

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

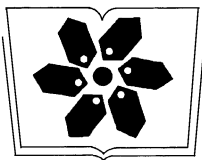
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
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 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

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

DOI: 10.5846/stxb201111151736

戴亚南, 贺新光. 长株潭地区生态可持续性. 生态学报, 2013, 33(2): 0595-0602.

Dai Y N, He X G. Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region: a prediction study. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0595-0602.

长株潭地区生态可持续性

戴亚南*, 贺新光

(湖南师范大学 资源与环境科学学院, 长沙 410081)

摘要: 基于长株潭地区被批准为“全国资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革试验区”的背景, 针对生态足迹方法的产量因子参数进行改进, 利用区域产量因子代替全球产量因子, 对长株潭地区 1986—2005 年生态足迹和生态承载力进行核算, 在此基础上, 着重采用两种预测方法对该地区 2007—2015 年生态足迹和生态容量进行预测。两种预测方法分别是二项式曲线预测模型和灰色 GM(1,1) 模型, 对长株潭地区 1986—2005 年 20a 的人均生态足迹与时间关系进行了拟合, 得出二项式曲线预测模型具有更高的预测精度; 用两种预测模型预测了长株潭地区的人均生态容量, GM(1,1) 模型的预测精度更高。选取精度最高的模型分别预测研究区未来 10a 人均生态足迹和生态容量。未来 10a 人均生态容量增长平缓(年平均增长率 1.8%), 人均生态足迹增长快(年平均增长率达 16%), 相应的人均生态赤字增长快。

关键词: 生态足迹; 最小二乘法; GM 模型; 长株潭地区

Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region: a prediction study

DAI Yanan*, HE Xinguang

College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract: This study calculated the ecological footprint and ecological capacity in Chang-Zhu-Tan region from 1986 to 2005 through adjusting the yield factors' parameters of ecological footprint, which uses the global yield factor instead of the regional one. The results showed that the ecological footprint per capita generally increased, increasing dramatically by 15% each year from 2002 to 2005, and meanwhile the ecological capacity per capita grew gradually and slightly with an annual increase of 2.5%. Similar to the conditions of ecological footprint per capita, the ecological deficit per capita remained steady in the early stage but rose greatly from 2003 to 2005 with an annual increase of 48%. Overall, the ecological footprint expanded much faster than the ecological capacity, bringing out fast growth of ecological deficit. Based on this, we then forecasted the ecological footprint and capacity of Chang-Zhu-Tan region between 2007 and 2015 and fit the relationship between the ecological footprint and time there in the 20 years between 1986 and 2005 in this study. The two methods utilized in this process were the Binomial Curving Forecasting Model and the Grey GM (1.1) Model. When the Grey GM (1.1) Model was used, the average relative error rate of the predicted values of the ecological footprint per capita between 1996 and 2005 was 4.91% while it was 4.41% in the case of Binomial Curving Forecasting Model. Furthermore, the two models were also used in predicting the ecological capacity per capita there during the same time period. It was observed that the average absolute error rate and average relative error rate of the Binomial Curving Forecasting Model were 0.67% and 2.12%, respectively, while they were as 0.53% and 1.67% for the Grey GM (1.1) Model. Thus, it can be concluded that, in the prediction of ecological footprint of Chang-Zhu-Tan region, the Binomial Curving Forecasting Model performance much better compared to the Grey GM (1.1) Model. However, it was inverse when the two models were used

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40871043, 41140004); 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ6034); 湖南师范大学人文地理学校级重点学科项目

收稿日期: 2011-11-15; 修订日期: 2012-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: echo76cn@yahoo.com.cn

to predict the ecological capacity per capita there.

In addition, the two models were used to predict the ecological footprint per capita and the ecological capacity per capita in Chang-Zhu-Tan region from 1999 to 2005. It has to be noted here when the Binomial Curving Forecasting Model was used to predict ecological footprint, the the Grey GM (1, 1) Model was used for calculating the ecological capacity per capita. The results showed that the ecological capacity per capita will grow gently with an annual increase of 1.8% while the ecological footprint per capita will grow much faster with an annual growth of 16%, producing rapid growth of ecological deficit per capita. Although the amount of ecological deficit per capita was initially low, it rose rapidly, equaling to that of ecological capacity per capita in 2009. And in 2015, the amount of ecological deficit per capita in Chang-Zhu-Tan region will be 1.67 times more than the ecological capacity per capita. The ecological footprint will exceed the ecological capacity and fall behind the demand, bringing about increasing serious ecological deficit, as well as restrain the regional development greatly. Therefore, the solution to this coming problem might be to import sufficient resources outside the region to make up for the ecological deficit and keep the ecology developing in a sustainable way.

