

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **2014**

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 34 卷 第 11 期 2014 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)

基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)

西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)

青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)

黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)

三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)

三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)

流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)

江西省自然保护区发展布局空缺分析 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)

鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 黄和平,彭小琳 ,孔凡斌,等 (3107)

基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2014-06



封面图说: 三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

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/stxb201303140423

刘庚,毕如田,权腾,李发生,郭观林.某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究.生态学报,2014,34(11):2876-2883.

Liu G, Bi R T, Quan T, Li F S, Guo G L. 3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2876-2883.

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究

刘 庚¹, 毕如田³, 权 腾³, 李发生², 郭观林^{2,*}

(1. 太原师范学院汾河流域科学发展研究中心, 太原 030012;

2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

摘要:为准确界定污染场地土壤中多环芳烃在 3 维条件下的污染分布范围和受污染土方量,选择我国某焦化污染场地苯并(a)芘分布为研究对象,对比研究 Krig-3D、IDW-Shepard、IDW-(Franke/Nielson)以及 Nearest Neighbor 4 种 3 维插值方法对界定污染范围的不确定性影响。结果表明,不同 3 维插值模型计算结果差异较大,交叉验证结果显示 Krig-3D 插值模型插值精度最高,插值结果能较真实地反映场地实际污染情况。通过修复目标对比确定进一步表明,基于 4 种插值模型计算所得的污染土壤土方量分别为 8.51×10^5 、 5.62×10^5 、 7.12×10^5 、 $1.09 \times 10^6 \text{ m}^3$,选择合理的插值模型将对预测污染范围的不确定性产生重要影响。研究结果对分析污染范围和修复治理过程土方量确定提供重要参考。

关键词:土壤;污染场地;多环芳烃;地层建模;三维插值

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China

LIU Geng¹, BI Rutian³, QUAN Teng³, LI Fasheng², GUO Guanlin^{2,*}

1 Fenhe-Vally Science Development Research Center, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030012, China

2 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3 School of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract: Contaminated sites are an environmental issue of concern all over the world, especially some large-scale industrial contaminated sites, which are key objects for environmental supervision and risk management in many countries. In recent years, following rapid economic development and adjustments of industrial structure, polluting industrial plants were commonly closed or moved out of developing cities, and the quantity and degree of contamination of the remaining industrial contaminated sites appeared to be rising. Soil contamination of industrially contaminated sites has received widespread attention in China, and not only directly affects the soil physicochemical properties and the environment, but also threatens human health in the contaminated area. Industrial contaminated sites severely restricted the availability of urban land resources for sustainable development. The regional soil environment is an important part of the whole ecological environment system; the original ecological functions and system balance of the regional soil environment was destroyed initially by the industrial contaminated sites. The contaminants in the soils threaten organisms and human health through migration and transformation. The presence of industrial contaminated sites has significant impacts on the sustainable development of the regional economy, reuse of land resources, laws and regulations, and relevant industry standards, which has attracted great attention from the relevant Chinese government departments. Environmental risk management of contaminated sites in China lack fully developed laws or management systems when compared to more developed countries, however, the theoretical basis and technology needed to perfect these is required immediately. According to the management

基金项目:环境保护公益性行业科研专项经费项目(201009015);国家自然科学基金青年基金项目(40901249)

收稿日期:2013-03-14; **网络出版日期:**2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guogl@craes.org.cn

and application requirements in China, new theory and technology research was deemed indispensable. Knowledge of the spatial distribution of available pollutants is critical for risk control, remedial strategy development and for determination of remediation boundaries and soil volumes. Pollution characteristics of contaminated sites are different from general non-point source pollution as they are influenced by human disturbance and accumulative release, forming hotspots that exist in the local region of contaminated sites. Commonly used spatial interpolation methods can provide an unbiased prediction with minimum variance for the concentration of a given pollutant, but the interpolation techniques all have a smoothing effect, which underestimates locally high values and overestimates locally low values. The uncertainty in determining contamination boundaries at contaminated sites is affected by spatial interpolation methods. In order to determine the PAHs pollutant boundary and soil volumes needing restoration, different prediction models had an influence on the uncertainty of determining the polluted boundary. Thus, a large domestic coking contaminated site was selected; four 3D interpolation models of Krig-3D, IDW-Shepard, IDW-(Franke/Nielson), and Nearest Neighbor were employed to compare their reliability and prediction uncertainty. A significant difference between model results was observed, and cross-validation testing indicated that the Krig-3D was more accurate in predicting the actual pollution situation. Referring to the remediation goal, the polluted soil volumes calculated using the four 3D interpolation models were 8.51×10^5 , 5.62×10^5 , 7.12×10^5 , and $1.09 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively. This study, based on typical field site data, provides a great contribution to the analysis of pollution spatial distribution characteristics and determination of remediation soil volumes.

