

## 湘南丘岗红壤地区土壤肥力质量指标的空间变异特征

刘杰<sup>1,2</sup>, 张杨珠<sup>2\*</sup>, 罗尊长<sup>1</sup>, 曾希柏<sup>3</sup>, 廖超林<sup>2</sup>, 黄运湘<sup>2</sup>, 周卫军<sup>2</sup>

(1.湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125; 2.湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 3.中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘 要:**采用地理信息系统(GIS)和地统计学方法研究了湘南丘岗红壤地区土壤表层(0~20 cm)pH 值、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾 8 项土壤肥力指标的空间变异特征。结果表明:土壤 pH、有效磷、全氮和全钾的理论模型为球状模型,有机质、碱解氮和速效钾的理论模型为指数模型,全磷的理论模型为高斯模型;碱解氮和全磷的基底效应分别为 13.6%、19.0%,表现出强烈的空间相关性,土壤 pH、有机质、有效磷、速效钾、全氮和全钾的基底效应分别为 28.7%、29.9%、54.7%、53.1%、55.6%、73.0%,具有中等的空间相关性;研究区域的书林寺村南部和官山坪村北部以石灰岩风化物母质为主,土壤肥力较高,属 ~ 级,幸福桥村区域以板岩风化物母质为主,土壤肥力为 级,官山坪村南部以第四纪红土母质为主,土壤肥力属 级,应重视第四纪红土母质地区土壤退化防治和肥力恢复调控。

**关 键 词:**土壤肥力质量;地统计学;地理信息系统;空间变异;湘南

中图分类号:S158.3;S155.25 文献标志码:A 文章编号:1007-1032(2012)01-0096-06

## Spatial variability of soil fertility quality indices in red soil region

LIU Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Yang-zhu<sup>2\*</sup>, LUO Zun-chang<sup>1</sup>, ZENG Xi-bo<sup>3</sup>, LIAO Chao-lin<sup>2</sup>,  
HUANG Yun-xiang<sup>2</sup>, ZHOU Wei-jun<sup>2</sup>

(1.Institute of Soil and Fertilizer in Hunan Province, Changsha 410125,China; 2.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128,China; 3.Institute of Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Geographical information system(GIS)combined with geostatistics was applied to reveal the spatial variability of soil fertility quality indices including soil pH, organicmatter, available N, available P, available K, Total N, Total P and Total K in the topsoil(0-20 cm)of southeastern Hunan province. The results showed that theoretical semivariogram models of soil pH, available P, Total N and Total K were best described with an spherical model, whereas the organic matter, available N and available K were best fitted with a exponential model, Total P was best described with an gaussian model. The ratios of nugget to sill of available N and Total P were 13.6%, 19.0%, respectively, indicating there existed strong spatial correlation. The ratios of nugget to sill of pH, organicmatter, available P, available K, Total N and Total K were 28.7%, 29.9%, 54.7%, 53.1%, 55.6%, 73.0%, respectively, indicating a moderate spatial correlation. In the red soil region, the soil *IFI* (integrated fertility index) was closely related with parent material, based on which the fertility quality of the soil in north of Guanshanping village and south of Shulingsi village developed from limestone parent material belonged to the I, II and III degree, which was high, the fertility quality of soil in Xingfuqiao village developed from slate parent material belonged to IV degree and the fertility quality of soil in south of Guanshanping village developed from quaternary red earth parent material belonged to V degree.

**Key words:** soil fertility quality; geostatistics; geographical information system; spatial variability; Southeast of Hunan province

收稿日期: 2010-11-11

基金项目: 国家“十一·五”科技支撑计划重点项目(2009BAD6B005); 国家“863 计划”项目(2006AA10Z419)

作者简介: 刘杰(1980—), 男, 湖南湘潭人, 博士, 主要从事退化土壤修复与土壤质量保育研究, jiebaz@yahoo.com.cn; \*通信作者, zhangyangzhu2006@163.com