Key Words: ecological footprint; least square method; GM(grey model) Model; Chang-Zhu-Tan Region

加拿大科学家 Rees 和他的博士生 Weckernagel 提出的生态足迹^[1-2], 广泛应用于可持续发展研究^[3-5]。被引入国内后, 也已成为衡量地区可持续发展程度的指标之一^[6-9], 比其他可持续发展测度指标相比更具操作性及可重复性。作为一种应用方法, 生态足迹模型也是不断改进和完善, 时间序列分析法^[10]、能值生态足迹方法^[11]、改进化石能源生态足迹算法等^[12]。生态足迹的变化受人口、土地、科技、管理等众多社会、经济及自然因素影响, 具有复杂的非线性特征, 且时空上具多尺度特性, 时间序列也多是而非平稳数据。单一方法时间序列分析方法不能全面地提取影响要素变化的自然变率, 亦不能有效揭示不同时间尺度变化的基本形态, 多种分析方法有机结合, 相互印证, 可达到更好的分析效果。

1 研究区概况及研究方法

1.1 长株潭地区概况

长株潭地区包括长沙、株洲、湘潭三市, 地理位置位于东经 111°58'38"—114°13'20", 北纬 26°18'19"—28°41'22", 处于湖南省东北部, 属亚热带季风湿润气候区, 多年平均降水量 1427mm, 全年 1 月最冷, 月平均气温 4.4—6.1℃; 境内地貌包括平原、岗、丘、山地等类型。三市呈“品”字形分布, 面积 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 常住人口 1300 万, 经济总量 2818 亿元, 分别占湖南全省的 13.3%、19.2%、37.6%, 是湖南省经济发展的核心增长极^[13]。

1.2 数据来源

1986—2005 年 20a 三市的国民经济统计工作是独立展开, 本文的数据搜集工作是先收集三市各自的统计资料, 再汇总在一起的。资料来源有: 长沙统计年鉴(1987—2006 年)^[14], 株洲统计年鉴(1987—2006 年)^[15], 湘潭统计年鉴(1987—2006 年)^[16], 湖南统计年鉴(1987—2006 年)^[17]。

1.3 研究方法

1.3.1 传统生态足迹模型计算方法^[1]

生态足迹理论基于两个重要的理论假定^[18]。第一, 能够计算出人类消费的大多数资源和人类产生的大多数废弃物。第二, 这些资源和废弃物能够被转换成产生这些资源和同化这些废弃物的生产性土地面积。生态足迹的计算, 是按生物资源消费和能源消费两部分分类进行统计和计算, 并把两大类消费折算成六大类生态生产性土地: 可耕地、林地、牧草地、水域、建设用地及化石能源地。为了便于区域之间同类生态生产性土地能进行对比, 引入产量因子调整; 为了获得区域内总的生态足迹, 汇总区域的生态生产力, 又引入等价因子。具体计算公式为:

$$EF_j = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{EP_i/yF_i} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i + I_i - E_i}{EP_i} \times yF_i = \sum_{i=1}^n \frac{P_i + I_i - E_i}{EP_i} \quad (1)$$

$$yF_i = \frac{EP_i}{EP} \quad (2)$$

$$EF = \sum_{j=1}^m EF_j \times eF_j \quad (3)$$

式中, EF_j 为第 j 类消费项目折算的生态生产性面积(hm^2); $j=0, 1, 2, 3, 4, 5$ 分别为化石能源地、可耕地、牧草地、森林、水域、建成地; $i=1, 2, \dots, n$ 为消费品类型, 如: 水稻、小麦等; C_i 为第 i 类消费项目的总消费量(kg); EP_i 为第 i 类消费项目的年平均产量(kg/hm^2); P_i 为第 i 类消费项目的年生产量(kg); I_i 为第 i 类消费项目年进口量(kg); E_i 为第 i 类消费项目的年出口量(kg)。考虑到贸易因素, 本地实际资源消耗量 = 资源生产量 + 资源进口量 - 资源出口量。 yF_i 为产量调整因子; eF_j 为每类生态系统面积的等量化因子; EF 为汇总生态足迹(hm^2)。

