

# 土壤速效养分空间变异的尺度效应\*

杨奇勇 杨劲松\*\* 刘广明

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 在 GIS 技术支持下,运用经典统计学和地统计学的方法,从经典统计分析、变异函数和 Kriging 插值图等方面探讨了禹城市耕地土壤速效磷(AP)、速效钾(AK)在县级和镇级两个不同采样尺度下的空间变异特征.结果表明:在两个采样尺度下,AP、AK 都服从对数正态分布,它们的变异系数范围为 26.5%~36.6%,均属中等变异强度,随着采样尺度的缩小,土壤 AP、AK 的变异系数都增大.两个采样尺度下,土壤 AP 和 AK 均在一定范围内存在空间相关关系,县级采样尺度下土壤 AP 和 AK 的空间自相关距离较大,分别为 9.0 km 和 26.5 km,镇级采样尺度下土壤 AP 和 AK 的空间自相关距离明显变小,分别为 1.7 km 和 2.8 km.两个采样尺度下的土壤 AP 和 AK 受结构性因素和随机性因素的影响,表现出明显不同的分布规律.

**关键词** 土壤 空间异质性 尺度效应 速效养分

**文章编号** 1001-9332(2011)02-0431-06 **中图分类号** S158.6 **文献标识码** A

**Scale-dependency of spatial variability of soil available nutrients.** YANG Qi-yong, YANG Jing-song, LIU Guang-ming (*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(2): 431-436.

**Abstract:** With the support of GIS and by using classical statistics and geostatistics methods, the spatial variability of soil available P (AP) and available K (AK) in cultivated lands in Yucheng City of Shandong Province was approached at county and township scales. The results showed that both the soil AP and AK followed the logarithmic normal distribution, with the coefficient of variation (CV) at the two scales being 26.5%–36.6% and presenting a moderate variation. With the decrease of the scale, the CV of the soil AP and AK increased. Both the soil AP and AK were spatially correlated with scale. At county scale, the soil AP and AK had a larger spatial correlation distance, being 9.0 km and 26.5 km, respectively; while at township scale, the soil AP and AK had a smaller spatial correlation distance, being 1.7 km and 2.8 km, respectively. The spatial distribution of the soil AP and AK at the two scales was obviously different, which was mainly affected by structural factors and random factors.

**Key words:** soil; spatial variability; scale-dependency; available nutrient.

采用 GIS 与地统计学相结合的方法准确了解土壤养分的空间分布特征及其变异规律,在农业生产中的土壤改良、精准施肥等方面得到了越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>.但是,很多研究表明,土壤特性的空间变异性是尺度函数,不同尺度下同一变量的自相关程度相差很大<sup>[4-5]</sup>.因此,大尺度采样条件下,小尺度下的结构特征将被掩盖,不利于深入分析土壤特性的空间变异结构特征,而在多尺度下进行研究可

以很好地解决此问题.国内外学者在土壤特性空间变异的多尺度研究上取得了一定的进展,如王永东等<sup>[6]</sup>利用地统计学方法探讨了两个取样尺度下四川蒙顶山茶园土壤 CEC 的空间变异特征;胡伟等<sup>[7]</sup>从变异系数、相关距离和 Moran's I 相关指数 3 个方面对黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性的尺度性进行了研究;张玉铭等<sup>[8]</sup>采用地统计方法,分别对栾城县和中国科学院栾城生态农业试验站示范区两个尺度下农田耕层土壤养分的空间变异特征进行了研究;Yemefack 等<sup>[9]</sup>对喀麦隆南部森林的土壤 pH、速效磷和粘粒含量进行了 4 个尺度下的空间变异性研究;Goovaerts<sup>[10]</sup>于 2001 年运用地统计学中

\* 公益性行业(农业)科研专项(200903001)、中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-09)、国家自然科学基金项目(40771097)和国家高技术研究发展计划重点项目(2007AA091702)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: jsyang@issas.ac.cn

2010-06-25 收稿,2010-11-13 接受.

