

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

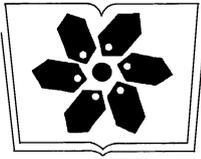
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第6期 Vol.32 No.6 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 6 期      2012 年 3 月 (半月刊)

## 目 次

高原草被退化程度的遥感定量监测——以甘肃省玛曲县为例.....	周坚华,魏怀东,陈芳,等 (1663)
基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价.....	殷旭旺,渠晓东,李庆南,等 (1677)
哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用.....	纪金华,章永江,张一平,等 (1692)
青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系.....	杨金鹏,姜勇,胡晓钟 (1703)
增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究.....	亓伟伟,牛海山,汪诗平,等 (1713)
三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征.....	揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等 (1723)
三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学.....	任玉芹,陈大庆,刘绍平,等 (1734)
强壮前沟藻化感物质分析.....	冀晓青,韩笑天,杨佰娟,等 (1745)
饥饿对中间球海胆 MYP 基因转录表达的影响.....	秦艳杰,孙博林,李霞,等 (1755)
贺兰山牦牛冬春季的生境选择.....	赵宠南,苏云,刘振生,等 (1762)
利用元胞自动机研究一类捕食食饵模型中的斑块扩散现象.....	杨立,李维德 (1773)
转 <i>Cry1Ab</i> 和 <i>Cry1Ac</i> 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响.....	李志毅,隋贺,徐艳博,等 (1783)
光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响.....	范凡,任红敏,吕利华,等 (1790)
荧光素对舞毒蛾核型多角体病毒不同地理品系的增效与光保护作用.....	王树娟,段立清,李海平,等 (1796)
不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征.....	李海峰,曾凡江,桂东伟,等 (1803)
稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析.....	秦晓波,李玉娥,石生伟,等 (1811)
黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分割面分布特征.....	党亚爱,李世清,王国栋 (1820)
紫色土菜地生态系统土壤 $N_2O$ 排放及其主要影响因素.....	于亚军,王小国,朱波 (1830)
中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素.....	王芸,欧阳志云,郑华,等 (1839)
基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图.....	刘鹏飞,宋轩,刘晓冰,等 (1846)
淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征.....	杨志敏,陈玉成,张赞,等 (1854)
推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响.....	王红光,于振文,张永丽,等 (1861)
江苏省冬小麦渍害的风险区划.....	吴洪颜,高苹,徐为根,等 (1871)
草原植物根系起始吸水层深度测定方法及其在不同群落状态下的表现.....	郭宇然,王炜,梁存柱,等 (1880)
亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (1888)
高寒草原植物群落种间关系的数量分析.....	房飞,胡玉昆,张伟,等 (1898)
菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定.....	孙艳,高海顺,管志勇,等 (1908)
南方菟丝子寄生对喜旱莲子草生长及群落多样性的影响.....	王如魁,管铭,李永慧,等 (1917)
基于 cDNA 克隆的亚热带阔叶林和针叶林生态系统担子菌漆酶基因多样性及其群落结构研究.....	陈香碧,苏以荣,何寻阳,等 (1924)
细柄阿丁枫和米槠细根寿命影响因素.....	黄锦学,凌华,杨智杰,等 (1932)
基于 TM 遥感影像的森林资源线性规划与优化配置研究.....	董斌,陈立平,王萍,等 (1943)
基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析.....	刘艳红,郭晋平,魏清顺 (1951)
<b>专论与综述</b>	
生态补偿效率研究综述.....	赵雪雁 (1960)
<b>研究简报</b>	
黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响.....	陈凯,肖能文,王备新,等 (1970)



**封面图说:** 植物生命演进石——这不是一块普通的火山岩,而是一块集中展示植物“原生演替”过程最有价值的石头。火山熔岩冷却后的玄武岩是无生命无土壤的真正“裸石”,风力使地衣的孢子传入,在一定温湿度环境下,开始出现了壳状地衣,壳状地衣尸体混合了自然风化的岩石碎屑提供的条件使叶状、枝状地衣能够侵入,接着苔藓侵入,是它们启动了土壤的形成,保持了土壤的湿度,并使营养物质反复循环。于是蕨类定居,草丛长了起来,小灌木出现,直到树木生长,最终形成森林。

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

DOI: 10.5846/stxb201102240213

刘鹏飞, 宋轩, 刘晓冰, 陈杰. 基于  $K$ -均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图. 生态学报, 2012, 32(6): 1846-1853.

Liu P F, Song X, Liu X B, Chen J. Numerical soil classification using fuzzy  $K$ -means algorithm and predictive soil mapping at regional scale. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1846-1853.

## 基于 $K$ -均值算法模型的区域土壤 数值化分类及预测制图

刘鹏飞<sup>1,2</sup>, 宋 轩<sup>1,2</sup>, 刘晓冰<sup>1,2</sup>, 陈 杰<sup>1,2,\*</sup>

(1. 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学自然资源与生态环境研究所, 郑州 450001)

**摘要:** 根据封丘县土壤发生学特点遴选质地、有机质、土壤颜色、pH 值、电导率和土壤发生层厚度等作为土壤属性向量, 运用  $K$ -均值算法模型, 对研究区 40 个土壤剖面样本实施数值化分类, 并依据《中国土壤系统分类检索》确定算法模型输出的 5 个中心土壤剖面的系统分类归属。基于 40 个样本土壤剖面与各中心剖面的类型之间的分类距离, 应用地统计学手段预测研究区空间任意位置的土壤与各中心剖面的分类距离, 完成研究区土壤数值化连续分类并实现可视化表达。在此基础上, 运用去模糊化手段, “硬化”连续分类边界, 获得可与传统土壤制图互为参比的研究区土壤预测图, 并对输出结果进行了土壤发生学解释。研究表明, 土壤数值化分类手段与地统计学随机模型相结合可以实现区域土壤的空间预测, 且预测图比传统土壤图蕴含更加丰富的信息。