生态容量的计算采用资源产出法方法, 根据生态足迹公式有:

$$A_{Ca} = \sum_{j=0}^5 \sum \frac{P_i}{EP_i} \times eF_j \quad (4)$$

式中, A_{Ca} 为生态容量(g hm^2); P_i 为当地第 j 类生态生产性土地中第 i 种生态产品的资源生产量(t); $\overline{EP_i}$ 为当地第 j 类生态生产性土地中第 i 种生态产品全球单位产量(t/hm^2)。

生态赤字(盈余)为生态足迹减去生态容量的差值, 负值表示盈余, 表明该地区的人类负荷处于本地区所提供的可控生态容量之内, 处于生态可持续状态; 差值为正值, 则表明该地区处于生态不可持续状态。

1.3.2 改进生态足迹参数模型

为反映当地的真实情况, 考虑当地的土地利用情况、土壤情况、气候(如降水和气温变化)差异及农业技术(如袁隆平对杂交水稻培育的不断突破)等对各类生物资源产量的影响, 本研究把生态足迹公式(1)中的 $\overline{EP_i}$ 改为研究区的第 i 类消费项目的平均产量 $\bar{P}_i$ 。因本文研究目的是通过长株潭地区过去生态足迹及生态赤字的研究来反映区域可持续情况, 并不涉及与其他地区的对比, 因此不采用产量调整因子, 又因为很难找到一个合理的均衡因子使得各类不同的生态占用被同度量化, 而且同度量化后的数据含义也发生了变化, 这时的加权总量指标很难说还是与地球空间相关联的生态空间, 因此也不采用等量化因子。

所以本文中把生态足迹的计算公式改进如下:

$$EF_j = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{\bar{P}_i} = \sum_{i=0}^n \frac{P_i + I_i - E_i}{N \times \bar{P}_i} \quad (5)$$

$$EF = \sum_{j=0}^5 EF_j \quad (6)$$

式中, $\bar{P}_i$ 表示第 j 类生态生产性土地中第 i 种生态产品的当地平均产量(t/hm^2); EF 为最后汇总的生态足迹, 仍考虑贸易因素。

生态容量的计算公式作了如下改进。

$$A_{Ca} = \sum_{j=0}^5 \sum \frac{P_i}{\bar{P}_i} \quad (7)$$

生态赤字的意义同传统生态足迹方法中的计算, 用改进后的生态足迹及生态容量进行差值计算。

2 1986—2005 年长株潭地区生态足迹结果分析

根据公式(5)及公式(6), 得到长株潭地区 1986—2005 年人均生态足迹。1986 年到 2002 年, 人均生态足迹随着时间缓慢上升, 中间 1995 年有一个较高的值, 而从 2002 年到 2005 年, 人均生态足迹增长比较快。具

体的变化情况将结合人均生态容量和人均生态赤字一起分析。

根据公式(7)计算得出长株潭地区 20a 来的人均生态容量,综合人均生态足迹,人均生态容量,相应得出人均生态赤字,通过曲线图来表示三者随时间变化的趋势(图 1)。人均生态足迹总的变化趋势是增长的,2002—2005 年人均生态足迹变化剧烈,年平均增长率达 15%。1986—2005 年的人均生态容量的变化特点是平稳中略有上升,特别是 2000—2005 年期间有增长趋势,年平均增长率为 2.5%;人均生态赤字的变化趋势与人均生态足迹相似,1986—2002 年变化平稳,2003—2005 年增长剧烈,年平均增长率达 48%。虽然生态足迹和生态容量在 2000 年来都有增长,但是生态足迹增长速度远远快于生态容量,导致生态赤字也快速增长。

3 长株潭地区人均生态足迹预测

3.1 二项式曲线预测模型的建立及检验

利用软件 MATLAB 6.0 的编程功能,以长株潭地区 20a 的人均生态足迹值为基础实际值,初步选定二次函数来建立预测模型:

$$\begin{aligned} Z(1) &= 0.333694908; Z(2) = 0.340204318; Z(3) = 0.349382902; Z(4) = 0.327300427 \\ Z(5) &= 0.329706805; Z(6) = 0.336068254; Z(7) = 0.326176767; Z(8) = 0.350153003 \\ Z(9) &= 0.330112873; Z(10) = 0.379843689; Z(11) = 0.30547184; Z(12) = 0.315478734 \\ Z(13) &= 0.327929011; Z(14) = 0.342760358; Z(15) = 0.354011616; Z(16) = 0.376285684 \\ Z(17) &= 0.374715563; Z(18) = 0.425978261; Z(19) = 0.484121407; Z(20) = 0.563793706 \end{aligned}$$