的 Kriging 插值、序贯高斯模拟和序贯指示模拟等方法,对耕层土壤 Ca 和水力传导参数进行了两个尺度的对比分析。以上研究虽然揭示了不同土壤特性在不同尺度下的空间变异特征,却很少就不同采样尺度对土壤资源制图所产生的影响进行分析。而土壤资源的空间分布图是土壤属性空间变异性的直观表达,在土壤资源开发利用中有着重要的作用。为此,本文以黄淮海平原典型盐渍土改良区禹城市为研究区域,在 GIS 和 GPS 技术支持下,通过在全市进行县级和镇级两个尺度下的布点采样,在全面野外调查和室内化验分析以获得大量的土壤速效磷和速效钾相关信息的基础上,以 GS+7.0 为操作平台,从经典统计特征、变异函数和空间制图等方面对禹城市 0~20 cm 耕地土壤速效磷(AP)和速效钾(AK)空间异质性的尺度效应进行了探讨,旨在为盐渍土改良区障碍因子制图和障碍因子消减提供参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

禹城市位于山东省西北部,处于 36°40′—37°12′ N, 116°22′—116°45′ E, 全市土地总面积 990 km<sup>2</sup>, 微地貌比较复杂, 共有河滩高地、高坡地、平坡地、洼坡地、浅平洼地、决口扇形地和砂质河槽地 7 种类型。该地属于暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 13.1 °C, 全年平均降雨量 616 mm, 约 76.4% 的降水集中在 6—9 月。禹城市内皆平原, 海拔高度 19.2~27.27 m, 受地形、地貌、母质、气候等因素的影响, 全市形成了潮土和盐土两大土类。潮土面积 7.3×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 占土壤面积的 97.8%, 在全市广泛分布。主要农作物为小麦、玉米、棉花。禹城市是黄淮海平原典型的盐渍土改良区。在 20 世纪 80 年代以前, 禹城市盐渍化土地占耕地的比例一直都在 15%~35% 之间波动, 经过中国科学院和中国农业科学院的专家及当地农户的努力, 对盐渍土进行了改良, 1980 年以后盐渍化土地占耕地的比例逐渐减小。在第二次土壤普查时, 研究区土壤有机质平均含量只有 7.36 g·kg<sup>-1</sup>, 盐分平均含量为 3.13 g·kg<sup>-1</sup>; 经过长期的盐渍土改良、培肥, 到 2003 年土壤有机质平均含量增加到 12.47 g·kg<sup>-1</sup>, 盐分平均含量下降为 0.96 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 土壤样品采集

以 ArcMap 9.2 为操作平台, 通过屏幕数字化获取了禹城市的土壤图、地形地貌图、主要河流分布

图、行政边界图和乡镇尺度下密集采样区的边界图等矢量图。在 GIS 中进行采样点室内布设, 将采样点坐标输入 GPS 进行野外采样导航。

**1.2.1 县级尺度下土壤样品采集** 以禹城市为边界在 GIS 中进行 2.0 km×2.0 km 网格布点, 获取网格中心的坐标作为准采样位置, 输入 GPS 进行野外采样导航。实际采样过程中对于落在村庄、河流、道路等地的样点, 在其附近 500 m 内进行调整, 并用 GPS 记下实际采样点的坐标, 如不能调整, 则将该采样点删除。遵照这个原则共得到县级尺度下有效采样点 298 个(图 1)。

**1.2.2 镇级尺度下土壤样品采集** 选取新寨镇、安仁镇和伦镇镇结合处的典型地块(图 1 中虚线框)为密集采样区域。样点布设分为两层: 一层是在典型地块进行 0.5 km×0.5 km 网格布点; 二层是进行 1.0 km×1.0 km 嵌套网格布点, 且 1.0 km×1.0 km 网格点处在 0.5 km×0.5 km 4 个点的中心, 与县级采样尺度重复的样点不再采集。将准采样坐标输入 GPS 进行野外采样导航, 将实际采样过程中落在村庄、河流、道路等地的样点删除。遵照这个原则共得到镇级尺度下有效采样点 373 个(图 1)。

