

# 江津市紫色土中 N、P 养分元素区域空间变异性研究

朱益玲<sup>1</sup>, 刘洪斌<sup>2</sup>, 江希流<sup>1</sup>

(1. 国家环保总局南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 西南农业大学资源与环境学院, 重庆 400716)

**摘要:**利用地统计学, 结合 GIS 研究紫色土土壤表层(0~20cm)的全氮、碱解氮、全磷和速效磷 4 种养分含量的空间分布特征。结果表明, 全氮和速效氮为正态分布, 全磷和速效磷为对数正态分布; 通过半方差函数分析, 发现全氮存在纯块金效应, 块金值为 0.2, 其它养分在一定间距内(50m)存在空间相关性, 且为中等强度的空间自相关性(块金值与基台值之比在 25%~75%之间); 用普通克里格法和对数正态克里格法进行最优内插, 做各种养分含量的分布图。结合 GIS 可充分了解土壤中 N、P 养分的空间变异性规律, 并可进一步应用于精确施肥和农业非点源污染预测和控制。

**关键词:**紫色土; 土壤中 N、P; 地统计学; 空间变异

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)01-0138-06

## Investigation of the Spatial Variability of Nitrogen and Phosphorus in Purple Soils in Jiangjing City, Sichuan, China

ZHU Yi-ling<sup>1</sup>, LIU Hong-bin<sup>2</sup>, JIANG Xi-liu<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, State Environmental Protection Administration, Nanjing 210042, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest Agriculture University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** In this paper, the spatial distribution pattern of the total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus and total phosphorus in surface purple soil (0~20cm) with a city region were analyzed by applying geostatistics combined with GIS. The spatial distribution pattern of the four soil nutrient parameters were quantitatively described with semivariogram and the soil nutrient content distribution pattern was constructed by using Ordinary Kriging and lognormal Kriging optimal interpolation. The results indicated that total nitrogen, available nitrogen showed a normal distribution, the others with a lognormal distribution; the analysis of semivariogram indicated that the total nitrogen showed the pure nugget effect with the nugget of 0.2, others were correlated in a given spatial range (50m) with mild spatial relativity, the nugget-to-sill ratio was from 25% to 75%; Preliminary analysis was made for the spatial variability of the soil nutrients by using the group map of the soil nutrients with Ordinary Kriging. These results could be useful for further application in precision fertilization and for evaluation of non point polluting of agricultural lands.

**Key words:** purple soil; soil N P; geostatistics; spatial variability

土壤并非一个均质体, 而是一个时空连续的变异体, 具有高度的空间异质性<sup>[1]</sup>。20 世纪 70 年代以来, 已有较多的将地统计学方法应用于土壤环境科学研究领域的报道<sup>[2~5]</sup>。近年来, 农业非点源污染问题受到政府和研究者的不断重视。这种污染源中, N、P 元素的污染是最主要的和重要的, 而土壤 N、P 养分的空间变异性对于非点源污染的发生和发展具有重要作用<sup>[6]</sup>。本文利用 GIS 软件中的 Arcmap 地统计学分析模块(Geostatistical Analysis)和空间分析模块(Spatial Analysis), 研究西南丘陵地区紫色土中 N、P 养分空间变异规律, 为建立土壤养分的空间内插和制图方法提供实测依据。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 研究区概况

本研究在重庆江津市进行, 研究区的总面积为 70.0hm<sup>2</sup>, 属丘陵低山地貌类型, 为中亚热带季风性

气候, 年降雨量为 1030.7mm, 年均温 13.6℃~18.4℃。土壤主要为沙溪庙组砂页岩发育形成的紫色土和水稻土。土地利用现状主要为水田、旱地, 现改为南方早熟梨种植区, 种植制度以中稻或稻麦两熟为主, 少部分间套红苕或豌豆等作物。施肥结构以化肥为主, 有机肥料并重。