**关键词:** 土壤数值化分类; 预测制图;  $K$ -均值算法; 分类距离

### Numerical soil classification using fuzzy $K$ -means algorithm and predictive soil mapping at regional scale

LIU Pengfei<sup>1,2</sup>, SONG Xuan<sup>1,2</sup>, LIU Xiaobing<sup>1,2</sup>, CHEN Jie<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

2 Institute of Natural Resource and Eco-Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** In the studied region, choosing texture, organic matter content, soil color, pH, electronic conductivity and soil layer thickness as soil variables, numerical soil classification based on 40 soil profiles was conducted by the use of fuzzy  $K$ -means algorithm, and the resulting central profiles soil 01, 18, 37, 38 and 40 were allocated into a hierarchical classification according to Key to Chinese Soil Taxonomy. They belonged to Pandian Series, Haplic Uap Ustic Cambisol, Yingju Series, Haplic Uap Ustic Cambisol, Haplic Endorusti-Ustic Cambisol, Haplic Warpic Anthric Entisol and Salinic Warpic Ustic Cambisol respectively. On the basis of the known taxonomic distances (Here, Euclidean distance was employed) amongst the sampled soils and the above central profiles, the taxonomic distance between unknown soils at any sites and the central profiles was figured out using Geostatistic techniques. In this way, continuous soil classification of the studied region was conducted through a predicted relationship of taxonomic distances between soils. For a better visualization, the soft borders between soils from different fuzzy classes were hardened by means of defuzzification defined through the distance thresholds. And the output of predictive soil mapping thus had a same visual appearance with a conventional soil map. From the predictive mapping, it could be clearly seen that the soil cover in the studied region was dominated by Haplic Endorusti-Ustic Cambisols and Salinic Warpic Ustic Cambisols, which accounts for a large percentage

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971128); 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KSCX1-YW-09-02)

收稿日期: 2011-02-24; 修订日期: 2011-08-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jchen@zzu.edu.cn

of the region's total area (46.3% and 33.2% respectively). By contraries, Haplic Uap Ustic Cambisols and Haplic Warpic Anthric Entisols were discontinuously distributed and totally occupied only around 10% of the total land area of the studied region. It could be concluded that integration of numerical soil classification and geostatistic interpolation would be one of the most recommendable approaches for predictive soil mapping.

**Key Words:** Numerical soil classification, predictive soil mapping, fuzzy  $K$ -means algorithm, taxonomic distance

土壤剖面是土壤信息的主要载体,同时综合反映土壤的形成、分布与环境变量的交互关系。常规土壤分类将土壤剖面划入各个描述性的、假定在属性空间上不存在变异的分类单元。基于常规土壤分类信息,无法应用数学模型对未观测区域的土壤类型及分布实施空间预测,因此真正意义上的数字化土壤制图无法实现。土壤剖面进行数值化分类是一种应用数学模型获取定量化分类信息的技术手段,其输出结果可借助各种不确定性模型插值外推,从而实现研究区土壤的预测制图<sup>[1]</sup>。

目前的土壤剖面数值化分类手段有 3 种:(1)Rayner 在 20 世纪 60 年代中期开发的以土壤剖面之间相似性计算为基础的层级式土壤数值分类算法,其最大缺点是运算复杂,不适合大批量数据运算。另外此分类算法只考虑依据土壤发生学属性甄别的剖面土层类型,不考虑土层厚度参数及土壤在剖面中的排列组合特征<sup>[2-3]</sup>。(2)King 和 Girard 于 20 世纪 80 年代后期开发的 VLADIMIR 半自动分类<sup>[4]</sup>,在人为设置研究区参比土层的前提下,计算观测土壤剖面中土层与参比土层的分类距离并据此建立研究区参比剖面系统,最终计算观测剖面与参比剖面之间的分类距离并将观测剖面划分入不同类型。(3)基于模糊  $c$ -均值算法的土壤数值化分类方法,它也是目前最为常用的土壤数值化分类手段<sup>[5-6]</sup>。对于一组土壤剖面分类对象,模糊  $c$ -均值算法模型输出土壤剖面样本与中心剖面类型之间的模糊隶属度和分类距离,并根据模糊隶属度和分类距离大小将样本土壤剖面分入不同类型<sup>[7-11]</sup>。

本研究选用以 VLADIMIR 半自动分类为基础的 OSACA 土体分类系统遴选中心土壤类型并得出各剖面点之间的分类距离,计算空间中任意位置与中心土壤类型间的分类距离,对封丘地区土壤类型进行数值化连续分类。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区简介

封丘县位于河南省的东北部,黄淮海大平原的中部,东经  $114^{\circ}14'$ — $114^{\circ}46'$ ,北纬  $34^{\circ}53'$ — $35^{\circ}14'$ ,隶属新乡市。东临长垣县,南隔黄河与开封市相望,西靠延津县,北接安阳市滑县,面积  $1220.5 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的 0.68%。封丘县地处黄河的故道,地貌复杂,沙岗、平原、洼地兼有,黄河大堤以南滩地较高,其余地势低洼。地势由西南向东北倾斜。海拔  $65$ — $72.5 \text{ m}$ 。黄河从县南和县东流过。属暖温带大陆性季风气候。1 月份平均气温  $-1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。7 月份平均气温  $27.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均气温  $13.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量  $615.1 \text{ mm}$ 。无霜期 214 天。土壤的母质均属第四纪全新统地层,其主源是西北黄土高原的黄土,主要土壤类型是黄河沉积物上发育而成的潮土(在中国土壤系统分类中为雏形土纲和新成土的下属类型),部分为盐土、碱土和少量沙土和沼泽土。

