

# 低丘红壤肥力的时空变异<sup>\*</sup>

孙 波<sup>1,2</sup> 赵其国<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

阎国年<sup>2</sup>

(2 南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 南京 210024)

**摘 要** 利用地统计学方法研究了我国中亚热带低丘红壤区土壤肥力的时空变异。1985 年和 1997 年, 在 1.35km<sup>2</sup> 的区域内以 100m × 100m 的网格采集了 105 个表层土壤样品。分析结果表明土壤肥力性质具有较大的空间变异, 速效磷的变异系数最高, 而 pH 的变异系数最低。土壤 pH 空间相关性强, 而有机质、速效磷和速效钾空间相关性中等。未开垦前, 土壤肥力性质的空间相关间距大于等于红壤丘陵的直径; 开垦 12 年后, 土壤肥力性质的相关间距减少, 其中 pH 和速效钾的相关间距与红壤丘陵的半径相当。土壤肥力性质及其变化值的克立格插值结果显示出一一定的空间相似性, 说明地统计学方法可以同时分析土壤肥力在时间和空间上的变异。

**关键词** 低丘, 红壤, 肥力, 时空变异, 地统计学

**中图分类号** S158

土壤的物理、化学和生物学性质的一个特点是具有时间和空间的变化特征, 这种变化取决于各种内在的(如土壤形成因子, 包括土壤母质、地形等)和外在的因子(如土壤耕作措施, 包括施肥、灌溉和作物轮作等)的综合作用。监测土壤肥力的时空变异可以了解土壤耕作管理及污染等过程对土壤肥力的影响, 从而为精确施肥和防治土壤肥力退化提供理论依据。在对不同时间尺度的影响研究方面, 通常是通过长期试验监测土壤肥力的变化, 其中最著名的是英国洛桑试验站 1843~ 1856 年开始的经典试验(Rothamsted classical experiments)和美国的长期生态研究网络(LTER Network)。但是, 这种方法存在时间长、花费高的缺陷。如果需要在较短的时间内测定土壤肥力的变化, 传统的基于设计(Design-based)的估计与研究区域内一定的采样位置有关, 因此不可避免地存在短时间的微小变化与巨大的空间变异之间的矛盾。基于模型(Model-based)的地统计学方法, 提供了一个将空间和时间坐标结合进数据处理过程的有力工具, 它通过半方差(Semivariogram)描述空间分布模式及空间相关性, 通过克立格插值(Kriging)等方法预测未采样点土壤性质。由于考虑了与时间和空间有关的随机过程对土壤性质时空分布的影响, 地统计学方法可以很好地估计土壤肥力的时间变化, 也能用于评价土壤质量的不确定性、随机模拟土壤性质的空间分布、模拟土壤的时空变化过程等<sup>[1]</sup>。

\* 国家重点基础发展规划项目(G1999011801)和南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室资金资助

20 世纪 80 年代以来研究者大多在田块范围上, 应用地统计学方法研究和预测了土壤肥力性质的空间分布及其与作物产量之间的关系, 90 年代以来对农场范围直至地区尺度(几十至几百  $\text{km}^2$ ) 的研究开始增加<sup>[2~7]</sup>。近年来, 研究者开始研究具有巨大空间变异的土壤肥力在时间上的变化的估计方法, Papritz 和 Webster 提出利用协同克里格(Cokriging)估计具有空间自相关性的土壤性质在时间上的变化<sup>[8,9]</sup>。但是这些研究是在田块范围上针对方法论进行的探索。到目前为止, 尚未看到在农场和地区级尺度上, 针对土壤肥力的时间和空间变异进行实例研究。另一方面, 以往的研究很少考虑地形起伏对土壤肥力空间变异的影响。