#### 1.2 采集土样和室内分析

采用随机采样方式采集 0~20cm 的表层土壤, 样点之间的间距最小为 50m, 共采样点 52 个。同时, 记录采样点的坐标数据(大地坐标和相对 km 网坐标), 生成研究区的样点分布图(图 1)。

#### 1.3 统计与建模

本研究主要采用地统计学中半方差理论对样品

收稿日期: 2002-12-11; 修订日期: 2003-03-03

基金项目: 重庆市科委科技攻关项目(6217); 重庆教委科技项目(011802)

作者简介: 朱益玲(1975~), 女, 浙江永康人, 硕士, 从事土壤资源信息管理研究。

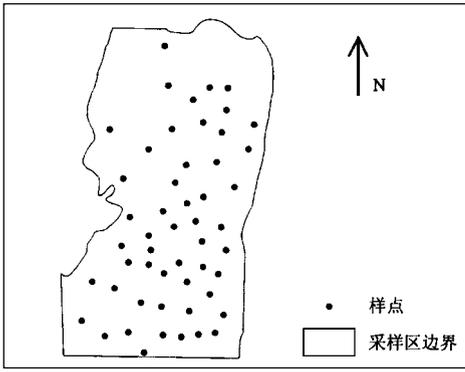


图 1 研究区的样点分布图

Fig.1 The sample distribution pattern of study area

N、P 进行空间变异分析,计算公式如下:

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

式中,  $N(h)$  是间距为  $h$  时的样点对数;  $\gamma(h)$  为变异函数;  $h$  为样点空间间隔距离,称为步长(lag),

$Z(x_i)$  是样点  $Z$  在位置  $x_i$  的实测值,  $Z(x_i + h)$  是与  $x_i$  距离为  $h$  的样点的值.

半方差函数的具体计算是在 GIS 支持下进行的,所用的 GIS 软件为美国环境地理研究所(ESRI)研制的 ArcInfo8.1、Arc View3.2.在样点分布图中输入土壤表层 0~20cm 的土壤养分的数据,生成属性数据,建立数据库,即可计算出半方差,最后用理论模型拟合.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分的统计分析

表 1 是对 52 个样本的养分数据进行常规统计分析的结果.从表 1 可以看出,全氮、全磷和碱解氮的变异系数 < 40%,而速效磷的变异系数最高,达 106%,这可能与土地利用、施肥不均和侵蚀等过程的不同导致的不均一性有关.

判断土壤养分数据的分布类型,先将分析数据

表 1 N、P 养分含量的统计特征表

Table 1 The statistical feature values of nitrogen and phosphorus

土壤属性	最大值	最小值	平均值	方差	标准差	变异系数/%
全氮/ $g \cdot kg^{-1}$	2.57	0.38	1.32	0.2	0.5	38.5
碱解氮/ $mg \cdot kg^{-1}$	191.3	81.3	129.6	679.2	26.1	20.1
全磷/ $g \cdot kg^{-1}$	2.78	0.63	1.03	0.14	0.37	36
速效磷/ $mg \cdot kg^{-1}$	13.8	0.3	3.1	10.9	3.3	106

按照经验公式<sup>[8]</sup>分组,确定组距及组数.

$$\begin{cases} i(\text{组距}) = \text{全距} / (1 + 3.322 \lg N) \\ i(\text{组数}) = 1 + 3.322 \lg N \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $N$  为观测值总数(即测定的样数),  $\lg$  为

常用对数.然后根据分组数据统计各组内的频数,制成频数表,计算出频率(%),在此基础上,以频率作纵坐标,以养分浓度作横坐标,生成频率分布直方图(见图 2).