### 1.2 土壤剖面样点布设及样品采集

封丘县是国家重点野外台站——中国科学院封丘农业生态实验站所在地。长期以来,土壤研究在该县实施频繁,土壤基础资料丰富。在收集、整理第二次全国土壤普查时期绘制的《封丘县土壤图》、不同时期土壤调查观测的典型土壤剖面样点形态特征及准确空间位置等相关信息的基础上,兼顾土壤类型与空间均匀原则,在研究区布设标准土壤剖面样点 40 个(图 1),采集分层土壤样品 142 个,同时记录下剖面样点的地理坐标、高程和周围景观信息等。采集的土样经过室内自然风干,磨碎、过  $2 \text{ mm}$  筛后备用,实验理化分析项目及方法参见参考文献<sup>[12]</sup>。

### 1.3 OSACA 土体分类系统

OSACA 是一个以 VLDIMIR 算法为基础、运用  $K$ -均值算法模型中多次迭代的移动聚类质心运算功能进行土壤剖面数值化分类的系统<sup>[13]</sup>。假定在研究区观测  $N$  个土壤剖面  $s_i$  ( $i=1, \dots, N$ ), 每个土壤剖面  $s_i$  包含  $M_i$  个由  $F$  个属性向量  $p_{i0} = 0$  ( $f=1, \dots, F$ ) 描述的土层变量  $h_{ij}$  ( $j=1, \dots, M_i$ ) 构成, 每个土层的厚度为  $p_{ij}$ , 每一个土层中的  $p_{ij} > p_{i,j-1}$  并且  $p_{i0} = 0$ 。那么 OSACA 系统实施土壤剖面数值化分类的主要技术环节包括: 1) 基于人为设定的模糊聚类类别数量  $K$ , 算法输出各个类别的聚类中心(聚类类别内部所有样本与聚类中心的分类距离和最小); 2) 确定合适的分类距离表达形式(不同分类距离形式不影响上一步骤中聚类中心的确定); 3) 选择合适的结束条件终止系统运行并获得最佳运算输出结果; 4) 否则从第二步重复操作, 重新计算聚类中心。研究中, 对上述步骤进行了改进, 将不预先设置类别数量, 从而使土壤剖面数值化分类由监督分类变为无监督分类。

实际运算中, 将  $N$  个土壤剖面样本分入  $K$  个模糊类别须经由两个步骤: 计算每个样本剖面中土层的距离矩阵, 然后根据各样本剖面中的土层距离计算剖面之间的分类距离, 土层距离相近的剖面被划入同一类型, 从而实现研究区土壤类型的连续分类。研究中土层分类距离的表达选用欧几里得距离, 对于剖面中的两个土层  $h_a$  和  $h_b$ , 土层距离  $D_e$  表示为公式(1):

$$D_e(h_a, h_b) = \sqrt{\sum_{f=1}^F (v_{a,f} - v_{b,f})^2} \quad (1)$$

土壤剖面之间分类距离的计算可采用 3 种方式进行, 分别为土壤发生学距离或者简称发生学距离、公用距离以及联合距离(图 2)。

土壤剖面发生学距离的计算只考虑不同剖面中土层序列而不考虑土层厚度差异, 如果两个剖面中土层数量不同, 那么较浅的剖面最下部土层厚度重复计算一次。而公用距离则使用剖面中土层的加权距离, 如果剖面深度不同, 较浅剖面中最下部土层“拉伸”至较深剖面底部一致的位置。公用距离在计算中尽管考虑了剖面土层厚度, 但在一些具体案例中, 土体深度的“人为”改变可能在一定程度上夸大或掩盖土壤剖面间的发生学联系。两个土层序列完全相同的土壤剖面, 可能会因为土层厚度的差异被划入不同的土壤类型。联合距离虽然也采用与公用距离相似的计算方法, 但前提是将较深土壤剖面的深度设定为 1, 较浅剖面中各土层等比例“拉伸”使剖面深度也为 1(公式(2)), 从而在距离计算结果最大程度消减厚度加权带来的影响<sup>[3]</sup>(图 2)。研究选用联合距离表达土壤剖面之间的分类距离:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= D_e(h_{1,1}, h_{2,1})p_{i,j} \\ \Delta_2 &= D_e(h_{1,2}, h_{2,1})(p_{2,1} - p_{1,1}) \\ \Delta_3 &= D_e(h_{1,2}, h_{2,2})(p_{1,2} - p_{2,1}) \\ \Delta_4 &= D_e(h_{1,3}, h_{2,2})(p_{2,2} - p_{1,2}) \\ \Delta_5 &= D_e(h_{1,3}, h_{2,3})(p_{1,3} - p_{2,2}) \\ \Delta_6 &= D_e(h_{1,4}, h_{2,3})(p_{1,4} - p_{1,3}) \\ \Delta_{\text{joint}}(1,2) &= (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6)/p_{1,4} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $D_e(h_{1,1}, h_{2,1}), \dots, D_e(h_{1,4}, h_{2,3})$  分别表示剖面中不同土层之间的距离,  $p_{i,j}$  表示土层厚度,  $\Delta_{\text{joint}}(1,2)$  表示剖面 1、2 之间的联合距离。

