

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚婧,李颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟希,张淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳林,王信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207241053

李兴, 史洪森, 张树礼, 李畅游, 王立新. 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟. 生态学报, 2013, 33(13): 3987-3994.

Li X, Shi H S, Zhang S L, Li Chang Y, Wang L X. Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 3987-3994.

基于环境流体动力学模型的浅水草藻型 湖泊水质数值模拟

李 兴¹, 史洪森², 张树礼³, 李畅游^{4,*}, 王立新⁵

(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. 河海大学水利水电学院, 南京 210098;

3. 内蒙古自治区污染物在线监控中心, 呼和浩特 010020; 4. 内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018;

5. 内蒙古大学 环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 针对内蒙古乌梁素海面临的污染现状, 基于三维环境流体动力学模型(EFDC)的计算模式, 将其与 CE-QUAL-ICM 模型耦合, 模拟了不同情景下的乌梁素海藻类、总氮、总磷、化学需氧量年际和季节变化规律, 模型中不仅考虑了风速和蒸发对模型的影响, 也加入了挺水植物密度、高度、直径等形态指标, 以此反映水生植物存在的区域中植物吸收降解污染物质、风速对底部应力、流场变化等因素对模型模拟结果的影响。研究结果表明: 考虑挺水植物分布的耦合模型能够很好的模拟藻类和污染物质在乌梁素海内的年际、季节变化过程, 模拟结果更接近于实际, 模拟值与实测值间的相对误差基本控制在 30% 以内, 大部分相对误差已控制在 20% 以内; 降低入湖污染物质负荷直接影响着湖区水质浓度的变化。另外, 对于浅水或挺水植物密集而无法进入取得信息的区域, 利用所建耦合模型能够为这些区域湖泊规划、管理、修复提供依据。

关键词: 乌梁素海; 环境流体动力学模型; 水质变化; 数值模拟

Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia

LI Xing¹, SHI Hongsen², ZHANG Shuli³, LI Changyou^{4,*}, WANG Lixin⁵

1 Inner Mongolia Engineering Research Center for Water-Saving Agriculture, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

2 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai university, Nanjing 210098, China

3 OnLine Monitoring Center on Pollutants in Inner Mongolia Autonomous, Hohhot 010020, China

4 College of Water Conservancy and Civil Engineering Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

5 College of Environment and Resources of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Abstract: The problems of salinization, organic pollution and eutrophication are very severe in the Wuliangsuhai Lake. In this paper, a coupled model was built based on Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) model and three-dimensional eutrophication (CE-QUAL-ICM) model, with considering the various meteorological factors and the form indicators of emergent plants (e. g. density, height, diameter etc),. This model can reasonably reflect the effects of absorption and degradation of polluting substances by aquatic plants, the bottom stress change and the flow field change. Then the coupled model was applied to predict the inter-annual and seasonal changes of algae, total nitrogen, total phosphorus and chemical oxygen demand with different scenarios in the Wuliangsuhai Lake. Results indicated that the model can well describe the

基金项目: 国家自然科学基金项目(51069009); 内蒙古自治区科技创新引导奖励资金项目; 内蒙古自然科学基金面上项目(2012MS0621); 乌梁素海湿地生态系统恢复与重建关键技术研究示范(2011BAC02B03); 内蒙古师范大学科研基金项目(KYZR1117)

收稿日期: 2012-07-24; **修订日期:** 2013-03-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nndlichangyou@163.com

inter-annual and seasonal changes of water quality model when considering the effects of emergent plants. Simulation results were close to the measured ones, with relative error less than 30% and most of absolute error less than 20%. Reducing the pollutant load into the lake directly affected the changes of water quality in the lake. In addition, it is difficult to obtain the information of water quality in water area with shallow and dense emergent plants. However, the use of the coupled model can solve this problem and provide the basis for reasonable planning and management in these areas.

