

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

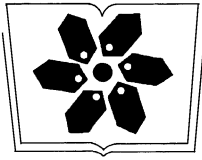
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 24 期 Vol.32 No.24 **2012**

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 32 卷 第 24 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

从文献计量角度分析中国生物多样性研究现状.....	刘爱原,郭玉清,李世颖,等 (7635)
CO ₂ 浓度升高和模拟氮沉降对青川箭竹叶营养质量的影响.....	周先容,汪建华,张 红,等 (7644)
陕西中部黄土高原地区空气花粉组成及其与气候因子的关系——以洛川县下黑木沟村为例.....	吕素青,李月从,许清海,等 (7654)
长三角地区 1995—2007 年生态资产时空变化.....	徐昔保,陈 爽,杨桂山 (7667)
基于智能体模型的青岛市林地生态格局评价与优化.....	傅 强,毛 锋,王天青,等 (7676)
青藏高原高寒草地生态系统服务功能的互作机制.....	刘兴元,龙瑞军,尚占环 (7688)
北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估.....	张 彪,高吉喜,谢高地,等 (7698)
武汉市造纸行业资源代谢分析.....	施晓清,李笑诺,赵吝加,等 (7706)
丽江市家庭能耗碳排放特征及影响因素.....	王丹寅,唐明方,任 引,等 (7716)
基于分布式水文模型和福利成本法的生态补偿空间选择研究.....	宋晓谕,刘玉卿,邓晓红,等 (7722)
设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律.....	杨再强,张 波,薛晓萍,等 (7730)
湖南珍稀濒危植物——珙桐种群数量动态.....	刘海洋,金晓玲,沈守云,等 (7738)
云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性.....	李萍萍,孟衡玲,陈军文,等 (7747)
沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响.....	杨慧玲,梁振雷,朱选伟,等 (7757)
栗山天牛天敌花绒寄甲在栎林中的种群保持机制.....	杨忠岐,唐艳龙,姜 静,等 (7764)
基于相邻木排列关系的混交度研究.....	娄明华,汤孟平,仇建习,等 (7774)
三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较.....	孙 华,鞠洪波,张怀清,等 (7781)
红松和蒙古栎种子萌发及幼苗生长对升温与降水综合作用的响应.....	赵 娟,宋 媛,孙 涛,等 (7791)
新疆杨边材贮存水分对单株液流通量的影响.....	党宏忠,李 卫,张友焱,等 (7801)
火干扰对小兴安岭毛赤杨沼泽温室气体排放动态影响及其影响因素.....	顾 韩,牟长城,张博文 (7808)
不同潮汐和盐度下红树植物幼苗秋茄的化学计量特征.....	刘滨尔,廖宝文,方展强 (7818)
腾格里沙漠东南缘沙质草地灌丛化对地表径流及氮流失的影响.....	李小军,高永平 (7828)
西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征.....	邓 云,唐炎林,曹 敏,等 (7836)
西南高山地区净生态系统生产力时空动态.....	庞 瑞,顾峰雪,张远东,等 (7844)
南北样带温带区栎属树种种子化学组成与气候因子的关系.....	李东胜,史作民,刘世荣,等 (7857)
模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和自由基代谢的影响.....	李永裕,潘腾飞,余 东,等 (7866)
沈阳市城郊表层土壤有机污染评价.....	崔 健,都基众,马宏伟,等 (7874)
降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响.....	高 翔,郝卫平,顾峰雪,等 (7883)
冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响.....	于天一,逢焕成,任天志,等 (7894)
施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响.....	杨蕊菊,柴守玺,马忠明 (7905)
微山湖鸟类多样性特征及其影响因素.....	吕昭智,潘卫林,张 鑫,等 (7925)
新疆北部棉区作物景观多样性对棉铃虫种群的影响.....	刘静静,董春颖,宋英琦,等 (7932)
杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算.....	郭 静,陈求稳,张晓晴,等 (7940)
基于实码遗传算法的湖泊水质模型参数优化.....	王跃中,孙典荣,陈作志,等 (7948)
气候环境因子和捕捞压力对南海北部带鱼渔获量变动的影响.....	颜婷茹,焦海峰,毛玉泽,等 (7958)
象山港南沙岛不同养殖类型沉积物酸可挥发性硫化物的时空分布.....	
专论与综述	
提高植物抗寒性的机理研究进展.....	徐呈祥 (7966)
植被对多年冻土的影响研究进展.....	常晓丽,金会军,王永平,等 (7981)
凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动.....	查同刚,张志强,孙 阁,等 (7991)
街尘与城市降雨径流污染的关系综述.....	赵洪涛,李叙勇,尹澄清 (8001)



封面图说: 永兴岛海滩植被——永兴岛是中国西沙群岛的主岛,也是西沙群岛及南海诸岛中最大的岛屿。国务院 2012 年 6 月批准设立的地级三沙市,管辖西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛的岛礁及其海域,三沙市人民政府就驻西沙永兴岛。永兴岛岛上自然植被密布,野生植物有 148 种,占西沙野生植物总数的 89%,主要树种有草海桐(羊角树)、麻枫桐、野枇杷、海棠树和椰树等。其中草海桐也称为羊角树,是多年生常绿亚灌木植物,它们总是喜欢倚在珊瑚礁岸或是与其他滨海植物聚生于海岸沙滩,为典型的滨海植物。

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

DOI: 10.5846/stxb201204110505

郭静, 陈求稳, 张晓晴, 李伟峰. 基于实码遗传算法的湖泊水质模型参数优化. 生态学报, 2012, 32(24): 7940-7947.

Guo J, Chen Q W, Zhang X Q, Li W F. Optimization of lake model salmo based on real-coded genetic algorithm. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7940-7947.