Key Words: soil; contaminated site; PAHs; stratum model; 3D interpolation

污染场地的环境调查、风险评估以及污染分布确定等工作都是基于场地采样样点数据来进行^[1-3], 场地采样样点钻孔数据由于其带有空间坐标信息, 是一种典型的地学变量, 可以进行地学上的相关模拟和预测^[4]。随着计算机技术和空间信息技术的发展, 各种插值模型和地理信息系统等行业软件被广泛应用于污染场地的空间分布预测和污染分布制图^[5-8]。污染场地污染物空间分布的界定和污染修复土方量计算的准确与否对修复方法的选择和修复成本都有着重要的影响^[9]。目前, 污染场地污染物的空间分布范围界定大多基于 2 维平面, 利用场地表层或某单一地层土壤钻孔样点数据, 采用地统计学模型或确定性插值模型进行空间分布预测并进行污染制图^[10-11], 对于单一地层污染空间分布界定能够取得较好的预测效果^[12], 但在整个场地污染范围界定过程中没有考虑到不同地层之间污染物迁移的特性, 受土壤异质性等因素的影响, 预测结果存在着一定的不确定性^[13-14], 不同地层之间误差的累积, 导致最后污染范围的确定和污染土方量的计算存在着误差。

自 20 世纪 90 年代以来, 随着对 3 维空间插值技术的深入研究以及 3 维可视化系统的出现和功能的不断完善, 使得地学空间变量的真实 3 维模拟和 3

维插值成为了可能^[15-16]。3 维空间插值和可视化技术根据地层内的采样点空间分布信息, 可以将区域化变量插值成空间体, 能够获取变量在真实 3 维环境下的空间分布, 使地层建模和 3 维插值技术在相关领域取得了较好的应用效果^[17-20]。通过地层建模和 3 维插值, 可以直观获取污染物的 3 维空间分布信息, 降低 2 维插值模型在高程变化较大地区和污染分布离散性强的地层中产生的预测误差。受不同 3 维插值模型算法及适用范围等因素影响, 不同插值模型对污染范围的界定存在一定的不确定性, 因此选取最优插值模型, 有效规避对预测结果的不确定性影响, 对准确界定污染场地污染范围和受污染土壤土方量具有重要的理论和实际意义。本研究以某典型焦化企业污染场地为目标研究区域, 选择场地中特征污染物 Bap(苯并(a)芘, Benzo(a)pyrene)为研究对象, 对比研究不同 3 维插值模型对预测土壤中 Bap 分布范围界定不确定性的影响, 为场地修复治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 目标场地特征描述

本研究目标污染场地所在地区曾是北京市以化工行业为主的工业区, 随着污染企业的转型和改造

搬迁,该焦化企业也已关停,周边土地利用类型逐渐改为公建与居住用地。该焦化企业曾是我国规模最大的独立炼焦化学工业企业之一,是国内最大的商品焦炭供应和出口基地,主要为大型冶金、化工企业提供各种规格的优质焦炭,在建厂初期生产工艺技术条件和污染治理水平所限,环境污染相对较严重,其中不乏对人体有害和致癌物质排放,对焦化厂厂区和周围环境造成一定影响。该焦化厂总面积 1.35 km²,主要生产车间包括备煤分厂、炼焦一分厂、二分厂、三分厂、筛焦分厂、回收一分厂、二分厂、煤气精制分厂、精苯分厂、焦油分厂等。产品包括焦炭、焦炉煤气,同时还生产焦油、苯、硫铵、沥青、萘等 40 多种化工产品。通过场地的初步环境调查,确定多环芳烃为场地内特征污染物。

1.2 土壤钻孔数据的采集与化验分析

根据对目标场地的实地考察,结合原有水文地质和岩土工程勘察资料,将本场地内最大勘探深度 19.30 m 范围的土层划分为人工堆积层和第四纪沉积层两大类,并按地层岩性及其物理力学性质指标,进一步划分为 6 个土层,第 1 土层为人工堆积的粘质粉土填土、粉质粘土填土;第 2 土层为粘质粉土、砂质粉土;第 3 土层为粉砂、细砂;第 4 土层为粉质粘土、粘质粉土;第 5 土层为细砂、粉砂;第 6 土层为粉质粘土、粘质粉土。