Key Words: Wuliangsu Lake; environmental fluids dynamics model; Change of water quality; numerical simulation

1 研究背景

内蒙古乌梁素海地处内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内($40^{\circ}36'—41^{\circ}03'N$, $108^{\circ}43'—108^{\circ}57'E$), 近年来,随着河套地区社会、经济的发展,各类大量未达标的水体汇流后排入乌梁素海,已导致乌梁素海藻类异常生长、“黄苔”不断暴发、湖泊沼泽化进程加快、水体富营养化程度加剧、水质不断恶化、水位下降、物种资源数量和质量降低、旅游业发展受阻,最终遭受有机污染、盐化污染和呈现严重的富营养化状态^[1-5]。水环境系统的健康发展是衡量一个社会文明与进步的重要标志之一,而湖泊水环境在整个水环境体系中起着关键性的作用。水环境本身是一个受水文、气象、地形、地貌、物理、化学、生物、生态以及水体各种不确定的非线性因素影响和制约的复杂系统,这使得理论分析解很难做出,只能依赖于数值解,因此,数学模型能够成为研究水环境水动力条件、水质、水量及其预测无法获取信息领域、未来情况的主要技术手段。利用数学模型对河流、河口、湖泊、海湾、水库、长江等水域水体的水质、流场、温度等方面的研究屡见不鲜^[6-10],但都或多或少地对影响水质变化的特殊因子做了某种意义上的忽略,尤其是对水体中存在的挺水植物做了概化,水体中挺水植物密度,个体形态指标不仅直接影响水体动力变化、底部切应力、紊动系数变化等过程,同时,挺水植物为了自身生长需要,会不断从周边环境汲取营养物质。因此,不宜直接忽略挺水植物的存在,尤其对于大面积分布挺水植物的水体,必须考虑。迄今为止,鲜见系统地报道过考虑挺水植物并能够模拟藻类生长过程的富营养化数学模型。本研究在此背景下,以乌梁素海为研究对象,针对其水浅、多草、多藻、多污染物种类的综合特征,建立乌梁素海富营养化耦合模型,不仅能够模拟和预测因水浅或挺水植物密集而无法进入的区域中的污染物质动态过程及其变化规律,也能够根据叶绿素峰值的大小和出现的时间指示和预警“水华”的暴发。旨在为治理和修复乌梁素海水环境、保护黄河流域可持续发展提供一定的借鉴。

2 材料与方法

2.1 研究区域概况

乌梁素海为河套灌区灌排系统的重要组成部分(图1),近年来,入湖口水质监测结果显示,总氮含量平



图1 河套灌区灌排系统

Fig. 1 The system of irrigation and drainage of Hetao

均值达 9.54mg/L,总磷含量平均值达 0.28mg/L,分别达到国际判断水体富营养化标准(N 0.2mg/L、P 0.02mg/L)的 48 倍和 14 倍,每年排入乌梁素海总氮量约为 1090t,总磷量约为 66t^[2]。根据 2006 年 7 月卫片解译结果显示,湖区内挺水植物面积占全湖面积的 44% 左右,挺水植物密集或浅水处,采样船不能到达,已导致一些区域无法获取水样。依据乌梁素海水动力条件和污染物分布特征,并按照湿地生态系统调查规范^[11],将整个湖面在空间上以 2km×2km 的正方形尺寸进行网格化,以梅花形布置取样监测点,取样监测点位置为各网格交点,采样点使用 GPS 定位,具体详见图 2。采样时间定为每年 5—10 月和 2 月中旬左右,采样完毕后,立即运回实验室化验,每个采样点设置 3 次重复,最终取平均值作为监测结果,各水质指标及具体检测方法按照国家环境保护总局编写的《水和废水监测分析方法》(第四版)增补版进行。

2.2 环境流体动力学模型及计算方法

环境流体动力学模型(EFDC)是由威廉玛丽大学海洋学院维吉尼亚海洋科学研究所的 John Hamrick 等人开发研制的综合水质数学模型,模型中水质模块不仅考虑了风速、风向(以来风方向为基准,规定正东方向为 0°,正北方向为 90°)和蒸发对流场和污染物质迁移转换的影响,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^[12-13]。环境流体动力学计算方式采用“干湿”网格法对水体动边界进行识别和处理,另外,通过网格坐标代码识别水体中挺水植物的分布情况,对数学方程组进行求解前,所编程序每隔一个时间步长就会对边界网格的干湿情况进行辨别,以此确定是否属于计算的水体区域,而湿网格属于计算水体区域。

EFDC 模型提供 FORTRAN 源程序,可根据实际需要,对源程序进行修改,进而达到最佳的模拟效果。CE-QUAL-ICM 模型由美国陆军工程兵团 Carl F. Cerco 与 Thomas Cole 等人开发,该模型能够模拟藻类、化学需氧量、溶解氧、盐度、温度、金属以及不同形态碳、氮、磷、硅等水质变量,能够以 3 种不同的动力学参数来区分蓝藻、绿藻和硅藻,并涉及各种藻类与多种营养盐间的相互作用过程,考虑了藻类生长消亡、呼吸作用、新陈代谢、被捕食等过程,但该模型本身没有水动力模块,需从其他模型中获得流量、扩散系数和蓄水量等信息^[14]。因此,本研究以 EFDC 的水动力模块作为 CE-QUAL-ICM 富营养化模型的输入文件,对水动力模型和富营养化模型进行了接口修改和调试,建立了耦合富营养化模型。