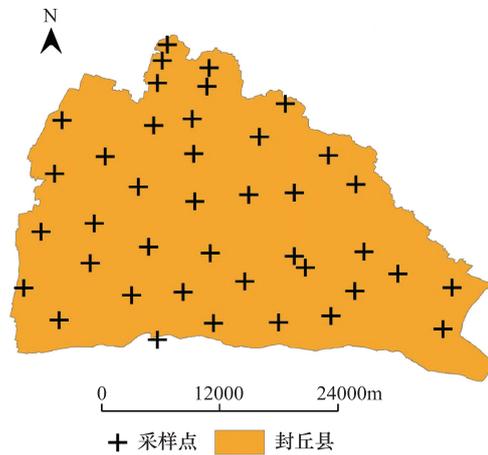


图 1 研究区土壤剖面样点分布图

Fig. 1 Locations of observed soil profiles in the studied region

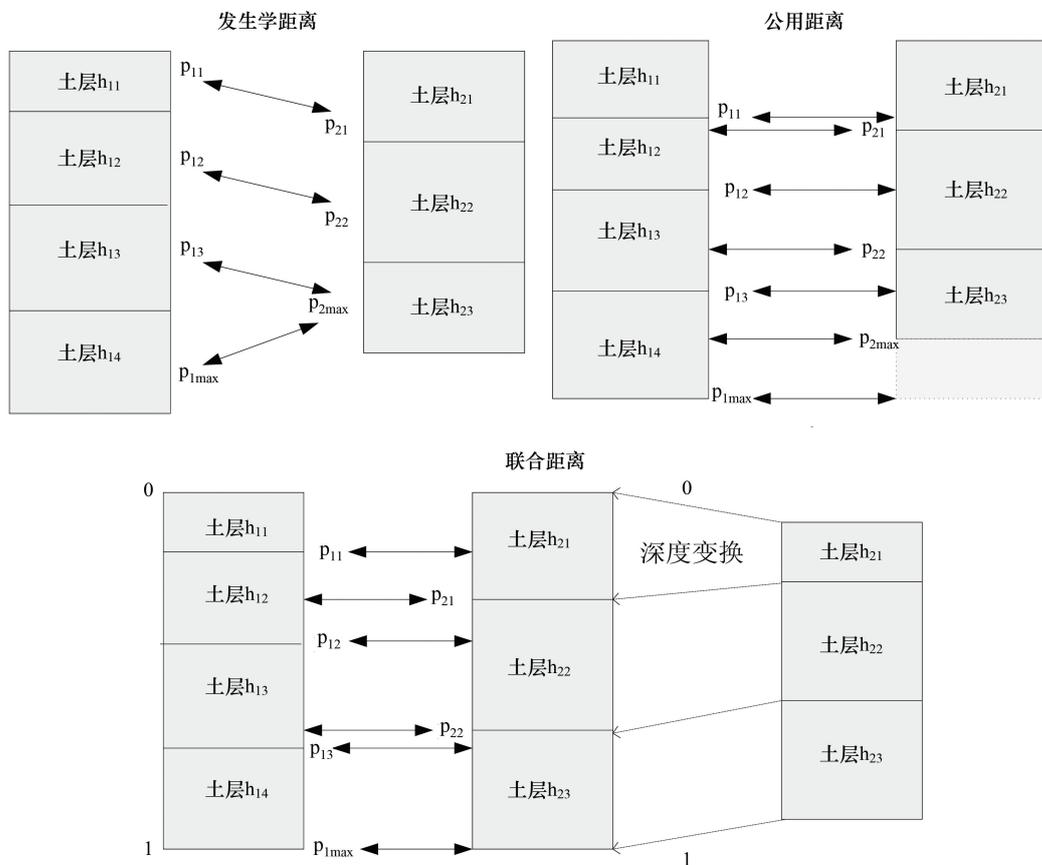


图 2 剖面距离

Fig. 2 Profile distance

### 1.4 土壤属性指标的遴选

土壤属性指标的选择直接决定 OSACA 土体分类系统的输出结果。前文所述,研究区封丘县位于黄河冲积平原,归属于《中国土壤系统分类》中雏形土纲、新成土下的幼年土壤类型在空间分布占据绝对主导地位。其突出特征是成土作用微弱、土壤形态特征与理化性状对成土母质具有强烈继承性。基于上述认知,选择反映母质沉积特征的土壤剖面分层机械组成和土壤颜色、反映土体中水盐运动特征的土壤电导率、反映土壤环境和土壤物质迁移特征的 pH 值以及反映耕作活动强度和土壤熟化程度的有机质含量作为 OSACA 土体分类系统的土壤属性输入指标。其中,用于土壤野外观测、描述和记载的门塞尔色系经 RGB 格式转换才能进入分类算法模型。研究中色系的转换在 Wallkillcolor 公司开发的专业软件 Munsell Conversion Vision 10 环境中实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 中心土壤剖面类型

将选定的土壤属性指标输入 OSACA 土体分类系统,运行 K-均值聚类分析,获得研究区土壤数值化分类结果。40 个样本土壤剖面被划分为 5 个模糊类别,依次将其命名 A、B、C、D、E,其对应的中心土壤剖面分别为土壤 01、土壤 18、土壤 37、土壤 38 和土壤 40。

根据雏形层发育状况、半干润水分状况(包括灌溉导致的由干旱水分状况转变的半干润水分状况)、灌淤现象、氧化还原特征以及盐积现象等土壤诊断层和诊断特性,按照《中国土壤系统分类检索》将上述 5 个中心土壤剖面分别归入普通底锈干润雏形土(土壤 37)、普通人为淤积新成土(土壤 38)、弱盐灌淤干润雏形土(土壤 40)以及普通筒育干润雏形土(土壤 01 和土壤 18)亚类。其中,中心土壤剖面土壤 01 和土壤 18 尽管从亚类级诊断标准上看同属一个亚类,但二者剖面形态特征与理化性状存在明显区别、且区别已由 OSACA 土体分

类系统输出结果从另一角度证实。因此可以认定,土壤 01 和土壤 18 属于同一亚类下的不同类型,应能在更低阶分类单元上加以区分。本研究按照中国土壤系统分类基层分类原则,直接将土壤 01 和土壤 18 划定为不同土系,并分别以各自样本剖面观测点附近地名直接命名为潘店系和应举系。

## 2.2 土壤剖面样本间的分类距离

参与研究区土壤数值化分类的土壤剖面样本与不同中心土壤剖面的分类距离列入表 1。

表 1 土壤剖面样本与中心剖面之间的分类距离

	土壤 37	土壤 38	土壤 40	土壤 01	土壤 18
土壤 1	2.444	3.388	2.113	0	3.384
土壤 2	2.769	3.512	2.466	2.041	3.240
土壤 3	1.850	3.036	2.946	2.597	2.667
...	...	...	...	...	...
土壤 40	2.181	2.940	0	2.113	3.632