基于实码遗传算法的湖泊水质模型参数优化

郭 静¹, 陈求稳^{1,2,*}, 张晓晴¹, 李伟峰¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085, 2. 三峡大学, 宜昌 430010)

摘要: 参数的合理取值决定着模型的模拟效果, 因此确定研究区域的模型结构后, 需要对模型的参数进行优化。湖泊水质模型 (Simulation by means of an Analytical Lake Model, SALMO) 利用常微分方程描述湖泊的营养物质循环和食物链动态, 考虑了多个生态过程, 包含 104 个参数。由于参数较多, 不适宜采用传统参数优化方法进行优化。利用太湖梅梁湾 2005 年数据, 采用实码遗传算法优化了 SALMO 模型中相对敏感的参数, 运用优化后的模型, 模拟了梅梁湾 2006 年的水质。对比分析参数优化前后模型的效果表明遗传算法能高效地对 SALMO 进行参数优化, 优化后的模拟精度得到了显著提高, 能更好地模拟梅梁湾的水质变化。

关键词: 参数优化; 实码遗传算法; SALMO (Simulation by means of an Analytical Lake Model); 水质模拟

Optimization of lake model salmo based on real-coded genetic algorithm

GUO Jing¹, CHEN Qiuwen^{1,2,*}, ZHANG Xiaoqing¹, LI Weifeng¹

1 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 China Three Gorges University, Yichang 430010, China

Abstract: Model calibration is required in order to make model predictions reliable for a certain area. But model calibration is always difficult, especially when the model contains a large number of parameters. The Lake model SALMO (Simulation by means of an Analytical Lake Model) is based on complex ordinary differential equations which represent the nutrient cycles of $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and the food webs consisting of diatoms, green algae, blue-green algae and cladocerans. As the model includes numerous ecological processes, it has 104 constant parameters, making it unsuitable for calibration with conventional methods, such as trial and error, HSY (Hornberger-Spear-Young) and GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) algorithms.

Genetic algorithm (GA) is a biologically motivated global optimization technique based on natural selection, reproduction and mutation. Compared to conventional methods, GA is more efficient for global optimum searches and it has a faster convergence speed. There are two different kinds of GA encoding: binary encoding and real encoding. The binary encoding introduces discretization errors when it encodes a real number, and encoding and decoding operations take more computation time. While real encoded GA works directly on the real number, it is more suitable for dealing with continuous search spaces with large dimensions. Therefore this paper chooses a real coded GA to calibrate the sensitive parameters of SALMO. Since the sensitive parameters of SALMO are related to phosphate, zooplankton and three algae (diatoms, green algae, blue-green algae), the objective of the optimization is to minimize the relative errors of these state variables. The

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50920105907); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2008CB418106); 中国科学院百人计划 (A1049)

收稿日期: 2012-04-11; **修订日期:** 2012-11-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qchen@rcees.ac.cn

implementation of GA begins with determining the following appropriate values of its operators: the population size is 200, the max generation is 400, the crossover probability is 0.8, the mutation probability is 0.05.

Two years of water quality data were collected from the Meiliang bay of Taihu lake. Data of 2005 was used for calibration while data of 2006 was used for validation. According to the validation results, the average relative errors of $\text{PO}_4\text{-P}$, zooplankton, total algae decrease from 53.9%, 174.6%, 65.4% in the initial unoptimized model to 25.2%, 48.1%, 44.4% in the optimized model. Errors of less than 50% are typically considered as satisfactory results in ecological models.

This suggests that the real-coded GA is efficient in the calibration of SALMO. After calibration, SALMO predicted the dynamics of water quality variables well, but the maximum simulated value of blue-green algae is still considerably smaller than the observed value. This may be because SALMO does not consider the benthic recruitment and the migration of blue-green algae driven by wind and hydrodynamic forces. Moreover, the real-coded GA just used one year's data to calibrate SALMO, which may also be a cause of the deviation of the simulated results from the observed values.

Key Words: optimization; real-coded genetic algorithm; SALMO; water quality modelling

模型参数对模拟结果有着重要影响,一个模型要取得成功应用,首先需要有合理的参数取值^[1],因此模型参数率定和优化是模型应用的关键之一。近几十年来,水环境模型考虑的过程越来越完善,模拟的状态变量越来越多,相应地模型参数组合优化也日益复杂^[2]。

湖泊水质模型 SALMO (Simulation by means of an Analytical Lake Model)^[3]利用常微分方程描述了湖泊的营养物质循环和食物链动态,考虑了多个生态过程,已经在不同的研究区域获得了成功应用^[3-5]。但该模型包含参数众多(共 104 个),其参数组合优化对模型应用效果有决定性影响。

传统的模型参数优化方法有人工试错法、梯度法、HSY (Hornberger-Spear-Young)^[6]算法、GLUSE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)^[7]算法等,其中人工试错法需要手动调整模型参数,耗时耗力并具有主观性,难以同时调整多个参数;梯度法具有初值依赖性,通常只能搜索到局部最优解,并且算法构造复杂;HSY 算法和 GLUSE 算法都基于随机采样,计算量随参数数目的增加呈指数增长^[2,8]。遗传算法是一种高效的启发式全局优化算法,其原理简单,近些年已被越来越多地应用于环境模型的参数优化,包括水文模型^[9]、地下水模型^[10]、河流及湖泊水质模型^[11-13]。常用的简单遗传算法采用二进制编码,但二进制编码占用计算机内存多,计算精度不高,稳定性不如实数编码^[14]。实码遗传算法直接使用实数作为染色体基因参与遗传操作,便于较大空间的遗传搜索,而且不需要特定的编码和解码过程,改善了计算复杂性,提高了运算效率。

本研究利用梅梁湾 2005 年实测数据采用实码遗传算法对湖泊水质模型 SALMO 的敏感参数进行了优化,并利用率定后的 SALMO 模拟了 2006 年梅梁湾的水质。研究表明,遗传算法能高效地优化 SALMO 参数,并显著提高了 SALMO 的模拟精度。

1 模型与数据

1.1 湖泊水质模型 SALMO

湖泊水质模型 SALMO 由 Benndorf 和 Reznagel 在 1979 年开发^[15],用于模拟湖泊或水库富营养化。该模型包含一个由 3 种藻类(硅藻、蓝藻、绿藻)和浮游动物构成的食物链,同时还模拟了湖泊的正磷酸盐、硝氮、溶解氧和有机碎屑的循环,其模型结构如图 1 所示。