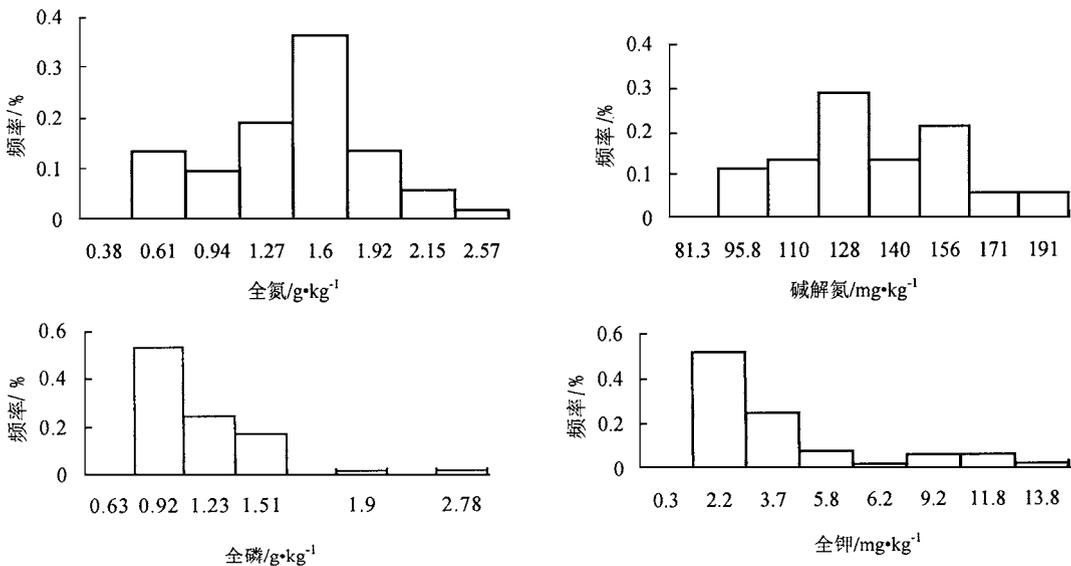


图 2 频数分布直方图

Fig.2 Frequencies distribution map

可见,研究区内全氮、碱解氮都接近于正态分布,全磷和速效磷为偏态分布.因此,在 Geostatistical Analyst 模块中的 Explore Data 将全磷和速效磷取对数后使其呈对数正态分布,再进行空间变异分析.

## 2.2 土壤养分含量的空间变异

变异函数是地统计学中研究空间分布特征的有力工具.根据不同空间位置上土壤各养分含量的分析数据,计算实际半方差值  $\gamma(h)$ ,绘制变异函数曲线图,这是土壤养分空间变异性分析的基本性步骤,

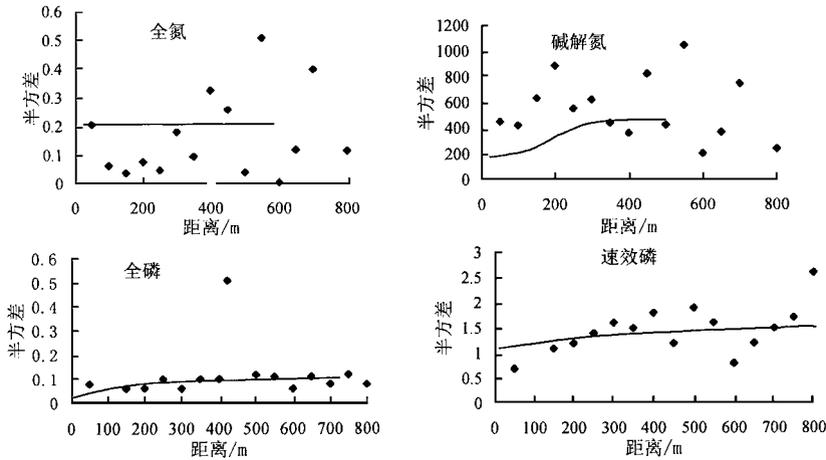


图3 土壤养分的半方差图

Fig.3 Semivariogram of nitrogen and phosphorus

从图3可以看出,N和P的半方差变化有2种不同的趋势:

(1) 全氮的半方差值大致围绕一条直线上下波动,因而可以认为是各向同性的,亦即半方差不随空间距离而变化,也就是说存在纯块金效应(pure nugget effect).这说明在误差范围内,研究区内全氮的分布在空间上是独立的.

