

# 基于 GIS 和地统计学的低丘红壤地区 三种土壤性质空间变异性研究

祝锦霞, 许红卫, 王珂, 陈祝炉

(浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310029)

**摘要:** 以浙江省金华市为例, 采用地统计学和 GIS 相结合的方法, 对低丘红壤地区土壤有机质、有效 N、有效 K 3 种主要性质的空间变异特性进行研究。研究表明, 通过平方根转换后, 三者都呈很好的正态分布。有机质的变异函数曲线的理论模型较好地符合球状模型, 有效 N 和有效 K 则符合指数模型。三者都属于中等空间相关性, 同时受到结构性因素和随机性因素的共同影响。通过分析 3 种土壤性质的各向异性, 发现不同的土壤性质有不同的空间分布, 同一土壤性质在不同的方向上也有不同的空间变异性。

**关键词:** 地统计学; GIS; 低丘红壤; 空间变异

**中图分类号:** S3

土壤是动态的, 它是形态和演化过程都十分复杂的自然综合体, 具有高度的空间异质性。土壤理化性质是衡量作物产量和质量的一个极其重要的指标, 通过分析土壤理化性质及其空间变异特征能够将空间对土壤以及对土壤-作物复合系统的不同作用更形象、更深入地呈现在人们眼前, 更好地理解空间作用对土壤、作物关系的重要性。

从 20 世纪 70 年代开始, 土壤空间变异性规律得到初步研究。80 年代初, 区域化变量理论和地统计方法被进一步引用到土壤特性的研究上。地统计学的基本原理和方法在许多文献中都有比较详细的描述<sup>[1-4]</sup>。大量研究表明, 地统计学方法中半方差图和 Kriging 插值法适合于土壤特性空间预测, 并得到了广泛应用。到 90 年代, 随着发达国家精确施肥技术的提出和开展, 土壤特性及作物产量的空间变异和空间插值技术研究得到众多农学家的关注<sup>[5-7]</sup>, 并取得了不少研究成果。浙江省地处南方红壤区域范围, 陆域面积 10.53 万 km<sup>2</sup>, 其中红壤资源占 54.52%。我国红壤资源的农业利用研究进展大体上可划分为以下 3 个阶段:

(1) 考察、垦殖与培肥阶段 (20 世纪 50 年代初至 70 年代初)。该阶段许多科研单位对红壤的分布规律与性状进行了初步的调查研究, 为红壤资源的合理开发利用与改良打下了一定的基础。

(2) 改良整治与综合利用阶段 (20 世纪 70 年代中

至 80 年代中)。建立了我国富铝化土壤的分类命名系统, 并在第二次土壤普查等工作的基础上, 进行了全国和部分省 (区) 的红壤改良利用区划, 以及红壤资源评价与利用规划研究<sup>[8-15]</sup>。

(3) 可持续利用研究阶段 (20 世纪 80 年代末以来)。期间, 浙江省农业科学院、林业科学研究所等单位在浙西红壤综合实验区进行了多年的多学科协作系列研究, 取得了一定的成果, 为浙西红壤区农业的可持续发展指明了方向<sup>[16-17]</sup>。浙江大学近年完成了浙江省红壤资源的遥感调查与评价, 分省、地、县三级建立了 1:50 万、1:25 万和 1:5 万等多种比例尺的红壤资源信息系统, 并初步应用于红壤资源的类型划分、适宜性评价与质量评价、及农业利用分区<sup>[18-19]</sup>。中国科学院南京土壤研究所等相关单位也在红壤资源信息管理方面做了大量的工作, 并取得了初步的成绩<sup>[20]</sup>。

金衢盆地是浙江省的红壤集中地, 拥有丰富的低丘红壤资源。从经济效益来看, 金衢地区 2000—2004 年低丘红壤开发生产的农副产品按当年价计算总产值每年平均在 13 亿元以上, 是浙江省低丘红壤开发利用保护的地区之一。因此, 合理开发与保护低丘红壤资源并保证其可持续利用, 不断提高低丘红壤资源的生产力, 是今后浙江省实施耕地总量动态平衡的重要任务之一。国内外在丘陵红壤的大型农场等中等空间尺度上, 也开展了很多土壤特性空间变异规律的研

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (30671212) 和浙江省围垦局项目 (J40514) 资助。