土壤在成土过程中由于不同的物理、化学、生物等因素的影响,使得土壤性质具有高度的空间异质性,且在不同尺度上均存在土壤的空间变异性<sup>[1-2]</sup>。土壤质量的空间变异性比较复杂,成土母质、地形、人类活动等对土壤质量的空间变异均有较大影响,而土地资源利用、农业技术推广以及生态环境保护都需要对土壤质量指标的空间变异性进行分析<sup>[3]</sup>。地统计学方法是研究空间变异性的一种重要方法<sup>[4]</sup>,在矿产地质领域的应用目前已经达到了成熟阶段。随着 GIS、GPS 技术的发展,地统计学方法结合 GIS 技术越来越多地应用到土壤学和生态学等领域中<sup>[2,5]</sup>。中国红壤地区面积约占全国土地总面积的 22.7%,由于自然因素和人们不合理的生产经营活动,导致了严重的水土流失,造成生态环境的不断恶化,直接威胁着国家商品粮基地建设和社会经济的发展<sup>[6]</sup>。笔者选取湘南典型丘岗红壤地区永州市祁阳县文富市镇官山坪村、书林寺村和幸福桥村为研究区域,运用地理信息系统(GIS)和地统计学分析方法,研究该地区土壤肥力质量及其各指标的空间变异特征,以期为该地区土地资源利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

祁阳县位于湖南省南部,东经 110°35′~112°14′,北纬 26°02′~26°51′,总面积约 2 538 km<sup>2</sup>,为湘南典型丘岗红壤地区。海拔 105.6~165.2 m,以低山和丘陵为主。主要成土母质为板岩风化物、石灰岩风化物 and 第四纪红色黏土。平均气温 17.2 °C,年平均无霜期为 275 d,年积温为 5 457 °C,年平均日照数为 1 677 h,年降水量为 1 390 mm,主要集中在春、夏两季,降水年际变化较大。

### 1.2 土壤样品采集

以永州市祁阳县文富市镇官山坪村、书林寺村和幸福桥村作为小尺度下土壤样品的采集区域,结合土地利用类型、地貌单元及植被、土壤成土母质类型,进行表层土壤(0~20 cm)随机取样。每个土样以取样点为中心,在半径 10 m 内取 5 点混合而成,同时采用 GPS(GARMIN 72)记录中心点位置,记录其经、纬度坐标及高程,并详细记录采样点周

围的景观信息。在地形相对复杂处加大采样密度。试验共采集土样 58 个,所有样品经风干、剔除杂质和研磨后,分别过孔径 2 mm 和 0.149 mm 筛,用于土壤理化性质的测定。

### 1.3 测定项目与方法

根据红壤地区土壤资源的特点并结合前人研究结果,选取土壤有机质、pH 值、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾 8 个指标作为该区域土壤肥力质量评价指标。土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提后采用钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAC 浸提-火焰光度法测定;全氮采用半微量开氏法测定;全磷、全钾采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;pH 值采用 1~2.5 水溶解电位法测定;有机质采用外加热氧化-容量法测定<sup>[7]</sup>。

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 地统计学方法

本研究主要采用地统计学中的半方差函数及其模型<sup>[4]</sup>。半方差函数的块金系数、基台值和变程等重要参数可以用来表征区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度,它是研究土壤特性空间变异的关键,同时也是进行 Kriging 插值的基础<sup>[8]</sup>;运用 MapInfo7.0 软件将采样区的边界进行矢量化,将各采样点的位置及其数据导入 ArcGIS 中,以获得样点分布的空间数据库,通过关键字段与分析数据之间实现连接,作为 Kriging 插值的源属性数据。运用 Cross-Validation 交叉验证选择合适的 Kriging 插值模型,并进行验证和对各参数进行修正,以得到最合理的土壤肥力指标及土壤肥力质量分布图<sup>[4]</sup>。

#### 1.4.2 土壤肥力质量综合评判法

土壤肥力质量综合评价根据模糊数学(Fuzzy)和多元统计分析原理,先分别计算各肥力指标的隶属度值和权重系数,再以模糊数学中的加乘法原理,利用各项肥力指标的权重系数和隶属度值,计算土壤综合肥力指数(integrated fertility index, IFI)。IFI 取值范围为 0~1,其值越高,表明土壤肥力质量越好。