2.3 研究区域网格的剖分

模型计算特定区域生成的平面斜对角笛卡尔网格时,按照图 3 中粗实线所示的水体边界计算单元进行,采用平面斜对角笛卡尔方法对水体边界进行逐步逼近获得,图中的细实线为单元网格线,曲线为实际水体边界线,粗实线内部即为模型实际计算区域。为标注不同的区域,在程序计算时采用网格标记区分,将网格分为 6 种代码,用数字区分,数字 1、2、3、4 分别代表不同的三角方向,用来判别三角形边界的 4 种位置,数字 5 代表水体计算区域网格,数字 9 代表边界点,数字 0 代表

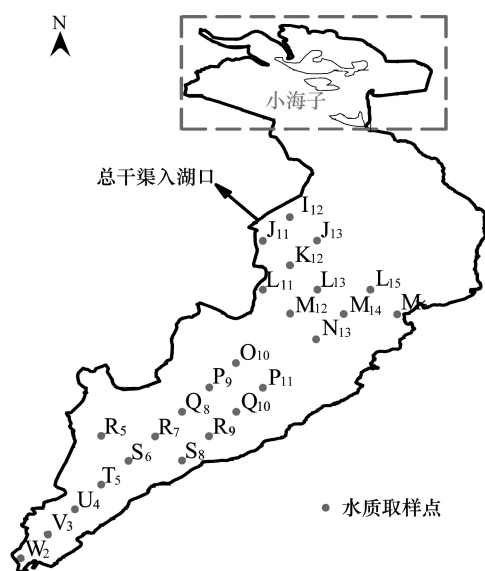


图 2 乌梁素海水质监测点分布示意

Fig. 2 Schematic graph of sampling sites of water quality in the Wuliangsuhai lake

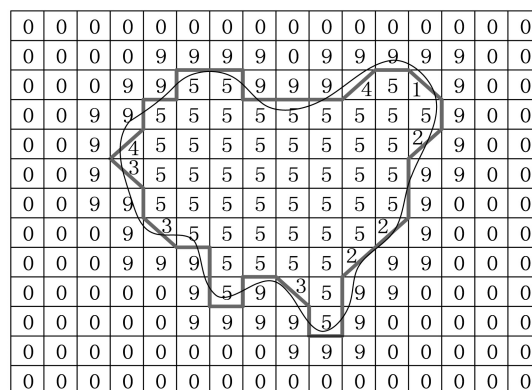


图 3 平面网格标志示意图

Fig. 3 Sketch map of horizontal grid symbol

陆地部分。

根据边界处采用斜对角笛卡尔坐标方式,本研究选取整个乌梁素海为计算区域,通过解译 2006 年 6 月遥感影像图,然后使用地理信息工具配准生成计算网格,如图 4 所示,将建模区域以 $350\text{m}\times 350\text{m}$ 的网格进行剖分,剖分网格数目为 67×111 ,实际计算网格数目为 2430 个。另外,为区分明水区域与挺水植物区域,研究通过 dx dy. inp 文件采用网格代码来识别,数字 1 代表该网格存在挺水植物,数字 0 代表该网格不存在挺水植物。并以 vege. inp 文件存放挺水植物形态、波浪对底部切应力的影响、底部最小流速控制值等指标。