作者简介: 祝锦霞 (1982—), 女, 浙江新昌人, 硕士研究生, 主要从事农业信息技术应用研究。E-mail:ko-ko998@163.com

究<sup>[21-24]</sup>。本文运用地统计学和GIS相结合的方法,选择具有代表性的金华市为例,研究低丘红壤地区土壤的有机质、有效N和有效K 3种主要性质的空间变异特征,揭示其空间变异规律和特征,为低丘红壤地区土壤的精确管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样区概况

金华市位于浙江省中部, 介于东经 119°02' ~ 120°47', 北纬 28°32' ~ 29°18', 南北跨度 129 km, 东西跨度 151 km, 土地面积 10919 km<sup>2</sup>。其地势南北高、中部低, 盆地底部广泛分布着起伏和缓的低丘缓坡。境内仅 25° 以下的低丘(下限为山坡的坡脚, 上限为海拔 300 m, 坡度 < 25° 的区域) 就有 54800 hm<sup>2</sup>。土地利用类型主要有耕地、林地和园地。

### 1.2 数据来源

土壤样点数据: 采样区实地采集所得。土壤图(1:5万): 金华市农业局提供。土地利用现状图: 根据 SPOT 图像(2004年)解译所得, 由其他课题组完成。地形图(1:1万): 浙江省地理信息中心提供。

### 1.3 样品采集与分析

图 1 为样点分布图。采样时间为 2005 年 9 月。研究区内一共布置了 794 个采样点, 样本采集点布置遵循均匀性、代表性的原则, 均在低丘范围内。在田间取样时, 利用 GPS 确定各采样点位置, 定位精度在 1 m 以下。以定位点为中心, 在取样半径约 1 m 的圆形区域内多点混合取样, 取样深度 0~15 cm, 用四分法取大约 1 kg 的土样带回实验室。土样经风干、磨碎及过筛后, 进行有关土壤理化性质和养分含量测定。其中, 土壤有机质采用重铬酸钾容量法; 土壤有效 N 采用康威皿扩散法; 有效 K 采用 1 mol/L 醋酸铵提取, 原子吸收法测定。

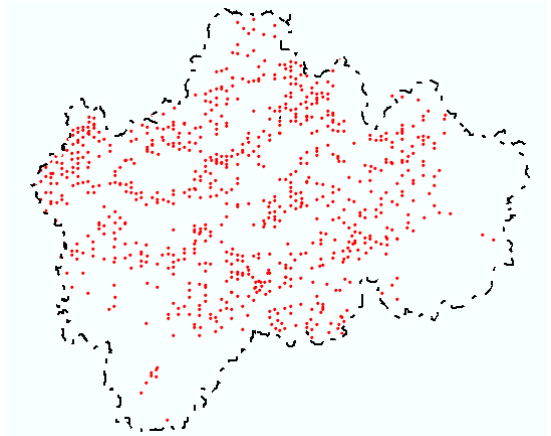


图 1 研究区样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the studied area

土壤样点信息空间变异性的各项统计特征值(均值、标准差、峰度、偏度和变异系数等)的分析主要采用 SPSS 统计软件, 地统计分析、半方差函数的拟合等采用 GS+3.1 软件, 土壤属性的空间插值分析采用 GIS 平台, 选用 ESRI 公司的 Arc/Info8.1 的 Kriging 插值法。

(1) 异常值的识别和处理。异常值也称为特异值(outlier), 是样品数据中出现概率很小的值。为了克服少数异常值带来的干扰(特异值的存在会造成变量连续表面的中断, 使得实验半方差函数发生畸变, 甚至会掩盖变量固有的空间结构特征), 有必要在进行研究之前识别出这些异常值, 并做一些必要的处理, 使它们的影响降低到最低。判断异常值的方法很多, 本文采用域法识别特异值<sup>[25]</sup>, 即样本平均值 $\bar{a}$ 加减 3 倍标准差  $s$ , 在此区间( $\bar{a} \pm 3s$ ) 以外的数据均定为特异值, 然后分别用正常最大值和最小值代替特异值。

(2) 正态检验与交换。数据的正态分布性是用 Kriging 方法进行土壤特性空间分析的前提, 本文对原始数据用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 正态分布检验概率 (PK-S) 进行检验<sup>[5]</sup>。检验时取显著水平  $\alpha = 0.05$ , 若  $PK-S > 0.05$ , 则认为数据服从正态分布。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤性质的统计特征