(2) 碱解氮、全磷和速效磷的半方差随着间距的增加而增加,在达到一定的距离后,最后趋向于某一平稳值.显示为当  $h > a$  时,  $\gamma(h)$  在某一值上下摆动的特征,因而反映出一定的空间变异结构.

计算出  $\gamma(h) - h$  的散点图之后,分别用不同类型的模型来进行拟合,得到模型的参数值.在用 Geostatistical Analysis 模块进行分析后,得到各种模型拟合的各种参数值.选取 Mean 最接近 0, Root-Mean-Square 和 Average standard Error 最小, Root-Mean-Square Standardized 最接近 1 的模型类型,此模型即为最佳拟合模型.最后用交叉验证法(cross-validation)来修正模型的参数<sup>[9]</sup>,所得结果见表2.

其中,  $C + C_0$  值称基台值(sill),是半方差函数

也是确定是否进行地统计学分析和 Kriging 插值的前提.半方差函数曲线图表示了土壤养分含量的区域化变量在距离与方向上不同的所有成对点之间的观测值的空间相关性.

### 2.2.1 土壤养分含量在各向同性(isotropy)条件下的变异

图3是4种土壤养分指标在各向同性条件下,按实际变异函数的计算结果以半方差为纵坐标,采样距离为横坐标,分别绘制的变异函数曲线图.

随间距增到一定程度后出现的平稳值,通常表示系统内总的变异,一般接近于观测值的方差  $S^2$ ;  $C_0$  是间距  $h$  为 0 时的半方差,称为块金系数(nugget coefficient),或块金效应(nugget effect),它反映了在最小间距内的土壤变异性,和测量分析过程中引起的误差,较大的块金方差值说明较小尺度上的某种过程不容忽视.总体来看,大多数养分要素的块金值都比较小(见表2),这说明在最小间距内的变异分析过程中引起的误差较小.  $a$  是变程(range),是半方差达到基台值时的样本间距,代表了该参数的相关距离,变程的变化也反映出引起土壤要素变异主要过程的变化.供试土壤养分含量的变程在 350 m ~ 650 m 范围内,养分观测值之间存在着一定的相关关系,如大于该值时,则说明它们之间是相互独立的.块金值与基台值之比可表明系统变量的空间相关性的程度,因为土壤养分分布是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果.结构性因素,如气候、母质、地形、土壤类型等可以导致土壤养分强的空间相关性,而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使土壤养分的空间自相关性减弱,朝均

一化发展<sup>[10-11]</sup>。如果比值小于 25%,说明系统具有强烈的空间相关性;大于 75%则说明系统空间相关性很弱;在两者之间,则表明系统具有中等的空间相关性。图 3 和表 2 结果表明,全磷的块金值与基台值之比最低,为 33.3%,说明影响全磷含量分布的结构性因素作用很强,它们的变化主要由结构性因素控制,导致样点之间的空间自相关作用强。速效磷的

块金值与基台值之比最高,为 73.3%,说明人为活动对速效钾的影响程度很大,削弱了结构性因素造成的强的空间自相关作用。3 种元素的块金值与基台值之比都在 25%~75%之间,都为中等强度的空间相关性,表明这些田间养分性质的空间变化是结构性因素(如土壤形成因子)和随机性因素(施肥耕作措施)共同作用的结果。

表 2 氮和磷元素的理论模型和相应的参数

Table 2 The theory models of nitrogen and phosphorus and corresponding parameters

土壤属性	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	变程 $a/m$	块金值/基台值/%
全氮	纯块金效应	0.2			
碱解氮	高斯模型	386	658	350	58.7
全磷	指数模型	0.03	0.09	650	33.3
速效磷	高斯模型	1.1	1.5	640	73.3