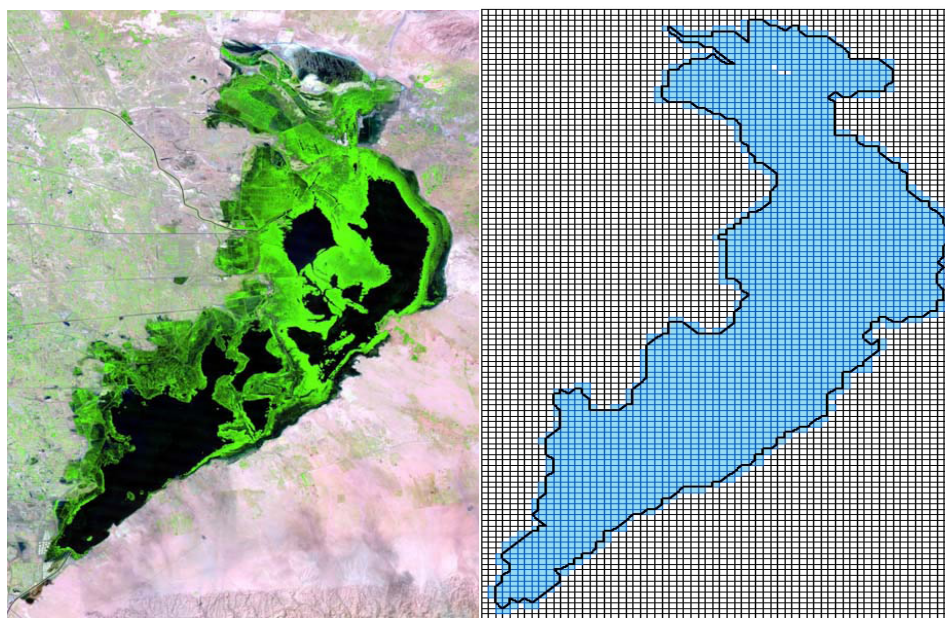


图 4 乌梁素海遥感影像图及网格剖分

Fig. 4 Remote sensing image and grid partition of Wuliangsuhai lake

3 分析与结果

3.1 耦合富营养化模型计算条件

模拟湖泊各水质动态,需要边界条件、初始条件等一系列条件,其中,边界条件包括入湖各水质变量浓度、气象因子、入湖流量、入湖水体温度以及湖区各网格处水生植物分布情况等,初始条件为湖区各网格水体的初始水温、初始水质变量浓度等。模型输出文件包括各网格坐标代码处的水质变量浓度、流速、流向、水深等。对于平均水深只有 1m 左右的乌梁素海而言,相比平面尺寸很小,可认为沿水体垂直方向掺混比较均匀。因此,适合用垂向平均化的二维不可压缩、紊流流动的运动方程来描述流场和水质浓度的变化过程。

3.2 计算时段及时间步长

利用 2004-05-01—2006-04-15 时间段内的 25 个常年水质监测指标为率定模型的基础数据,首先对湖泊水动力条件及水动力参数进行了率定和验证,然后,为进一步检验模型的合理性和可靠性,以 2006-04-16—2009-10-14 时段内的实测水质数据检验所建耦合富营养化模型,并以天为单位进行模拟计算,总共 1440 个时间步长,每个时间步长为 60s。

3.3 参数率定

将耦合模型所需各输入文件设置完毕后就可以率定参数。由于该耦合模型需要率定的参数众多,用试错法结合相关文献提供的经验参数范围进行率定,通过反复试算,直到模拟值与实测值间的误差达到满意的效果为止,得出耦合模型涉及的主要敏感参数如表 1 所示。

3.4 模型模拟及应用

为验证所建耦合模型的适应性及应用性,本研究将 2006-04-16—2009-10-14 时段内的实测总氮、总磷、叶

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

模型参数 Model parameters	参数含义 Parameter meaning	率定结果 Parameters	参数单位 Unit	文献取值范围 ^[14] Value range
K_2	复氧系数	0.35		0.1—0.5
KHCO _D	COD 降解所需氧的半饱和和常数	1.0	mg/L O ₂	0.5—1.0
KCD	COD 降解速率	0.01	d ⁻¹	0.01—0.22
I_0	水体表面处藻类生长的最佳光照强度	300	Langley/d	200—400
KHN	藻类生长吸收氮的半饱和和常数	0.30	mg/L	0.03—0.4
KHP	藻类生长吸收磷的半饱和和常数	0.026	mg/L	0.005—0.3
PM	藻类生长速率	2.0	d ⁻¹	1.0—5.0
BM	藻类新陈代谢速率	0.03	d ⁻¹	0.01—0.2
PRR	藻类被捕食速率	0.11	d ⁻¹	0.01—0.2
WS	藻类沉积速率	0.10	m/d	0.01—0.2
RNITM	最大硝化速率	0.05	gN·m ⁻³ ·d ⁻¹	0.01—0.1
KRP	难溶解有机磷颗粒的最小水解速率	0.0045	d ⁻¹	0.001—0.005
KLP	易溶解有机磷的最小水解速率	0.025	d ⁻¹	0.01—0.2
KDP	溶解态有机磷的最小水解速率	0.1	d ⁻¹	0.05—0.3
KRN	难溶解有机氮颗粒的最小水解速率	0.003	d ⁻¹	0.001—0.005
KLN	易溶解有机氮的最小水解速率	0.003	d ⁻¹	0.001—0.05
KDN	溶解态有机氮的最小水解速率	0.05	d ⁻¹	0.01—0.1
Cchl	碳对叶绿素的比率	0.045	mg C/μg Chl	0.01—1
ANC	氮对碳的比率	0.3		0.1—0.4
UVEGSCL	计算挺水植物底部应力时的最小流水控制值	0.003—0.25	m/s	0.002—1.00
RDLPSQ	空间密度	20—65	株/m ²	0—100
BPVEG	挺水植物宽度	0.006—0.017	m	0.005—0.03
HPVEG	挺水植物高度	0.63—2.75	m	0.5—3.0
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	0.03,0.07,0.4,0.5; 0.1,0.2,0.5,0.2
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	0.0,0.0,0.5,0.5;0.0, 0.0,1.0,0.0
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	0.15,0.25,0.5,0.1; 0.35,0.55,0.10,0.0
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	0.15,0.25,0.5,0.1; 0.0,0.0,1.0,0.0