### 1.3 土壤样品测定

土壤样品于 2008 年 5 月下旬采集, 取样土层为 0~20 cm 耕层土壤。土壤样品带回实验室, 风干、研磨、过筛备用。根据项目要求速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法(Olsen)测定; 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。具体分析方法见《土壤农业化学分析》<sup>[11]</sup>。

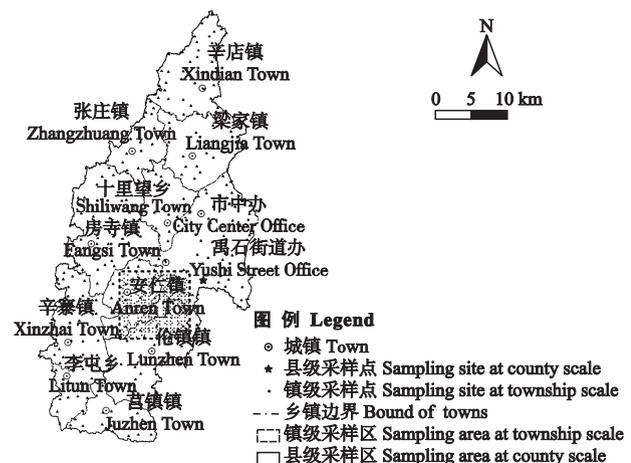


图 1 禹城市行政区划与土壤采样点分布

Fig. 1 Administrative division of Yucheng City and distribution of soil sampling sites.

## 1.4 数据处理

本文采用地统计学方法,对禹城市县级和镇级两个尺度下土壤速效养分空间变异性的尺度效应进行研究.在地统计学中,半方差函数的块金值、基台值和变程等参数可用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度,它们是研究土壤特性空间变异性的关键,是 Kriging 精确插值的基础,有关地统计学的原理和方法可参考相关文献<sup>[12]</sup>.经典统计分析、半方差函数的模拟计算在 GS+7.0 中进行;采样点位图、Kriging 插值图在 ArcGIS 9.2 中完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同采样尺度下土壤速效磷和速效钾的统计特征

由于离群值的存在会影响变量的分布特征,并造成变量连续表面的突变,因此,在进行统计分析之前,首先要识别离群值.本研究采用域法<sup>[13]</sup>对离群值进行修正,域法区间为 $[u-3s, u+3s]$ .其中, $u$ 为样本均值, $s$ 为样本标准差,在区间以外的数据均定义为离群值.离群值分别用正常的最大值和最小值代替.通过修正后,禹城市县级和镇级采样尺度下的速效磷、速效钾的统计分析和 K-S 检验结果见表 1.从偏度系数和峰度系数可以看出,在两种采样尺度下 AP 和 AK 含量都不服从正态分布,但是经对数转换后服从正态分布.

两个采样尺度下,土壤 AP 和 AK 含量的均值、变化幅度都存在一定差异(表 1).从土壤 AP 来看,县级采样尺度下的变化幅度比镇级采样尺度下的变化幅度小,其最小值较大,最大值较小;县级采样尺度下 AP 均值比镇级采样尺度大,根据全国第二次土壤普查划分标准<sup>[14]</sup>,土壤肥力属中等偏下水平;变异系数比镇级采样尺度小,但两个采样尺度下 AP 都属中等强度变异<sup>[15-16]</sup>.从土壤 AK 来看,县级采样尺度下变化幅度小些,最小值和最大值都较镇级采样尺度小;县级采样尺度下 AK 均值比镇级采样

尺度小,根据全国第二次土壤普查划分标准,土壤肥力属中等水平;变异系数比镇级采样尺度小,都属中等强度变异.两个尺度下,AP 的变异性比 AK 小.