从表 1 可知, 3 种土壤性质的含量数据偏度值为正, 峰度存左偏尖峰态。正态分布检验采用单样本 K-S 检验方法, 置信度为 95%。从表 1 的 K-S 检验值来看, 对应的相伴概率为 0.163、0.005、0.000, 只有有机质一项大于显著性水平 0.05, 符合正态分布的要求。其他观测量符合平方根正态分布, 经平方根变换, 3 者均通过正态分布的 K-S 检验。

变异系数(CV%)的大小表示土壤特性空间变异性的。从表 1 可以看出, 3 种土壤性质的变异系数中, 土壤的有机质、有效 N、速效 K 含量的变异系数在 18%~21% 之间。土壤有机质、有效 N、有效 K 均为中等变异, 且三者的变异系数较为接近(表 1), 都不是很大, 可能这 3 种性质的变异受相同条件的控制, 如研究区的地形、土属以及土壤的水热条件等。相对来说, 有机质的变异系数最大, 达到 20.3%。因此, 在相同精度要求下, 有机质要求的采样布点要比其它土壤特性多。

对研究区域的土壤性质的传统统计分析只能概括全貌, 不能反映局部的变化特征。其只能一定程度上反映某一性质的总体状况, 不能精确定量地刻画土壤

性质的随机性和结构性、相关性和独立性。因此，必须采用地统计学方法对土壤性质数据进行空间变异性的分析。

## 2.2 土壤性质的半方差分析

根据土壤性质的统计特征值，对研究的土壤特征项（有机质、有效 N、有效 K）分别应用 GS+ 软件进行半方差的计算，所得 3 种性质的半方差拟合模型及其特征参数见表 2，3 种土壤性质的半方差结果见图 2、图 3、图 4。从表 2 数据可知，3 种土壤性质的块金值（基底值）均为正值，说明存在由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应。3

种性质的基底效应在 0.271 ~ 0.500 之间，均表现为中等的空间相关性。有机质、有效 N、有效 K 都具有较好的半方差结构，拟合程度都很好，其决定系数分别达到 0.906、0.934、0.922。有机质、有效 N 二者的半方差图中，变异函数曲线也十分相似，这说明土壤中有机质和有效 N 有着较好的相关性。它们的变异函数曲线变化较为平稳，表明在整个尺度上各种生态过程同等重要；有效 K 的变异函数曲线的变化符合指数模型，决定系数为 0.922，但变异函数曲线变化不平稳，说明控制有效 K 变化的各种生态过程在整个变程范围之内所起的重要程度不同。

表 1 3 种土壤性质的基本统计特征

Table 1 Statistical parameters for three soil characteristics

| 土壤性质         | 平均值   | 中值    | 标准差  | 最小值  | 最大值   | 变异系数<br>CV(%) | 偏度    | 峰度    | 正态检验<br>K-S | 取平方根<br>后 K-S |
|--------------|-------|-------|------|------|-------|---------------|-------|-------|-------------|---------------|
| 有机质 (g/kg)   | 18.5  | 17.9  | 7.1  | 2.0  | 39.2  | 20.3          | 0.381 | 0.049 | 0.163       | 0.435         |
| 有效 N (mg/kg) | 95.9  | 93.0  | 34.5 | 14.0 | 203.0 | 18.6          | 0.558 | 0.674 | 0.005       | 0.258         |
| 有效 K (mg/kg) | 114.7 | 109.0 | 43.3 | 13.0 | 251.0 | 19.0          | 0.827 | 1.025 | 0.000       | 0.051         |

表 2 土壤属性数据的半方差分析及拟合结果

Table 2 Theoretical semi-variance models for soil nutrients and their parameter values

| 土壤性质 | 基底值(C <sub>0</sub> ) | 基台值(C <sub>0</sub> +C) | 变程(R) | 基底效应  | 模型 | R <sup>2</sup> | RSS                  |
|------|----------------------|------------------------|-------|-------|----|----------------|----------------------|
| 有机质  | 0.264                | 0.973                  | 4530  | 0.271 | S  | 0.906          | 1.145e <sup>-3</sup> |
| 有效 N | 0.334                | 0.990                  | 5520  | 0.337 | E  | 0.934          | 1.086e <sup>-3</sup> |
| 有效 K | 0.579                | 1.159                  | 32400 | 0.500 | E  | 0.922          | 0.0146               |

