

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

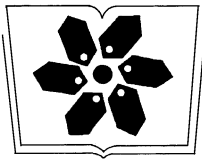
Acta Ecologica Sinica



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/stxb201111161745

陈涛, 常庆瑞, 刘京, 齐雁冰, 刘梦云. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异. 生态学报, 2013, 33(2): 0554-0564.

Chen T, Chang Q R, Liu J, Qi Y B, Liu M Y. Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable lands of Heyang County in South Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0554-0564.

黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异

陈 涛^{1,2}, 常庆瑞^{1,2,*}, 刘 京^{1,2}, 齐雁冰^{1,2}, 刘梦云^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:在生态脆弱的黄土高原南麓合阳县,以 1983、2006 年耕地土壤速效氮、磷、钾含量为对象,利用空间自相关、变异函数及分形维数等方法,研究县域土壤速效养分时空变异特征及主要影响因素。结果表明,从 1983 到 2006 年,除土壤速效钾外,耕地速效氮、磷的平均含量分别提高 73.98% 和 92.69%;土壤速效养分全局 Moran's *I* 指数和空间相关距均呈递减变化、分维数增加,预示其空间结构减弱,随机变异性增强。土壤速效氮、磷含量在绝大部分研究区域内呈现不同程度累积,而速效钾含量则在 59.65% 的耕地上减少;导致其不同变化的因素有耕地利用方式、施肥管理、灌溉、土壤类型等,其中以土地利用方式和施肥管理措施的影响最大。

关键词:土壤速效养分;时空变异特征;空间自相关;变异函数;分形维数

Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau

CHEN Tao^{1,2}, CHANG Qingrui^{1,2,*}, LIU Jing^{1,2}, QI Yanbing^{1,2}, LIU Mengyun^{1,2}

1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Shaanxi Yangling 712100, China

2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Shaanxi Yangling 712100, China

Abstract: Soil available nutrients play important roles in ensuring high, stable yields and avoiding water eutrophication. In this study, the spatiotemporal variation of soil available nitrogen (AN), phosphorus (AP) and potassium (AK) was studied in Heyang County of Shaanxi Province, an ecologically vulnerable area at the south Loess Plateau. Two sets of data were used for analysis in this study, in which 545 and 618 soil samples data were from the second national soil survey in 1983, and Shannxi Province arable land soil fertility survey in 2006, respectively. Prior to data analysis, outliers were identified and removed. Logarithmic and BOX-COX transformations of data were performed to obtain normality distribution of variables. Data were analyzed with spatial autocorrelation, semi-variance function and fractal dimension analysis. Factors affecting soil nutrient change were identified using Kriging interpolation and zonal statistics.

The results showed that mean concentrations of arable soil AN, AP and AK were 35.4, 8.2, and 195 mg/kg in 1983, respectively; whereas their average contents in 2006 were 61.5, 15.8, and 196 mg/kg, respectively. The contents of soil AN and AP were significantly increased from 1982 to 2006 by 26.2 (74.0%) and 7.6 (92.7%) mg/kg, respectively. It was found that there was significant difference between soil available nutrient contents in 1983 and those in 2006 based on the Levene's equality of variance test.

Spatial autocorrelation analysis showed that the Moran's *I* values of AN, AP and AK in the two time points all showed spatial cluster at 0.01 significance levels. Soil available nutrients in 1983 had higher Moran's *I* values, indicating their

基金项目:国家教育部博士点专项基金(20090204120035); 中国博士后科学基金(20090451399); 西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”

收稿日期:2011-11-16; **修订日期:**2012-06-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

stronger spatial structure. In semi-variance function and fractal dimension (*FD*) analysis, AN, AP and AK contents in 2006 had shorter spatial correlation distance and higher fractal dimension values, suggesting that soil available nutrients in 2006 exhibited weaker spatial structure and self-similarity. Thus, results obtained from analysis with three methods confirmed their effectiveness.

The spatial patterns of soil available nutrients in 1983 and 2006 were analyzed with kriging interpolation and raster computing in ArcGIS. It was found that soil AN and AP contents in most study areas showed varying degree of increase in the past 23 years. In contrast, soil AK content decreased in 59.65% of arable land during this period. The relationships were analyzed between soil nutrient changes and land use type, fertilizer application, geomorphic type, soil type and so on. It was found that soil available nutrient changes were significantly affected by these factors. Among others, excessive N and P fertilizer use and land use change were the main reasons for soil AN and AP increase. The decrease of soil AK was due primarily to the shortage of K fertilizer.

Key Words: soil available nutrient; spatial-temporal variation; spatial autocorrelation; semi-variance function; fractal dimension

土壤速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)养分不仅是作物生长发育所必需的三大基本元素直接来源,也是影响区域水体生态环境的重要属性^[1]。它既受成土母质、地形、时间等自然因素影响,同时也受施肥、灌溉等人为因子作用,具有高度空间异质性特点^[1-3]。研究其时空变异规律对加强区域土壤管理,保障粮食稳产、高产,避免水体富营养化和促进农业可持续发展等具有重要的理论与现实指导意义。

国内外学者从 20 世纪 70 年代末开始将地统计学引入土壤学,对各种土壤属性空间变异特征展开一系列研究,取得丰富成果^[4-8]。随着研究深入,近年来对土壤特性在时间尺度上的变异分析逐渐成为土壤学、农业生态学等多学科关注热点之一^[9]。如,刘文杰等^[3]研究黑河中游 20 余年土壤速效养分时空变异特征,揭示了绿洲、戈壁交错区土壤肥力的变化规律;Goidts 和 Wesemael^[10]研究比利时 50a 土壤有机碳变异特点,阐明了农业生产对其变化的重要影响;Huang 等^[11]研究长江流域农田土壤有机质和全氮在 20a 农业结构调整与土地利用方式转变中的时空变异规律等,此类研究还有许多^[11-13]。

但从已有文献报道来看,当前研究仍存在一些不足。第一,研究手段较为单一。在土壤空间变异研究中,变异函数以其能够定量刻画空间特征、提供插值等优点,应用最为广泛^[14]。除变异函数外,少量学者也曾利用空间自相关和分维数对土壤变异进行了初步探索,取得较好效果^[9,15-17]。但目前能够结合多种分析从不同角度刻画土壤空间变异的研究仍然较少。第二,在不同尺度下已开展较多土壤养分空间变异研究,但针对生态脆弱区县域耕地土壤的时空变异研究仍然较少,特别是在家庭联产承包责任制、退耕还林还草等管理措施实施以来,对土壤养分及其空间结构的变化规律仍缺乏足够了解。