绿素和化学需氧量水质指标用于模型检验,对湖泊内多个采样点进行了检验。结果表明,模拟值与实测值之间的相对误差基本小于 30%,并选择乌梁素海采样中心 O₁₀ 点为代表,对 4a 内总氮、总磷、叶绿素和化学需氧量水质指标是否考虑挺水植物的存在进行了模拟,并根据已建模型,固定其它输入文件,以地表水环境质量标准(GB3838—2002)为依据,将入湖水质指标(溶解氧、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷和总氮)按照Ⅴ类标准作为污染负荷的输入文件,以此反映湖泊内各水质的变化过程,分别如图 5—图 8 所示。从图 5 和图 6 的变化趋势可以看出,总氮、总磷变化趋势大体相似,总氮和总磷浓度最大值基本出现在 5 月份和 6 月份,该时期日照增强,温度不断回升,冬季水体中死亡的动植物残骸尸体开始水解矿化,加之该时期风力较大,水动力条件开始加强,水体上下间的交换开始频繁,底泥释放各类营养元素的速率也不断提高,导致该时期水体中总氮总磷浓度升高;另外,冬季冰下水体中总氮总磷浓度也较大,原因为冬季河套灌区不进行灌溉,乌梁素海没有农田排水的补给,入湖水量开始减少,主要入湖水量为潜层地下水和沿总排干渠区域的工业废水以及附近居民的生活污水,所以因补给水量减少造成水体中总氮总磷浓度较高。每年 10 月份和 11 月份总氮、总磷浓度呈现下降的趋势,主要因为秋季河套灌区开始大面积秋浇压盐,排水量明显增大,补给水量的增加造

成了污染物质浓度的降低。

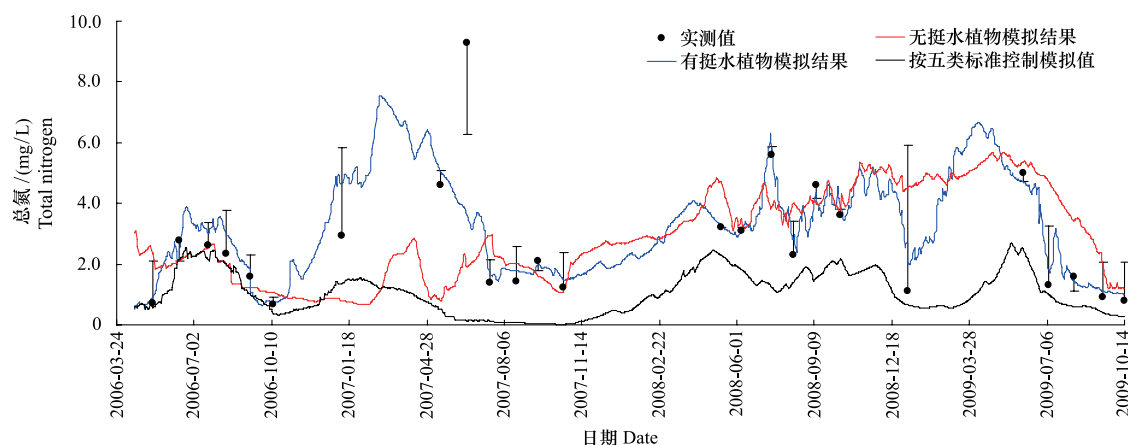


图5 不同条件下总氮实测值与模拟值动态

Fig. 5 Dynamic process of measured and simulation value of total nitrogen in different conditions