SALMO 模拟了 8 个状态变量: $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度、碎屑浓度、溶解氧浓度、浮游动物生物量,以及 3 种藻类生物量(蓝藻、绿藻和硅藻)。因为详细考虑了这些状态变量之间的转化机制,SALMO 包含的参数众多,共 104 个。Reznagel^[16]通过灵敏度分析发现 SALMO 模型中与藻类生长相关的参数灵敏度大,对模拟结果影响最为显著。根据前期基础^[17],本研究选取了灵敏度大的部分关键参数(表 1),并在这些参数通常的取值范围^[18-22]内进行优化,其它参数采用 SALMO 的默认值,参见文献^[3]。

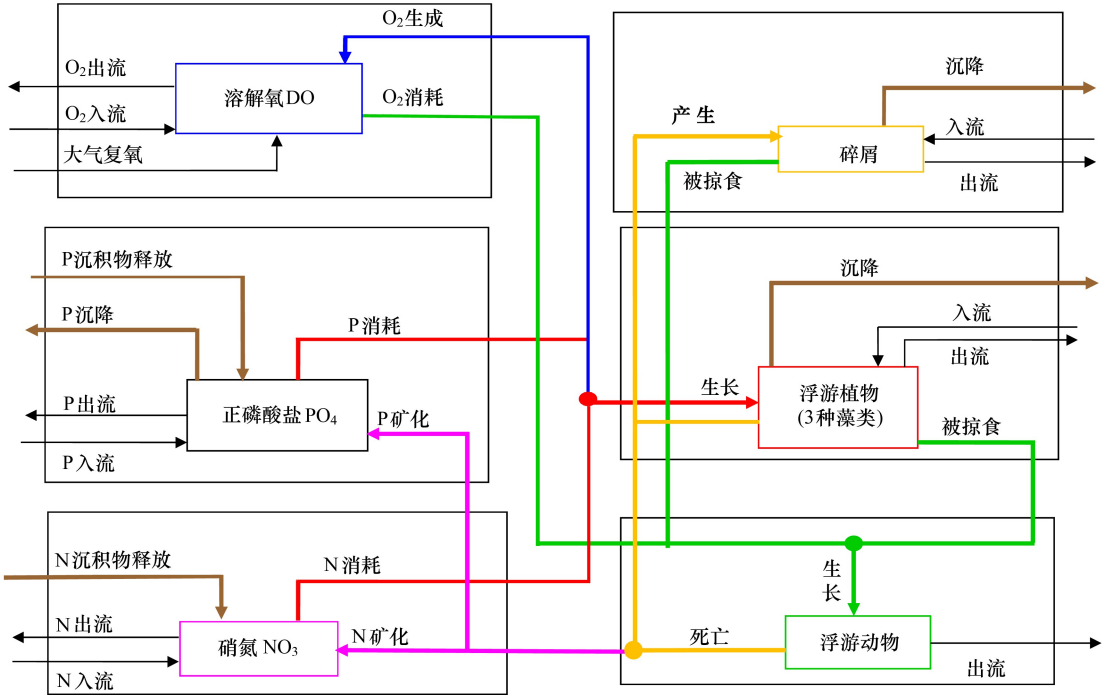


图1 SALMO 模型结构图

Fig. 1 Structure diagram of the SALMO model

表1 拟优化的 SALMO 模型部分关键参数

Table 1 Some key parameters to be optimized for the SALMO model		
参数符号 Parameter	含义 Meaning	取值范围 ^[18-22] Value range
GI	光照对浮游动物消化作用的抑制系数(无量纲)	0.6—1.0
GMAX	浮游动物的最大摄食速率/(g·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	1.0—1.9
GMIN	浮游动物的最小摄食速率/(g·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.1—0.4
RZMIN	浮游动物在最佳摄食温度和无食物条件的呼吸速率/d ⁻¹	0.06—0.16
RZTMIN	浮游动物在最佳摄食供应和0℃条件下的呼吸速率/d ⁻¹	0.02—0.06
RXMF	藻类呼吸作用占光合作用的比例(无量纲)	0.24—0.36
KP ₁	硅藻对正磷酸盐的半饱和常数/(mg/m ³)	1.0—9.0
KP ₂	绿藻对正磷酸盐的半饱和常数/(mg/m ³)	5.0—24.0
KP ₃	蓝藻对正磷酸盐的半饱和常数/(mg/m ³)	1.0—15.0
PFA ₁	浮游动物对硅藻的摄食选择参数(无量纲)	0.55—1.0
PFA ₂	浮游动物对绿藻的摄食选择参数(无量纲)	0.5—1.0
PFA ₃	浮游动物对蓝藻的摄食选择参数(无量纲)	0.18—0.5
PHOMAX ₁	硅藻在理想条件下的最大光合作用速率/d ⁻¹	1.0—3.0
PHOMAX ₂	绿藻在理想条件下的最大光合作用速率/d ⁻¹	2.0—4.0
PHOMAX ₃	蓝藻在理想条件下的最大光合作用速率/d ⁻¹	1.0—3.0
PHOMIN ₁	硅藻在低温条件下的最小光合作用速率/d ⁻¹	0.0—0.55
PHOMIN ₂	绿藻在低温条件下的最小光合作用速率/d ⁻¹	0.0—0.7
PHOMIN ₃	蓝藻在低温条件下的最小光合作用速率/d ⁻¹	0.0—0.41
RXTOPT ₁	硅藻在其最佳生长条件下的呼吸速率/d ⁻¹	0.05—0.25
RXTOPT ₂	绿藻在其最佳生长条件下的呼吸速率/d ⁻¹	0.05—0.25
RXTOPT ₃	蓝藻在其最佳生长条件下的呼吸速率/d ⁻¹	0.05—0.25
TOPTA ₁	硅藻的最佳生长温度/℃	14—22
TOPTA ₂	绿藻的最佳生长温度/℃	20—25

