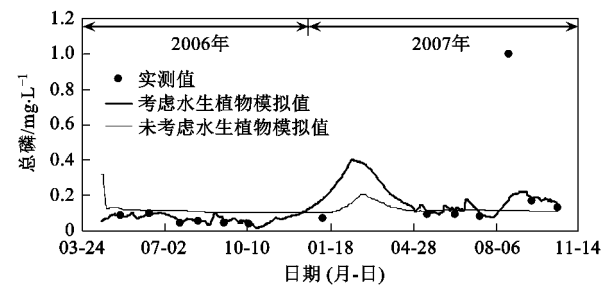


图 5 挺水植物对总磷模拟结果的影响
Fig. 5 Aquatic plants on the impact of simulation results of total phosphorus

中,氨氮浓度和硝态氮浓度在 7 月和 8 月出现低谷,

硝态氮最低浓度出现的时间比氨氮最低浓度出现的时间滞后,分析其原因主要是因为藻类的光合作用在氮源的选择上首先会吸收氨氮,当氨氮浓度下降到一定程度时,藻类才会吸收硝态氮,因此,使得氨氮最低浓度值出现在 7 月和 8 月,而硝态氮浓度低谷值出现在 8 月和 9 月.从图 2 和图 5 可以看出,总氮和总磷浓度峰值出现在 5 月左右,主要是因为春季温度回升,日照增强,冬季死亡的藻类及其它挺水植物开始水解矿化,加之该时段是全年风力最大的时期,水动力过程增加,水体上下交换频繁,底泥释放各类营养元素加强,导致该时期水体中总氮总磷浓度升高;另外,1 月左右总氮总磷浓度也出现了峰值,主要是因为冬季湖水表面已结冰,乌梁素海没有农田排水的补给,入湖水量明显减少,主要补给水量为地下水和沿总干渠区域的工业废水和生活污水,所以因排入水量减少使得总氮总磷浓度较高.由上述分析可知:本研究所建立的富营养化模型能够较好地反映乌梁素海氮磷污染的动态过程,能够为防治乌梁素海富营养化污染提供一定的参考.

为更直观显示挺水植物对模拟结果误差的影响,将实测值与是否考虑挺水植物的模拟值进行了对比,结果如图 6~9 所示,可以看出,各水质指标在 2007-01-09 的模拟结果几乎都不理想,模拟误差基本都超过了 30%,分析误差原因,主要由于该时期处于冰冻期.计算过程中,尽管考虑了该时期模型输入条件的变化(降雪、蒸发、风速、风向等),但由于在 1 月湖泊水体表层结冰,水动力条件和边界条件都发生了根本的变化,冰层底部水体受到压力的影响与十期的水动力特征明显不同,而模型本身尚未考虑这方面的影响.加之湖泊水体表层不存在自由水面,改变了模型的边界条件.从而导致该时期模拟结果较差.

实际过程中,挺水植物的分布不仅妨碍湖泊内水动力变化过程,而且也影响水体中营养盐的分布,主要体现在,改变了沉积物再悬浮的临界切应力、对动力的扩散及紊动系数的影响、以及水生植物对水体中营养盐的利用等方面.因此,考虑挺水植物后,使结果更接近于实际情况,模拟效果较优.

草-藻型浅水湖泊水质的变化过程十分复杂,模型中使用的部分参数还具有一定的经验性和适应性;模型中考虑的植物因素不具有动态性(挺水植物生长过程中的形态指标变化).因此通过大量的实测资料对参数进行率定和建立动态的模型结构是今后需加强和发展的重点.

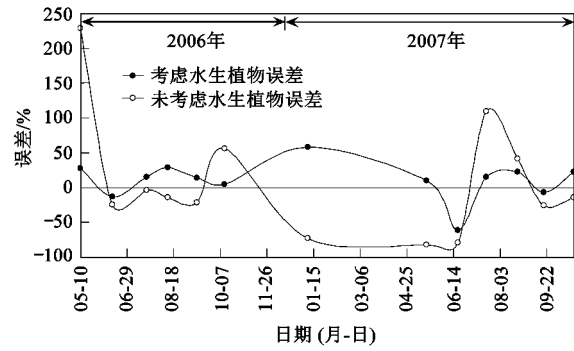


图 6 水生植物对总氮模拟结果误差的影响
Fig. 6 Aquatic plants on the impact of simulation results error of total nitrogen

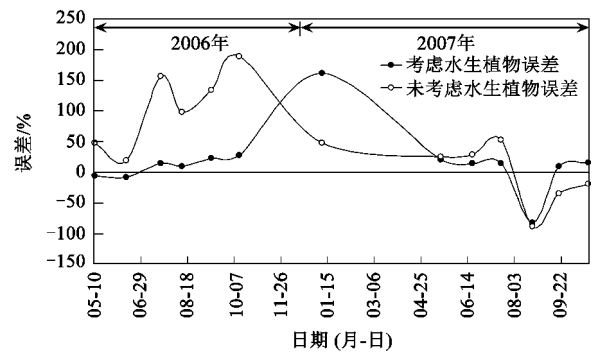


图 9 水生植物对总磷模拟结果误差的影响
Fig. 9 Aquatic plants on the impact of simulation results error of total phosphorus