我国中亚热带的湘、赣、浙三省是丘陵红壤的主要分布区, 其红壤面积达 2304.9 万  $\text{hm}^2$ , 占东南丘陵区红壤总面积的 54.4%。其中分布在缓丘地区的红壤旱坡地是目前本区农业开发中潜力最大的一种土地资源。这些低丘红壤大多为遭受不同程度侵蚀退化后的残留体, 其养分水平已接近“谷底”。评价结果表明旱地土壤养分退化程度相对水田土壤要重, 退化最严重的是磷, 最轻的是钾; 而大部分水田土壤供磷充足, 钾素的亏缺却越来越严重。因此, 为了防治土壤退化必须首先了解低丘红壤肥力的时空变异特征和影响因素。本项研究的目的一方面是揭示低丘红壤在小流域尺度上肥力的时空变异特征, 另一方面是检验地统计学方法对研究低丘红壤肥力时空变化的适用性。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域

研究区域选择位于江西省鹰潭市余江县的中国科学院红壤生态实验站(28°13' N, 116°55' E), 具有中亚热带温暖湿润的季风气候, 年均温为 17.8℃, 年均降雨量为 1785mm, 主要集中在 4~6 月。地形为低丘岗地, 海拔 35.0~54.6m, 坡度为 5°~8°。典型土壤为第四纪红粘土发育的红壤, 此外还有少量第四纪红粘土坡积物发育的水稻土。研究区域 1985 年前的主要植被为稀疏的马尾松林并覆盖草被(通常称为荒地)。1985 年后开始建立试验站, 部分荒地开垦用作旱地(包括纯旱作和果树-旱作间作两种方式), 部分旱地恢复为阔叶-针叶混交林, 部分地形部位较低的荒地开垦为水田。

### 1.2 土壤样品采集及分析

在试验站 1.1km×2.0km 的区域内, 按丘陵的主要走向, 以 100m×100m 的网格法采集表层(0~15cm)土壤样品, 并在网格内中心采集了 11 个土壤剖面样品, 样品总数为 105 个。样品分别在 1985 年和 1997 年 10 月采集, 1985 年采集后在 1:3000 的地形图上标注了采样的方格及采样点位置, 1997 年根据标注重新采样。

土壤样品采集方法是利用土钻在 30cm 直径范围内采集 5 个样品的混合样, 然后风干, 过 2mm 筛。土壤有机质用重铬酸钾湿烧法, 土壤速效钾用  $1\text{mol L}^{-1}\text{NH}_4\text{Ac}$  提取, 土壤速效磷用  $0.5\text{mol L}^{-1}\text{NaCO}_3$  (pH 8.5) 提取, 土壤 pH 用 1:2.5 的土水比测定<sup>[10]</sup>。

### 1.3 统计学分析

土壤肥力性质的平均值、方差和变异系数等描述性统计分析采用统计软件 STATISTICA 计算<sup>[11]</sup>。关于地统计学方法的基本原理已经有很好的解析和综述, 经典的半方差计算是基于数据的平方差, 对于数据中的异常值十分敏感<sup>[1]</sup>。为了减少异常值的影响, 本研究采用稳健估计(Robust estimator)计算区域化变量  $Z(X_i)$  的半方差<sup>[12]</sup>:

$$Y(h) = \frac{\left\{ \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |Z(X_i) - Z(X_i + h)| \right\}^4}{0.457 + \frac{0.494}{N(h)}}$$

式中  $Y(h)$  是样本的半方差,  $N(h)$  是在不同间距 ( $h$ ) 上的样本对的总数。经验半方差利用球形、指数和高斯 (Gaussian) 模型进行拟合。地统计学参数采用软件 S-PLUS2000<sup>[13]</sup> 计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同利用方式对土壤肥力的影响