续表		
参数符号 Parameter	含义 Meaning	取值范围 ^[18-22] Value range
TOPTA ₃	蓝藻的最佳生长温度/℃	25—32
VA ₁	硅藻的沉降速率/(m·d ⁻¹)	0.017—0.35
VA ₂	绿藻的沉降速率/(m·d ⁻¹)	0.016—0.25
VA ₃	蓝藻的沉降速率/(m·d ⁻¹)	0.020—0.15
YA ₁	硅藻的磷释放系数/(g·mg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.5—1.0
YA ₂	绿藻的磷释放系数/(g·mg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.3—0.6
YA ₃	蓝藻的磷释放系数/(g·mg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.8—1.2

1.2 研究区域数据

本文选取太湖北部的梅梁湾为研究区域,它是无锡市的重要水源地和风景旅游区,南北长 14 km,东西宽 8km,平均水深为 1.95m^[23]。梅梁湾周边有多条出入流,因监测数据的限制,本研究仅考虑了图 2 所示的 3 条主要河流:武进港、直湖港和梁溪河,同时也考虑了梅梁湾与大太湖的水量水质交换。梅梁湾与大太湖之间的流量,通过水量平衡方程由梅梁湾水体体积变化和 3 条河流流量计算得出,其中梅梁湾水体体积利用 ArcGIS 软件根据梅梁湾的水位和湖底地形计算。因站点拖山位于大太湖和梅梁湾的交界面处,以拖山的水质作为大太湖进入梅梁湾水体的水质数据。在梅梁湾共设置了 5 个监测点进行常年水质监测,每月采样一次,主要监测指标有水温、溶解氧、硝氮、总磷、藻类生物量、浮游动物生物量等。其中以梅梁湾 2005 年 1 月的水质数据为初始条件,以 2005 年出入湖河流流量、水质作为边界条件,对梅梁湾湖区 2005 年的水质进行了计算,根据模型状态变量的计算值与实测值的吻合程度对拟优化的参数进行了优化。利用优化后的模型模拟了 2006 年的水质情况,用来验证和比较参数优化后的模拟效果。

2 参数优化方法

遗传算法是由 Holland 基于达尔文的自然进化理论和孟德尔的遗传理论在 1975 年提出的一种全局优化算法^[24]。它采用群体搜索技术,具有内在的隐并行性和更强的全局寻优能力。另一方面,它采用概率寻优方法,自动获取和指导优化空间,自适应地调整搜索空间,因此它具有自适应、自组织和自学习性的特性。下面对遗传算法的几个重要过程进行详细介绍^[25-26]。

2.1 编码

遗传算法首先需要对所选择优化的参数进行编码,实数编码方法如下式所示:

$$x_j = \min_j + r [\max_j - \min_j] \quad (j = 0, 1, 2, \dots, n)$$

(1)

式中, x_j 为种群中个体的第 j 个基因(即优化的第 j 个参数), r 为(0,1)内的随机数, $\max_j$ 和 $\min_j$ 分别为第 j 个基因的最大值和最小值, n 为所优化的参数个数。

2.2 初始种群的生成

将 2.1 中的编码过程重复 n 次,生成一个个体 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n\}$ 。若种群数目为 N ,按上述生成个体的方法,重复 N 次,则生成初始种群 $\{X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_n\}$ 。

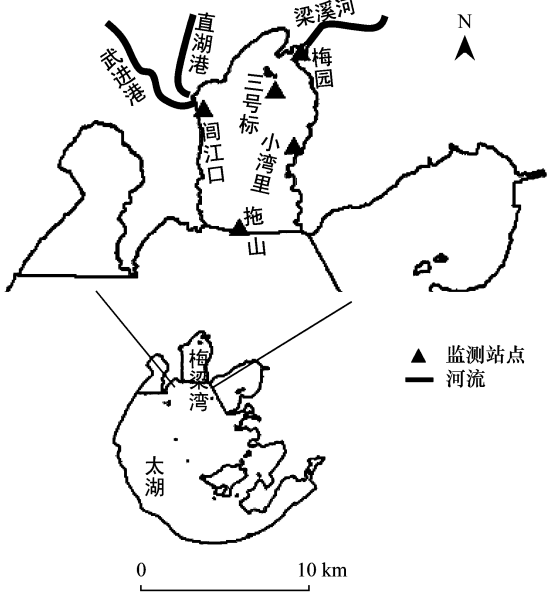


图2 梅梁湾出入流和水质监测站点图
Fig.2 Rivers connected with Meiliang Bay and distribution of sampling stations

2.3 适应度函数

遗传算法以种群个体适应度为指导,向目标函数值最小的方向进行搜索,以找到最佳参数组合^[27]。本研究将种群中每个个体所代表的参数代入 SALMO 进行计算,得到一组模拟结果(正磷酸盐浓度、硝氮浓度、浮游动物生物量、有机碎屑浓度、溶解氧浓度、硅藻生物量、蓝藻生物量、绿藻生物量)。因所选择优化的参数主要与 3 种藻类、浮游动物、磷酸盐相关,因此构造了如式(2)所示的适应度函数,函数值越大表示个体适应度越高。

$$f = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \left[\frac{|P'_i - P_i|}{P'_i} + \frac{|A'_{1i} - A_{1i}|}{A'_{1i}} + \frac{|A'_{2i} - A_{2i}|}{A'_{2i}} + \frac{|A'_{3i} - A_{3i}|}{A'_{3i}} + \frac{|Z'_i - Z_i|}{Z'_i} \right]}{m} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, m 为监测总天数, $P'_i, A'_{1i}, A'_{2i}, A'_{3i}, Z'_i$ 和 $P_i, A_{1i}, A_{2i}, A_{3i}, Z_i$ 分别为正磷酸盐浓度、3 种藻类生物量(硅藻、绿藻、蓝藻)、浮游动物生物量在第 i 天的实测值和模拟值。

2.4 选择算子

本研究采用轮盘赌选择算子,第 k 个体被选中的概率 P_k 与其适应度 f_k 大小成正比, P_k 计算公式如下:

$$P_k = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^N f_k} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