从表 2 数据还可以看出：块金值越低，块金值与基台值之比（基底效应）也越低；块金值越高，块金值与基台值之比也越高。3 种土壤属性均表现为中等空间相关性，其中有效 K 的空间相关性略高，说明其样点间的差异主要来自于气候、母质、地形、土壤类型等，因为结构性因素可以导致土壤属性强的空间相关性；相反，土壤有机质的空间相关性略低，其主要受随机性因素影响，如施肥、耕作措施、种植制度等使土壤属性的空间相关性减弱，朝均一化发展。

变程表明属性因子空间自相关范围的大小。通过分析变程，土壤调查和统计分析中可避免在相关距离内重复设置样点，以遵守和满足统计抽样的独立性原则，节约调研、测定费用。从表 2 可以看出，有效 K 的变程较大，为 32400 m；有机质和有效 N 次之，分别是 4530 m 和 5520 m。这主要是由于一方面研究区域的土壤主要为花岗岩母质发育而成的赤红壤，极易发生

K、P 等土壤养分的流失，特别是地形变化较大的区域，这种养分的流失更加普遍，因此引起该地区土壤养分空间结构变异的因素与速效养分的流失有关；另一方面，研究区域不同植被的空间分布格局将影响土壤养分分布，也会造成土壤养分的空间分布差异。

## 2.3 土壤性质空间变异的各向异性

图 5、图 6 和图 7 分别是土壤有机质、土壤有效 N、有效 K 在不同方向的半方差图。表 3 是土壤有效 K 和有效 N、有机质各自在不同方向上方差的显著性差异分析。土壤的 3 种性质，各自在不同方向的相伴概率都明显大于显著性水平 0.05，说明各自在不同的方向上都不存在显著差别。因此可以得到结论：①全方向半方差图最接近所有采样点的拟合曲线；②土壤有机质、有效 K、有效 N 均不存在各向异性。由此，在采样总数一致的情况下，可以优先考虑三角网布点。

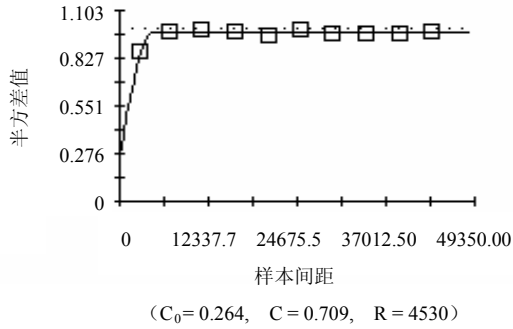


图 2 土壤有机质半方差值球状拟合模型  
Fig. 2 Spherical fitted model of semi-variogram of soil organic matter

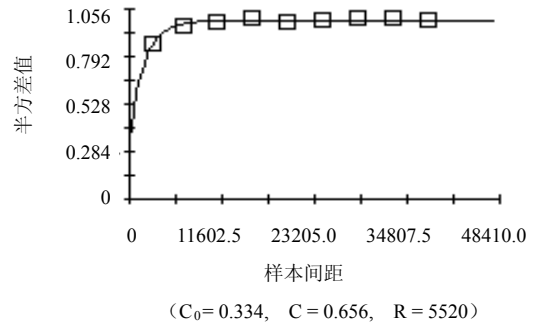


图 3 土壤有效 N 半方差值指数拟合模型  
Fig. 3 Exponential fitted model of semi-variogram of soil available N

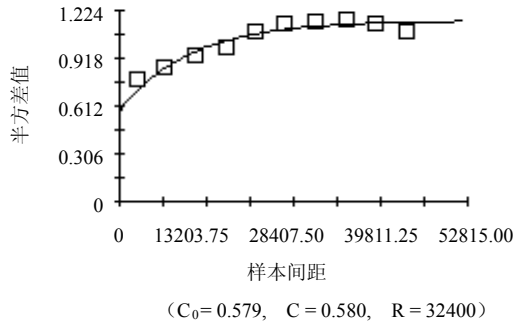


图 4 土壤有效 K 半方差值指数拟合模型  
Fig. 4 Exponential fitted model of semi-variogram of soil available K

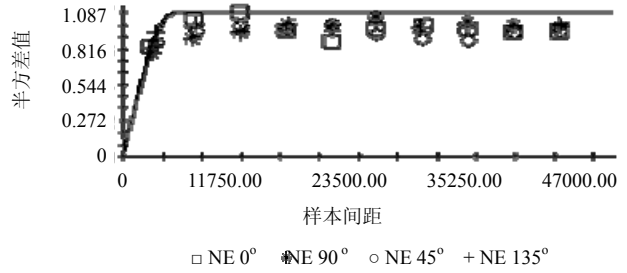


图 5 土壤有机质空间变异的各向异性  
Fig. 5 Anisotropic semi-variogram of soil organic matter in different direction