土壤肥力性质的描述性统计结果见表 1。在研究的 4 种土壤肥力性质中, 土壤速效磷的变异系数最大, 而土壤 pH 的变异系数最小, 土壤速效钾和有机质处于中间。其他研究也表明在土壤性质中 pH 的变异性相对较低<sup>[2,7]</sup>, 而土壤速效磷的变异系数很高。Chien 等报道在 2.5km × 4.0km 区域内, 土壤速效磷的变异系数高达 199%<sup>[5]</sup>。表 1 中土壤有机质的变异系数较 Tsegaye 和 Hill<sup>[7]</sup> 在 37m × 45m 田块中的报道值高 5 倍以上。土壤速效磷和有机质变异性较大的原因可能与较大区域内土地利用、施肥和侵蚀等过程的不同导致的不均一性有关。此外, Olsen 法测定土壤速效磷适合于中性和碱性土壤, 在酸性土壤中其测定的变异较大也是一个可能的原因。

表 1 土壤肥力性质的描述性统计值

Table 1 Descriptive statistical results of the tested soil properties ( $n = 105$ )

土壤性质 Soil property	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)	最小值 Minimum	最大值 Maximum
1985					
pH(1:2.5H <sub>2</sub> O)	5.0	0.4	7.9	4.5	8.0
有机质(g kg <sup>-1</sup> )	14.1	8.3	58.7	2.9	42.9
速效磷(mg kg <sup>-1</sup> )	2.8	8.4	302.5	0.2	74.0
速效钾(mg kg <sup>-1</sup> )	65.8	35.8	54.5	24.0	328.0
1997					
pH(1:2.5H <sub>2</sub> O)	5.0	0.4	7.4	4.0	6.7
有机质(g kg <sup>-1</sup> )	11.2	6.0	53.9	4.0	35.3
速效磷(mg kg <sup>-1</sup> )	5.3	10.7	203.2	0.2	53.8
速效钾(mg kg <sup>-1</sup> )	98.4	109.5	111.2	13.0	933.0

### 2.2 土壤肥力的空间变异

空间相关性分析表明, 土壤肥力性质均表现出空间等方向性 (Isotropic), 这与土壤形成因素以及作物和施肥管理措施等因素在缓丘区的各个方向上差异不大有关。地统计学分析的经验半方差结果见图 1, 各个土壤肥力性质的半方差模型及其拟合参数见表 2。