选择算子的具体实现过程是先计算父代种群中每个个体的累积概率 SP_k ,随机产生一个 $(0, 1)$ 的随机数 r ,若 SP_k 为大于 r 的最小概率,则第 k 个个体被选为进行交叉操作生成下一代的个体。

$$SP_k = P_0 + P_1 + \dots + P_i + \dots + P_k \quad (i = 0, 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

遗传算法通过对个体进行交叉、变异等遗传操作而不断产生新的个体。由于这些遗传操作的随机性,可能会破坏种群中的最优个体,因此本研究还采用了最优保存策略,即若交叉和变异后下一代最优个体的适应度小于当前代最优个体的适应度,则用当前代的最优个体替代下一代的最差个体。

2.5 交叉算子

实数编码常采用算术交叉算子,即由两个个体的线性组合产生两个新个体。算术交叉分为均匀算术交叉和非均匀算术交叉。本文采用如下非均匀算术交叉:

$$\begin{cases} \begin{cases} X_1^{T+1} = r_1 \cdot X_1^T + (1 - r_2) \cdot X_2^T \\ X_2^{T+1} = (1 - r_1) \cdot X_1^T + r_2 \cdot X_2^T \end{cases} & \text{if random}(0, 1) = 1 \\ \begin{cases} X_1^{T+1} = (1 + r_1) \cdot X_1^T - r_2 \cdot X_2^T \\ X_2^{T+1} = (1 + r_2) \cdot X_2^T - r_1 \cdot X_1^T \end{cases} & \text{if random}(0, 1) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, X_1^T, X_2^T 为被选择的交叉个体, X_1^{T+1}, X_2^{T+1} 为交叉后产生的新个体, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数。

2.6 变异算子

变异算子模拟了自然遗传中的基因突变过程,保证了个体的多样性,可以防止遗传算法早熟,本文采用了非均匀变异:若种群个体 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n\}$ 中的基因 x_k 要发生变异, x_k 的基因值取值范围为 $[\min_k, \max_k]$,则新基因值 x'_k 由如下公式计算:

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, \max_k - x_k), r' < 0.5 \\ x_k + \Delta(t, x_k - \min_k), r' \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta(t, y) = y \cdot (1 - r^{(1-t/T)^2}) \quad (7)$$

式中, t 为进化代数, T 为最大遗传代数, r' 和 r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2.7 算法参数

遗传算法的种群数目、交叉概率和变异概率是影响算法效率的重要因素^[28],本文经过多次试算后,种群数目选定为 200,交叉概率选为 0.8,变异概率选为 0.05,最大进化代数选为 400,遗传终止条件为遗传达到最

大代数或最优个体的适应度 $f>10$ 。

3 结果与讨论

遗传算法对 SALMO 优化后的参数取值见表 2,为了对比,将未优的化参数取值^[3]同时列入表 2 中。

表 2 优化后的参数取值

Table 2 Optimized values of parameters

参数符号	GI	GMAX	GMIN	RZMIN	RZTMIN	RXMF	KP ₁	KP ₂	KP ₃	PFA ₁
未优化值	0.8	1.3	0.26	0.08	0.05	0.3	1.7	9.5	1.7	1.0
优化值	0.992	1.743	0.333	0.155	0.059	0.280	6.756	19.311	10.985	1.000
PFA ₂	PFA ₃	PHOMAX ₁	PHOMAX ₂	PHOMAX ₃	PHOMIN ₁	PHOMIN ₂	PHOMIN ₃	RXTOPT ₁		
1.0	0.3	2.37	3.3	2.37	0.17	0.35	0.0	0.06		
0.874	0.196	2.300	3.434	2.065	0.094	0.080	0.230	0.090		
RXTOPT ₂	RXTOPT ₃	TOPTA ₁	TOPTA ₂	TOPTA ₃	VA ₁	VA ₂	VA ₃	YA ₁	YA ₂	YA ₃
0.06	0.06	21	23	30	0.1	0.1	0.05	0.08	0.41	1.0
0.096	0.098	19.996	23.752	29.441	0.096	0.054	0.080	0.973	0.592	1.050

图 3 给出了参数优化后的模型对梅梁湾 2006 年水质的模拟结果,可以看出,正磷酸盐浓度和浮游动物生物量的模拟精度明显提高,其平均相对误差绝对值分别由参数优化前(即采用 SALMO 默认参数值)的 53.9% 和 174.6% 降至参数优化后的 25.2% 和 48.1%。正磷酸盐的模拟效果较好,但是仍然存在一定的误差,这可能