第 1 次现场采样采用判断布点的原则,其目的是在场地污染识别的基础上,选择潜在污染区域进行土壤布点采样,共布设 64 个土壤采样点;第 2 次现场采样是在第 1 次采样点布设的基础上,采用近似网格布点和判断布点相结合的方法,目的是全面了解场地污染分布情况,判断布点是结合第 1 次采样分析结果,对污染严重区进行加密。鉴于场地中有部分硬化地面和建筑物,两次采样没有完全按照网格布点的方法进行。两次共采集有效土壤样点 114 个。为了判断土壤中污染物含量随深度的变化情况进行不同深度的取样,取样深度为 0.3—17.0 m,每个钻孔的深度根据污染源的情况有所不同。本次采样将取样深度分为 6 层:0.3—1.5 m, 1.5—4.0 m, 4.0—8.0 m, 8.0—10.0 m, 10.0—13.0 m, 和 13—17.0 m。钻探采用本地区常用的 SH-30 型钻机,采样使用原状土取土器按照方案设计深度取土,取土后采样。多环芳烃的测定方法以及质量控制参照

USEPA8270D 标准^[21]。场地污染土壤钻孔采样分布如图 1 所示。

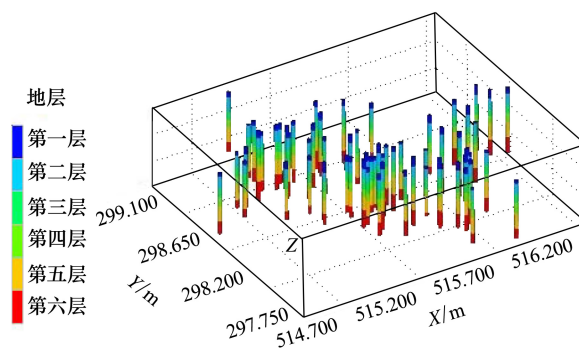


图 1 场地土壤钻孔样点分布

Fig.1 The distribution of soil drilling samples

1.3 插值精度评价方法

本研究选择插值精度评价中常用的交叉验证法来评价各种插值模型的精度,采用平均误差 (ME) 和均方根误差 (RMSE) 作为误差统计指标,ME 越接近于 0, RMSE 值越小,插值精度就越高。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [u(x_i) - u^*(x_i)] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [u(x_i) - u^*(x_i)]^2} \quad (2)$$

式中, $u(x_i)$ 为预测值, $u^*(x_i)$ 为原始样点含量值。

1.4 数据处理方法

本研究对钻孔数据的地层建模、3 维空间插值和 3 维可视化表征均在软件 EVS.Pro 中实现。对钻孔样点数据进行前期预处理,将钻孔数据转换成 EVS.Pro 可读的地层文件,用于构建研究区的地层建模,主要架构过程为,插值地表面及各个地层的底面,每个地层的底面即为下层的顶面,再将每两个相邻的地层间填充为某一地层,结合构建的 3 维地层模型,采用不同的 3 维空间插值方法对污染物钻孔样点含量数据进行 3 维插值和分布表征。

2 结果与分析

2.1 土壤钻孔样点含量数据的统计特征分析

不同地层土壤钻孔样点含量数据的描述性统计特征结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,在每层中样点含量的最小值与最大值差异较大。前 3 层样点含量数据的最大值超标严重,均大于后 3 层最大值的数百倍,表明污染物在场地分布状况受一定迁移

转化因素的影响。将采样样点数据叠加到原厂区平面图上可以看出,样点含量的高值点主要分布在焦油分厂、炼焦分厂等重点污染厂区,在局部区域存在严重污染现象。6 层样点含量数据的偏度和峰度都较大,变异系数均超过了 200%,表明样点含量数据具有很高的偏倚性和空间变异特征。

表 1 场地土壤中多环芳烃污染数据的基本统计特征
Table 1 Descriptive statistics of soil PAHs concentrations