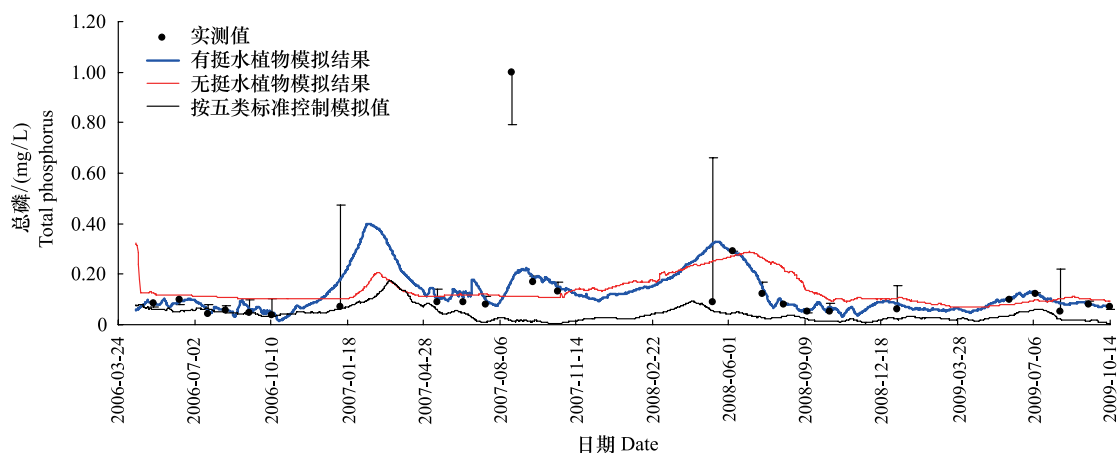


图6 不同条件下总磷实测值与模拟值动态

Fig. 6 Dynamic process of measured and simulation value of total phosphorus in different conditions

在模型中以叶绿素 a 浓度表示藻类含量,叶绿素 a 浓度会受到氮、磷等营养物质的影响,从图 7 可以看出,乌梁素海叶绿素峰值出现在夏季的 7 月份和 8 月份。表明,该时期是藻类大量吸收水体中各类营养盐的阶段,也是藻类快速繁殖期。因此,会导致总磷、总磷等营养盐在该时期出现较低值。进入秋冬季节以后,随着温度的降低,光照强度的减弱,藻类光合作用下降,藻类浓度不断降低,逐步进入消亡阶段。从整个 4 年的变化情况看,叶绿素峰值呈现逐年降低的趋势,同时每年的变化过程也表现出一定的周期性。图 8 显示了乌梁素海 4a 内有机污染的变化过程,可以看出,COD 峰值基本出现在 7 月份和 8 月份,该时期是水生动植物十分活跃的时期,他们的新陈代谢要消耗水体内大量的氧,使得水体中有机物、硫化物、亚硝酸盐、硝酸盐、亚铁盐等还原性物质相对增多,因此,COD 反映出的还原性物质相对较多,COD 数值增高。另外,冬季水体中 COD 数值增高,主要是因为冬季水体表面的冰层阻碍了大气复氧和水体动力条件降低造成溶解氧下降,使得 COD 数值升高。从 4a 变化趋势可以看出,COD 变化趋势呈现出较好的周期性。

从图 5—图 8 是否考虑挺水植物分布的各水质变化过程可知,挺水植物的生长过程对湖体水质的影响很大。未考虑挺水植物存在的富营养化模型模拟值与实测值相对误差基本都超过 30%,误差总体水平在 50% 左右,不能反映出实际水质的变化过程。而考虑挺水植物存在的模拟值基本能够反映出实测数值的变化趋势,从各图的误差线可以看出,误差超过 30% 的测点占总误差比例的 11%,误差在 30%—20% 的测点占总误