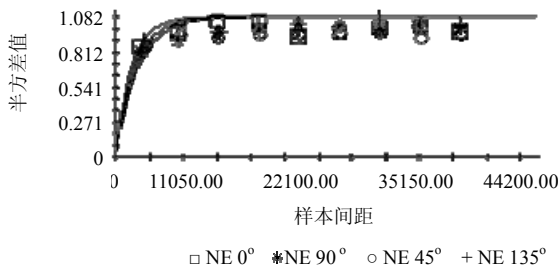


图 6 土壤有效 N 空间变异的各向异性  
Fig. 6 Anisotropic semi-variogram of soil available N in different direction

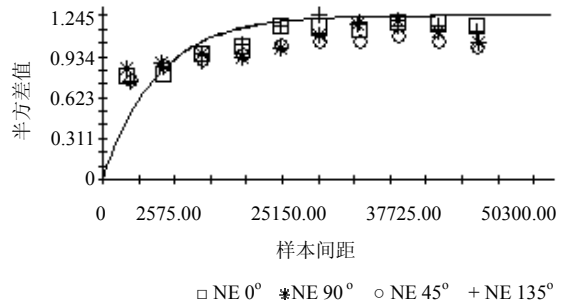


图 7 土壤有效 K 空间变异的各向异性  
Fig. 7 Anisotropic semi-variogram of soil available K in different direction

研究区域形状对半方差的拟合会产生影响，本文中东西向采样点半方差拟合度不如南北向，主要受到研究区域形状的影响（南北长，东西窄）；其次，对照研究区的高程图发现，区域内地势基本上是由南至北

逐级升高，而东西方向上高程差异较小。这表明高程是决定土壤有机质、有效 N 的空间变异的一个重要因素；土壤有效 K 并未随有机质表现出同样的各向异性，可能是由于低丘范围内地形变化比较复杂，除高程外，

表 3 土壤有效 K、有效 N、有机质不同方向的方差分析

Table 3 Variance analyses for K, N, organic matter  
in different orientations

| 角度 I    | 角度 II   | 相伴概率 |      |      |
|---------|---------|------|------|------|
|         |         | 有机质  | 有效 N | 有效 K |
| NE 180° | NE 45°  | 0.76 | 0.35 | 0.93 |
|         | NE 90°  | 0.64 | 0.67 | 0.72 |
|         | NE 135° | 0.69 | 0.46 | 0.93 |
| NE 45°  | NE 180° | 0.76 | 0.35 | 0.93 |
|         | NE 90°  | 0.44 | 0.63 | 0.67 |
|         | NE 135° | 0.48 | 0.10 | 0.86 |
| NE 90°  | NE 180° | 0.64 | 0.67 | 0.72 |
|         | NE 45°  | 0.44 | 0.63 | 0.67 |
|         | NE 135° | 0.95 | 0.26 | 0.80 |
| NE 135° | NE 180° | 0.69 | 0.46 | 0.93 |
|         | NE 45°  | 0.48 | 0.10 | 0.86 |
|         | NE 90°  | 0.95 | 0.26 | 0.80 |

还有坡度、坡向、土地利用类型等因素的变化，它们都有可能削弱高程对有效 K 空间变异的控制。所以，不同的土壤性质有不同的空间分布，同一土壤性质在不同的方向上也有不同的空间变异性。

### 3 结论

(1) 经典的统计分析和正态分析检验表明：3 种土壤性质经平方根变换，均通过正态分布的 K-S 检验，服从正态分布。3 种土壤性质的变异系数分别为 0.203、0.186、0.190，均为中等强度变异；三者变异系数比较接近，可能原因是受相同条件的控制，如研究区的地形、土属以及土壤的水热条件等。

(2) 3 种土壤性质的结构性分析表明：三者有明显的空间相关性，基台效应分别是 0.271、0.337、0.500，均为中等空间自相关性，各土壤性质在一定的区域范围内具有空间结构特征，较好地符合球状和指数模型分布。其中有机质、有效 N、有效 K 的空间相关极限距离分别是 4530、5520、32400 m。研究结果为以后土壤调查和统计分析中避免在相关距离内重复设置样点，以遵守和满足统计抽样的独立性原则，节约调研、测定费用奠定基础。土壤有机质的空间变异主要是由随机性因素引起，而有效 K 的空间变异，主要受结构性因素的影响。