与中心土壤剖面的分类距离越小,表明剖面样本与中心剖面的相似程度越高,土壤发生学上的联系越紧密,因此依据分类距离最小原则,将剖面样本划入相应的中心剖面所在类别。研究区土壤剖面数值化分类输出结果表明,相比与其他中心剖面,与中心剖面土壤 37 分类距离最小的剖面样本有 16 个、与土壤 38 分类距离最小的剖面样本有 7 个、与土壤 40 分类距离最小的剖面样本有 8 个、与土壤 18 分类距离最小的剖面样本有 3 个、与土壤 01 分类距离最小的剖面样本有 1 个。据此,将上述各组剖面样本分别划入锥形土纲下普通底锈干润锥形土亚类、普通淤积人为新成土亚类、弱盐灌於干润锥形土亚类以及普通筒育干润锥形土亚类中的应举系和潘店系。

## 2.3 土壤分类距离空间预测

基于样本土壤剖面与 5 个中心土壤剖面的分类距离,应用普通克里格技术实施插值预测<sup>[14]</sup>,获得研究区内任意地理空间位置上的未测土壤与 5 个中心土壤剖面的分类距离(图 3)。图 3 中较暗区域分布的土壤,与相应中心剖面的分类距离较小,土壤剖面形态特征与分层理化性状相似程度较高,土壤发生学联系较为紧密,因此与相应中心剖面为同一土壤类型的可能性越高;反之,颜色较淡区域分布的土壤与相应中心剖面分类距离越大,土壤剖面形态特征与分层理化性状越大,发生学联系越弱,与相应中心剖面为同一土壤类型的可能性越低。

## 2.4 研究区土壤预测制图

借助 GIS 技术手段,将图 3 中任意地理位置上土壤与 5 个中心土壤剖面分类距离预测图分别转换为栅格大小为 20 m 的栅格图。依据分类距离最小、土壤属性相似程度最高原理,将空间任意一点的土壤划入与之分类距离最小的中心剖面所在类型,从而实现连续制图的去模糊化,获得研究区基于最小分类距离的土壤空间预测图(图 4)。

图 4 中,普通筒育干润锥形土亚类在研究区分布面积较小,其中潘店系只占土壤总面积的 0.8%,分布范围在封丘县中部的东西县界处,远离其中心土壤剖面土壤 01 所在位置;应举系占研究区土壤总面积的 1.5%,以其中心土壤剖面土壤 18 所在位置为中心呈半圆形分布于西部县界处。以土壤 37 为代表的普通底锈干润锥形土亚类分布面积最大,为研究区土壤总面积的 59%,连片分布于中北部区域。以土壤 38 为中心土壤剖面的普通淤积人为新成土所占面积为 5.9%,主要分布于南部黄河大堤以北,其中心土壤剖面土壤 38 所在地附近只有零星分布。以土壤 38 为代表的弱盐灌於干润锥形土所占面积比例达到 32.3%,为研究区第二大土壤类型,紧靠黄河大堤分布于研究区西南和东南大部分地区。

从图 4 中可以看出,只有中心土壤剖面土壤 18、土壤 37 和土壤 38 分别位于对应的普通筒育干润锥形土亚类应举系、普通底锈干润锥形土亚类以及普通淤积人为新成土亚类图斑中。而其他中心剖面(土壤 01 和土

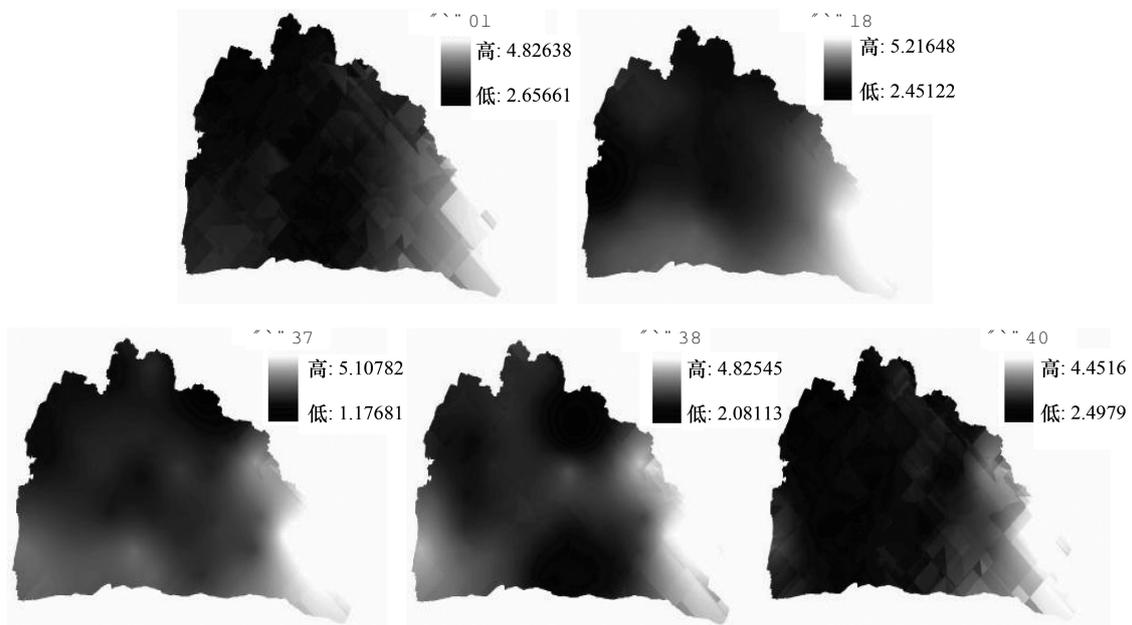


图3 研究区土壤与各中心土壤剖面分类距离预测结果

Fig.3 Predictive taxonomic distance of soil to a single central soil profile

壤 40) 则均位于以土壤 37 为中心土壤剖面的普通底锈干润锥形土亚类图斑中。这不符合土壤在属性空间和地理空间上具有双重连续性的一般特征。分析其原因,可能主要是因为计算所得剖面联合距离的结构性较弱,即空间变异中结构性成分较小(土壤 01、土壤 40 块金系数  $C_0/(C_0+C)$  分别为 0.287 和 0.241)。鉴于此,基于普通克里格插值获取土壤距离连续分布输出结果、经模糊化处理后获得土壤预测图的技术途径可能不适用于研究区。