可见,随着采样尺度的增加,AP、AK 变异系数都减小,但是 AP 含量均值增大,AK 含量均值减小.其主要原因可能有两个方面:一方面,从农户访问调查结果来看,研究区磷的缺乏比钾的缺乏更严重.农户普遍注重磷肥的施用,因此研究区 AP 在空间上趋于均匀化分布;而钾肥少施甚至不施,使得 AK 在空间上的分布受施肥的影响小,变异较大.另一方面,AP 和 AK 具有空间异质性,因此在禹城市范围内小尺度采样区域选择的位置不同,可能导致土壤属性值的范围和变异系数有差异,如选在大尺度的高值区域,则小尺度土壤属性值可能偏高<sup>[17]</sup>,相反选在大尺度的低值区域,则小尺度土壤属性值可能偏低<sup>[18]</sup>.

### 2.2 不同采样尺度下土壤速效养分的半方差函数

在 GS+7.0 中对两个采样尺度下土壤 AP 和 AK 的半方差函数进行反复计算模拟,分别得到它们的最佳半方差模型及其参数值(图 2).两个采样尺度下,AP 和 AK 的理论模型分别符合指数模型和高斯模型,其决定系数为 0.547~0.969,说明模型的拟合度均较高,能够较好地反映研究区两个采样尺度下耕层土壤 AP 和 AK 的空间结构特征.

由图 2 可知,在县级和镇级两个采样尺度下,土壤速效养分含量的空间分布都存在半方差结构,但是不同的养分之间、同一养分的不同采样尺度之间土壤属性的空间结构不同.图 2 中, $C_0$ 为块金值,表示由随机部分引起的空间异质性; $Sill$ 为基台值,表示系统内总的变异.土壤 AP 和 AK 的块金值和基台值在两个研究尺度下差异较大. $C_0/Sill$ 表示由随机因素所引起的异质性占总的空间异质性的程度,如果该值较高,说明随机部分引起的空间变异起主要作用,相反则由空间自相关引起的空间变异较大<sup>[19-20]</sup>.镇级采样尺度下,AP 和 AK 的  $C_0/Sill$  分别

表 1 不同采样尺度下速效养分的统计特征

Table 1 Statistical characteristics for soil available P and K at different sampling scales

采样尺度 Sampling scale	变量 Variable	最小值 Minimum ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	最大值 Maximum ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	平均值 Mean ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准差 SD ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV (%)	分布类型 Distribution type
县级 County scale	AP	5.45	25.79	13.08	3.47	0.92	1.76	26.5	LN
镇级 Township scale	AK	43.55	247.46	113.69	41.06	1.11	1.11	36.1	LN
县级 County scale	AK	4.29	25.94	11.39	4.05	1.40	2.14	35.5	LN
镇级 Township scale	AP	54.17	293.13	117.28	42.96	2.14	5.69	36.6	LN

AP:有效磷 Available P; AK:有效钾 Available K; LN:对数正态分布 Lognormal distribution. 下同 The same below.