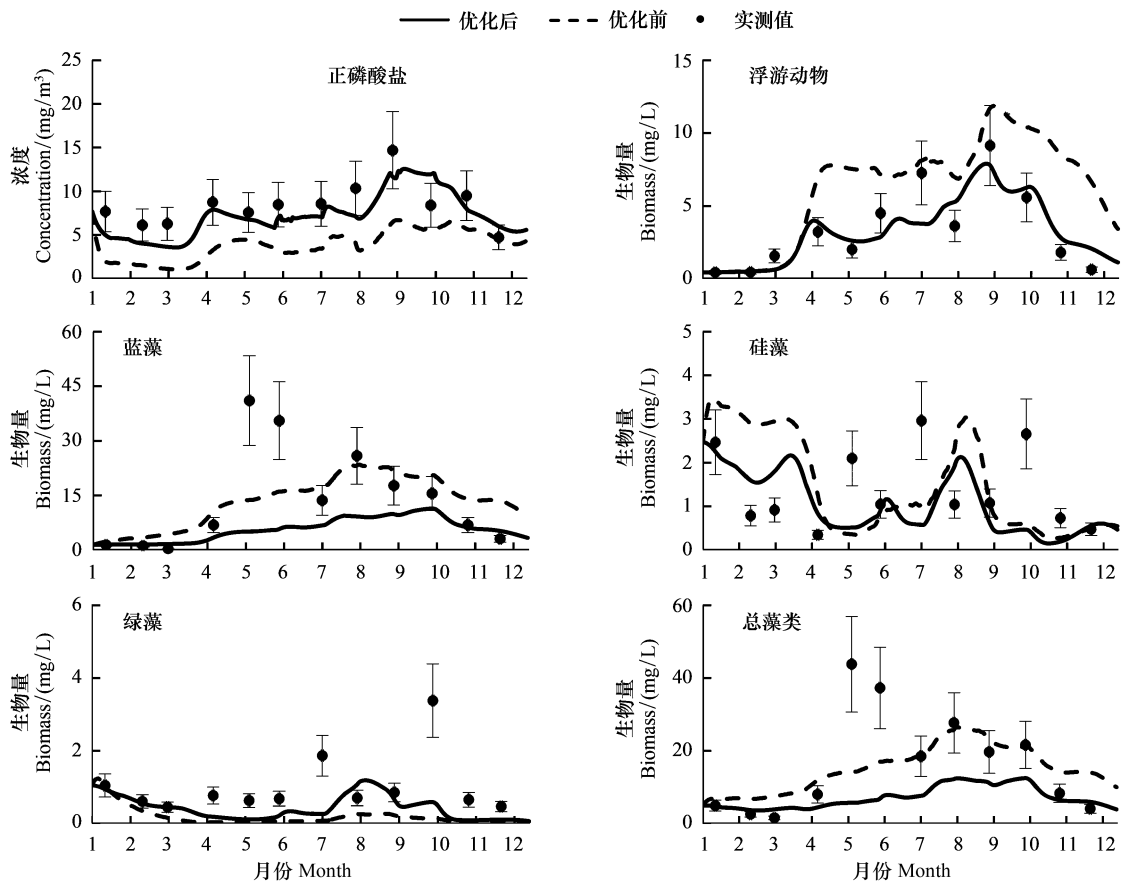


图 3 以 2006 年为例比较模型参数优化前后的模拟效果

Fig. 3 Comparison of simulation results before and after optimization in 2006 for verification

与梅梁湾的 3 条主要河流的流向不定,流量难于测定以及营养盐入流负荷为不确定过程难以测量有关。虽然藻类总生物量从变化动态看没有明显的改善,但是其平均相对误差绝对值也由 65.4% 降至 44.4%。藻类总生物量主要来源于蓝藻,优化后其无明显改善主要是因为蓝藻生物量的模拟值无明显改善。蓝藻优化效果不理想,其模拟峰值明显低于实测值,这可能与 SALMO 未考虑沉降到底泥表面的蓝藻春季复苏对水华形成的贡献有关。根据孔繁翔等^[29]提出的蓝藻水华形成的“四阶段理论”,蓝藻在冬季会下沉到底泥表面越冬,在春季随着温度升高、光照加强,底泥表面蓝藻会开始进入水体中。Verspagen 等^[30]研究了水体中蓝藻和底泥中蓝藻对夏季水华的贡献程度,结果表明底泥表面蓝藻复苏对夏季微囊藻水华的贡献为 50% 左右,由于 SALMO 未考虑这一过程,因此夏季蓝藻高峰模拟值偏低。

另一方面,因太湖夏季盛行东南风,漂浮的席状藻类会在风力作用下由大太湖漂移进入梅梁湾,使夏季水华加剧,藻类生物量增加^[31]。而 SALMO 为零维水质模型,假设水体混合均匀,蓝藻高峰值偏低可能也与未考虑藻类在水动力及风力作用下的迁移有关。

但总的来说,实码遗传算法能高效地优化 SALMO 参数,优化后模型的模拟精度得到了明显提高。

4 结论

本研究以太湖梅梁湾为实例,收集了 2005—2006 年的水质监测数据,利用湖泊水质模型 SALMO 模拟梅梁湾的水质动态。采用 2005 年的数据,通过实码遗传算法对模型的 30 个关键敏感参数进行了同步优化,并用 2006 年的数据比较了参数优化前后模型的模拟效果。得到以下主要结论:

(1) 实码遗传算法对 SALMO 参数优化的效率较高,参数优化后,模型的模拟精度得到提高。对梅梁湾 2006 年水质模拟结果表明正磷酸盐、浮游动物生物量、藻类总生物量的模拟平均相对误差绝对值分别从优化前的 53.9%、174.6% 和 65.4% 降到了 25.2%、48.1% 和 44.4%。

(2) 参数优化后的 SALMO 仍然存在一定的模拟误差,这可能与只优化了部分参数有关。此外,本研究仅利用了 1a 的数据进行优化,为进一步提高模拟精度,可以利用更多的实测数据优化更多的参数。

(3) 模型对蓝藻峰值的模拟值明显低于实测值,可能是因为未考虑底泥中蓝藻复苏对夏季蓝藻水华的贡献以及水动力和风力对蓝藻迁移作用的影响。

References:

- [1] Wang J P, Chen S T, Jia H F. Advances in study on parameters identification methods for environmental models. *Advances in Water Science*, 2006(04): 574-580.
- [2] Han F, Chen Y C, Liu Z W. Advance in the eutrophication models for lakes and, reservoirs. *Advances in Water Science*, 2003(06): 785-791.
- [3] Recknagel F, van Ginkel C, Cao H Q, Cetin L, Zhang B. Generic limnological models on the touchstone: Testing the lake simulation library SALMO-OO and the rule-based Microcystis agent for warm-monomictic hypertrophic lakes in South Africa. *Ecological Modelling*, 2008, 215(1/3): 144-158.
- [4] Cetin L, Zhang B, Recknagel F. A Process-based Simulation Library SALMO-OO for Lake Ecosystems[D]. Australia: School of Earth and Environmental Science, University of Adelaide, 2005.
- [5] Walter M, Recknagel F, Carpenter C, Bormans M. Predicting eutrophication effects in the Burrinjuck Reservoir (Australia) by means of the deterministic model SALMO and the recurrent neural network model ANNA. *Ecological Modelling*, 2001, 146(1/3SI): 97-113.
- [6] Beck M B. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, 1987, 23(8): 1393-1442.
- [7] Beven K, Binley A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Process*, 1992, 6(3): 279-298.
- [8] Deng Y X, Wang Q, Lai S Y, Chen J N. Comparison of Optimum, RSA and GLUE Methods in parameters Identification of a Nonlinear Environmental Model. *Environmental Science*, 2003(06): 9-15.
- [9] Wang Y C, Yu P S, Yang T C. Comparison of genetic algorithms and shuffled complex evolution approach for calibrating distributed rainfall-runoff model. *Hydrological Processes*, 2010, 24(8): 1015-1026.
- [10] Bau DA, Lee J. Multi-objective optimization for the design of groundwater supply systems under uncertain parameter distribution. *Pacific Journal of optimization*, 2011, 7(3): 407-424.
- [11] Goktas R K, Aksoy A. Calibration and verification of QUAL2E using genetic algorithm optimization. *Journal of Water Resources Planning and*