	苯并(a)芘 Benzo(a) pyrene						
	最小值 Minimum/ (mg/kg)	最大值 Maximum/ (mg/kg)	平均值 Mean/ (mg/kg)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient of Variation	标准差 Standard deviation/ (mg/kg)
第 1 层 First strata	0.01	172.00	7.30	4.44	20.84	3.57	26.08
第 2 层 Second strata	0.01	95.20	3.72	5.34	28.67	4.74	17.64
第 3 层 Third strata	0.01	33.40	1.42	5.19	27.49	4.38	6.22
第 4 层 Fourth strata	0.01	0.44	0.034	4.24	18.71	2.53	0.086
第 5 层 Fifth strata	0.01	0.85	0.06	3.72	13.09	3.17	0.19
第 6 层 Sixth strata	0.01	0.28	0.026	4.33	20.46	2.00	0.052

2.2 污染场地的三维地层建模

在污染场地土壤及地下水调查中,仅依靠柱状图或 2 维平面图提供的信息,不能完全满足获取整个场地地层分布状况的需求,通过钻孔数据可以获得钻孔样点的准确地层分布信息,但受钻孔样点个数的限制,并不能掌握整个场地的地层状况,通过有限的钻孔样点进行建模,是模拟整个场地地层分布的主要手段,因此,3 维地层建模技术在污染场地的环境调查中具有很强的技术优势,通过构建 3 维地层模型,可以快速获取不同地层的分布状况和分布规律,加强对场地地质特征的认识,同时也可以辅助分析污染物在不同地层的分布和迁移规律。为说明钻孔样点数据对模拟地层几何体的过程,将钻孔高程数据与地层几何体显示在同一坐标系当中。根据本焦化场地的钻孔样点数据,首先提取出不同层的高程点,在 EVS.Pro 中通过 Post sample 模块生成钻孔样点分布图,3D Geology 模块可以读取记录土壤类型的钻孔数据文件,自动进行空间网格 grid 的划

分,创建不同地层,地层属性包括土壤类型、高程等,Geologic surfaces 模块用来接收 3D geology 模块生成的网格,节点模型,展现地层的曲面,通过上述方法构建的底层模型即第 6 层粉质粘土、粘质粉土层如图 2a 所示,同样方法,建立不同层的层面,根据初步地质调查结果,本场地内地层岩性较好,相邻土层之间没有空隙,对相邻土层之间进行填充,即可获得上层的地层模型,同理可构建不同土层的层面模型,最终形成了场地不同土层的 3 维地层建模,如图 2b 所示,图 2b 中从上到下蓝色、浅蓝、浅绿、绿色、橙色、红色分别代表粘质粉土填土、粉质粘土填土层;粘质粉土、砂质粉土层;粉砂、细砂层;粉质粘土、粘质粉土层;细砂、粉砂层和粉质粘土、粘质粉土层。通过地层建模,可以实现地层的 3 维立体显示和查看,也可以在任意方向对地质体截取切片,了解地质结构在不同平面上的分布特征,结合特征污染物的 3 维插值结果,通过切片的截取,能够显示污染物在不同剖面上的污染情况。

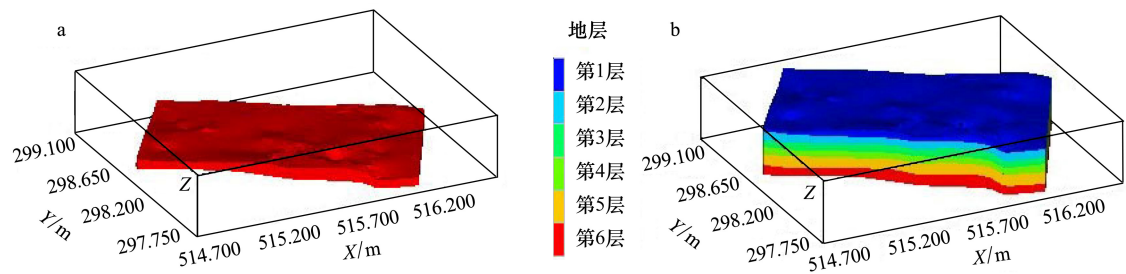


图 2 场地不同地层的三维地层模型
Fig.2 3D stratum model of the contaminated site

2.3 不同插值模型的 3 维空间插值结果

在对场地污染土壤钻孔数据预处理以及 3 维体模型构建基础上,选用该建模系统中 Krig-3D、IDW-Shepard、IDW-(Franke/Nielson)以及 Nearest Neighbor 4 种 3 维插值方法,对 Bap 的钻孔样点含量数据进行 3 维插值。应用克里格模型插值之前,需要对待插值数据进行半变异函数的拟合,根据理论半变异函数拟合的结果,对特征污染物进行 3 维空间插值计算。苯并(a)芘 Bap 污染含量钻孔数据最终 3 维插值结果如图 3 所示。从污染物的 3 维空间插值分布图可以看出,4 种方法的插值结果差异较大,图 3d 中显示表层污染严重区域最大,图 3a、3c、3b 次之,表明污染插值结果受插值方法的影响较大。通过切片显示