因此,本研究以位于黄土高原生态脆弱区的合阳县为研究区域,以 1983、2006 年耕地土壤 AN、AP、AK 为研究对象,利用空间自相关、变异函数及分维数,从多角度分析土壤速效养分空间变异特征及其时空变化规律,探讨各成土因素对土壤供肥能力的影响,旨在为干旱半干旱生态脆弱区土壤资源管理、生态环境保护及农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

本研究以陕西合阳县为例,该县位于黄土高原南麓,渭北旱塬东北部,介于 109°59′—110°27′ E, 34°59′—35°26′ N 之间。全县地势西北高东南低,平均海拔 715 m,北部山区最高 1526 m,东部黄河滩地最低 340 m,相对高差 1186 m。境内分布有大峪河、金水沟、徐水河、太枣河四条较大沟系,将全县切割成形状与大小不同的多个塬面。本县气候属暖温带大陆季风性半干旱气候,年均气温 11.5℃,降水量 559.6 mm,夏秋多雨,冬春较为干旱。耕地土壤主要以壤土(按中国土壤系统分类归为土垫旱耕人为土,Earth-cumuli-Orthic Anthrosols)

和黄绵土(黄土正常新成土, Loessi-Orthic Primosols)为主, pH 值在 7.5—8.5 之间, 属碱性土壤, 容重平均 1.24 g/cm^3 , 阳离子代换量(CEC)平均 11.49 cmol/kg , 质地以中壤为主。

1.2 数据来源

本研究共收集两个时期耕地土壤速效养分数据。一期源于 1983 年合阳县第二次土壤普查资料; 另一期是在土壤普查基础上, 结合陕西省耕地地力调查项目, 于 2006 年 4—5 月采样、分析获取。在 2006 年采样过程中, 样点按随机均匀布点采集, 在每个采样点约 10 m^2 范围内采集 6—8 个点混成一个土壤样品, 利用 GPS 记录点位; 取样时尽量避开道路、渠道、水井、坟地、住宅等易干扰地段; 采集土样经通风晾干、剔除杂质、磨细后化学分析。两期土样均取自耕层 0—20 cm, 采样点位置见图 1。本研究从第二次土壤普查资料中共收集到 545 个经系统采样、测定分析的土壤 AN、AP、AK 数据; 2006 年采集 618 个土样, 其中 332 个测定了 AN 含量, 618 个测定了 AP、AK 含量。土壤 AN 用 1 mol/L NaOH 扩散法测定, 土壤 AP 用 $0.5 \text{ mol/L NaHCO}_3$ 浸提-磷钼蓝比色法测定, 土壤 AK 采用 $1 \text{ mol/L NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法测定^[18]。在本文中, 为叙述方便, 两时期土壤速效 N、P、K 数据分别用“速效养分-采样时期”来表示, 如 AN-2006 即为 2006 年土壤速效氮含量。此外, 由于该县 1983—2006 年耕地面积变化较小, 仅由 895.53 km^2 (1983 年) 减少为 880.99 km^2 (2006 年), 为便于研究该县耕地土壤速效养分时空变化规律, 通过土地利用现状图叠加提取两时期均为耕地的公共部分作为研究区域。

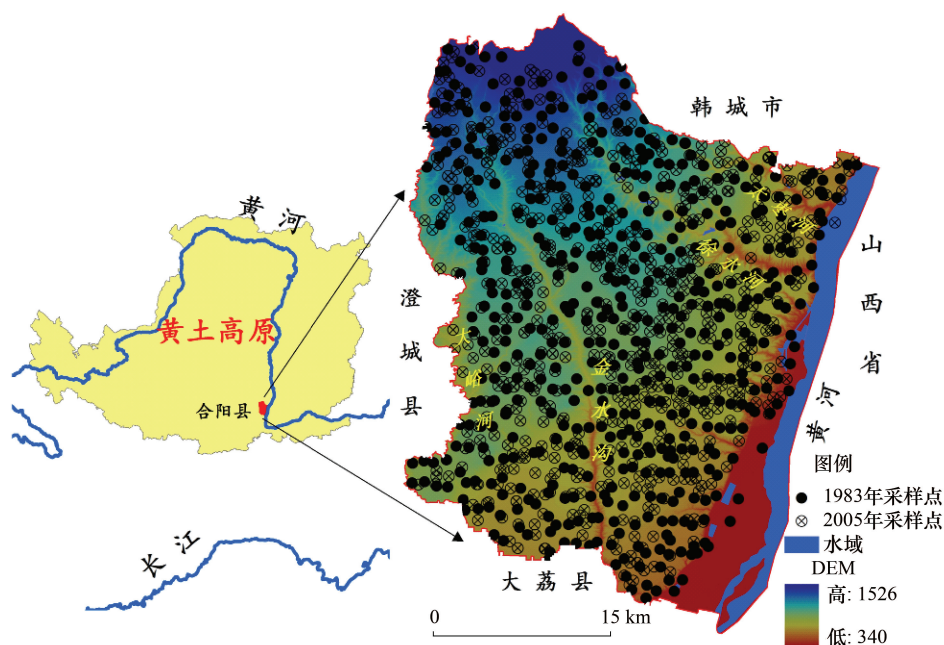


图1 研究区域及采样点分布图

Fig. 1 The distribution map of study area and sampling points

1.3 数据处理及分析

1.3.1 数据的预处理及正态转化

异常值的存在和数据非正态分布易引起变异函数的比例效应, 增加估计误差^[2], 故采用 $X \pm 3\delta$ 法剔除异常值。在该方法中, X 为研究变量原始数据平均值, δ 为标准差, 为保持原始样本量, 被识别并剔除的异常值用剔除后最大值或最小值替代。与此同时, 采用对数转换和 BOX-COX 转换, 对异常值剔除后数据进行转换以及 Kolmogorov-Smirnov 单样本正态检验(K-S 检验)。BOX-COX 转换实质是一种幂转换数据处理方法, 其转换公式为:

$$x_i' = \ln(x_i) \quad \lambda = 0$$

$$x_i' = \frac{x_i^\lambda - 1}{\lambda} \quad \lambda \neq 0$$

式中, λ 是原数据经幂转换后最接近正态分布时的参数值, 当 $\lambda = 0$ 时, BOX-COX 转换即为对数转换, λ 的获取方法参考相关文献^[19]。