- Management, ASCE, 2007, 133(2): 126-136.
- [12] Ng A W N, Perera B J C. Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2003, 16(5/6): 529-541.
- [13] Pelletier G J, Chapra S C, Tao H. QUAL2Kw-A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(3): 419-425.
- [14] Pan W, Diao H Z, Jing Y W. An improved real-value adaptive genetic algorithm. *Control and Decision*, 2006(07): 792-795.
- [15] Benndorf J, Recknagel F. Problems of application of the ecological model SALMO to lakes and reservoirs having various trophic states. *Ecological Modelling*, 1982, 17(2): 129-145.
- [16] Recknagel F, Benndorf J. Validation of the ecological simulation model-SALMO. *International Revue der gesamten Hydrobiologie*, 1982, 67(1): 113-125.
- [17] Guo J, Chen Q W, Li W F. Application of Lake Model SALMO to the Meiliang Bay of Taihu Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, in press.
- [18] Qin B Q, Xu H, Dong B L. The principle and practice of eutrophic lake restoration and Management. Beijing: Higher Education Press, 2011. 325.
- [19] Cao H Q, Recknagel F, Cetin L, Zhang B R. Process-based simulation library SALMO-OO for lake ecosystems. Part 2: Multi-objective parameter optimization by evolutionary algorithms. *Ecological Informatics*, 2008, 3(2): 181-190.
- [20] Arhonditsis G B, Brett M T. Eutrophication model for Lake Washington (USA) Part I. Model description and sensitivity analysis. *Ecological Modelling*, 2005, 187(2/3): 140-178.
- [21] Pei H P, Ma J Y. Study on the algal dynamic model for West Lake, Hangzhou. *Ecological Modelling*, 2002, 148(1): 67-77.
- [22] Bowie G L, Mills W B, Porcella D B. Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling. U. S: Environmental Protection Agency. 1985. EPA/600/3-85/040.
- [23] Zhu Y C, Cai Q M. Studies on a three-dimensional hydro-Dynamic model for Meiliang Bay, Taihu Lake I. Model description and result interpretation. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998(01): 79-85.
- [24] Holland J. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975. 183.
- [25] Wang X P, Cao L M. Application and software implementation of genetic algorithm. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 344.
- [26] Michalewicz Z. Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs. New York: Springer, 1992.
- [27] Liu S M, Butler D, Brazier R, Heathwaite L, Khu S T. Using genetic algorithms to calibrate a water quality model. *Science of the Total Environment*, 2007, 374(2/3): 260-272.
- [28] Wang J P, Chen S T, Jia H F. Parameter Optimization of Water Quality Model: Implementation of Genetic Algorithm and Its Control Parameters Analysis. *Environmental Science*, 2005(03): 61-65.
- [29] Kong F X, Ma R H, Gao J F, Wu X D. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2009(03): 314-328.
- [30] Verspagen J, Snelder E, Visser P M, Johnk K D, Ibelings B W, Mur L R, Huisman J. Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the harmful cyanobacterium *Microcystis*. *Freshwater Biology*, 2005, 50(5): 854-867.
- [31] Bai X H, Hu W P, Hu Z X, Li X H. Importation of Wind-Driven Drift of Mat-Like Algae Bloom into Meiliang Bay of Taihu Lake in 2004 Summer. *Environmental Science*, 2005(06): 59-62.

参考文献:

- [1] 王建平,程声通,贾海峰. 环境模型参数识别方法研究综述. *水科学进展*, 2006(04): 574-580.
- [2] 韩菲,陈永灿,刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述. *水科学进展*, 2003(06): 785-791.
- [8] 邓义祥,王琦,赖斯芸,陈吉宁. 优化、RSA 和 GLUE 方法在非线性环境模型参数识别中的比较. *环境科学*, 2003(06): 9-15.
- [14] 潘伟,刁华宗,井元伟. 一种改进的实数自适应遗传算法. *控制与决策*, 2006(07): 792-795.
- [17] 郭静,陈求稳,李伟锋. 湖泊水质模型 SALMO 在太湖梅梁湾的应用. *环境科学学报*, 2012, 排刊中.
- [18] 秦伯强,许海,董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践. 北京: 高等教育出版社, 2011. 325.
- [23] 朱永春,蔡启铭. 太湖梅梁湾三维水动力学研究——I. 模型的建立及结果分析. *海洋与湖沼*, 1998(01): 79-85.
- [25] 王小平,曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 344.
- [28] 王建平,程声通,贾海峰. 水质模型参数优化的遗传算法实现及控制参数分析. *环境科学*, 2005(03): 61-65.
- [29] 孔繁翔,马荣华,高俊峰,吴晓东. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. *湖泊科学*, 2009(03): 314-328.
- [31] 白晓华,胡维平,胡志新,李香华. 2004 年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量计算. *环境科学*, 2005(06): 59-62.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 24 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