### 2.2.2 土壤养分含量在各向异性(anisotropy)条件下的变异

如果变异函数  $\gamma(h)$  在各个方向上的变化都相同时称各向同性,反之称为各向异性<sup>[12]</sup>。在实际研究工作中,各向同性是相对的,而各向异性则是绝对的。在结构分析中,最重要的是分析变异函数  $\gamma(h)$  的各向异性问题,产生各向异性的原因。Journel 等<sup>[13]</sup>将各向异性分成 2 类,即几何异向性(geometric anisotropy)和带状异向性(zonal anisotropy)。

表 3 是 3 种土壤养分在 4 个方向上的空间变异函数参数值。可以看出,3 种土壤养分在不同方向上具有明显的各向异性结构特征。其中,速效磷在不同方向上的基台值都相同,变程不同,是典型的几何异向性变异。碱解氮和全磷在不同的方向上,块金值和基台值有一定的差异,但也有相似值或相同值,说明同时具有几何异向性和带状异向性。这些说明各种养分在不同方向上的空间变异尺度都不相同,因而土壤养分在空间分布上的几何形状是极不规则的。

### 2.3 土壤养分含量的空间分布格局(Kriging 插值)及分析

除全氮外,其它 3 种土壤养分都具有明显的各向异性结构,分析得到它们的变异函数理论模型(表 3)。据此,可以采用普通克立格法和対数正态克立格法进行最优内插,绘制各种土壤养分含量的空间分布格局(kriging map)图。当然,Kriging 插值的结果受变异函数模拟精度、样点的分布、邻近样点的选取数(Searching neighborhood)的影响<sup>[14-15]</sup>。

图 4 是土壤全氮的插值法分级面积图,因存在纯块金效应,其空间结构性比较差。这与本次采样间距过大有关,看来今后采样点间距的设置应小于

50 m。

表 3 4 个方向上的理论模型及相应的参数

Table 3 Theory models and corresponding parameters in four directions

土壤养分	方向	理论模型	块金值	基台值	变程 / m	块金值/基台值/%
碱解氮	0°	球状模型	467.2	667.9	440	70.0
	45°	高斯模型	448.7	670.1	320	66.9
	90°	球状模型	467.2	667.9	470	70.0
	135°	高斯模型	448.7	670.1	300	66.9
全磷	0°	高斯模型	0.05	0.09	410	0
	45°	指数模型	0.1	0.8	790	12.5
	90°	高斯模型	0	0.7	440	0
	135°	指数模型	0.1	0.8	750	12.5
速效磷	0°	球状模型	0.9	1.5	520	60.0
	45°	球状模型	1.0	1.5	610	80.0
	90°	球状模型	0.9	1.5	530	60.0
	135°	球状模型	1.0	1.5	670	80.0

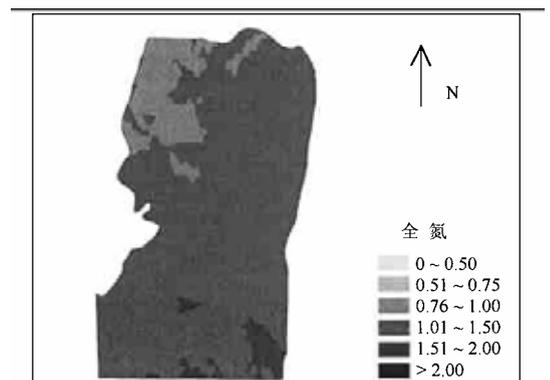


图 4 全氮的插值图

Fig. 4 The interpolation map of total nitrogen

同样,图 5 是用普通克立格法插值后的土壤中碱解氮空间分布图。从图中可看出,土壤中碱解氮含量的空间分布总的趋势是:由北向南方向含量逐

渐升高,共有 3 个级别,其空间分布特征与全氮的空间分布特征相关性显著.土壤中碱解氮的含量最高级别为 1 级( $>150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )水平,出现在研究区的南部,东部还有一小块图斑出现,共占总面积的 9.1%.2 级( $120 \sim 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的面积最大,占总面积的 52.2%.3 级( $90 \sim 120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )次之,主要分布在研究区的西南部,占总面积的 38.7%.氮的空间变异性与地形有关,在该研究区的东部和南部,地势平洼,排水困难,土壤湿度高,土温较低,氮的积累也较为容易,因此含量较高.