反距离权(Inverse Distance Weighted, 简称 IDW)法是基于相近相似的原理的一种插值方法:两个物体的空间距离越近、彼此的特性就越相似;反之,相似性越小。这种插值技术以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,距离插值点越近的样本点被赋予的权重越大。应用反距离权插值技术,获得研究区土壤预测图输出结果如图 5。

对比图 4 与图 5,可以发现研究区土壤空间分布的总体格局没有显著差异。与图 4 相比,基于反距离权插值技术获取的预测图中,普通筒育干润锥形土潘店系和应举系分布面积均有明显提高,分别达到 5% 和 3.5%;同样,普通淤积人为新成土所占面积比例在图 5 中大幅增加到 11.4%;弱盐灌於干润锥形土分布面积比例在上述两图中基本没有变化,从 32.3% 略微提高至 33.2%;而普通底锈干润锥形土亚类分布面积比例有图 4 中的 59% 降低至图 5 中的 46.3%。基于两种插值方法获取的研究区土壤预测图中,均以普通底锈干润锥形土和弱盐灌於干润锥形土两个锥形土亚类的分布为主,二者分布面积比例达到 4/5,其余三类土壤在空间上呈零星斑状分布。不同的是,基于 IDW 插值方法获得

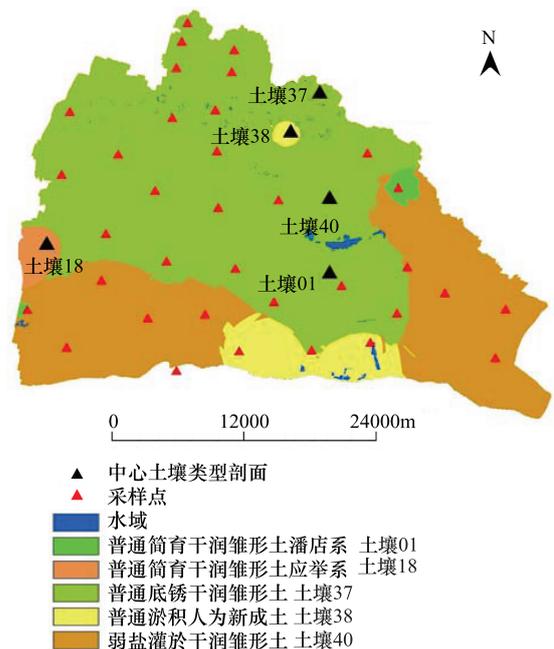


图4 普通克里格插值经去模糊化处理后的研究区土壤预测制图

Fig.4 Predictive soil mapping of the studied region by defuzzification of the ordinary kriging interpolation

的预测图中,各中心土壤剖面均处于其对应土壤类型的图斑中。

### 2.5 土壤空间预测结果的发生学解释

地形因素不仅影响土壤内部的水分运动和物质转移,而且直接影响封丘县土壤形成的母质基础——河流沉积物的空间分配格局与物质组成特性,从而对研究区土壤发生、发育以及空间分布产生至关重要的影响。对比图 5 和图 6,可清楚看到锥形土纲下普通底锈干润锥形土集中发育于研究区分布面积最大、地势平坦的冲-沉积地貌。弱盐灌淤干润锥形土则主要形成于黄河大堤两侧背河洼地,地貌类以河床地貌、河床-泛滥地貌、风沙-泛滥啊地貌以及人为地貌为主,地下水埋深普遍较高,土壤盐分尚未全部淋洗出土体,局部甚至仍有盐分表聚特征。新成土纲下普通淤积人为新成土大部分分布于研究区南部,与人为地貌的分布范围有较大程度的重合,另在研究区北部区域有小面积零星分布,此类土壤的形成、发育与研究区引黄灌淤为主的土壤改良实践密切相关。锥形土纲下普通筒育干润锥形土潘店系和应举系形成、发育的地貌特征较为复杂,潘店系形成于冲-沉积地貌与风沙地貌交接地带,而应举系在分布于河床地貌、风沙地貌、泛滥地貌等几种地貌类型的结合部位。此外,研究区农业历史悠久、人类活动强烈,平整土地、翻淤压沙、引黄灌淤、井灌井排等土壤改良与农田基本建设实践对本区地形、地貌以及土壤发生、发育与空间分布特征产生深远影响,土壤类型与成土环境之间的自然联系不断弱化,这导致对研究区土壤空间分布格局与发生学背景的分析与解释较为困难。

### 3 结论

1) 基于样本土壤剖面的形态描述信息与分层样品理化分析数据,应用 OSACA 土体分类系统对研究区土壤剖面进行了数值化分类,将 40 个样本土壤剖面划入分别以土壤 01、土壤 18、土壤 37、土壤 38 和土壤 40 为代表性中心剖面的普通底锈干润锥形土亚类、普通淤积人为新成土亚类、弱盐灌淤干润锥形土亚类以及普通筒育干润锥形土亚类中的应举系和潘店系,并获得了样本土壤剖面对上述 5 个中心剖面的分类距离。

2) 应用地统计学手段,计算研究区任意空间位置上土壤与 5 个中心剖面之间的分类距离,从而实现研究区土壤连续分布空间预测;基于分类距离最小、土壤相似程度最高的原则,实现了连续制图的去模糊化,获得研究区基于最小分类距离的土壤空间预测图;比较了普通克里格插值与反距离权插值技术在土壤空间预测实践中的合理性与可靠性,认为以反距离权插值手段获取的研究区土壤预测图更为合理。