1) 隶属度值的确定。隶属度函数实际是所评价的肥力指标与作物生长效应曲线之间关系的数学

表达式, 它可以将肥力评价指标标准化, 转变成范围为 0~1 的无量纲值, 即隶属度值。隶属度函数通常有两类, 分别是 S 型隶属度函数和抛物线型隶属度函数<sup>[9]</sup>。依据专家评定及当地实情, 确定隶属度函数曲线转折点( $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ )的取值, 拟合出每个函数的确切函数式, 将单个指标实测值代入相应的函数, 得到单因子隶属度值。本研究除 pH 值采用抛物线型隶属度函数外, 其他肥力指标均采用 S 型隶属度函数。

2) 权重系数的计算。首先将所有样点各项评价指标的测定值录入 SPSS 软件, 计算单项肥力指标之间的相关系数并取其绝对值, 然后求出单项肥力指标与其他肥力指标间相关系数的平均值, 并将该平均值占所有肥力指标相关系数平均值总和的比例, 作为该单项肥力指标在土壤综合肥力中的权重系数<sup>[10]</sup>。

#### 1.4.3 土壤综合肥力指数 (IFI) 等级划分

以土壤综合肥力指数(IFI)作为依据, 按照等距法<sup>[11]</sup>, 将土壤肥力划分为 5 个等级(表 1)。

表 1 土壤综合肥力指数 (IFI) 分级标准

IFI	肥力水平	肥力等级
> 0.80	优	
0.80 ~ 0.70	良好	
0.69 ~ 0.60	中等	
0.59 ~ 0.40	较差	
< 0.40	差	

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤肥力指标的描述性统计分析

由表 2 可知, 研究区所有养分偏态检验值接近于 0, 而峰度检验值为 1.54~3.34, 表明土壤养分的分布范围较广; pH 值为 4.2~7.8, 平均为 6.0, 土壤总体上呈酸性, 这可能是由于研究区域气候以及母质共同导致其土壤偏酸性; pH 值变异系数最小, 为 19.6%, 有效磷变异系数最大, 为 61.5%, 8 个土壤养分指标均为中等变异性; 有机质、全氮、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和 pH 值接近正态分布, 全磷服从正态分布。

表 2 土壤肥力指标的描述性统计

指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	偏态	峰度	K-S 检验
pH 值	4.2	7.8	6.0	1.2	19.6	0.036	1.54	接近正态分布
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	13.6	53.8	29.0	11.6	40.1	0.165	1.89	接近正态分布
碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	47.2	257.7	131.7	44.9	34.1	-0.392	2.79	接近正态分布
有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2.6	30.7	10.9	6.7	61.5	-0.175	2.66	接近正态分布
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	38.7	228.7	102.6	35.3	34.4	-0.349	3.15	接近正态分布
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.9	2.9	1.7	0.5	31.4	0.142	1.83	接近正态分布
全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.3	1.0	0.7	0.2	22.1	-0.494	3.34	正态分布
全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	12.7	30.9	18.9	3.8	19.8	0.399	2.88	接近正态分布

“接近正态分布”指养分指标经对数转换后的频数分布。

### 2.2 土壤肥力指标空间变异特征分析

由表 3 可知, 土壤 pH 值、有效磷、全氮和全

钾含量符合球状模型, 有机质、碱解氮和速效钾含量符合指数模型, 全磷含量符合高斯模型; 基底效

表 3 土壤肥力指标半方差函数理论模型及相关参数

指标	最优模型	变程/m	最大步长/m	块金值	基台值	基底效应/%
pH 值	S	494.8	71.2	0.009 3	0.032 4	28.7
有机质含量	E	524.5	44.3	0.054 0	0.180 5	29.9
碱解氮含量	E	491.5	41.5	0.023 2	0.171 2	13.6
有效磷含量	S	330.3	40.5	0.203 6	0.372 1	54.7
速效钾含量	E	1714.8	145.7	0.078 6	0.148 0	53.1
全氮含量	S	549.0	46.3	0.061 0	0.109 6	55.6
全磷含量	G	264.2	145.7	0.004 0	0.021 2	19.0
全钾含量	S	326.6	46.5	0.023 1	0.031 6	73.0