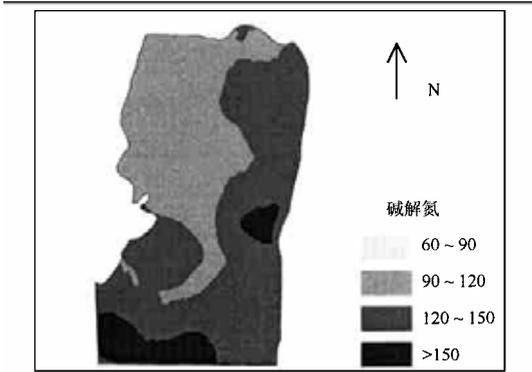


图 5 碱解氮的插值图

Fig.5 The interpolation map of available nitrogen

因土壤中全磷的分布类型符合对数正态分布,故采用对数正态克立格法进行内插.插值的结果见图 6.全磷的空间分布总的趋势是:由西北向东南方向含量逐渐降低,共有 3 个级别.土壤中全磷含量 1 级水平( $>1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )主要分布于研究区的北部和西部,占总面积的 63.1%;2 级水平( $0.81 \sim 1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )次之,占总面积的 33.8%;3 级水平( $0.61 \sim 0.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )是研究区中全磷含量最低的,仅占总面积的 3.1%,零星出现于研究区的东南部.可见土壤中全磷的分布主要与成土母质有关.

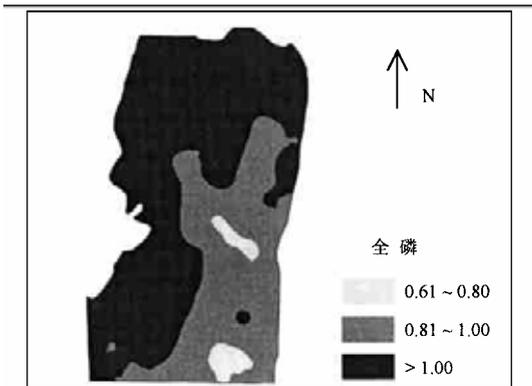


图 6 全磷的插值图

Fig.6 The interpolation map of total phosphorus

同理,对土壤中速效磷进行内插,插值的结果见图 7.从图 7 可知,速效磷的空间分布结构在南北方向较好,而在东西方向则较差.这可能与狭长取样,东西方向上取样数目过少有关.速效磷较高的水平(3 级  $11 \sim 15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )出现在研究区的北部,只占总面积的 0.9%.4 到 6 级为缺磷土壤.其中,4 级( $6 \sim 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )分布于研究区的北部和中部偏南,占总面积的 8.8%,5 级( $4 \sim 5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和 6 级( $\leq 3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )分布最广,各占总面积的 41.6%和 48.7%.影响有效磷含量的因素除全磷含量外,还受土壤酸碱度和土壤中活性铁、铝、钙等离子固定作用的影响.