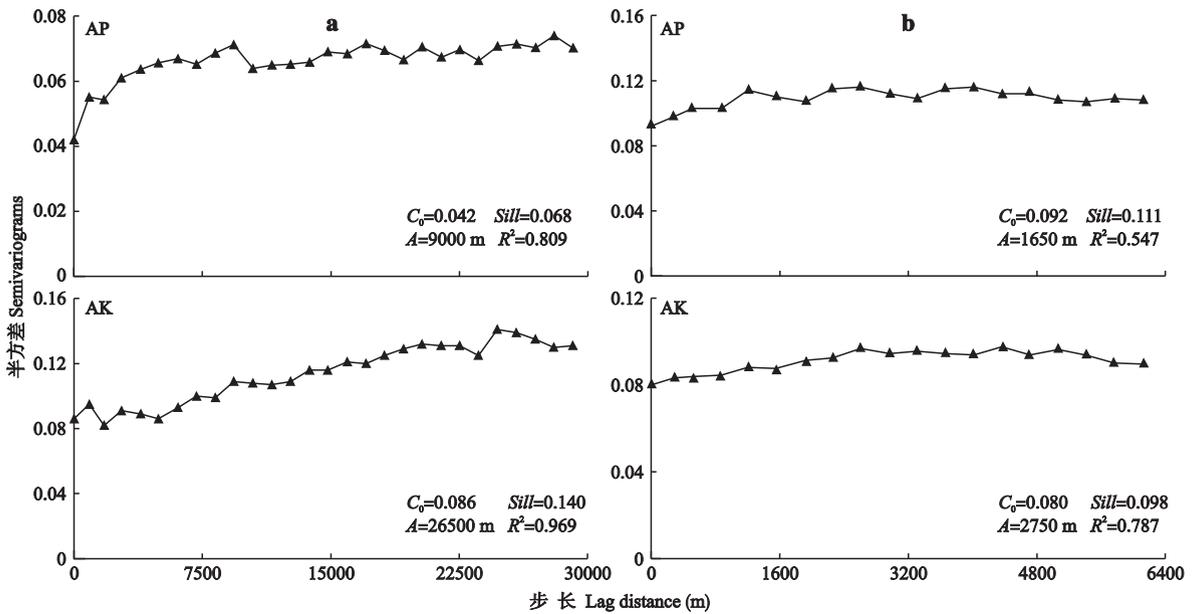


图2 不同采样尺度下速效养分的变异函数

Fig. 2 Semivariograms of soil available P and K at different sampling scales.

a) 县级 County scale; b) 镇级 Township scale. 下同 The same below.

为 0.829 和 0.816, 属于较弱的空间变异强度; 县级采样尺度下, AP 和 AK 的  $C_0/Sill$  分别为 0.618 和 0.614, 属于中等强度空间变异性. 在县级采样尺度下, 采样点的地貌类型有 7 种, 土属种类有 6 种; 而在镇级采样尺度下地貌类型、土壤种类都变得单一化, 地貌类型只有 2 种, 土属种类也只有 2 种. 因此, 随着采样尺度的缩小, 结构因素影响减弱, 随机因素影响增强, 使得 AP 和 AK 的  $C_0/Sill$  变大. 两个尺度下 AP 的  $C_0/Sill$  都比 AK 大, 说明 AP 受到随机性因素的影响比 AK 大, 这与上面的分析结果一致.

变程 A 也称为空间最大相关距离, 反映了变量空间自相关范围的大小. 从图 2 可以看出, 两个采样尺度下, AP 和 AK 在一定范围内均存在空间相关性. 在县级采样尺度下, AP 和 AK 的变程较大, 分别为 9.0 km 和 26.5 km; 在镇级采样尺度下, AP 和 AK 的变程小, 分别为 1.7 km 和 2.8 km. 其主要原因是随着研究尺度的缩小, 地形、母质、土壤类型等大尺度结构因素对土壤 AP 和 AK 的影响逐渐减弱, 而小尺度随机因素的影响逐渐加强, 导致土壤 AP 和 AK 在较小尺度上发生强烈的变化, 从而使它们的变程明显变小.

### 2.3 不同采样尺度下速效养分的空间插值

为了更直观地反映土壤特性在不同尺度下的空间变异特征, 在 ArcMap 中输入图 2 中的半方差函数模型参数, 进行 Kriging 插值, 绘制了禹城市县级采样尺度和镇级采样尺度下土壤 AP 和 AK 含量的空

间分布图, 同一土壤属性采用相同的等级划分标准进行分级(图 3).