可以看出,第 2 层的插值结果具有和表层相同的规律。污染严重区域的钻孔样点为本场地高风险的集中点,4 种插值结果的污染超标严重区域主要集中在场地的中下部,结合该焦化厂原有厂区平面布局图以及历史生产活动可知,该厂区中下部主要有炼焦分厂和焦油分厂等生产车间,是多环芳烃污染产生的主要原因,个别车间在生产、存储过程中的泄露、遗洒等原因使得局部地区污染严重。另外,污染物在不同地层中也出现不均匀性分布特征,如个别钻孔样点的下层含量超过上层土壤的含量,说明污染物在场地中的分布受累积释放因素以及不同地层迁移特征的影响。

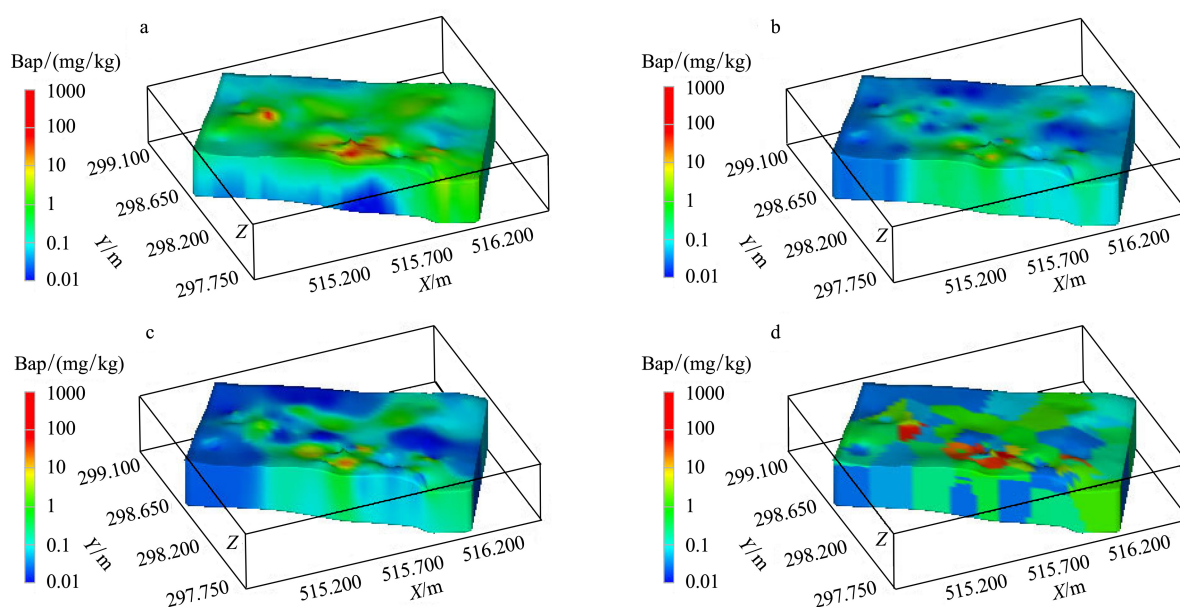


图 3 场地土壤多环芳烃三维空间分布预测

Fig.3 3-Dimensional spatial distribution prediction of soil PAHs

a:采用 Krig-3D; b: IDW-Shepard; c: IDW-(Franke/Nielson); d: Nearest Neighbor 模型计算的 3 维空间插值结果; Bap: 苯并(a)芘 Benzo(a)pyrene

2.4 不同插值模型污染范围界定及土方量估算

对不同插值模型插值结果的内部特征进行统计分析,可以确定污染物在 3 维空间不同地层上的污染分布范围以及污染土方量的估算。EVS.Pro 中的 Plum volume 模块接受插值结果,按照临界值的标准界定出需要表达的污染范围。EVS.Pro 将 3 维应用分析与 ESRI ArcGIS 进行了无缝集成,污染体可通过网格表面的形式在 ArcGIS 中呈现,体现了对数据编辑管理的优势,也可以对污染土壤的边界点进行标示。参照北京市污染场地土壤筛选值所规定的标