3) 对土壤预测制图输出结果进行了土壤发生学解释,对研究区土壤发生发育及空间分布格局与地貌类

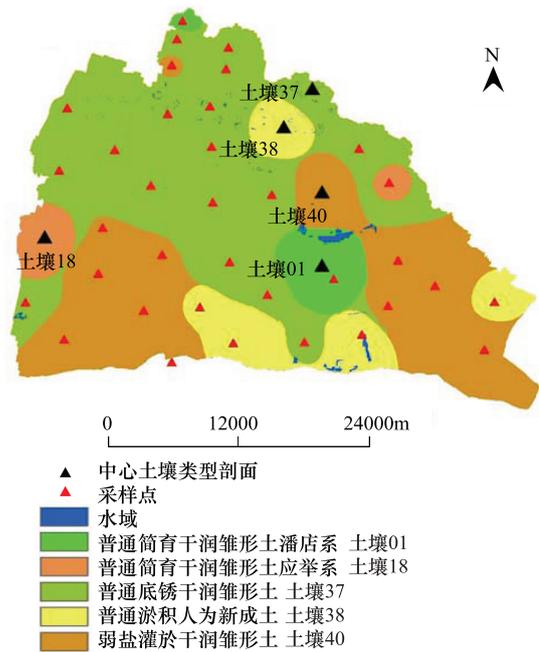


图 5 反距离权插值经去模糊化处理后的研究区土壤预测制图

Fig. 5 Predictive soil mapping of the studied region by defuzzification of IDW interpolation

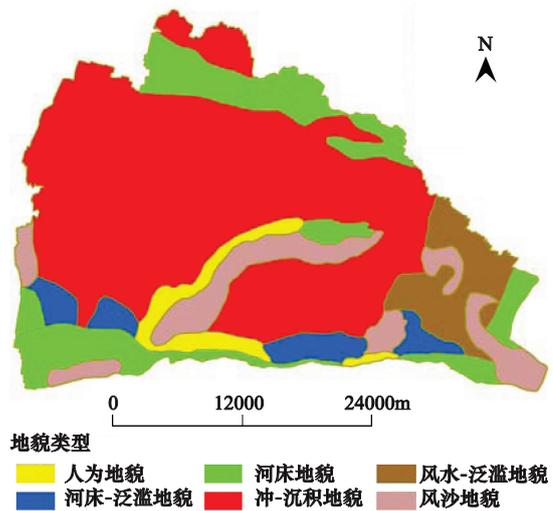


图 6 研究区地貌类型图

Fig. 6 The map of geomorphological types in the studied region

型之间的相互关系进行了系统阐述,揭示了土壤类型主要分布区域的地貌特征,如锥形土纲下普通底锈干润锥形土集中发育于研究区分布面积最大、地势平坦的冲-沉积地貌。弱盐灌於干润锥形土则主要形成于黄河大堤两侧背河洼地,地貌类以河床地貌、河床-泛滥地貌、风沙-泛滥地貌以及人为地貌为主;指出平整土地、翻淤压沙、引黄灌淤、井灌井排等土壤改良与农田基本建设实践对本区地形、地貌以及土壤发生、发育与空间分布特征产生深远影响。

4) 基于土壤类型之间的数值化差异实现的土壤预测制图输出成果,可以直接应用于精准农业管理、生态环境建模、土壤和水文过程模拟等诸多领域,具有比传统土壤图更为广阔的应用前景。本研究作为一个探索性案例研究,希望在传统土壤调查制图向模型化、信息化、精准化、自动化的土壤预测制图发展进程中发挥些许启发性作用。

**致谢:**中国科学院南京土壤研究所杜国华研究员在土壤剖面描述分析中给予指导,特此致谢。

#### References:

- [ 1 ] Minasny B, McBratney A B. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. *Geoderma*, 2007, 142(3/4): 285-293.
- [ 2 ] Rayner J H. Classification of soils by numerical methods. *Journal of Soil Science*, 1966, 17(1): 79-92.
- [ 3 ] Carré F, Jacobson M. Numerical classification of soil profile data using distance metrics. *Geoderma*, 2009, 148(3/4): 336-345.
- [ 4 ] Carré F, McBratney A B. Digital terrain mapping. *Geoderma*, 2005, 128(3/4): 340-353.
- [ 5 ] De Grujter J J, McBratney A B. A modified fuzzy k-means method for predictive classification//Bock H H, ed. *Classification and Related Methods of Data Analysis*. Amsterdam: Elsevier, 1988: 97-104.
- [ 6 ] De Grujter J J, Walvoort D J J, Van Gaans P F M. Continuous soil maps-a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models. *Geoderma*, 1997, 77(2/4): 169-195.
- [ 7 ] Verheyen K, Adriaens D, Hermy M, Deckers S. High-resolution continuous soil classification using morphological soil profile descriptions. *Geoderma*, 2001, 101(3): 1-48.
- [ 8 ] Amini M, Afyuni M, Fathianpour N, Khademi H, Flühler H. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation. *Geoderma*, 2005, 124(3/4): 223-233.
- [ 9 ] Tan M Z, Chen J. Visualization of uncertainty associated with spatial prediction of continuous variables using HSI color model: a case study of prediction of pH for topsoil in peri-urban Beijing, China. *Journal of Forestry Research* 2008, 19(3): 319-322.
- [ 10 ] Tan M Z, Chen J, Zheng H L, Zhang X L. Spatial prediction of soil heavy metal pollution using fuzzy c-mean algorithm. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2006, 26(12): 2086-2092.
- [ 11 ] Chen J, Sun Z Y, Tan M Z. Application of fuzzy logic in landuse classification based on remote sensing data. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 44(5): 1-7.
- [ 12 ] Chinese Soil Taxonomic Classification Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *The soil analysis program and method in laboratory(The research program of the Chinese soil taxonomic classification)*. 1991.
- [ 13 ] Carré F, Girard M C. Quantitative mapping of soil types based on regression kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes. *Geoderma*, 2002, 110(3/4): 241-263.
- [ 14 ] Shi D, Li Y. In the Application of Statistics in Soil Science. Beijing: China's Agriculture Press, 2006: 1-9.