本研究通过比较两种转换方法对正态检验概率 p 值的提高程度, 发现对数正态转换能力相对较弱, 经转换后 AN-1983 和 AP-2006 仍未通过 K-S 正态检验; 而 BOX-COX 转换后数据的偏度、峰度均显著降低, 且通过正态检验, 转换效率更高。因此在本研究中为统一处理, 对所有变量均采用 BOX-COX 转换后数据进行空间统计分析。

1.3.2 空间自相关分析

空间自相关分析是对研究变量空间相邻位置间相关性进行检验的一种统计方法。通过检测某位置变异对邻近位置变异的依赖性, 判断是否存在空间自相关, 即空间结构^[9]。Moran's I 指数是空间自相关分析中应用最广泛的一种参数, 其中全局 Moran's I 计算公式为:

$$I = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad i \neq j$$

式中, n 是变量 x 的样本数; x_i, x_j 是位置 i 和 j 的样本实测值, S^2 是其方差, $\bar{x}$ 是平均值, w_{ij} 是对称二项分布空间权重矩阵, w_{ij} 的确定参考相关文献^[20]。

I 取值 $[-1, 1]$, 可用标准化统计 Z 值检验是否存在显著空间自相关^[21]。 Z 计算公式为:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}}$$

通过查阅标准正态分布表可知, 当在 0.05 置信水平下 $|Z| = 1.96$; 当在 0.01 置信水平下 $|Z| = 2.54$ 。因此, 取 $|Z| > 1.96$ 或 $|Z| > 2.54$ 表示研究变量在区域总体上呈现显著或极显著空间自相关。当 $Z > 1.96$ (或 2.58) 时, 该变量存在显著 (或极显著) 空间正相关, 即空间聚集; $Z < -1.96$ (-2.58) 时, 为显著 (或极显著) 空间负相关, 即空间离散; 若 Z 值介于 -1.96 与 1.96 之间, 则空间自相关不显著, 变量呈随机分布^[22]。详细介绍见 Anselin 文献^[23]。

1.3.3 变异函数分析与分维数计算

刻画空间变异性最常见的方法是地统计学中二阶矩变异函数^[24], 该函数可用于描述土壤空间连续变异。由于变异函数 $\gamma(h)$ 是抽样间隔 h 时样本方差数学期望的一半, 所以又常称为半方差函数。以变异函数 $\gamma(h)$ 和抽样间隔 h 绘制变异函数曲线图, 根据其变化趋势拟合理论模型, 得到 3 个重要参数, 即块金值 (C_0)、基台值 ($C_0 + C$) 和变程 (A)。一般 C_0 反映最小抽样尺度下变异性及测定误差; $C_0 + C$ 表示变量最大变异性; A 表示变量空间变异尺度范围^[16]。在进行变异函数分析时, 常用块基比 $C_0 / (C_0 + C)$ 衡量变量空间相关程度。一般讲, 该比值 $< 25\%$ 表明变量空间相关性较强, 比值在 $25\% - 75\%$ 之间表明其具有中等空间相关性, 比值 $> 75\%$ 则表明空间相关性较弱^[2]。实验变异函数计算公式 $\gamma(h)$ 如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 为空间间隔 h 的半方差, $N(h)$ 是具有相同空间间隔 h 的离散点对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别对应点 x_i 和 $x_i + h$ 的实测值。

Burrough 在 1983 年将分形理论引入土壤学, 认为不同土壤特性具有不同分形特征^[25]。具有分形特征的空间变量, 可用分维数 FD 度量其空间异质性, FD 计算公式如下^[26]:

$$FD = 2 - H, H = \frac{1}{2} \log \gamma(h) \propto \log h$$

式中, H 为 $\log \gamma(h) \propto \log h$ 在尺度 h 范围内线性回归的直线斜率, 取值范围 0—1, 当 $H=0$ 时, 分维数 $FD=2$, 表明变异函数为随机型, 即纯块金效应, 变量不存在空间相关性。分维数 FD 取值范围 (1, 2], 由于 FD 无量纲, 因此可对不同变量 FD 值进行比较, 衡量其空间异质性程度大小。斜率越陡 (H 越大), FD 值就越小, 主要反映较大尺度的变异特点 (即结构因子引起的系统变异), 随机变异比例少; FD 越大, 则主要反映较小尺度的变异特征 (人为因子引起的随机变异), 结构变异比例小^[27]。

2 结果与分析

2.1 土壤速效养分的描述统计

表 1 为两时期耕地土壤速效养分原始数据的描述统计结果。从中可知, 1983 年该县耕地土壤 AN、AP、AK 平均含量分别为 35.36、8.21 和 195 mg/kg; 2006 年则达 61.52、15.82 和 196 mg/kg。除 AK 平均含量变化不大外, 土壤 AN、AP 含量均随时间变化有明显提高, 分别增加 26.16 和 7.61 mg/kg, 经 Levene's 方差检验及均值 t 检验, 其均值呈显著差异。

表 1 两个时期土壤速效养分描述统计

Table 1 The summary statistics for soil available N, P and K under two different periods

项目 Item	样本数 Samples	平均值±标准差/(mg/kg) Mean±standard deviation	最大值/(mg/kg) Max.	最小值/(mg/kg) Min.	全距/(mg/kg) Range	变异系数 coefficient of variation/%
AN-1983	545	35.36±8.83	95	4	91	24.99
AP-1983	545	8.21±4.24	56.5	2.2	54.3	51.62
AK-1983	545	195.00±52.45	464	65	399	26.82
AN-2006	332	61.52±22.77	188	18	170	37.00
AP-2006	618	15.82±13.57	109.5	1.1	108.4	85.75
AK-2006	618	196.00±70.83	670	21	649	36.06