从图 3 可以看出, 在两个采样尺度下, 禹城市耕层土壤 AP 含量空间分布总体上比 AK 含量空间分布要破碎些, 其原因主要是 AP 受随机因素的影响大. 在县级采样尺度下, 土壤 AP 含量最高的区域分布在禹城市北部的辛店镇, AP 的高值中心主要分布在西部, 低值中心分布在东部. 禹城市 AP 的这种空间格局与禹城市因缺磷而重视磷肥的施用有关. 如北部的辛店镇地势低洼, 多风沙, 盐碱危害较大, 以盐化潮土为主, 土壤肥力低; 西部的房寺镇土壤为发育于高坡地上的轻质土壤, 引黄干渠自东向西穿过其南部, 干渠附近地区地下水位较浅, 次生盐渍化威胁大, 是全市低肥力土壤的集中地带, 这些地区土壤肥力低, 缺磷严重. 而土壤 AK 含量高的区域主要分布在东部、中部, AK 含量低的区域主要分布在北部、西北部和南部. AK 的这种空间格局与禹城市不重视钾肥的施用有关, 其空间分布主要受土壤母质、地形地貌等因素的影响. 徒骇河呈西南-东北走向, 从禹城市的西部流向东部, 地形地貌以河滩高地为主, 地势较高, 地下水位多在 3 m 以下. 土壤多为褐土化潮土, 土体构型良好, 土壤肥力较高, 是全市著名的高产区, AK 含量丰富.