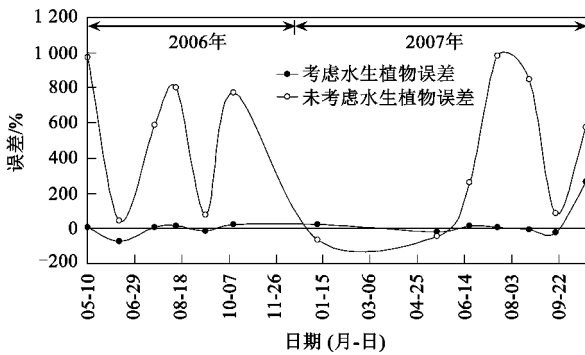


图 7 水生植物对氨氮模拟结果误差的影响
Fig. 7 Aquatic plants on the impact of simulation results error of ammonia nitrogen

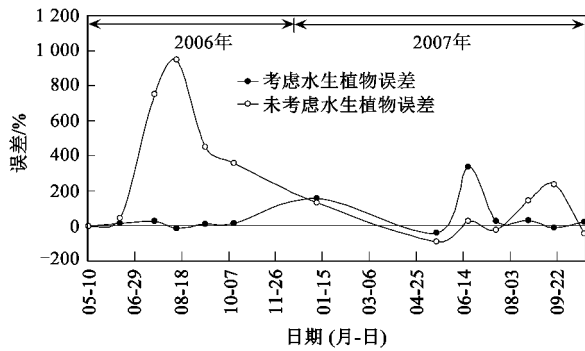


图 8 水生植物对硝态氮模拟结果误差的影响
Fig. 8 Aquatic plants on the impact of simulation results error of nitrate nitrogen

4 结论

(1)在挺水植物影响氮磷浓度变化过程的基础上,将 EFDC 模型和 CE-QUAL-ICM 模型相结合,建立了内蒙古乌梁素海富营养化模型,并用实测数据对模型进行了校验,表明考虑挺水植物形态指标的

富营养化模型能够较好地反映实际氮磷浓度的动态过程.

(2)考虑挺水植物影响的富营养化模型模拟过程中的运算时间由原来的 14.2 h 减少到 10.7 h,明显提高了模拟效率.

(3)误差分析结果表明考虑挺水植物影响的氮磷浓度误差精度基本都在 30% 以内,表明模拟精度较优.

参考文献:

[1] Drago M, Cescon B, Iovenitti L. A three-dimensional numerical model for eutrophication and pollutant transport[J]. *Ecol Model*, 2001, **145**(1):17-34.

[2] Borsuk M E, Stow C A, Reckhow K H. A bayesian network of eutrophication models for synthesis, prediction, and uncertainty analysis[J]. *Ecol Model*, 2004, **173**(2-3):219-239.

[3] Park K, Jung H, Kim H, et al. Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea[J]. *Mar Environ Res*, 2005, **60**(2):171-193.

[4] 杨具瑞,方铎.滇池二维分层水质模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(5):533-536.

[5] 陈云峰,殷福才,陆根法.富营养化水体水华暴发的突变模型[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(1):125-128.

[6] 罗华军,刘德富,黄应平.基于遗传算法-支持向量机的水库叶绿素 a 浓度短期预测非线性时序模型[J]. *水利学报*, 2009, **40**(1):46-50.

[7] 钟德钰,张红武,张俊华,等.游荡型河流的平面二维水沙数学模型[J]. *水利学报*, 2009, **40**(9):1040-1047.

[8] 吕宪国.湿地生态系统观测方法[M].北京:中国环境科学出版社,2005.182-222.

[9] Hamrick J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects [R]. Gloucester, Massachusetts: Virginia Institute of Marine Science, the College of William and Mary, 1992.1-60.

[10] Daniel L, Tufford, Hank N, et al. Spatial and temporal

hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain [J]. Ecol Model, 1999, **114** (2-3):137-173.

[11] Jeong S, Yeon K, Hur Y, *et al.* Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River [J]. J Environ Sci, 2010, **22**(6):934-939.

[12] 陈景秋,赵万星,季振刚.重庆两江汇流水动力模型[J].水动力学研究与进展,2005,**20**(12):829-835.

[13] 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.

[14] 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[J].环境科学,2006,**27**(7):1286-1291.

[15] Ji Z G. Hydrodynamics and water quality Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries[M]. John Wiley & Sons, Inc, 2007. 1-15.

[16] Hamrick J M. The environmental fluid dynamics code theory and computation volume 3: Water quality module [R]. Tetra Tech, Inc 10306 Eaton Place Suite 340, 2007. 1-10.

[17] 何国建.三维水沙及水质数学模型的研究与应用[D].北京:清华大学,2007.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2009 年 11 月 27 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2008 年“百种中国杰出学术期刊”评选结果.《环境科学》再次荣获“百种中国杰出学术期刊”的称号,这也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣.

“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.