众所周知, 变异系数在一定程度上可定量刻画样本数据的离散、变异特点。本研究两时期耕地土壤速效养分的变异系数在 24.99%—85.75% 之间, 属中等变异。其中, 以 AP-2006 的变异最大, 有 85.75%; 而 AN-1983 变异最小, 仅为 24.99%。从 1983 到 2006 年, 耕地土壤 AN 的变异系数由 24.99% 增加至 37%, AP 从 51.62% 增至 85.75%, 而 AK 增加最少, 仅由 26.82% 增至 36.06%。总体上讲, 在过去 23a 间, 该县耕地土壤 AN、AP、AK 的变异性均随时间变化呈增加趋势。

2.2 土壤速效养分的时空变异特征

耕地土壤变异可分为系统变异和随机变异, 结构因子导致系统变异, 人为因子引起随机变异。一般结构性因子包括土壤形成过程中成土母质、地形等因素, 随机因子则主要包括施肥、灌溉等人为措施。通常结构因子促使土壤养分呈较强空间相关性, 而随机因子则表现为削弱该种空间相关性^[28]。

表 2 为两期耕地土壤速效养分空间统计结果。由表可知, 从 1983 到 2006 年, 土壤 AN、AP 和 AK 的 Moran's I 值分别由 0.43、0.11、0.19 变化为 0.14、0.11、0.08。经标准化计算, 所有变量 Z 值均大于 2.58, 说明当前采样密度下, 两时期耕地土壤速效养分在 0.01 统计水平下呈极显著空间自相关, 其空间分布表现为集聚特点; 此外, 经对比还发现 1983 年速效养分 Z 值均大于 2006 年标准化值, 表明在过去 23a 间, 耕地土壤速效养分的空间结构有所削弱, 随机变异性增强, 这可能与家庭联产承包责任制实施以来, 耕地分产到户, 农民自主采用不同管理和耕种措施有密切关系。

为进一步分析耕地土壤速效养分的空间变异特点, 并避免样本方差的影响, 本研究采用标准半方差分析^[29], 结果见图 2 和表 2。由图 2 可见, 随间隔距离 h 增加, 各养分的半方差持续增加, 显现出鲜明结构特点, 表明在两个不同时期特定采样密度和样点分布条件下, 各土壤速效养分在相邻点位间存在较明显空间相关

关系。

表 2 两个时期土壤速效养分的半方差模型、Moran's I 指数及分形维数

Table 2 Best-fitted semi-variogram model, Moran's I and fractal dimension of soil available nutrients in two different periods

项目 Item	模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块基比 C_0/C_0+C	变程 A	决定系数 r^2	Moran's I	标准化 Z	分维数 FD
AN-1983	E	0.482	1.311	36.80	50610	0.991	0.43 **	17.44	1.866
AP-1983	E	0.124	1.007	12.31	2700	0.882	0.11 **	4.82	1.979
AK-1983	E	0.134	1.010	13.27	3510	0.964	0.19 **	7.68	1.960
AN-2006	E	0.104	0.983	10.55	2520	0.894	0.14 **	3.83	1.977
AP-2006	E	0.101	0.978	10.29	1680	0.718	0.11 **	4.47	1.988
AK-2006	E	0.106	0.988	10.73	1740	0.670	0.08 **	3.68	1.990

** 为 0.01 极显著水平

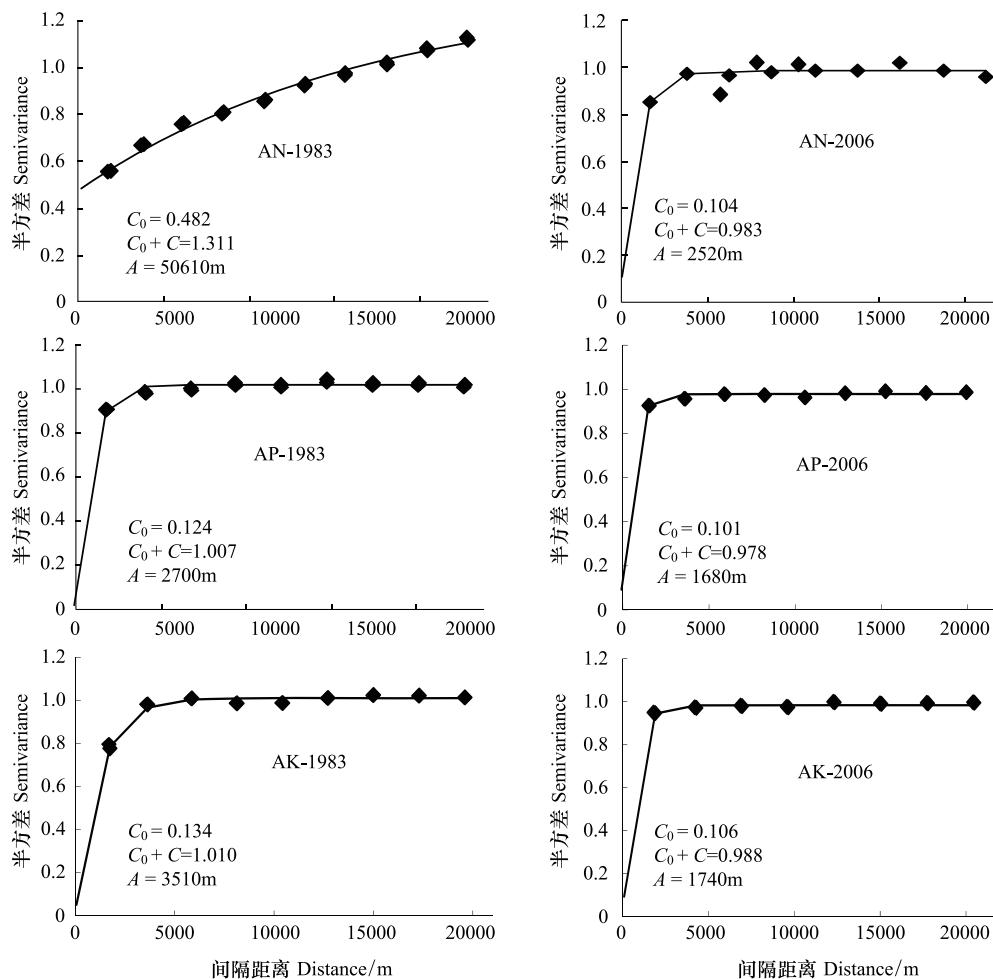


图 2 不同时期土壤速效养分的半方差图

Fig. 2 The semi-variograms of soil available nutrients in two different periods

由表 2 可知,两时期土壤 AN、AP 和 AK 含量的半方差拟合模型均为指数模型。除 AN-1983 块基比 $C_0/(C_0+C)$ 为 36.80% 以外,其它养分的块基比均低于 25%,表明在两个时期,该县耕地土壤养分均表现为较强空间相关性,其分布主要受结构因子影响。此外,从 1983 到 2006 年,耕地土壤 AN、AP 和 AK 的变程分别由 50610、2700、3510 m 减少为 2520、1680、1740 m,说明 2006 年各土壤速效养分的空间分布更趋于破碎,其空间结构减弱,随机变异增强,这与前面空间自相关分析结果一致。