准,定义苯并(a)芘 Bap 污染超标的临界值为 0.4 mg/kg,4 种插值模型界定的污染物在不同地层污染超标的范围如图 4 所示。从图 4 可以看出,4 种插值模型界定的污染超标范围主要集中在第 1 和第 2 层上。局部污染严重的区域主要分布在表层土壤中,位于场地中下部,叠加土壤钻孔样点数据,通过不同方向上的切片显示可以看出,含量超标严重的样点均在插值结果中局部污染严重的区域,说明污染物在场地中的分布状况和污染超标范围受场地历史生产、管理布局和污染成因的影响。大气排放是本焦

化场地的主要污染途径,排放产生的污染物通过扩散对整个场地表层土壤产生污染,场地的中下部为回收一分厂、焦油分厂、炼焦分厂等车间,是产生污染的主要原因,因此界定的污染超标范围也主要分布在该区域的表层土壤中,另外,由于储存了含多环芳烃的煤化工产品,储罐渗漏、遗洒也会对表层土壤造成局部严重污染,并可能渗透到下层土壤中。由于多环芳烃在土壤和地下水中很难进行迁移转化,在本场地中其污染主要分布在第 1 和第 2 地层当

中。4 种插值模型界定的污染范围和受污染土壤的土方量差异较大,参照北京市污染场地土壤筛选值所规定的标准,计算 4 种插值模型在场地中污染超标土壤的土方量分别为 8.51×10^5 、 5.62×10^5 、 7.12×10^5 、 $1.09\times 10^6\text{ m}^3$,Krig- 3D 和 IDW-(Franke/Nielson)模型计算受污染土壤土方量较为接近,但 IDW-Shepard 和 Nearest Neighbor 模型计算结果与上述两种模型有较大的偏差。

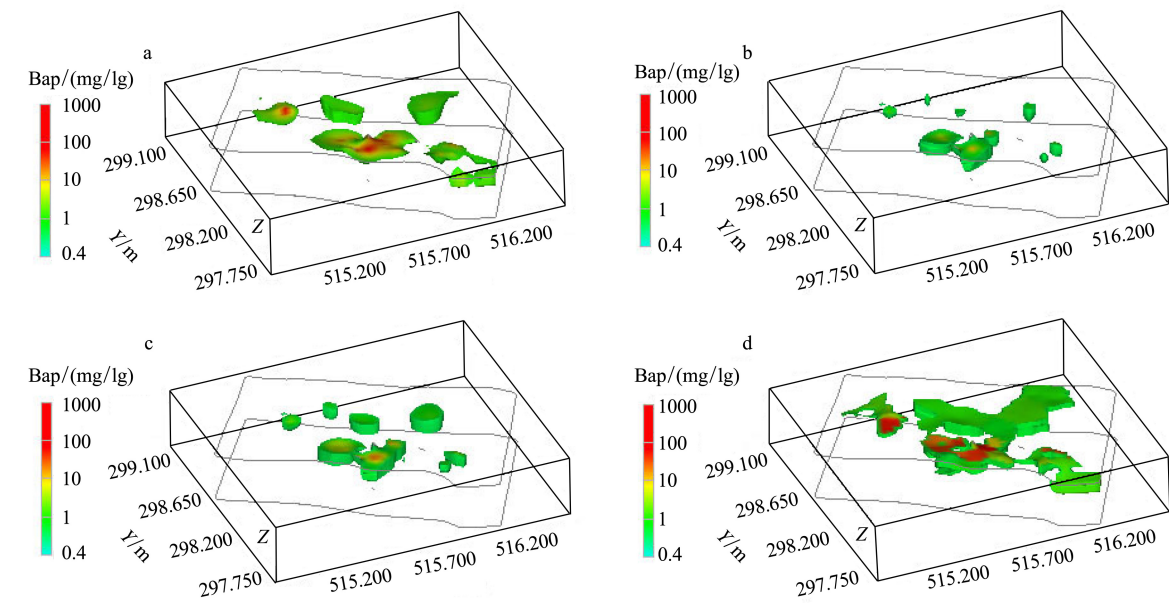


图 4 场地土壤多环芳烃污染污染空间分布范围
Fig.4 Scope of soil PAHs pollution

a: 采用 Krig-3D; b: IDW-Shepard; c: IDW-(Franke/Nielson); d: Nearest Neighbor 模型界定的污染范围; Bap: 苯并(a)芘 Benzo(a) pyrene