从 20a 数据中挑选 1991 年(Z(6)),1993 年(Z(8)),1999 年(Z(14))和 2001 年(Z(16))4a 的人均生态足迹作为数组,利用 16a 人均生态足迹获得预测模型的参数,得到模型(8):

$$Z = 0.001780243 \times x^2 - 7.098957 \times x + 7077.313 \quad (8)$$

建立模型后需要检验模型预测的效果,用预测模型 8 选出 4a 的人均生态足迹进行预测,对比实际值和预测值,两者的绝对误差百分比为<5%,相对误差百分比<12.4%,平均相对误差为 6.33%,说明预测值和实际值很接近,预测结果好,建立的预测模型具较高精度。利用模型 8 对长株潭地区 1986—2005 年的人均生态足迹进行预测,得到 20a 的预测值,进行预测值和实际值误差分析(图 2),预测值与实际值之间的平均绝对误差百分比为 0.02%,平均相对误差百分比为 4.41%,再次说明预测模型的预测效果好。

3.2 长株潭地区人均生态足迹 2006—2015 年预测

根据前面模型的建立和检验,模型(8)预测精确度高,预测效果好。因此,可以利用该模型来预测长株潭地区人均生态足迹未来的发展情况,模型 8 预测 2006—2015 年人均生态足迹情况,具体结果见图 3,人均生态足迹由 2006 年的 $0.5672 \text{ hm}^2/\text{人}$,到 2015 年增长为 $1.1018 \text{ hm}^2/\text{人}$,年平均增长率为 7.66%。

3.3 灰色预测模型的建立和预测

灰色系统分析方法是通过对鉴别系统因素之间发展趋势的相似或相异程度,即进行关联度分析,并通过对原始数据的生成处理来寻求系统变动的规律。生成数据序列有较强的规律性,可以用它来建立相应的微分方程模型,从而预测事物未来的发展趋势和未来状态。

灰色预测方法的共同特点是:(1)允许少样本(数据)预测;(2)允许对灰因果律事件进行预测,(3)具有可检验性。本文采用 GM(1,1)模型来预测长株潭地区 2006—2015 年的人均生态足迹发展趋势。

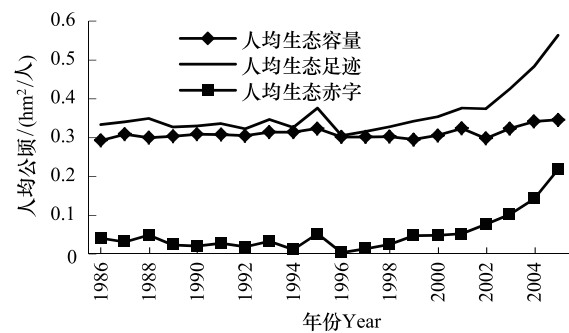


图 1 长株潭地区近 20 年历年人均生态足迹等分布时序图

Fig. 1 Ecological footprint, ecological capacity and ecological deficit of Chang-Zhu-Tan from 1986 to 2005

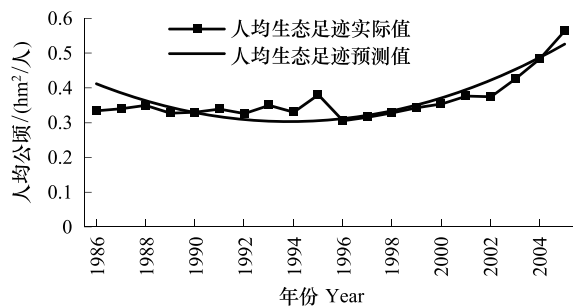


图2 长株潭地区1986—2005年人均生态足迹预测曲线

Fig. 2 The forecasting curve of per ecological footprint from 1986 to 2005 in Chang-Zhu-Tan