除空间自相关和变异函数分析以外,两期土壤速效养分的空间结构特点还可用分形维数 FD 来定量描述。由表 2 可知,1983 年土壤 AN、AP 和 AK 的 FD 值分别为 1.866、1.979 和 1.960,到 2006 年则变为 1.977、1.988 和 1.990。经比较发现 2006 年土壤养分分维数均大于 1983 年,表明 2006 年该县耕地土壤速效养分相对 1983 年,呈现出更多较小尺度上的变异特点,其随机变异比例相对增加,这也进一步印证了空间自相关和变异函数的分析结果。

上述三种分析结果一致,即 2006 年耕地土壤速效养分较 1983 年,其空间自相关性减弱,相关距变短,分布更趋于破碎,随机变异比例增加。其中,全局 Moran's I 指数从相关性角度描述了研究变量的空间聚集特点,并采用随机条件下近似正态分布假设的标准差对其标准化,以正态分布 95% (或 99%) 置信区间双侧检验阈值为界限,判断其空间自相关是否显著 (或极显著);缺点是不能提供空间插值依据,难于对变量空间格局进行描述。变异函数则能较好弥补空间自相关分析在插值方面的不足,其不仅能通过块基比、变程等指标定量揭示区域变量空间相关程度与空间变异的尺度范围,而且还可为 Kriging 插值提供参数依据;缺点是不能像 Moran's I 标准化 Z 值一样,对空间相关显著性及正负性提供统计学检验。分维数 FD 则是一种综合指标,由于其与变异函数双对数 $\log y(h) \propto \log h$ 回归直线斜率存在线性关系,无量纲,可直接对比不同变量 FD 值大小,从空间复杂性和相似性角度比较其空间异质性程度,反映不同尺度变异特点,为空间自相关或变异函数分析提供佐证。3 种手段角度不同,各有优缺点,结合使用、相互印证,则能更客观全面地描述变量的空间结构特点。

2.3 耕地土壤速效养分的时空变化

利用 ArcGIS 矢量掩模提取及栅格计算,按照公式 $(X_{2006} - X_{1983}) / X_{1983}$ 分别获得 1983—2006 年耕地土壤 AN、AP 和 AK 空间变化格局图 (图 3) 及增长面积 (表 3)。

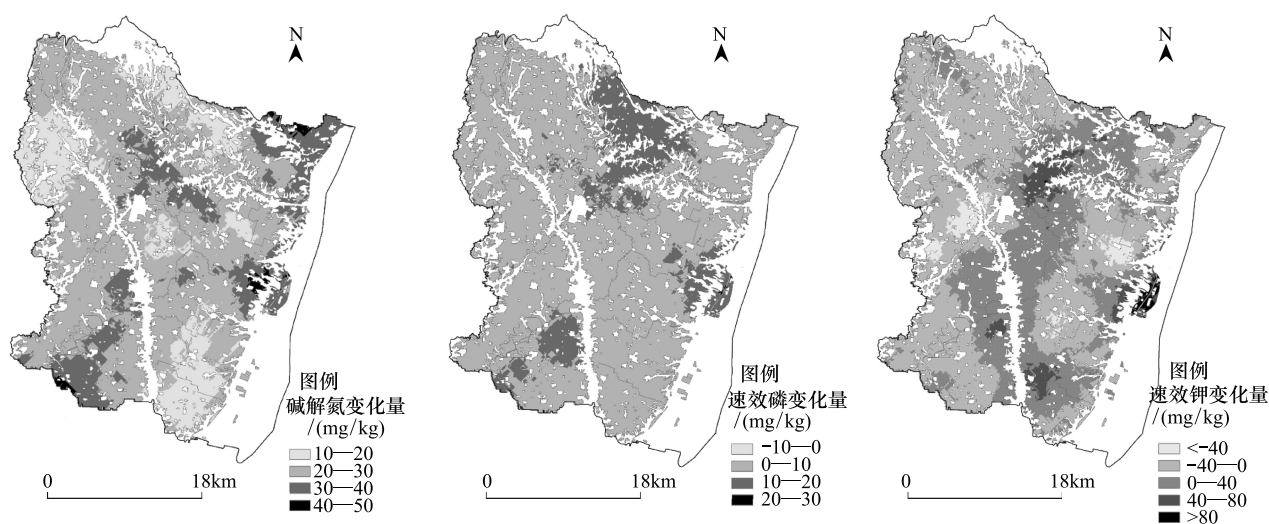


图 3 土壤速效养分时空变化格局图

Fig. 3 Temporal-spatial change maps of soil available nutrients from 1983 to 2006

由图 3 和表 3 可看出,1983 至 2006 年,该县绝大部分耕地土壤 AN、AP 含量呈增加趋势,而土壤 AK 则呈减少变化。其中,土壤 AN 增幅主要集中在 10—30 mg/kg 之间,占耕地面积 81.92%;增幅最大区域位于该县东部和西南低海拔沿黄农业灌区,该区农业生产条件较好,以种植蔬菜、瓜果等经济作物为主,通常施肥量大且追肥频繁,致使土壤 AN 含量增长最高。对于土壤 AP,除县域南部 0.52 km² 耕地上略有减少外,其它区域均有增加,以 0—20 mg/kg 增幅为主,增加超过 20 mg/kg 的耕地不足 0.3 km²;导致其含量普遍提高的原因,可能是家庭承包责任制实施以来,土地分产到户,磷肥作为底肥被广泛施用,加上灌排设施改善和农户精耕细作等措施促使磷的有效性普遍提高。对于土壤 AK,则在 487.54 km² (占面积 59.65%) 耕地上有不同程度降低,降幅集中在 -40—0 mg/kg 之间;剩余 40.35% 的耕地,其土壤 AK 有不同程度增加,增幅超过 80 mg/kg 的