S 球状模型; E 指数模型; G 高斯模型。

应为块金值与基台值之比, pH 值、有机质、有效磷、速效钾、全氮和全钾的基底效应为 28.7% ~ 73%, 说明这些土壤养分的空间分布具有中等的空间相关性; 碱解氮的基底效应为 13.6%, 表现出强烈的空间相关性; 全磷的基底效应为 19.0%, 也表现出强烈的空间相关性, 说明结构性因素对于全磷的空间变异起着主导作用, 全磷的空间变异与土壤

母质和土壤类型等结构性因素密切相关。此外, 土壤养分空间变异也会受到当地耕作制度、作物类型的变化等随机因素影响。

### 2.3 土壤肥力指标的空间分布特征分析

从图 1 可知, 研究区内土壤 pH 值、有机质、碱解氮、有效磷和全氮总体表现为从北向南递减;

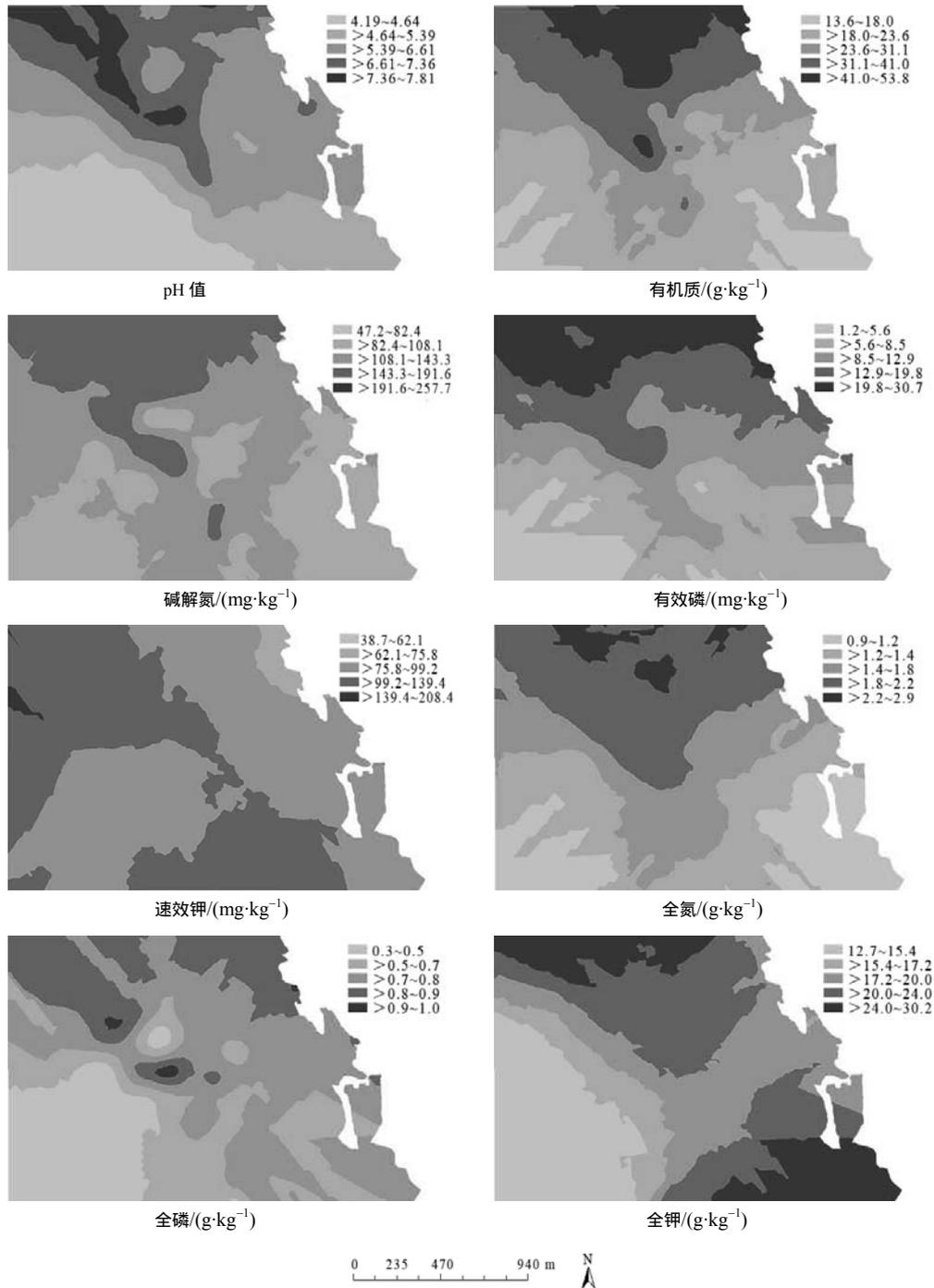


图 1 研究区各项肥力指标的空间分布

Fig.1 Group maps of eight fertility indices in the researched region

速效钾总体呈现从西向东递减;全磷总体呈现从东北向西南递减,但研究区北部出现了一个土壤全磷含量较低的区域;全钾总体呈现北部和东南部较高、西部较低的格局。土壤 pH 值、有机质、碱解氮、有效磷、全氮、全磷分布格局与成土母质关系密切,发育于石灰岩母质的北边区域高于发育于第四纪红土和板岩的南部区域。土壤有效磷分布还与土地利用类型有关,发育于石灰岩母质含量较高的区域土地利用类型以水田为主,水旱交替的耕作方式明显提高了土壤有效磷含量。土壤速效钾分布格局与结构性因素(地形、母质等)和随机性因素(施肥习惯)都有关,发育于第四纪红色黏土的西边区域高于发育于石灰岩母质的东北部区域,且西部区域土地利用类型以旱地为主,其有效性钾素的流失较水

田少。土壤全钾分布格局也与成土母质有关,发育于石灰岩母质的北边区域和发育于板岩母质的东南部区域高于发育于第四纪红土母质的西部区域。