镇级采样尺度下的研究区域是中国科学院禹城试验站所在区域, 过去盐碱危害非常严重, 经过几十年的土壤改良, 取得较好的效果, AP、AK 含量增加

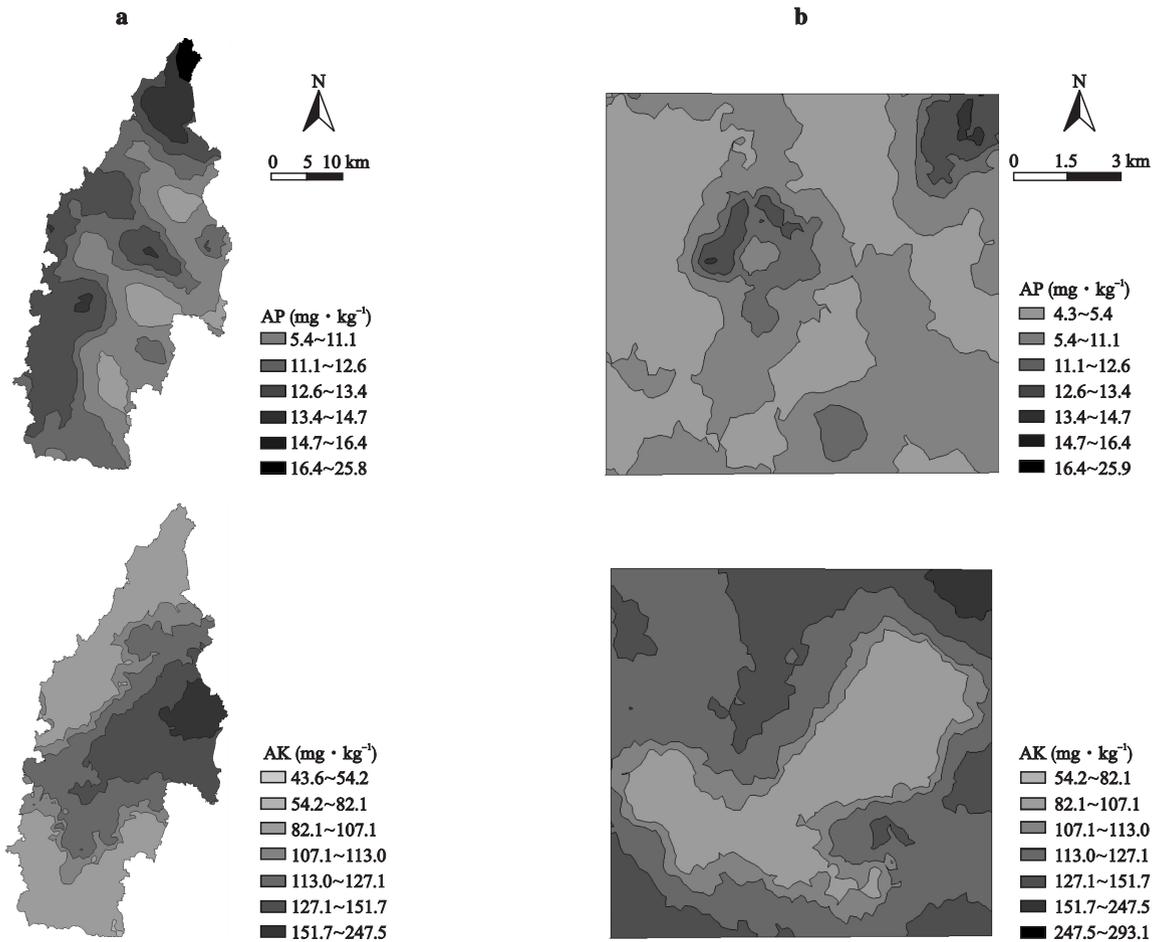


图3 不同采样尺度下土壤速效养分的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil available P and K at different sampling scales.

较快. AP 含量较高的区域呈斑块状的无规律分布, AK 含量低值区域主要集中在中部,东部和西南部 AK 含量较高.

对比两个尺度下的空间分布图,发现镇级采样尺度下研究区域处在县级尺度下 AP 含量的低值区, AP 含量区间主要为  $5.4 \sim 12.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 只包含 2 个等级图斑,但镇级采样尺度下的图斑等级比县级尺度下多了  $4.3 \sim 5.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的低等级分布和  $12.6 \sim 25.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的高等级分布,比县级采样尺度下同一区域的图斑等级多了 5 个;同时镇级采样尺度研究区域处在县级尺度下 AK 含量的高值区, AK 含量区间主要为  $107.1 \sim 127.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 包含 2 个等级图斑,镇级采样尺度下缺少  $43.6 \sim 54.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的图斑,却多了  $247.9 \sim 293.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的图斑分布,比县级采样尺度下同一区域的图斑等级多了 5 个. 镇级尺度采样区在两个尺度下的插值图明显不同,随着研究尺度的减小,图层更加丰富. 可见,在较大尺度下,由于 Kriging 插值的平滑作用,其

土壤属性制图会掩盖小尺度下的变异情况,小尺度下的土壤属性制图能观测到中、大尺度下不能观测到的细微变化. 因此,在土壤资源制图过程中,对重点区域适当进行加密采样有重要意义.

### 3 结 论

土壤速效养分对提高当季作物的供肥强度有重要意义. 禹城市县级和镇级两个采样尺度下,土壤速效磷和速效钾含量的空间变异性具有明显的尺度效应. 两个尺度下土壤速效磷和速效钾含量均值都处于中下水平,但各项统计特征值均存在一定的差异. 随着采样尺度的增大,土壤速效磷和速效钾含量的变异系数减小. 从空间结构上看,两个采样尺度下耕层土壤速效磷和速效钾含量的变程、块基比均存在一定的差异性. 随着采样尺度的减小,土壤速效磷和速效钾含量的变程均明显变小,块基比变大,其空间异质性受土壤母质、地形地貌等结构因素的影响减小,而受土壤改良、田间管理等随机因素的影响增强. 从空间分布图上看,同一采样区域在不同研究尺