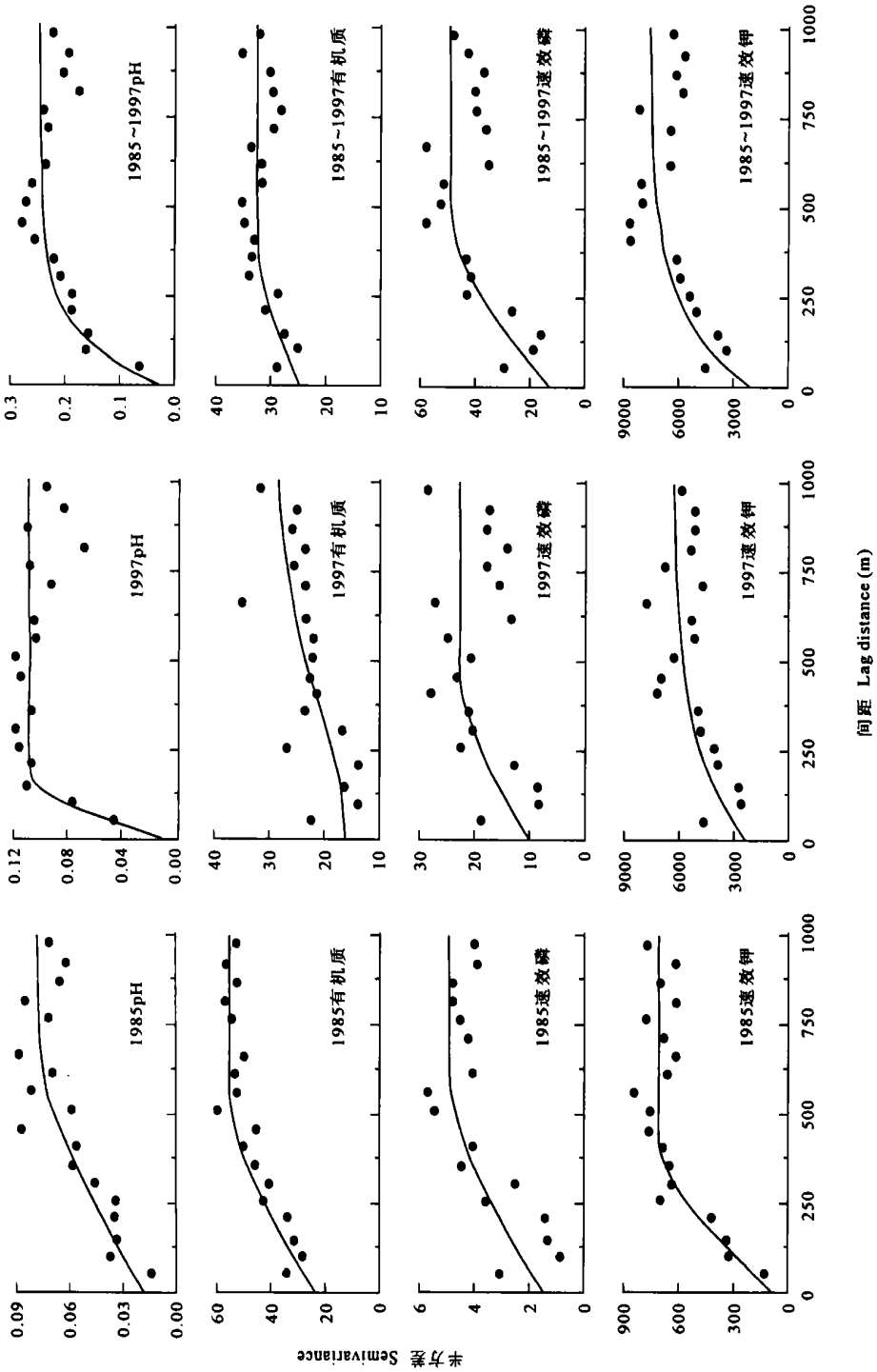


图 1 土壤肥力性质的经验半方差图及其拟合模型  
 Fig.1 The empirical semivariograms (dots) and the fitted models (lines) of soil properties

表 2 土壤肥力性质及其变化值的半方差模型拟合参数

Table 2 Parameters fitted by semivariogram models for soil chemical properties and their changes

土壤性质 <sup>1)</sup> Soil property	时间 Year	拟合模型 Model	相关间距 Range(m)	基底方差 Nugget	基台值 Sill	基底方差/基台值(%) Nugget/Sill
pH	1985	Spherical	757	0.019	0.077	24
	1997	Spherical	184	0.008	0.107	7
有机质	1985	Spherical	597	24.4	54.7	45
	1997	Gaussian	551	16.3	28.7	57
速效磷	1985	Spherical	639	1.49	4.91	30
	1997	Spherical	497	10.1	22.6	45
速效钾	1985	Spherical	448	90.4	708.6	13
	1997	Exponential	248	2314.1	6230.3	37
$\Delta$ pH		Exponential	137	0.024	0.249	10
$\Delta$ OM		Spherical	410	24.0	32.2	75
$\Delta$ AP		Spherical	490	12.7	48.3	26
$\Delta$ AK		Exponential	198	2063.8	7505.1	27