## 2.4 土壤综合肥力质量的空间分布特征

### 2.4.1 土壤综合肥力指数

根据湘南地区土壤肥力特性、作物品种特点及相关研究结果<sup>[12-13]</sup>,确定隶属函数曲线转折点的取值(表 4)。pH 值在抛物线型隶属度函数曲线中转折点的相应取值为: $X_1=4.0, X_2=5.5, X_3=7.5, X_4=8.5$ 。通过建立各参评指标的隶属函数模型计算隶属度值。

通过计算,获得研究区土壤指标的相关系数平均值及权重系数(表 5)。

表 4 S 型隶属度函数曲线转折点取值

Table 4 Value of turning point in S-type membership function

项目	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )
$X_1$	10	0.75	0.4	10	60	5	50
$X_2$	30	2.00	1.0	20	120	20	150

表 5 各参评土壤指标的相关系数平均值及权重系数

Table 5 Average correlation coefficient and weight coefficient of 8 fertility quality indices

肥力质量指标	pH 值	有机质	全 N	全 P	全 K	碱解氮	有效 P	速效 K
相关系数平均值	0.284 3	0.361 0	0.370 6	0.418 4	0.076 0	0.317 6	0.286 6	0.041 5
权重系数	0.131 9	0.167 4	0.171 9	0.194 1	0.035 2	0.147 3	0.132 9	0.019 2

利用各项肥力指标的隶属度值和权重系数,计算得土壤综合肥力指数(IFI)。

### 2.4.2 土壤综合肥力指数(IFI)空间变异特征

通过分析可知,本研究区 IFI 值的理论模型为球状模型,其基底效应为 17.2%,变程为 404.8 m,最大步长 74.1 m;尽管土壤 pH 值、有机质、有效磷、速效钾、全氮和全钾属于中等空间相关性,土壤碱解氮和全磷具有强烈空间相关性,但从整个研究区来看,土壤综合肥力质量指标仍表现出强烈的空间相关性,土壤母质和类型等结构性因素起着主导作用。