A bibliometric study of biodiversity research in China	LIU Aiyuan, GUO Yuqing, LI Shiying, et al (7635)
Effects of elevated CO ₂ and nitrogen deposition on leaf nutrient quality of <i>Fargesia rufa</i> Yi	 ZHOU Xianrong, WANG Jianhua, ZHANG Hong, et al (7644)
Airborne pollen assemblages and their relationships with climate factors in the central Shaanxi Province of the Loess Plateau: a case in Xiaheimugou, Luochuan County	LÜ Suqing, LI Yuecong, XU Qinghai, et al (7654)
Spatial and temporal change in ecological assets in the Yangtze River Delta of China 1995—2007	 XU Xibao, CHEN Shuang, YANG Guishan (7667)
Evaluation and optimization of woodland ecological patterns for Qingdao based on the agent-based model	 FU Qiang, MAO Feng, WANG Tianqing, et al (7676)
Interactive mechanism of service function of alpine rangeland ecosystems in Qinghai-Tibetan Plateau	 LIU Xingyuan, LONG Ruijun, SHANG Zhanhuan (7688)
Preliminary evaluation of air temperature reduction of urban green spaces in Beijing	 ZHANG Biao, GAO Jixi, XIE Gaodi, et al (7698)
Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China	 SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, ZHAO Linjia, et al (7706)
The characteristics and influential factors of direct carbon emissions from residential energy consumption: a case study of Lijiang City, China	WANG Danyin, TANG Mingfang, REN Yin, et al (7716)
Spatial targeting of payments for ecosystem services Based on SWAT Model and cost-benefit analysis	 SONG Xiaoyu, LIU Yuqing, DENG Xiaohong, et al (7722)
The wind tunnel test of plastic greenhouse and its surface wind pressure patterns	 YANG Zaiqiang, ZHANG Bo, XUE Xiaoping, et al (7730)
Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered plant <i>Davidia involucrata</i> in Hunan Province	 LIU Haiyang, JIN Xiaoling, SHEN Shouyun, et al (7738)
Phenotypic diversity in populations of germplasm resources of <i>Rodgersia sambucifolia</i> and related species	 LI Pingping, MENG Hengling, CHEN Junwen, et al (7747)
Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and growth of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. (Fabaceae) ...	 YANG Huiling, LIANG Zhenlei, ZHU Xuanwei, et al (7757)
Population-keeping mechanism of the parasitoid <i>Dastarcus helophoroides</i> (Coleoptera: Bothrideridae) of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) in oak forest	YANG Zhongqi, TANG Yanlong, JIANG Jing, et al (7764)
Study of mingling based on neighborhood spatial permutation	LOU Minghua, TANG Mengping, QIU Jianxi, et al (7774)
Comparison of three regression analysis methods for application to LAI inversion using Hyperion data	 SUN Hua, JU Hongbo, ZHANG Huaiqing, et al (7781)
Response of seed germination and seedling growth of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Quercus mongolica</i> to comprehensive action of warming and precipitation	ZHAO Juan, SONG Yuan, SUN Tao, et al (7791)
Impacts of water stored in sapwood <i>Populus bolleana</i> on its sap flux	DANG Hongzhong, LI Wei, ZHANG Youyan, et al (7801)
Dynamics of greenhouse gases emission and its impact factors by fire disturbance from <i>Alnus sibirica</i> forested wetland in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen (7808)
Different tide status and salinity alter stoichiometry characteristics of mangrove <i>Kandelia candel</i> seedlings	 LIU Biner, LIAO Baowen, FANG Zhanqiang (7818)
Effects of shrub encroachment in desert grassland on runoff and the induced nitrogen loss in southeast fringe of Tengger Desert	 LI Xiaojun, GAO Yongping (7828)
Community structure and throughfall erosivity characters of artificial rainforest in Xishuangbanna	 DENG Yun, [TANG Yanlin], CAO Min, et al (7836)
Temporal-spatial variations of net ecosystem productivity in alpine area of southwestern China	 PANG Rui, GU Fengxue, ZHANG Yuandong, et al (7844)

Relationships between chemical compositions of <i>Quercus</i> species seeds and climatic factors in temperate zone of NSTEC	LI Dongsheng, SHI Zuomin, LIU Shirong, et al (7857)
Effects of simulated acid rain stress on the PS II reaction center and free radical metabolism in leaves of longan	LI Yongyu, PAN Tengfei, YU Dong, et al (7866)
Assessment of organic pollution for surface soil in Shenyang suburbs	CUI Jian, DU Jizhong, MA Hongwei, et al (7874)
The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland	GAO Xiang, HAO Weiping, GU Fengxue, et al (7883)
Effects of winter crops on enzyme activity and morphological characteristics of root in subsequent rice crops	YU Tianyi, PANG Huancheng, REN Tianzhi, et al (7894)
Dynamic changes of soil moisture and nitrate nitrogen in wheat and maize intercropping field under different nitrogen supply	YANG Ruiju, CHAI Shouxi, MA Zhongming (7905)
Characteristics of the bird diversity and the impact factors in Weishan Lake	YANG Yuewei, LI Jiuen (7913)
The effect of cropping landscapes on the population dynamics of the cotton bollworm <i>Helicoverpa armigera</i> (Lepidoptera, Noctuidae) in the northern Xinjiang	LU Zhaozhi, PAN Weilin, ZHANG Xin, et al (7925)
The seasonal variations of nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	LIU Jingjing, DONG Chunying, SONG Yingqi, et al (7932)
Optimization of lake model salmo based on real-coded genetic algorithm	GUO Jing, CHEN Qiuwen, ZHANG Xiaoqing, et al (7940)
The influence of climatic environmental factors and fishing pressure on changes of hairtail catches in the northern South China Sea	WANG Yuezhong, SUN Dianrong, CHEN Zuozhi, et al (7948)
Seasonal and spatial distribution of acid volatile sulfide in sediment under different mariculture types in Nansha Bay, China	YAN Tingru, JIAO Haifeng, MAO Yuze, et al (7958)
Review and Monograph	
Research progress on the mechanism of improving plant cold hardiness	XU Chengxiang (7966)
Influences of vegetation on permafrost: a review	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, WANG Yongping, et al (7981)
Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review	ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (7991)
Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff	ZHAO Hongtao, LI Xuyong, YIN Chengqing (8001)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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

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 32 卷 第 24 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 24 (December, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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 70.00 元