度下土壤速效磷和速效钾含量空间分布规律明显不同,镇级尺度下的插值图破碎些,图形层次丰富些;而县级尺度下的插值图平滑些,图形层次简单些。

#### 参考文献

- [1] Liu Y (刘 杨), Sun Z-M (孙志梅), Yang J (杨军), *et al.* Spatial variability of soil N, P, and K in main production area of *Castanea mollissima*. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(4): 901-907 (in Chinese)
- [2] Jiang Y (姜 勇), Zhang Y-G (张玉革), Liang W-J (梁文举), *et al.* Spatial variability of soil nutrients in cultivated surface soil of Sujiatun District, Shenyang City. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2003, **14**(10): 1673-1676 (in Chinese)
- [3] Zhang H-W (张宏伟), Wei Z-Y (魏忠义), Wang Q-B (王秋兵). Spatial variability of soil total K and available N in Shenyang urban area. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2008, **19**(7): 1517-1521 (in Chinese)
- [4] Bloschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: A review// Klama JD, Sivapalan M, eds. *Scale Issues in Hydrological Modeling*. New York: Wiley, 1995: 9-48
- [5] Zhao J (赵 军), Liu H-J (刘焕军), Sui Y-Y (隋跃宇), *et al.* Analysis for spatial heterogeneity of organic matter content and available nutrients in black soil crop area with different scales. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2006, **20**(1): 41-45 (in Chinese)
- [6] Wang Y-D (王永东), Feng N-N (冯娜娜), Li T-X (李廷轩), *et al.* Study on the spatial variability of the soil cation exchange capacity in hilly tea plantation soils with different sampling scales. *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, 2007, **40**(9): 1980-1988 (in Chinese)
- [7] Hu W (胡 伟), Shao M-A (邵明安), Wang Q-J (王全九). Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2005, **21**(8): 11-16 (in Chinese)
- [8] Zhang Y-M (张玉铭), Mao R-Z (毛任钊), Hu C-S (胡春胜), *et al.* Spatial variability of farmland soil nutrients at Taihang piedmont. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(11): 2049-2054 (in Chinese)
- [9] Yemefack M, Rossiter DG, Njomgang R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*, 2005, **125**: 117-143
- [10] Goovaerts P. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*, 2001, **103**: 3-26
- [11] Lu R-K (鲁如坤). *Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [12] Wang Z-Q (王政权). *Application of Geostatistics on Ecology*. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [13] Gan H-H (甘海华), Peng L-Y (彭凌云). Spatial variability of nutrients in cultivated soils of Xinhui District, Jiangmen City. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2005, **16**(8): 1437-1442 (in Chinese)
- [14] The National Soil Survey Office (全国土壤普查办公室). *Chinese Soil Genus Records*. Beijing: China Agriculture Press, 1995 (in Chinese)
- [15] Zhang C-H (张春华), Wang Z-M (王宗明), Ren C-Y (任春颖), *et al.* Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen storages in Songnen Plain maize belt. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(3): 631-639 (in Chinese)
- [16] Wang H-M (王红梅), Wang K (王 堃), Mi J (米佳), *et al.* Spatial pattern of soil moisture at the cropland-grassland boundary in agro-pastoral transitional zone of North China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(3): 604-612 (in Chinese)
- [17] Chi F-W (池富旺), Zhang P-S (张培松), Luo W (罗 微). Spatial variability and distribution of soil total nitrogen and organic matter in medium and large scales in rubber plantations. *Chinese Journal of Tropical Crops (热带作物学报)*, 2009, **30**(5): 613-619 (in Chinese)
- [18] Wang S-Y (王淑英), Lu P (路 苹), Wang J-L (王建立). Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: A case study in Pinggu County, Beijing. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2008, **28**(10): 4957-4964 (in Chinese)
- [19] Wang C-G (王存国), Han S-J (韩士杰), Zhang J-H (张军辉), *et al.* Spatial heterogeneity of surface soil moisture in a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains based on geostatistic analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(4): 849-855 (in Chinese)
- [20] Wang S-Y (王淑英), Yu T-Q (于同泉), Wang J-L (王建立), *et al.* Preliminary study on spatial variability and distribution of soil available microelements in Pinggu District of Beijing. *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, 2008, **41**(1): 129-137 (in Chinese)

作者简介 杨奇勇,男,1976年生,博士研究生.主要从事土壤和水资源利用与管理及GIS应用研究. E-mail: qyyang@issas.ac.cn

责任编辑 张凤丽