### 2.4.3 土壤综合肥力质量空间分布

根据已计算的每个采样点的土壤综合肥力指数(IFI),得到土壤肥力质量的 Kriging 插值图

(图 2)。文富市镇官山坪村、书林寺村和幸福桥村综合研究区土壤肥力质量总体上呈现出从北到南梯度递减的变化趋势。发育于石灰岩风化物母质的北部地区(以书林寺村为主)土壤肥力以 I ~ III 级为主,发育于板岩风化物母质的东南部地区(以幸福桥村为主)土壤肥力以 IV 级为主,而发育于第四纪红土母质的西南部地区(以官山坪村为主)土壤肥力属 V 级。主要以石灰岩母质发育的北部地区土壤肥力水平较高,可能与土壤盐基离子相对较丰富,且土壤酸碱度为中性,加之地势偏低长期以水田为主要利用方式有关;而主要以第四纪红土母质发育的西南部地区地势较高,且以旱地为主要利用方式,土壤偏酸,盐基离子易淋溶,施肥水平低,生态系统极为脆弱,侵蚀退化较严重,土壤肥力水平很低,应重视对第四纪红土区域土壤退化的综合防治和培肥调控。



图 2 土壤综合肥力质量空间分布

Fig.2 Map of soil fertility quality

### 3 小 结

研究区土壤 8 种肥力指标的变异从大到小依次为有效磷、有机质、速效钾、碱解氮、全氮、全磷、全钾、pH 值 变异系数依次为 61.5%、40.1%、34.4%、34.1%、31.4%、22.1%、19.8%、19.6%。碱解氮和全磷的基底效应分别为 13.6%、19.0%，表现出强烈的空间相关性；而 pH 值、有机质、有效磷、速效钾、全氮和全钾的基底效应分别为 28.7%、29.9%、54.7%、53.1%、55.6%、73.0%，说明这些土壤养分的空间分布具有中等的空间相关性。从总体趋势来看，土壤 pH 值、有机质、碱解氮、有效磷、全磷和全氮都呈现出北高南低的趋势；全钾则呈现出北部和东南部较高，西部较低的趋势；土壤肥力质量综合指标则明显的呈现北部高、东南次高、西南较低的趋势，这与土壤母质类型等结构性因素关系密切。研究区书林寺村南部和官山坪村北部以石灰岩风化物母质为主，土壤肥力较高，属 I ~ III 级；幸福桥村区域以板岩风化物母质为主，土壤肥力属 IV 级；官山坪村南部以第四纪红土母质为主，土壤肥力属 V 级，应重视第四纪红土母质地区土壤退化防治和肥力恢复调控。

#### 参考文献：

[1] 谭万能, 李志安, 邹碧, 等. 地统计学方法在土壤学中的应用[J]. 热带地理, 2005, 24(4): 307-311.

- [2] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: A critical review[J]. *Catena*, 1998, 32: 155-172.
- [3] 贾树海, 张琦, 孟维军, 等. 基于 GIS 与地统计学土壤养分空间变异特征研究——以辽宁省凌源市 6 个乡镇为例[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 198-201.
- [4] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [5] 路朋, 苏以荣, 牛铮, 等. 红壤丘陵区村级农田土壤养分空间变异与制图[J]. 浙江大学学报, 2007, 33(1): 89-95.
- [6] 赵其国. 红壤物质循环及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [8] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 颜雄, 张杨珠, 周卫军, 等. 长沙县“百里茶廊”6 个茶叶基地的土壤肥力质量评价[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(3): 354-357.
- [10] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报, 1995, 32(4): 362-368.
- [11] 王茹. 基于 GIS 的城乡交错带土壤肥力质量变化规律研究: 以北京市大兴区为例[D]. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2002.
- [12] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 123-147.
- [13] 颜雄, 张杨珠, 刘晶, 等. 洞庭湖区 5 个茶叶基地土壤的养分状况与肥力质量评价[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2008, 34(5): 596-600.
- [14] 黄辉, 檀满枝, 陈杰, 等. 南通市城市边缘带土壤肥力时空特征分析[J]. 土壤, 2006, 38(3): 276-281.
- [15] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 等. 20 年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 19-24.
- [16] 张隆伟. 成都平原重金属空间分异驱动因子研究[D]. 雅安: 四川农业大学资源与环境学院, 2005.
- [17] 马媛, 龚新梅, 塔西南拉提·特依拜, 等. 干旱区典型流域土壤肥力空间变异特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1208-1213.

责任编辑: 杨盛强