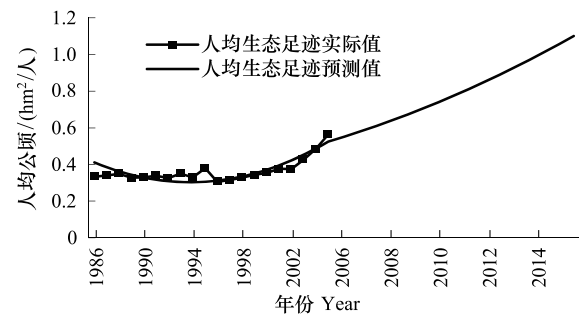


图3 长株潭地区1986—2015年人均生态足迹预测曲线

Fig. 3 The forecasting curve of per ecological footprint from 1986 to 2015 in Chang-Zhu-Tan

3.3.1 GM(1,1)模型建模思路

把一个随时间变化的数据序列通过1-AGO,生成新的数据列,然后根据灰微分方程的白化方程的解,还原后即得灰色GM(1,1)预测模型。如下列模型

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (10)$$

一般是得出预测模(9),但是这个模型得出的值还是生成序列的预测值,而要最终得到原序列的值,还需要经过模型(10)的计算过程。

预测模型还要经过精度检测来判断其效果的好与差。一般来说,GM(1,1)模型的检验通过后验差检验即对残差分布的统计特性来判断效果,通过方差比C和小残差概率P的值来判断。

表1 后验差检验判别参照表

Table 1 After-test residue checking distinguish list

小残差概率P Probability of residual error	方差比C Variance ratio	模型精度 Accuracy of model
>0.95	<0.35	优
>0.80	<0.5	合格
>0.70	<0.65	勉强合格
<0.70	>0.65	不合格

3.3.2 长株潭地区人均生态足迹GM预测模型的建立

建立GM(1,1)模型遵循定3个原则:(1)原始序列 $X^{(0)}$ 中的数据不一定要全部用来建模,对原始数据的取舍不同,可得不同模型,即a和b不同。(2)建模的数据取舍应保证建模序列等时距、相连,不得有跳跃出现。(3)一般建模数据序列应当由最新的数据及其相邻数据构成。在对长株潭地区人均生态足迹已有数据处理过程中,发现选择1996—2005年的数据建立的模型效果最好。所以建立的长株潭地区人均生态足迹GM(1,1)预测模型的数据用1996—2005年10年的数据。

利用软件DPS6.55,获取模型参数 $a = -0.079316$, $b = 0.243741$,从而建立GM(1,1)预测模型:

$$x(t+1) = 3.378532e^{0.079316t} - 3.073060 \quad (11)$$

根据GM(1,1)模型的建立的思路,预测长株潭地区1996—2005年人均生态足迹,预测模型的平均相对误差百分比4.91%,不超过5%,说明预测模型精度高,其次,预测模型的方差比 $C = 0.2735$,小残差概率 $P = 1.0000$,都落在模型精度检验精度优范围,所以判断所建预测模型效果很好。因此利用GM(1,1)模型(11)来预测长株潭地区未来10人均生态足迹的变化情况,通过预测曲线来直观表达,见图4,2006年人均生态足迹

为 $0.5694\text{hm}^2/\text{人}$, 到 2015 年增长到 $1.1627\text{hm}^2/\text{人}$, 年平均增长率达 16%。

3.3.3 两种预测模型对比分析

采用两种不同预测模型对长株潭地区人均生态足迹进行预测, 两种预测效果见图 5。

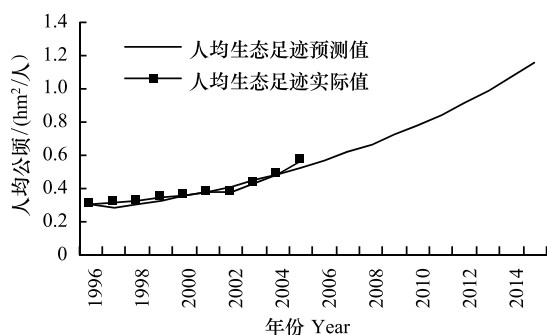


图4 长株潭地区 1986—2015 年人均生态足迹预测曲线

Fig. 4 The forecasting curve of per ecological footprint from 1986 to 2015 in Chang-Zhu-Tan