耕地仅有 4.26 km²,主要集中在东部洽川镇商品蔬菜种植区;导致在较大范围内 AK 含量减少的原因可能与农户长期“重用轻养”的钾肥使用方式及有机肥补充不足密不可分。

表 3 两个不同时期土壤速效养分不同增幅的土壤面积及其比例

Table 3 Area and percentage of soil with increased AN, AP and AK contents to a varying extent from 1983 to 2006

项目 Item	面积、比例和分级标准 Area, percent and classification standard	增幅分级/(mg/kg) Soil nutrient content raised classification				
速效 N (AN)	分级标准/(mg/kg)	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50
	面积/km ²	—	161.11	508.40	140.48	7.29
	占总面积比例/%	—	19.71	62.21	17.19	0.89
速效 P (AP)	分级标准/(mg/kg)	—10—0	0—10	10—20	20—30	30—40
	面积/km ²	0.52	690.94	126.10	0.24	—
	占总面积比例/%	0.06	84.48	15.43	0.03	—
速效 K (AK)	分级标准/(mg/kg)	< -40	-40—0	0—40	40—80	> 80
	面积/km ²	25.42	462.12	289.98	35.50	4.26
	占总面积比例/%	3.11	56.54	35.48	4.34	0.52

2.4 耕地土壤速效养分时空变化的影响因素

2.4.1 农业生产措施的影响

施用无机化肥能迅速提高耕地土壤氮、磷、钾含量,增强其有效性,满足作物对土壤速效养分的需求。因此,从 20 世纪 80 年代初家庭联产承包责任制实施以来,农户为增加粮食产量,施用化肥成为提高耕地生产力的主要方式之一,且使用量持续增加。经查阅合阳县统计年鉴(1980—2005 年)^[30]发现,该县 1980 年化肥施用量仅为 2928 t(平均 13.69 kg/hm²),1990 年增为 10722 t(54.39 kg/hm²),2005 年则增至 73134 t(438.42 kg/hm²),25a 间化肥施用量增加 24 倍,长期施用无机肥是导致该区耕地土壤 AN、AP 含量普遍提高而不可忽视的重要原因之一。此外,随着农业生产投入逐年增多,农业机械总动力也由 1980 年的 6.08 万 KW 增至 2005 年的 19.72 万 KW,机耕面积由 1985 年的 1.84 万 hm² 增加到 2005 年的 4.53 万 hm²,各种小型机耕设备的使用不仅极大提高了农业生产效率,同时也有效改善了土壤孔隙松紧状况,促进微生物活动,加快了土壤矿物质的风化释放及有机质分解转化,进而促使土壤养分有效性增强。但对于土壤钾,则由于该区较为丰富,通常在农业生产过程中较少施用或不施钾肥,长期忽视钾素的必要补充,致使在较大范围内呈减少变化,应引起农业生产部门的重视。

2.4.2 土地利用方式的影响

除施肥等农业生产措施影响以外,土地利用方式的转变也是不容忽视的。20 世纪 80 年代初,该县土地利用主要以旱地为主,随着农田水利设施的建设和完善,旱耕地逐渐减少,水浇地和菜地增多,耕地有效灌溉面积由 1983 年 1.01 万 hm² 增至 2006 年 3.2 万 hm²。由图 4 可知,1983—2006 年,无论耕地利用方式如何转变,土壤 AN 和 AP 含量均呈增加变化,其中以水浇地转化为菜地和长期保持蔬菜种植的耕地增幅最高,AN 分别增加 35.74 和 34.98 mg/kg,AP 增加 17.50 和 17.98 mg/kg。而对于土壤 AK 则表现出不同变化规律,其中长期为旱地或由旱地转化为水浇地的耕地,AK 呈负增长;而长期种植蔬菜或转化为菜地的耕地,由于灌溉条件优越,耕作管理精细,同时又注重有机肥与钾肥施用,其钾素有效性得到显著提高。可见,耕地利用方式的转变导致土壤有效养分呈现出不同的变化规律。

2.4.3 地貌类型的影响

该县地貌较为复杂,不同地貌条件下耕地土壤速效养分的变化也存在明显差异(图 5)。位于黄河滩地上的耕地,坡度小、海拔低(340—500 m),且处于黄河道渠井淤灌区,灌排设施完善,近年又开发为商品蔬菜基地,耕作措施更加精细,有机无机肥配施得当,从而导致位于该区的耕地土壤 AN、AP 和 AK 含量增长最高,分别增加 29.61、9.07 和 31.94 mg/kg;而位于北部山区的耕地,海拔高,坡度大,存在较高水土流失风险,且缺

少必要灌溉条件,管理粗放,基本以望天田为主,因此该区土壤 AN、AP 含量增加最少,AK 降低最多;位于一级黄土塬抽黄渠井灌区的低台塬水浇地和位于二级黄土台塬的旱耕地,面积最大,其立地条件、土壤性状和管理措施均介于河滩菜地和山区旱地之间,致使其土壤 AN、AP、AK 含量的增加也处于上述两者之间。可见,地貌类型也是影响该县耕地土壤养分有效供给变化的重要因素之一。

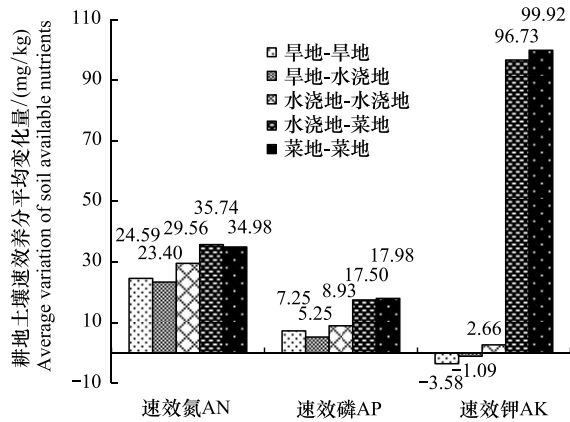


图4 不同土地利用方式下耕地土壤速效养分变化

Fig. 4 Changes of soil available nutrient under different land use type conditions