1) OM 为有机质, AP 为速效磷, AK 为速效钾。

所有土壤肥力性质的基底方差(Nugget)均为正值,说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应。土壤肥力性质的空间相关性可以根据基底方差与基台值(基底方差+结构方差,Sill)比值的大小进行划分,基底方差/基台值小于25%时,空间相关性强;在25%~75%之间时,空间相关性中等;大于75%,空间相关性弱<sup>[4]</sup>。图1和表2的结果表明,土壤pH和未开垦前(1985年)的土壤速效钾具有很强的空间相关性,表明这两个性质的变化主要由内在因子控制。这些因子包括土壤盐基强烈淋溶作用、以及由第四纪红粘土母质决定的较高的交换性Al含量和较低的交换性K含量。土壤有机质和速效磷具有中等强度的空间相关性,表明这两个性质的空间变化是内在因子(土壤形成因子)和外在因子(施肥耕作措施)共同作用的结果。由于施肥的影响,土壤速效磷在1997年空间相关性由强烈变为中等。Chien等的研究也表明,在10km<sup>2</sup>区域内土壤性质呈现中等空间相关性<sup>[5]</sup>。

从空间相关间距(或称变程,Range)上看,1985年土壤肥力性质的相关间距变化范围从土壤速效磷的448m到土壤pH的757m。在研究区域内,沿西南—东北方向主要分布着5个低丘,其平均直径为470m。这说明在未开垦前,低丘红壤肥力性质的空间相关间距与丘陵直径相当或更大。Miller等也发现土壤性质的相关间距与丘陵的直径相似<sup>[4]</sup>。以上的结果表明,在相似的气候、土壤母质和土地利用方式下,地形决定了土壤性质的空间相关间距。

随着荒地的开垦利用,土壤肥力性质的空间相关间距减小(表2)。在1997年,土壤pH和速效钾的空间相关间距大致与红壤丘陵的半径相当。由于红壤旱地或林地顺坡种植,丘陵的半径往往是具有相同作物和施肥管理措施的田块的最大长度。以往在热带地区的研究表明,热带森林砍伐焚烧后,焚烧面积的大小决定了土壤性质的空间相关