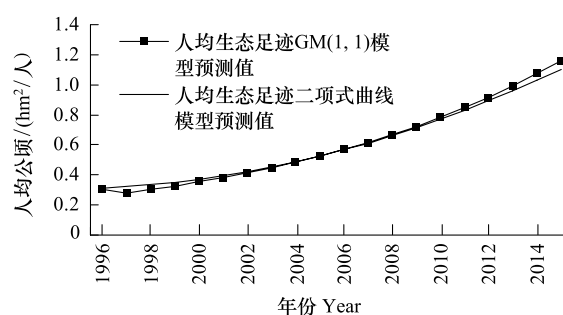


图5 两种预测方法下长株潭地区 2006—2015 年人均生态足迹预测曲线

Fig. 5 The forecasting curve of per ecological footprint from 2006 to 2015 with two different methods

图中的两条曲线吻合程度非常高, 再次验证采用两种预测方法都比较合理, 效果好; 对两种方法预测的误差比较, GM(1,1)模型预测的 1996—2005 年预测值和实际值的平均相对误差是 4.91%, 二项式曲线预测模型预测值和实际值的平均相对误差是 4.41%, 从误差比较这一细微差别分析, 两种方法中二项式曲线预测模型具有更高的预测精度, 本文采用二项式曲线预测模型来预测的长株潭地区 2006—2015 年人均生态足迹。

4 两种方法预测长株潭地区人均生态容量

4.1 二项式预测模型构建、检验及应用

基本思想同前面最小二乘方法, 利用 MATLAB 软件的编程功能, 基于长株潭地区 1986—2005 年的人均生态容量数据, 构建预测模型。

首先从 20a 人均生态容量数据中挑选 1991 年, 1993 年, 1999 年和 2001 年 4a 的数据作为缺省值, 利用剩余 16a 人均生态足迹获得预测模型的参数, 得到模型 (12):

$$Z = 0.0001915189 \times x^2 - 0.7625995x + 759.4408 \quad (12)$$

利用模型 12 对缺省的 4a 的人均生态容量进行模型的检验, 得到 4a 的预测值与实际值的绝对误差不大于 0.01, 相对误差不超过 3.75%, 因此模型检验得出模型精确度高。

利用模型对长株潭地区 1986—2005 年人均生态容量进行预测, 并检验预测值与实际值的预测情况, 对比实际值和预测值之间的误差范围, 从两者的绝对误差看, 全部都小于 0.02, 相对误差最大为 5.74%, 由预测值和实际值之间的误差分析得出, 模型 (12) 预测效果好。

利用通过检验的预测模型进一步来预测长株潭地区人均生态容量未来 10a (2006—2015 年) 的变化趋势。从图 6 中看出, 未来 10 人均生态容量的变化总体是增长, 趋势平稳, 2006 年人均生态容量为 $0.3451\text{hm}^2/\text{人}$, 到 2015 年为 $0.4126\text{hm}^2/\text{人}$, 年平均增长率为 2%。

4.2 GM(1,1)模型的建立、检验及应用

灰色理论和思想与前文一样, 基于长株潭地区 1986—2005 年人均生态容量为基础, 利用 DPS6.55 软件, 先用 20a 的数据来获取模型, 并根据检验结果判断模型是否可行, 利用 20a 数据, 先后建立了多个模型, 发现检验的时候方差比和小残差概率的值都不能达到合适的要求, 建立的模型都不合格, 每次排除一个模型就减少一个数据, 而且根据 GM 建模原则, 是从最老的数据剔除开始, 一直剔除到 1996 年, 根据 1996—2005 年的数据建立的模型, 在检验模型的时候, 方差比和小残差概率的值都落在优的范围。获取的参数为 $a = -0.018277$, $b = 0.287941$, 建立模型:

$$X(t+1) = 16.056141e^{0.018277t} - 15.754314 \quad (13)$$

通过对 1996—2005 年人均生态容量的预测,实际值和预测值的绝对误差不超过 0.0072,相对误差不超过 2.40%,从这两个值看出实际值和预测值之间的预测程度非常高;检验模型的方差比和小残差概率值,方差比 $C(0.299) < 0.35$,小残差概率 $P(1) > 0.95$,通过检验,预测效果好。

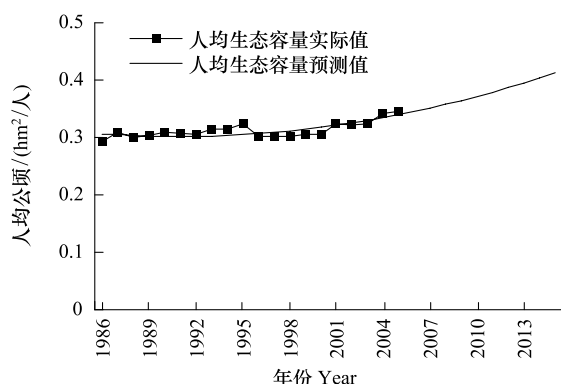


图 6 长株潭地区 1986—2015 年人均生态容量预测曲线

Fig. 6 The forecasting curve of per ecological capacity from 1986 to 2015 in Chang-Zhu-Tan