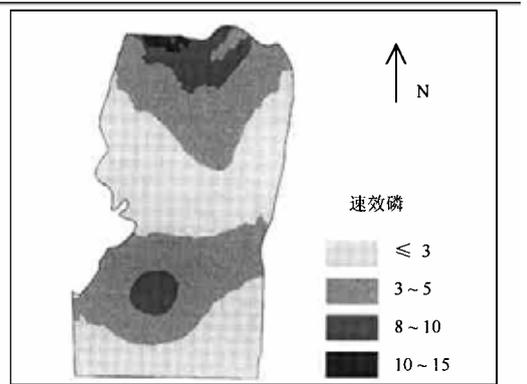


图 7 速效磷的插值图

Fig.7 The interpolation map of available phosphorus

### 3 结论

3 种(除全氮)土壤养分在一定的范围内观测值之间存在着空间相关性,即存在空间变异结构特征,这对于野外研究土壤养分区域分布和评价农业非点源污染潜力时十分重要.在今后研究土壤养分空间变异结构时,对于采样点的设置,不仅要在大尺度上采样观测,还应同时在小尺度上进行套合取样,这样才能更加准确地了解区域化变量在不同尺度上的变异特征.利用 GIS 的图形数据与属性数据相联的特性,进行随机采样,样点对之间的距离可很方便地测量出.这样,克服了用网格法采样时,样点数过多,工作量过大的弱点.同时,由于土壤养分各向异性分布,在不同的方向上采样密度也应有所不同.在小尺度距离上相对要多一点,在大尺度距离上相对少一点,这样才能保证在变程(a)范围内的变异函数值能准确反映区域化变量的空间变异性.

根据半方差图,可以确定各种土壤养分空间分布的理论模型.全氮存在较小的空间相关性,其空间变化是结构性因素(自然因素)和随机性因素(人为

利用因素)共同作用的结果.而其它养分是块金值与基台值之比大多在 25%~75%之间,说明都具有中等的空间相关性,这些性质的变化都是结构性因素和随机性因素共同作用的结果.

由于大部分土壤养分存在空间变异结构,可用普通克里格法和对数正态克里格法绘制等级图.从插值图可方便地了解土壤养分的空间分布,从养分含量的斑块(patch)的大小、形状及空间分布等特点可以判断一定区域内养分流动与非点源污染发展趋势及潜力.

参考文献:

- [ 1 ] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[ M].北京:科学出版社,1999.177~178.
- [ 2 ] Burgess T M, R Webster. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging[ J]. Soil Sci., 1980, **31**:315~331; 333~341.
- [ 3 ] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation [ J]. Soil Sci., 1983, **34**:577~597.
- [ 4 ] 沈思渊.土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望[ J].土壤学年进展,1989, **17**(3):11~24.
- [ 5 ] 王学军,邓宝山,张泽浦.北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征[ J].环境科学学报,1997, **17**(4):412~416.
- [ 6 ] 王志刚.广东省农村生态环境现状与保护[ J].农村环境与发展,2002,(2):18~19.
- [ 7 ] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[ M].北京:中国农业科技出版社,2000.147~181.
- [ 8 ] 胡孝绳.统计学. Log Cabin Societg, P. O. Box 1813, Singapore. 1976. 61~62.
- [ 9 ] Kevin Johnston, Jay M Ver Hoef, Konstantin Krivoruchko, Neil Lucas. Using ArcGIS Geostatistical Analyst. GIS by ESRI, 2001.
- [ 10 ] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[ J]. Soil Sci. Soc. Am., 1994, **58**:1501~1511.
- [ 11 ] Chien Y J, Dar Yuan Lee, Hong Yuh Guo, *et al.* Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soil[ J]. Soil Science, 1997, **162**(4):151~162.
- [ 12 ] Issaks E H, R M Srivastava. An introduction to applied geostatistics[ M]. New York: Oxford University Press. 1989.
- [ 13 ] Journel A G, C J Huijbregts. Mining geostatistics[ M]. London: Academic Press. 1978.
- [ 14 ] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives[ J]. Geoderm, 1999, **89**:1~45.
- [ 15 ] Chang Y H, Serimshaw M D, Emmerson R H C, *et al.* Geostatistical analysis of sampling uncertainty at the Tollesbury Managed rearea site in Black-water Estuary, Essex, UK: kriging and cokriging approach to minimize sampling density[ J]. The Science of the Total Environment, 1998, **221**:43~57.