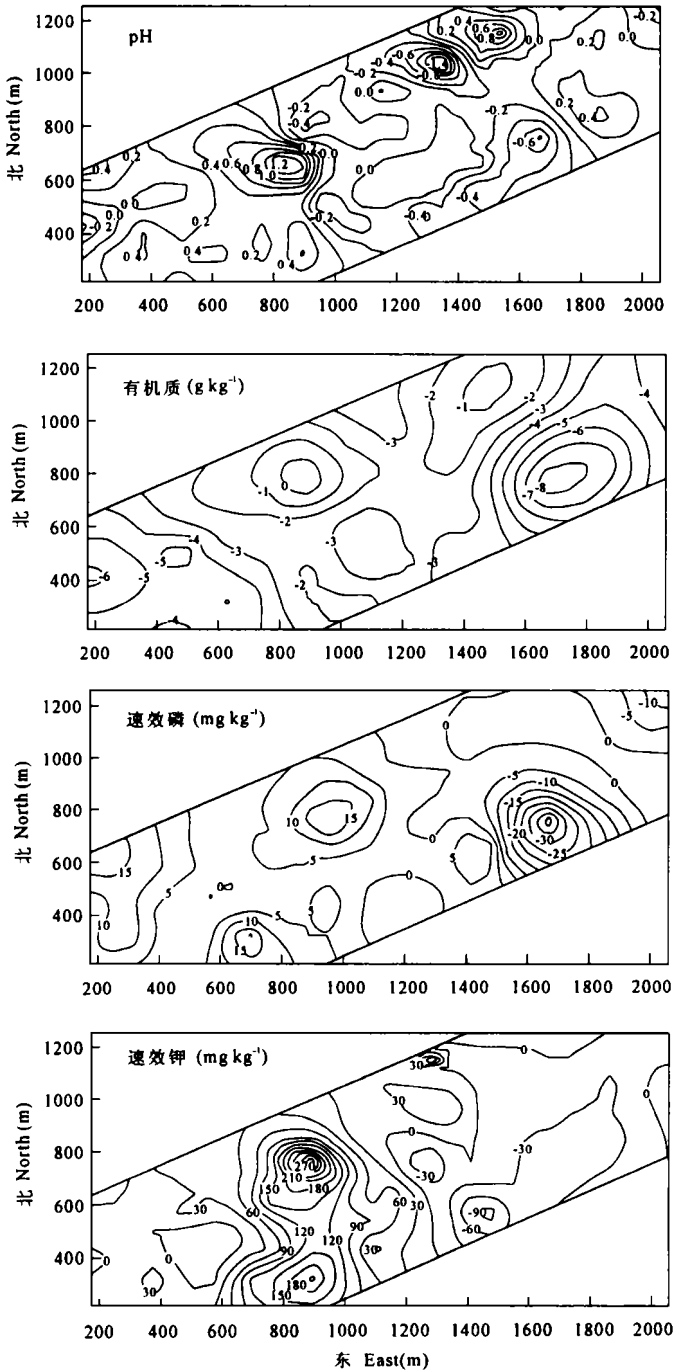


图 2 1985 年与 1997 年土壤肥力性质变化值的经典克立格插值等值线图

Fig. 2 Contour maps of ordinary kriged change values of soil chemical properties between 1985 and 1997

距<sup>[3]</sup>。耕垦对土壤有机质和速效磷空间相关间距的减少作用较对 pH 和速效钾的影响小。由于耕地中土壤有机肥投入很少,林地中的枯枝落叶往往被农民用作燃料,而土壤侵蚀作用普遍比较强烈,因此土壤有机质的变化不大。虽然耕地中磷肥投入较高,但由于红壤中富含铁铝氧化物,其残留的肥料磷大多被土壤表面固定,因此土壤速效磷含量普遍较低。与土壤有机质和速效磷相比,在耕地及树木根圈中施用的钾肥及石灰对土壤速效钾和 pH 的影响相对较大,因此耕垦对 pH 和速效钾的空间相关间距影响较大。

当在少量采样点上对土壤肥力进行长期序列测定时,模拟土壤肥力时空变化的最适合方法是多变量的时间序列分析。相反在较少的时间段对较大空间范围内的土壤肥力进行测定时,可以用多变量的空间随机过程对时空变化过程进行简化。Papritz 和 Webster 提出一个协同克立格法,利用假交互方差(Pseudo cross variogram)对田块土壤性质进行块段(Block)空间变化估计<sup>[8,9]</sup>,但是这种方法比较复杂,并且处于探索阶段。表 2 的分析结果表明,土壤肥力性质在两个时段的绝对差异也表现出空间相关性,其基底/基台值和空间相关间距与 1997 年的肥力性质相似。因此,可以通过对土壤肥力变化值直接进行克立格插值来分析和预测土壤肥力的时空变异。

### 2.3 土壤肥力时空变异的克立格插值

对未采样点土壤肥力性质的变化进行插值采用经典的克立格法(Classical kriging)。插值后的等值线图表明克立格插值的平滑性减少了土壤肥力性质的突然变化(图 2)。虽然传统的相关分析没有揭示出土壤肥力性质间的显著相关性,但克立格插值的结果揭示了土壤肥力性质在一定程度上表现出空间相似性。对 1985 年土壤肥力性质的克立格插值表明,在研究区域的东南区土壤肥力性质均表现出一个峰值,这一区域恰好是丘陵谷地中的水田分布区。在 1997 年,除了土壤有机质外,其余 3 个土壤性质在研究区域的中心区表现出一个明显的峰值,而这一区域是荒地开垦为旱地和果园的集中区域。而对土壤肥力变化值的克立格插值结果表明,土壤肥力变化值在上述两个区域分别表现出增加和降低,这从一个方面说明了利用克立格插值法预测土壤肥力时空变化的可信性(图 2)。