#### 参考文献:

- [ 10 ] 檀满枝, 陈杰, 郑海龙, 张学雷. 模糊 c-均值聚类法在土壤重金属污染空间预测中的应用. *环境科学学报*, 2006, 26(12): 2086-2092.
- [ 11 ] 陈杰, 孙志英, 檀满枝. 模糊逻辑在土地利用遥感分类中的应用. *土壤学报*, 2008, 44(5): 1-7.
- [ 12 ] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. *土壤实验室分析项目及方法规范(中国土壤系统分类用)*, 1991
- [ 14 ] 史丹, 李艳. *地统计学在土壤学中的应用*. 北京: 中国农业出版社, 2006: 1-9.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 6 March, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

- Quantitatively monitoring undergoing degradation of plateau grassland by remote sensing data; a case study in Maqu County, Gansu Province, China ..... ZHOU Jianhua, WEI Huaidong, CHEN Fang, et al (1663)
- Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China ..... YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al (1677)
- Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought ..... QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (1692)
- The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao ..... YANG Jimpeng, JIANG Yong, HU Xiaozhong (1703)
- Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau ..... QI Weiwei, NIU Haishan, WANG Shiping, et al (1713)
- Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China ..... JIE Shenglin, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al (1723)
- Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges reservoir ..... REN Yuqin, CHEN Daqing, LIU Shaoping, et al (1734)
- Analysis on allelochemicals in the cell-free Filtrates of *Amphidinium carterae* ..... JI Xiaoqing, HAN Xiaotian, YANG Baijuan, et al (1745)
- Effect of starvation on expression patterns of the MYP gene in *Strongylocentrotus intermedius* ..... QIN Yanjie, SUN Bolin, LI Xia, et al (1755)
- Habitat selection of feral yak in winter and spring in the Helan Mountains, China ..... ZHAO Chongnan, SU Yun, LIU Zhensheng, et al (1762)
- Using cellular automata to study patchy spread in a predator-prey system ..... YANG Li, LI Weide (1773)
- Effects of insect-resistant transgenic *Bt* rice with a fused *Cry1Ab+Cry1Ac* gene on population dynamics of the stem borers, *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens*, occurring in paddyfield ..... LI Zhiyi, SUI He, XU Yanbo, et al (1783)
- Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of *Frankliniella Occidentalis* (Pergande) ..... FAN Fan, REN Hongmin, LU Lihua, et al (1790)
- The synergistic action and UV protection of optical brightener on three different geographic isolates of Asian Gypsy Moth Nucleopolyhedrovirus (LdMNPV) ..... WANG Shujuan, DUAN Liqing, LI Haiping, et al (1796)
- The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China ..... LI Haifeng, ZENG Fanjiang, GUI Dongwei, et al (1803)
- Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil ..... QIN Xiaobo, LI Yu'e, SHI Shengwei, et al (1811)
- Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau ..... DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong (1820)
- N<sub>2</sub>O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions ..... YU Yajun, WANG Xiaoguo, ZHU Bo (1830)
- Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China ..... WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1839)
- Numerical soil classification using fuzzy *K*-means algorithm and predictive soil mapping at regional scale ..... LIU Pengfei, SONG Xuan, LIU Xiaobing, et al (1846)
- Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition ..... YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al (1854)
- Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO<sub>3</sub>-N migration in wheat ..... WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (1861)
- Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province ..... WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al (1871)
- Determination of the initial depth of water uptake by roots of steppe plants in restored and overgrazed communities, Inner Mongolia, China ..... GUO Yuran, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1880)
- Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species ..... XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (1888)
- Numerical analysis of inter-specific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak ..... FANG Fei, HU Yukun, ZHANG Wei, et al (1898)
- Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of *Chrysanthemum grandiflorum* and its closely related genera ..... SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, et al (1908)
- Effect of the parasitic *Cuscuta australis* on the community diversity and the growth of *Alternanthera philoxeroides* ..... WANG Rukui, GUAN Ming, LI Yonghui, et al (1917)
- Diversity and community structure of basidiomycete laccase gene from subtropical broad-leaved and coniferous forest ecosystems based on cDNA cloning ..... CHEN Xiangbi, SU Yirong, HE Xunyang, et al (1924)
- Fine root longevity and controlling factors in subtropical *Alingia grilipes* and *Castanopsis carlesii* forests ..... HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (1932)
- Linear programming and optimal distribution of the forest resources based on TM remote sensing images ..... DONG Bin, CHEN Liping, WANG Ping, et al (1943)
- Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics ..... LIU Yanhong, GUO Jinping, WEI Qingshun (1951)
- Review and Monograph**
- Review of the ecological compensation efficiency ..... ZHAO Xueyan (1960)
- Scientific Note**
- The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying ..... CHEN Kai, XIAO Nengwen, WANG Beixin, et al (1970)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 6 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 6 2012

<b>编 辑</b>	《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	<b>Edited by</b>	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
<b>主 编</b>	冯宗炜	<b>Editor-in-chief</b>	FENG Zong-Wei
<b>主 管</b>	中国科学技术协会	<b>Supervised by</b>	China Association for Science and Technology
<b>主 办</b>	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	<b>Sponsored by</b>	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
<b>出 版</b>	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	<b>Published by</b>	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
<b>印 刷</b>	北京北林印刷厂	<b>Printed by</b>	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
<b>发 行</b>	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	<b>Distributed by</b>	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
<b>订 购</b>	全国各地邮局	<b>Domestic</b>	All Local Post Offices in China
<b>国外发行</b>	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	<b>Foreign</b>	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
<b>广告经营 许 可 证</b>	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