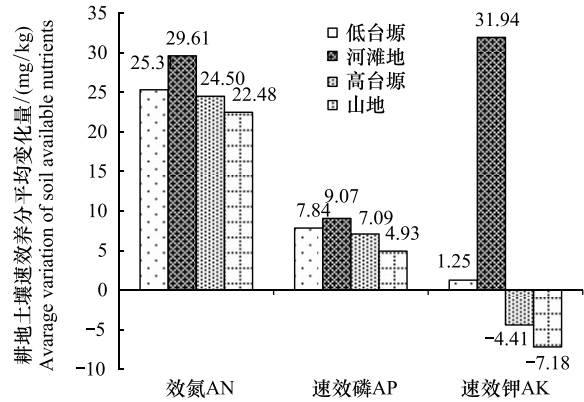


图5 不同地貌类型条件下耕地土壤速效养分变化

Fig. 5 Changes of soil available nutrient under different geomorphic type conditions

2.4.4 土壤类型的影响

由于土壤类型成土条件的变化,其供肥能力也表现出明显的变化差异。图6为1983和2006年耕地土壤速效养分在不同土壤类型条件下的变化结果。由图可知,位于低海拔河滩地的水稻土,经长期水耕熟化作用,积累了丰富有机物,由于近年水稻种植转化为蔬菜种植,更加精细的耕作措施和合理灌排,使其有机物分解转化增强,再加上有机无机肥的及时补充,该土壤供肥能力得到显著提高,AN、AP和AK含量增加最多,分别增加31.59、14.07和76.35 mg/kg。而位于合阳县北部山区陡坡地带的褐土,尽管重视施肥和改善耕作条件,但因长期受到不同程度侵蚀影响,致使其速效养分相对增加最少,仅分别增加19.91、1.69和-14.33 mg/kg。壤土和黄绵土是合阳县分布面积最广的两种农业土壤,该土壤主要分布在平缓塬面上,土层较厚,疏松多孔,有机物矿化度高,因此在增大施肥条件下其土壤N、P元素的有效性均提高较多;而对于钾素,由于长期施用钾肥相对较少,加上高强度农业生产的消耗,不能及时补充作物对钾素的吸收减少,故出现小幅降低。分布在黄河滩地上的淤土,以淤沙土和淤泥土为主,质地沙壤,结构疏松,在20世纪末被开发成菜地后,不断进行客土改良和增施有机肥,其土壤AN、AP和AK含量也均得到明显提高,分别增加26.39、7.09和13.04 mg/kg。可见,在不同土壤类型基础上,耕地土壤养分的有效性随成土条件的变化也表现出明显变化差异。

3 结论

从1983到2006年,黄土台塬区合阳县耕地土壤AN、AP平均含量均有显著提高,而AK含量提高较少,其总体变异性呈增加趋势。空间自相关、变异函数及分维数3种分析表明,两时期土壤AN、AP、AK含量均表

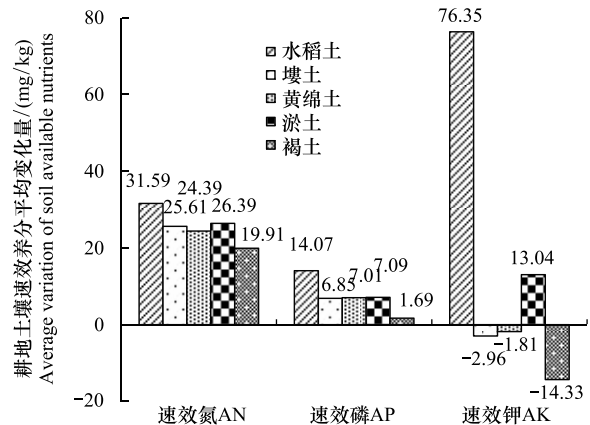


图6 不同土壤类型条件下耕地土壤速效养分变化

Fig. 6 Changes of soil available nutrient under different soil type conditions

现出较强空间自相关特征,但随时间变化,其全局 Moran's I 指数和空间相关距呈递减变化、分维数增加,预示其结构性减弱,随机性增强。在全县 81728.44 hm^2 耕地中,土壤 AN、AP 含量均有不同程度增加,增幅最大区域主要位于县域东部和西南低海拔沿黄河农业灌区;而土壤 AK 则在 59.65% 研究范围内有不同程度降低。引起土壤速效养分不同变化的因素有耕地利用方式、施肥管理、灌溉、土壤类型和地貌等,其中与耕地利用方式和施肥措施的关系最为密切。土壤 AN、AP 含量在过去 23 年间大幅增加,提高了因土壤 N、P 元素淋失而引起水体富营养化的风险;与此同时,土壤 AK 含量在较大范围内减少,可能会增加土壤对作物供钾能力下降所产生的负面影响。因此,土壤速效养分的不同时空变化应引起相关部门的高度重视。

References:

- [1] Zhao J, Meng K, Sui Y Y, Han B J, Zhang Y, Li H W. Analysis for spatial heterogeneity of organic carbon and available nutrients in black soil region of Hailun County. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 487-492.
- [2] Wang Z Q. Application of Geostatistics in Ecology. Beijing: Science Press, 1999.
- [3] Liu W J, Su Y Z, Yang R, Fan G P. Spatial and temporal changes of soil available nutrients in Linze Oasis in the middle reaches of Heihe River Basin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(11): 129-134.
- [4] Stenger R, Priesack E, Beese F. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale. *Geoderma*, 2002, 105(3-4): 259-275.
- [5] Cerri C E P, Bernoux M, Chaplot V, Volkoff B, Victoria R L, Melillo J M, Paustian K, Cerri C C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 51-68.
- [6] Lin Y H, Wang L F, Tian X K, Yang Y F, Xiao W F. Spatial structures of soil carbon and nitrogen of China fir and Masson pine mixed forest in the Three Gorges reservoir area. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7311-7319.
- [7] Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, Li S J. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 486-495.
- [8] Wang S Y, Lu P, Wang J L, Liu Y, Yang K, Yu T Q. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales a case study in Pinggu County, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4957-4964.
- [9] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 1999, 89(1/2): 1-45.
- [10] Goidts E, van Wesemael B. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955—2005). *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 341-354.
- [11] Huang B, Sun W X, Zhao Y C, Zhu J, Yang R Q, Zou Z, Ding F, Su J P. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. *Geoderma*, 2007, 139(3/4): 336-345.
- [12] Zhu J, Huang B, Sun W X, Yang R Q, Zou Z, Ding F, Su J P, Huang Y, Jin Y, Bi K S. Tempo-spatial variation of soil organic matter of farmland and its affecting factors in a typical area of the Yangze River Delta region. *Soil*, 2006, 38(2): 158-165.
- [13] Sun B, Zhao Q G, Lü G N. Spatio-temporal variability of red soil fertility in low hill region. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 190-198.
- [14] Zhang C S, Tao S, Yuan G P, Liu S. Spatial autocorrelation analysis of trace element contents of soil in Tianjin Plain area. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(1): 50-57.
- [15] Chen T, Shi J C, Liu X M, Wu J J, Xu J M. Spatial-temporal variability of Lead and Copper contents in vegetable soil in the peri-urban area of Hangzhou city. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 608-615.
- [16] Zhang J J, Li F Z, Hu K L, Zhang Q, Guo C X, Huang Y F. Spatial characteristics and impact factors of soil total nitrogen and soil organic matter in Taiyuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3163-3172.
- [17] Xie H L, Li B, Liu L M, Zhang X S. Study on spatial feature of soil nutrients based on integration of spatial statistical analysis and GIS in Farming-Pastoral zone-a case study in Wengniute county, Inner Mongolia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 73-76.
- [18] Yu T R, Wang Z Q. Soil Analytical Chemistry. Beijing: Science Press, 1988.
- [19] Wang X J, Li B G, Tao S. The Spatial Analysis of Soil Trace Element. Beijing: Science Press, 2005.
- [20] Wang Z, Zhang X D, Su W, Yang S Q, Liu S C. Spatial autocorrelation of three nature disasters in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Supp2): 302-306.
- [21] Wu J L, Wang J F, Meng B, Liu X H. Spatial association analysis on epidemic of SARS in Beijing, 2003. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science*, 2005, 31(1): 97-101.
- [22] Liu Q, Xia J B, Xie W J. Application of Semi-variogram and Moran's I to spatial distribution of trace elements in soil: a case study in Shouguang County. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1129-1133.

- [23] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [24] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for Environmental Scientists*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2001.
- [25] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environment data. *Nature*, 1981, 294(5838): 240-242.
- [26] Carr J R, Benzer W B. On the practice of estimating fractal dimension. *Mathematical Geology*, 1991, 23(4): 945-958.
- [27] Eghball B, Hergert G W, Lesoing G W, Ferguson R B. Fractal analysis of spatial and temporal variability. *Geoderma*, 1999, 88(3/4): 349-362.
- [28] Zhang J M, Xu Q R, Chi F Q, Kuang E J. Difference analysis on nutrient content of soil in Nenjiang County. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010, (3): 38-40.
- [29] Wang L. *Spatial Variability of Trace Elements in Soil and Rice Grain in Three Major Landforms [D]*. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [30] Bureau of Statistics of Shaanxi Province. *Statistical Yearbook of Shaanxi (1980—2005)*. Beijing: China Statistics Press, 1981-2006.

参考文献:

- [1] 赵军, 孟凯, 隋跃宇, 韩秉进, 张越, 李宏伟. 海伦黑土有机碳和速效养分空间异质性分析. *土壤通报*, 2005, 36(4): 487-492.
- [2] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 刘文杰, 苏永中, 杨荣, 范桂萍. 黑河中游绿洲农田土壤速效养分的时空变化特征. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(11): 129-134.
- [6] 林英华, 汪来发, 田晓堃, 杨延峰, 肖文发. 三峡库区杉木马尾松混交林土壤 C、N 空间特征. *生态学报*, 2011, 31(23): 7311-7319.
- [8] 王淑英, 路苹, 王建立, 杨柳, 杨凯, 于同泉. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征——以北京市平谷区为例. *生态学报*, 2008, 28(10): 4957-4964.
- [12] 朱静, 黄标, 孙维侠, 杨荣清, 邹忠, 丁峰, 苏建平, 黄耀, 金洋, 毕葵森. 长江三角洲典型地区农田土壤有机质的时空变异特征及其影响因素. *土壤*, 2006, 38(2): 158-165.
- [13] 孙波, 赵其国, 闫国年. 低丘红壤肥力的时空变异. *土壤学报*, 2002, 39(2): 190-198.
- [14] 张朝生, 陶澍, 袁贵平, 刘水. 天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究. *土壤学报*, 1995, 32(1): 50-57.
- [15] 陈涛, 施加春, 刘杏梅, 吴建军, 徐建明. 杭州市城乡结合带蔬菜地土壤铅铜含量的时空变异研究. *土壤学报*, 2008, 45(4): 608-615.
- [16] 张建杰, 李富忠, 胡克林, 张强, 郭彩霞, 黄元仿. 太原市农业土壤全氮和有机质的空间分布特征及其影响因素. *生态学报*, 2009, 29(6): 3163-3172.
- [17] 谢花林, 李波, 刘黎明, 张新时. 基于空间统计学和 GIS 的农牧交错带土壤养分空间特征分析——以内蒙古翁牛特旗为例. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 73-76.
- [18] 于天仁, 王振权. *土壤分析化学*. 北京: 科学出版社, 1988.
- [19] 王学军, 李本纲, 陶澍. *土壤微量元素含量的空间分析*. 北京: 科学出版社, 2005.
- [20] 王臻, 张晓东, 苏伟, 杨思全, 刘三超. 中国三大自然灾害空间自相关特征. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 302-306.
- [21] 武继磊, 王劲峰, 孟斌, 刘旭华. 2003 年北京 SARS 疫情空间相关性分析. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2005, 31(1): 97-101, 205-205.
- [22] 刘庆, 夏江宝, 谢文军. 半方差函数与 Moran's I 在土壤微量元素空间分布研究中的应用——以寿光市为例. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36(9): 1129-1133.
- [28] 张久明, 宿庆瑞, 迟凤琴, 匡恩俊. 嫩江县土壤速效养分差异性分析. *黑龙江农业科学*, 2010(3): 38-40.
- [29] 王琳. *浙江省三个主要农业地貌区土壤与稻谷微量元素空间变异规律研究 [D]*. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [30] 陕西省统计局. *陕西统计年鉴 (1980—2005)*. 北京: 中国统计出版社, 1981-2006.

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 leafhopper *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 O₃ 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 *Chlorophytum comosum* 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 *Leymus chinensis* 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 *Larix olgensis* 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