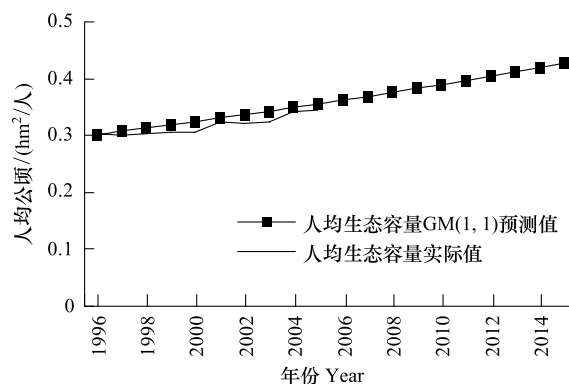


图 7 长株潭地区 1996—2015 年人均生态容量的 GM(1,1) 预测情况

Fig. 7 The forecasting curve of per ecological capacity from 1996 to 2015 in Chang-Zhu-Tan

通过建立模型(13),并通过了模型检验,因此可以利用模型(13)来预测长株潭地区人均生态容量未来 10a 的发展情况。直观用图来表达预测情况,见图 7。

从图 7 中看出,未来 10 人均生态容量的变化总体呈增长趋势,2006 年人均生态容量为 $0.3621 \text{ hm}^2/\text{人}$,到 2015 年为 $0.4268 \text{ hm}^2/\text{人}$,年平均增长率为 1.8%。

4.3 两种方法预测人均生态容量的对比分析

对比两种方法对未来 10 年人均生态容量预测结果,两种预测模型都通过了检验,预测的效果佳,对比两种模型预测结果是否一致。把两种方法预测的数值做成曲线图来分析趋势。

从图 8 看,两曲线伸展趋势一致,存在较好的预测关系。再对比两种预测结果的误差,二项式模型预测的 1996—2005 年的人均生态容量的绝对平均误差为 0.67%,相对平均误差为 2.12%;GM(1,1)模型预测产生的绝对误差 0.53%,相对平均误差为 1.67%,因此无论是绝对平均误差还是相对误差,GM(1,1)模型的预测精度显得更高,因此本文优选 GM(1,1)模型。

5 结论

根据二项式模型预测的长株潭地区 2006—2015 年人均生态足迹及 GM(1,1)模型预测的人均生态容量的结果,分析未来 10a 的人均生态赤字情况,人均生态容量年平均增长率 1.8%,而人均生态足迹年平均增长率达 16%,因此人均生态赤字增长快,人均生态赤字迅速增长到人均生态容量的 1 倍(2009 年),甚至 1.67 倍(2015 年)。长株潭地区人均生态足迹的发展将越来越超出人均生态容量,生态赤字越来越大,而这对于区域的发展是巨大的制约,维持正常的发展就必须从外界输入大量的资源以平衡生态足迹,弥补生态赤字。

利用历史数据对未来做出预测,其中就暗含了各种影响因素的惯性变化,即不考虑未来经济技术的提高或者政策或规划等方面的影响。生态足迹和生态容量的发展和变化,受诸多因素的影响,促使其变化复杂异

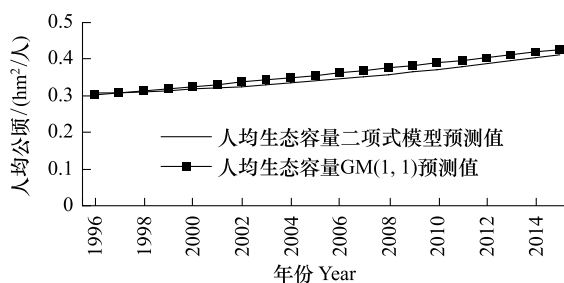


图 8 两种方法预测的长株潭地区 1996—2015 年人均生态容量曲线对比图

Fig. 8 The forecasting curve of per ecological capacity from 1996 to 2015 in Chang-Zhu-Tan with two different method