2.5 不同插值模型结果的精度验证

不同的插值模型虽然可以应用于该焦化场地污染物的 3 维空间分布预测,但预测的污染范围以及计算出受污染土壤的土方量差异较大,对预测结果产生一定的不确定性,通过对预测结果的精度验证,可以选取最优插值模型,提高预测结果的精度。本

文采用交叉验证方法中的平均值误差 (ME) 和均方根误差 (RMSE) 两个指标来比较不同插值模型的精度。4 种插值模型插值精度的交叉验证结果如表 2 所示。通过交叉验证结果可以看出,Krig- 3D 的 ME 和 RMSE 最小,取得了最高的预测精度,而 Nearest Neighbor 计算出的插值精度最低。插值结果的精度

表 2 不同插值模型的预测误差
Table 2 Mean error and Root mean square error for four interpolation methods

插值模型 Interpolation model	平均值误差/(mg/kg) Mean error	均方根误差/(mg/kg) Root mean square error
三维克里格模型 Krig- 3D	0.36	1.76
反距离加权模型 Inverse distance weighting-Shepard	0.67	2.45
改进的反距离加权模型 Inverse distance weighting-(Franke/Nielson)	0.45	3.62
最近邻点模型 Nearest Neighbor	1.24	4.87

验证表明 Krig-3D 模型界定的污染范围与场地污染的实际情况最为接近,取得了最优的预测效果,其界定的污染范围能够有效指导场地修复范围和开挖边界的确定。相对于其它 3 种 3 维空间插值模型,Krig-3D 模型最适合于本场地土壤多环芳烃的 3 维空间分布预测。

3 结论

利用场地污染土壤的钻孔样点数据进行场地的地层建模并对污染样点含量数据 3 维空间插值,可以实现污染物在真 3 维环境下的污染分布表征,界定污染物在不同地层上的污染范围和受污染土壤的土方量。3 维空间插值及污染分布的可视化可以直观体现污染物在不同地层上的污染特征,以及污染特性在地层间的相互关系和变化规律。

不同插值模型受其算法和场地钻孔数据特征的影响,插值结果存在较大差异。Krig-3D 模型取得了最高的预测精度,能有效降低对预测结果不确定性的影响。界定的污染范围与实际情况较为接近,为场地修复治理和开挖边界的确定提供了重要参考。

地层建模和 3 维插值可视化技术为污染场地的风险评估、修复治理等工作提供了一个新的思路,改变了传统的 2 维平面工作模式,在真 3 维环境下揭示污染物的分布特征和分布规律,能够更为真实掌握污染物在场地土壤中的分布状况,为后续的污染场地修复治理等相关工作提供科学指导。

References:

- [1] Chen H, Zhang G X, Hui H S. Preliminary study on spot setting methods for soil monitoring of the environmental investigation of contaminated sites. *Environmental Protection Science*, 2010, 36 (2): 61-64.
- [2] Wu Y Z, Zhu Q Y, Liu N, Lu G F, Dai M Z, Xia J. Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of Tuocheng county. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1283-1292.
- [3] Zhang H J, Wang X R, Chen C Y, Liu Q, Wang Q. The health risk assessment and remediation guide limit value of typical chromium slag contaminated sites. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(7): 1445-1450.
- [4] Lü P, Bi Z W, Zhu P F, Sun Y J, Chen J P. The development of some important simulation techniques for geosciences. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(5): 677-682.
- [5] Özdamar L, Demirhan M, Özpınar A. A comparison of spatial interpolation methods and a fuzzy areal evaluation scheme in environmental site characterization. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23(5): 399-422.
- [6] Verfaillie E, van Lancker V, van Meirvenne M. Multivariate geostatistics for the predictive modelling of the surficial sand distribution in shelf seas. *Continental Shelf Research*, 2006, 26 (19): 2454-2468.
- [7] Lacarce E, Saby N P A, Martin M P, Marchant B P, Boulonne L, Meersmans J, Jolivet C, Bispo A, Arrouays D. Mapping soil Pb stocks and availability in mainland France combining regression trees with robust geostatistics. *Geoderma*, 2012, 170: 359-368.
- [8] Gallagher F J, Pechmann I, Bogden J D, Grabosky J, Weis P. Soil metal concentrations and vegetative assemblage structure in an urban brownfield. *Environmental Pollution*, 2008, 153 (2): 351-361.
- [9] Liu G, Guo G L, Nan F, Wei W X, Li F S, Bi R T. Heterogeneous characteristic of PAHs' spatial distribution in a large coking site of China. *Environmental Science*, 2012, 33 (12): 4256-4262.
- [10] Dankoub Z, Ayoubi S, Khademi H, Lu S G. Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils as affected by land use in the Isfahan region, central Iran. *Pedosphere*, 2012, 22(1): 33-47.
- [11] Juang K W, Liao W J, Liu T L, Tsui L, Lee D Y. Additional sampling based on regulation threshold and kriging variance to reduce the probability of false delineation in a contaminated site. *Science of the Total Environment*, 2008, 389(1): 20-28.
- [12] Wu C F, Wu J P, Luo Y M, Zhang H B, Teng Y, DeGloria S D. Spatial interpolation of severely skewed data with several peak values by the approach integrating kriging and triangular irregular network interpolation. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63 (5): 1093-1103.
- [13] van Meirvenne M, Goovaerts P. Evaluating the probability of exceeding a site-specific soil cadmium contamination threshold. *Geoderma*, 2001, 102(1/2): 75-100.
- [14] Shi W J, Liu J Y, Du Z P, Song Y J, Chen C F, Yue T X. Surface modelling of soil pH. *Geoderma*, 2009, 150 (1/2): 113-119.
- [15] Culshaw M G. From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2005, 38(3): 231-284.
- [16] Wang G W, Zhu Y Y, Zhang S T, Yan C H, Song Y W, Ma Z B, Hong D M, Chen T Z. 3D geological modeling based on gravitational and magnetic data inversion in the Luanchuan ore region, Henan Province, China. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 80(1): 1-11.
- [17] Qiao J H, Pan M, Jin Y, Li Z L, Zhao Z Y. 3D Strata Modeling