## 3 结论

在土壤 pH、有机质、速效磷和速效钾 4 种肥力性质中,速效磷的空间变异系数最大,pH 最小。土壤肥力性质及其变化值均表现出空间相关结构。基底/基台值的大小表明土壤 pH 空间相关性强,其空间变化主要由内在因子控制;而有机质、速效磷和速效钾空间相关性中等,其空间变化由内在因子和外在因子共同作用决定。土壤肥力性质在未开垦前,其空间相关间距大于或者等于红壤丘陵的直径。土地利用方式改变后,土壤肥力性质的空间相关间距减少。其中土壤 pH 和速效钾的空间相关间距与红壤丘陵的半径相当,这是丘陵开垦后具有相似耕作管理的田块的通常长度。克立格插值的结果揭示了土壤肥力性质在一定程度上表现出空间相似性。土壤肥力变化值在原来的水田区域和荒地开垦为旱地的区域分别表现出增加和降低。本文的结果表明,利用地统计学方法可以同时分析土壤肥力在时间和空间上的变异。

致 谢 陈志诚绘制和标注了 1980 年的采样网格及采样点, 吴锡军和刘崇群采集和分析了 1980 年的土壤样品, 并提供分析结果, 在此一并感谢。

## 参 考 文 献

1. Goovaerts P. Geostatitics in soil science: state-of-the art and perspectives. *Geoderma*, 1999, 89: 1~ 45
2. Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semivariograms. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1028~ 1032
3. Trangmar B B, Yost R S, Wade M K. Spatial variation of soil properties and rice yield in recently cleared land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51: 668~ 674
4. Miller M P, Singer P M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, 52: 1133~ 1141
5. Chien Y-J, Lee D-Y, Guo H-Y. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Sci.*, 1997, 162: 291~ 298
6. Dobemann A, Goovaerts P, Neue H U. Scale-dependent correlations among soil properties in two tropical lowland rice fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 1483~ 1496
7. Tsegaye T, Hill R L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurement. *Soil Sci.*, 1998, 163: 155~ 165
8. Papritz A, Flühler H. Temporal change of spatially autocorrelated soil properties, optimal estimation by kriging. *Geoderma*, 1994, 62: 29~ 43
9. Papritz A, Webster R. Estimating temporal change in soil monitoring, II Sampling from simulated fields. *European J. Soil Sci.*, 1995, 46: 13~ 27
10. 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 1~ 283
11. StatSoft. STATISTICA for Windows [Computer program manual]. StatSoft, Inc., Tulsa, OK, 1995
12. Cressie N, Hawkins D. Robust estimation of the variogram. *Mathematical Geology*, 1980, 12: 115~ 125
13. Mathsoft. S.-SpatialStats User's Manual for Window and Unix, Data Analysis Products Division, MathSoft, Inc., Seattle, WA, 1996
14. Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 1501~ 1511

## SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF RED SOIL FERTILITY IN LOW HILL REGION

Sun Bo<sup>1,2</sup> Zhao Qi-guo<sup>1</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 821, Nanjing 210008, China*)

Lu Guo-nian<sup>2</sup>

(2 *Nanjing Normal University, Key Laboratory of Geography Information Science in Jiangsu Province, Nanjing 210024, China*)

### Summary

Research to address spatio-temporal variability of soil chemical properties was conducted with geostatistical method in low hill region in subtropical China. Soil samples from 0 to 15 cm depth were collected at 105 locations on a 100-by 100-m grid within a 1.35 km<sup>2</sup> field in 1985 and again in 1997. Soil properties varied sharply, with available P showing the highest CV and soil pH the low-



est. Geostatistical analysis revealed that all the soil chemical properties and their changes between the two sampling time were spatially structured. The nugget to sill ratio showed a strong spatial dependence for soil pH, and a moderate one for other properties. The ranges for soil properties sampled in 1985 were roughly equal or larger than the diameter of the hills. Changing the land use patterns decreased the ranges for soil chemical properties. The ranges for soil pH and available K were about the radius of hills. The contour map by kriging showed, to a certain extent, a spatial similarity among the estimated values for soil properties in and between the two sampling time. This showed the kriging can be used to analyze the spatio-temporal variability of soil properties.

**Key words** Geostatistics, Spatio-temporal variability, Soil properties, Low hill region