(3) 土壤性质的各向异性的研究表明，全方向半方差折线最接近所有采样点的拟合曲线，NE 45°斜线向的折线次之，而东西向最差。不同的土壤养分元素有不同的空间分布，同一种土壤养分元素在不同的方向

上也有不同的空间变异性，因此，施肥时应根据其分布情况因地制宜进行。

### 参考文献：

- [1] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999
- [2] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 赖丽芳. 甘肃灌漠土土壤肥力的空间变异性典型研究. 中国沙漠, 2004, 24(4): 451-455
- [3] 许咏梅, 冯耀祖, 张小玲. 土壤速效养分空间变异研究. 新疆农业科学, 2003, 40(2): 103-105
- [4] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, 55(5): 555-566
- [5] Burgess TM, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. Soil Sci., 1980 (31) : 315-331
- [6] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma, 1999 (89) : 1-45
- [7] Bergstrom DW, Monreal CM, Millette JA, King DJ. Spatial dependence of soil enzyme activities along a slope. Soil Science Society of America Journal, 1998 (62) : 1302-1308
- [8] 红黄壤利用改良区划协作组. 中国红黄壤地区土壤利用改良区划. 北京: 农业出版社, 1985
- [9] 贺湘逸, 谢为民. 我国红黄壤利用改良的成就和问题. 土壤通报, 1983(2): 1-4
- [10] 王文富. 云南省红壤分布和利用改良. 土壤肥料, 1985(3): 1-4
- [11] 赵其国, 石华, 王明珠. 我国热带和亚热带地区土壤的肥力特点及其利用改良. 土壤, 1981, 13(5): 161-168
- [12] 罗汝英. 亚热带红壤山地和丘陵地的利用 // 李庆逵主编. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983: 227-236
- [13] 赵其国. 热带亚热带地区土壤资源的合理利用及土壤区划 // 李庆逵主编. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983: 254-259
- [14] 史德明. 红壤地区土壤侵蚀及其防治 // 李庆逵主编. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983: 237-253
- [15] 覃先孝. 红壤丘陵地农业利用规划研究简报. 土壤肥料, 1985(3): 10-15
- [16] 罗永进. 论浙西低丘红壤区农业的持续发展. 浙江农业学报, 1995, 7(5): 337-342
- [17] 柴锡周. 低丘红壤区生态模式的研究. 浙江农业学报, 1995, 7(5): 400-404
- [18] 胡月明, 王人潮, 赵庚星. 浙江省红壤资源的开发利用分区初探. 山东农业大学学报, 1996, 27(6): 41-46
- [19] Wang RC, Shi Z. Red soil resource information system and its preliminary application. Pedosphere, 1998, 8(1): 9-14
- [20] 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区水平上不同时段土壤质量变化的评价和分析. 地理科学, 1997, 17(2): 141-149

- [21] 周慧珍, 龚子同, Lamp L. 土壤空间变异性研究. 土壤学报, 1996, 33 (3): 231-241
- [22] 孙波, 赵其国, 阎国年. 丘陵红壤肥力的时空变异. 土壤学报, 2002, 39 (2): 190-198
- [23] 张华, 张甘霖. 热带地区农场尺度土壤质量指标的空间变异. 土壤通报, 2003, 34 (4): 241-245
- [24] Li Y, Lindstrom MJ. Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and steep hillslope. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65 (5): 1500-1507
- [25] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用. 北京: 中国农业出版社, 2006

## On Spatial Variance of Three Soil Characteristics in Red Soil Hilly Region Based on GIS and Geostatistics

ZHU Jin-xia, XU Hong-wei, WANG Ke, CHEN Zhu-lu

(Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** The spatial variability of organic matter, available N and available K in red soil hilly region of Jinhua County, Zhejiang Province were studied by GIS and geostatistics. The results showed that: The contents of the three soil characteristics all showed good normal distributions after being transformed by square. The theoretical spherical model was accord with soil organic matter, while the exponential model was accord with soil available N and available K. The three soil characteristics all showed moderate spatial dependence, and their contents were influenced by both the intrinsic and extrinsic factors. The three soil characteristics showed different spatial distribution patterns and each nutrient also showed different spatial variability at different direction.

**Key words:** Geostatistics, GIS, Red soil hilly region, Spatial variability