- and Integrative Visualization Based on DEM. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(2): 34-37.
- [18] Wu J S, Wang Y L, Zeng X P, He Z J, Chen Z H. Ore body spatial data interpolation in 3D visualization environment. *Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Pekinesis*, 2004, 40(4): 635-641.
- [19] Falivene O, Cabrera L, Sáez A. Optimum and robust 3D facies interpolation strategies in a heterogeneous coal zone (Tertiary as Pontes basin, NW Spain). *International Journal of Coal Geology*, 2007, 71(2/3): 185-208.
- [20] Calcagno P, Chilès J P, Courrioux G, Guillen A. Geological modelling from field data and geological knowledge; Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, 171(1/4): 147-157.
- [21] U.S. EPA. Method 8270D: semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1996.
- 设方法初探. *环境保护科学*, 2010, 36(2): 61-64.
- [2] 吴以中, 朱沁园, 刘宁, 陆根法, 戴明忠, 夏晶. 污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例. *生态学报*, 2012, 32(4): 1283-1292.
- [3] 张厚坚, 王兴润, 陈春云, 刘雪, 王琪. 典型铬渣污染场地健康风险评价及修复指导限值. *环境科学学报*, 2010, 30(7): 1445-1450.
- [4] 吕鹏, 毕志伟, 朱鹏飞, 孙玉建, 陈建平. 地学模拟相关技术的研究与进展. *地质通报*, 2011, 30(5): 677-682.
- [9] 刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田. 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征. *环境科学*, 2012, 33(12): 4256-4262.
- [17] 乔金海, 潘懋, 金毅, 李兆亮, 赵增玉. 基于 DEM 三维地层建模及一体化显示. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(2): 34-37.
- [18] 吴健生, 王仰麟, 曾新平, 和志军, 陈振辉. 三维可视化环境下矿体空间数据插值. *北京大学学报: 自然科学版*, 2004, 40(4): 635-641.

参考文献:

- [1] 陈辉, 张广鑫, 惠怀胜. 污染场地环境调查的土壤监测点位布

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol
League, Inner Mongolia WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia: a case study of Heidaigou
open pit coal mining KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus*
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus*
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck
 YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)
- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles
 LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)
- Population, Community and Ecosystem**
- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area
 HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)
- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)
 cultural ponds YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)
- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology
 LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- CO₂ emissions transfer embedded in inter-regional trade in China LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)
- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years
 YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)
- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed
 LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)
- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ...
 WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)
- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area
 PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)
- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir
 ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)
- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis
 TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)
- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province
 HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)
- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone
 HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)
- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences
 LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

《生态学报》2014 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,280 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 34 卷 第 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 11 (June, 2014)

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

国内外公开发行人

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元