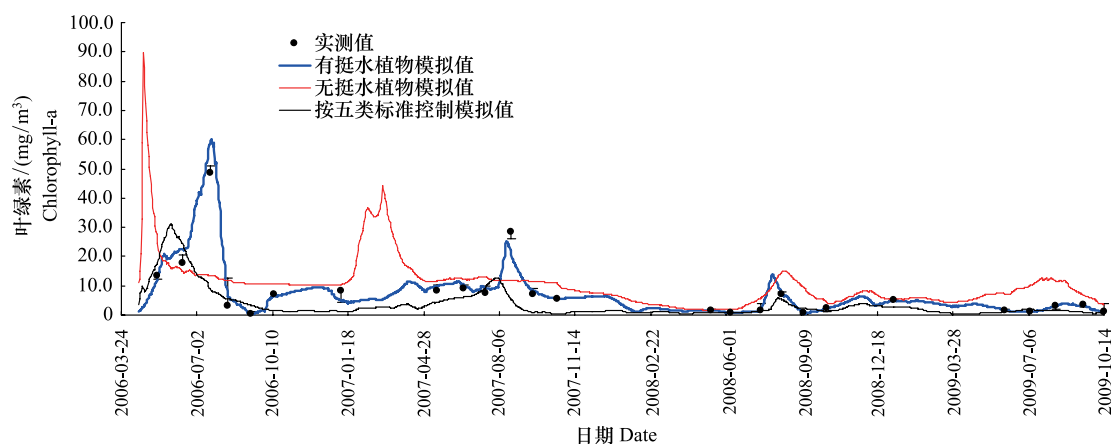


图7 不同条件下叶绿素实测值与模拟值动态

Fig.7 Dynamic process of measured and simulation value of chlorophyll-a in different conditions

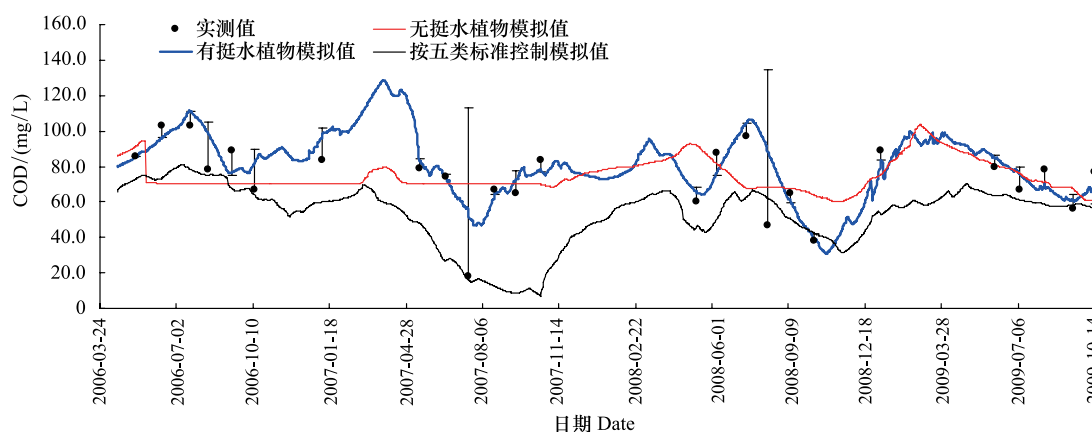


图8 不同条件下COD实测值与模拟值动态

Fig.8 Dynamic process of measured and simulation value of COD in different conditions

差比例的19%,误差占20%—10%的测点占总误差比例的24%,误差占10%—5%的测点占总误差比例的25%,误差小于5%的测点占总误差比例的21%。总体上讲,考虑水体挺水植物分布的耦合模型所模拟的各水质指标误差精度基本都在30%以内,表明模拟值与实测值吻合较好,误差满足模型模拟精度,模拟效果较优。另外,还可以从图中看出,冬季各水质指标模拟值和实测值相对误差很大,误差基本都超过了30%,分析误差原因,冬季处于冰冻期,湖泊水体水动力条件和边界条件都发生了根本的变化,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。

从图5—图8可以看出,按V类标准控制的入湖污染负荷模拟值较实际值波动小,这与每日输入相同的某一水质指标不无关系。按V类标准控制入湖的各水质指标模拟值基本都小于实际值,且模拟的动态过程和实际模拟结果基本一致,主要由于实际入湖各水质指标均不同程度地超过了地表水环境质量V类标准值,表明模型能够较好地反映不同入湖污染负荷对湖内不同水质的影响,降低入湖污染物质浓度对降低湖内污染物质含量具有显著的作用,且后期更为明显。因此,严格监管各排污部门达标排放,减少入湖污染负荷,这对治理和修复乌梁素海具有重要的意义。

4 结论与讨论

(1) 本文在考虑了挺水植物空间分布、气象因素变化、浮游植物生长动力条件、营养盐变化过程等众多因素的基础上,建立了乌梁素海富营养化模型,并用实测水质数据对耦合模型进行了校验,相对误差结果基本控