常,本文的预测都是基于假定将来的人口增长速度、人们的消费方式、经济技术水平、能源需求和土地利用方式等都按近年趋势发展。但在区域的发展过程中,社会、经济等各方面的诸多因素都会随着时间发生变化,都将对区域的消费方式、土地利用方式及资源利用等产生影响,也将影响到区域的生态足迹和生态容量,进而影响到生态赤字。因此基于不同经济、社会和技术等发展情况探讨不同情景下长株潭地区生态足迹等发展趋势将是此研究的后续。

致谢:贺新光副教授对写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 30-100.
- [2] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, 1996, 17(3): 195-215.
- [3] Ponthiere G. The ecological footprint: an exhibit at an intergenerational trial? *Environment, Development and Sustainability*, 2009, 11(4): 677-694.
- [4] Wood R, Lenzen M. Principal methodological approaches to studying sustainable consumption: scenario analysis, ecological footprints and structural decomposition analysis. *Eco-Efficiency in Industry and Science, Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, IV, 2009, 23: 285-312
- [5] Carlei V, Colantonio E, Furia D, Mattoscio N. Economic patterns of sustainable development: an analysis of absolute ecological footprint through self-organizing map. *Quality and Quantity*, 2011, 45(1): 157-171.
- [6] Li J, Ren Z Y, Zhou Z X. Quantitative analysis of the dynamic change and spatial differences of the ecological security: a case study of Loess Plateau in northern Shaanxi Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(2): 251-256.
- [7] Xie G D, Lu C X, Cheng S K, Zheng D. Evaluation of natural capital utilization with ecological footprint in China. *Resources Science*, 2001, 23(6): 20-23.
- [8] Liu D, Feng Z M, Yang Y Z, You Z. Spatial patterns of ecological carrying capacity supply-demand balance in China at county level. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(5): 833-844.
- [9] Chen C Z, Lin Z S, Liang R J. Analysis of ecological sustainability in china based on the ecological footprint method. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(2): 230-236.
- [10] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, Haberl H, Schulz N B. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961—1999: comparing the conventional approach to an “actual land area” approach. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 261-269.
- [11] Zhang Y G, Lin Z S, Li M L, Liang R J. Prediction on the dynamics of ecological footprint and ecological capacity based on EMD in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 5027-5032.
- [12] Xie H Y, Chen X S, Lin K R, Hu A Y. The ecological footprint analysis of fossil energy and electricity. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1729-1735.
- [13] http://www.hunan.gov.cn/zhuanti/cztlxsh/bjjs/gk/200801/t20080111_93918.htm.
- [14] Changsha Statistics Bureau. *Changsha Statistical Yearbook (1987—2006)*. Beijing: China Statistical Publishing House, 1987—2006.
- [15] Zhuzhou Statistics Bureau. *Zhuzhou Statistical Yearbook (1987—2006)*. Zhuzhou: Zhuzhou Statistical Publishing House, 1987—2006.
- [16] Xiangtan Statistics Bureau. *Xiangtan Statistical Yearbook (1987—2006)*. Xiangtan: Xiangtan Statistical Publishing House, 1987—2006.
- [17] Hunan Statistics Bureau. *Hunan Statistical Yearbook (1987—2006)*. Beijing: China Statistical Publishing House, 1987—2006.
- [18] Wackernagel M, Yount J D. The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability, *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 51(1/2): 511-529.

参考文献:

- [7] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁, 郑度. 中国的生态空间占用研究. *资源科学*, 2001, 23(6): 20-23.
- [9] 陈成忠, 林振山, 梁仁君. 基于生态足迹方法的中国生态可持续性分析. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 230-236.
- [11] 张衍广, 林振山, 李茂玲, 梁仁君. 基于 EMD 的中国生态足迹与生态承载力的动力学预测. *生态学报*, 2008, 28(10): 5027-5032.
- [12] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 胡安焱. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹. *生态学报*, 2008, 28(4): 1729-1735.
- [14] 长沙市统计局. *长沙统计年鉴(1987—2006 年)*. 北京: 中国统计出版社, 1987—2006.
- [15] 株洲市统计局. *株洲统计年鉴(1987—2006 年)*. 北京: 中国统计出版社, 1987—2006.
- [16] 湘潭市统计局. *湘潭统计年鉴(1987—2006 年)*. 北京: 中国统计出版社, 1987—2006.
- [17] 湖南省统计局. *湖南统计年鉴(1987—2006 年)*. 北京: 中国统计出版社, 1987—2006.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《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 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 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