制在 30% 以内,大部分测点相对误差在 20% 以内,模拟效果较优,表明所建富营养化模型能够较好地模拟和预测因浅水或挺水植物密集而无法进入取得信息的区域。

(2)从是否考虑挺水植物存在的模拟结果可知,湖泊水体中挺水植物的分布不仅影响了水动力变化过程,而且改变了沉积物再悬浮的临界切应力,影响着动力变化的扩散系数及紊动系数,另外,水生植物在不同时期对水体中不同营养盐的吸收强度也会不同,进而改变了水体中营养盐的分布。因此,考虑挺水植物分布的耦合模型模拟结果与实际情况吻合更好。

(3)从降低入湖污染负荷的模拟情景可知,入湖污染负荷的变化直接影响着湖区内水质变化。因此,可通过降低入湖污染物质浓度的方法治理和修复乌梁素海富营养化的问题。

(4)草-藻型湖泊水质的变化过程十分复杂,加之模型中考虑的挺水植物因素不具有动态性,因此,耦合模型并不能完全模拟实际情况。另外,考虑湖泊冰封期表面的边界条件和冰层下水体受压条件,改变模型方程式,加入冰封期模拟水体水质模块是该耦合模型未来发展的方向和重点。

References:

- [1] Li X, Li C Y, Li W P, Shi X H, Dai W J, Gou M M. Temporal and spatial distribution of different species of nitrogen in Lake Wuliangsuhai, Inner Mongolia. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(6): 885-890.
- [2] Li X. Study on Dynamic Numerical Simulation of Water Quality for Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009:23-29.
- [3] Li X, Gou M M. Analysis of factors of algal bloom of Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia. *Environmental Engineering*, 2010, 28(6): 28-30.
- [4] Li X, Gou M M, Wang Y. Analysis on the exceeding the risk ratio of mouth water quality for Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1638-1644.
- [5] Li X, Yang Q M, Gou M M. Temporal and spatial distribution of water quality in Lake Wuliangsuhai, Inner Mongolia. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8/9): 1301-1306.
- [6] Xie R, Wu D A, Yan Y X, Zhou H. Fine silt particle pathline of dredging sediment in the Yangtze river deepwater navigation channel based on EFDC model. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(6): 760-772.
- [7] Jeong S, Yeon K, Hur Y, Oh K. Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(6): 934-939.
- [8] Zhong D Y, Zhang H W, Zhang J H, Ding Y. Two-dimensional numerical model of flow and sediment transport for wandering rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1040-1047.
- [9] Xie R, Wu D A, Yan Y X, Zhou H. Application and improvement of the EFDC in numerical simulating of Yangtze River Estuary and adjacent sea. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2010, 25(2): 165-174.
- [10] Xu D, Liu Z P, Qian A G, Bai Y C. Three-dimensional numerical simulation of flow in river bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1423-1431.
- [11] Lü X G. Observation Method of Wetland Ecosystem. Beijing: China Environmental Science Press, 2005: 182-222.
- [12] Hamrick J M. A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects. Gloucester, Massachusetts: Virginia Institute of Marine Science, the College of William and Mary, 1992: 1-60.
- [13] Jeong S, Yeon K, Hur Y, Oh K. Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(6): 934-939.
- [14] Ji Z G. Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. John Hoboken: Wiley & Sons, Inc., 2007: 1-15.

参考文献:

- [1] 李兴, 李畅游, 李卫平, 史小红, 代文婕, 勾芒芒. 内蒙古乌梁素海不同形态氮的时空分布. *湖泊科学*, 2009, 21(6): 885-890.
- [2] 李兴. 内蒙古乌梁素海水质动态数值模拟研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [3] 李兴, 勾芒芒. 内蒙古乌梁素海“黄苔”暴发初探及防治对策. *环境工程*, 2010, 28(6): 28-30.
- [4] 李兴, 勾芒芒, 王勇. 内蒙古乌梁素海入湖水水质超标风险率分析. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1638-1644.
- [5] 李兴, 杨乔媚, 勾芒芒. 内蒙古乌梁素海水质时空分布特征. *生态环境学报*, 2011, 20(8-9): 1301-1306.
- [6] 钟德钰, 张红武, 张俊华, 丁赞. 游荡型河流的平面二维水沙数学模型. *水利学报*, 2009, 40(9): 1040-1047.
- [7] 谢锐, 吴德安, 严以新, 周海. EFDC 模型在长江口及相邻海域三维水流模拟中的开发应用. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2010, 25(2): 165-174.
- [8] 许栋, 刘召平, 乾爱国, 白玉川. 弯曲河道中水流运动的三维数值模拟. *水利学报*, 2010, 41(12): 1423-1431.
- [9] 吕宪国. 湿地生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 182-222.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元