

不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究

雷咏雯¹ 危常州^{1*} 李俊华¹ 候振安¹ 冶军¹ 鲍柏杨²

(1 石河子大学农学院资源与环境系 新疆石河子 832000 ;

2 新疆生产建设兵团农六师芳草湖农场 新疆呼图壁 833006)

摘要 在不同取样尺度下采集了农田土壤样品并测定土壤有机质、全 N 和有效 P 含量, 研究不同尺度下地统计学方法对土壤养分空间变异分析的适用性和空间插值质量。研究结果表明, 大比例尺下土壤有机质含量、有效 P 含量、全 N 含量的分布呈正态分布, 在中小比例尺下呈现轻微偏态分布。各养分空间变异系数存在明显空间变异 (C.V. 介于 17 % ~ 27 % 之间), 大比例尺下, 空间变异较小; 中小比例尺下, 空间变异程度大 (C.V. 和峰度值较小)。在各种尺度下, 土壤养分均存在典型的半方差结构, 表明在各种取样比例尺下采用地统计学方法进行土壤养分空间变异分析都是可行的。在大中比例尺下, 各养分块金系数介于 0.28 ~ 0.38 之间, 表明土壤养分具有明显空间自相关; 而在小比例尺下, 块金系数介于 0 ~ 0.17 之间, 表明土壤养分具有强烈空间自相关, 其中有机质含量具有恒定的空间自相关 (块金系数为 0), 有效 P 含量的空间自相关程度相对较弱; 空间插值和交互检验结果表明, 球状模型空间插值结果与实测结果符合性很好, 交互检验均达到极显著水平。在小比例尺下其估计比大比例尺下精度更高。不同养分的空间预测结果质量不尽相同, 土壤有机质含量空间预测符合度最高。

关键词 土壤养分空间变异; 插值分析; 取样尺度

中图分类号 S158.2

在农作物精确施肥研究中, 应用地统计学和空间插值方法分析土壤养分空间变异进而做出施肥决策是经常采用的做法, 在地统计学和空间插值模型农业应用中, Kriging 内插法是被广泛采用的方法^[1,2]。尽管如此, 地统计学技术源于地质学研究, 其研究尺度一般较大, 而农田养分取样一般尺度较小, 农田养分的空间变异是否适合采用地统计学方法分析空间变异以及不同土壤养分是否都适合采用地统计学方法进行空间变异分析, 也是需要深入研究的问题。因为在进行大尺度 (小比例尺) 空间变异分析时, 小尺度的变异常常被忽视, 而在进行小尺度 (大比例尺) 空间变异分析时, 大尺度上的变异往往由于比较微弱又作为“随机变异”被忽视或降维扣除^[3], 研究认为大尺度上的土壤养分空间变异一般与土壤质地变异、地形变化有关, 而小尺度上的空间变异与农业技术措施关系密切^[4]。

成土母质^[5]、土壤颗粒组成^[6]、地形^[7]、气候条件^[8]和人类活动对土壤养分空间变异产生影响已被很多研究所证明。在人类农业活动对土壤养分空间变异的影响方面, 一般认为虽然农田 N 肥用量一

径多, 残留少, 因此 N 素养分的空间变异受人类活动影响不很大, 而与自然成土过程中 N 素的空间分布相似; P 素养分由于在土壤中以沉淀为主, 作物当年 P 素养分利用率一般不超过 20%, 因此土壤 P 素明显受到施肥活动的影响^[9]。

本研究以土壤有机质含量、全 N 含量代表较少受农业活动影响土壤养分类型, 以土壤有效 P 含量代表明显受人类农业活动影响的土壤养分类型, 按不同比例尺采样, 研究不同尺度下农田养分空间变异的地统计学特征, 采用 Kriging 插值方法, 研究不同尺度下农田养分空间插值的适用性与空间插值的质量。

1 材料与方法

试验在新疆生产建设兵团农六师芳草湖农场五分场进行。该农场主要作物为棉花, 土地连片, 基本无沙丘、盐碱地等荒地, 农场农业技术采取集中管理, 不同地块施肥量 (包括追肥量) 一致, 因此施肥对土壤肥力影响较小, 基本可以认为是背景影

基金项目: 新疆生产建设兵团科技发展计划项目(GKB03SDXGJ27DX); 试验在教育部、新疆生产建设兵团共建“绿洲生态农业重点实验室”完成。

*通讯作者

响。有机肥的主要肥源基本是棉籽饼，长年进行棉花秸秆还田，取样时间在2001年棉花收获后进行，时间在10月20~28日。

1.1 大比例尺土壤采样

在棉花收获后按9m×12m网格取样，每个点以网格节点为中心，半径4.5m取5个点的混合土样，取样深度0~20cm，取样面积4200m²(0.42hm²)，采集土壤样品39份。土壤样品自然风干后在室内测定有机质含量、全N含量、有效P含量^[10]。由于采样面积小，需要定位精度高，普通商用GPS难以满足空间定位的要求，因此采用相对坐标，即直接用皮尺按照设计图纸在田间测量确定采样点，同时用GPS确定2个基准点（图1）。完成采样后，扫描设计图纸并矢量化，以基准点进行地理坐标校正。在ArcView GIS 3.2上输入采样点编号，以采样点编号为联系字段导入各采样点土壤分析数据，保存为shape 格式文件。在ArcGIS 8.01地统计学模块GeoStatistic Analyst下进行地统计学分析和插值分析。

1.2 中、小比例尺土壤取样

中等比例尺土壤采样以芳草湖农场五分场7连为单位采样，小比例尺以芳草湖农场五分场为单位采样。中等比例尺以200m×200m网格取样，小比例尺以1000m×1000m网格取样。具体方法是：在芳草湖农场农田利用现状图上按网格法确定取样点（中等比例尺1:5000，小比例尺1:20000），部分不规则地点适当加密采样点。在田间确定采样点后，用GPS Pathfinder Pocket定位（定位精度为米级），以网格节点为中心，半径15m取5个点的混合土样（包括中心点），采样深度0~20cm。土壤样品自然风干后测定有机质含量、全N含量、有效P含量。中比例尺采集土壤样品79份，小比例尺采集土壤样品43份。

1.3 GIS平台与数据处理

GIS软件采用ArcView GIS3.2和ArcGIS 8.01。在ArcView中导入采样点并进行坐标校正，在ArcGIS 8.01中主要以GeoStatistic Analyst模块分析采样点统计特征、半方差模型、进行空间插值和交互校验。

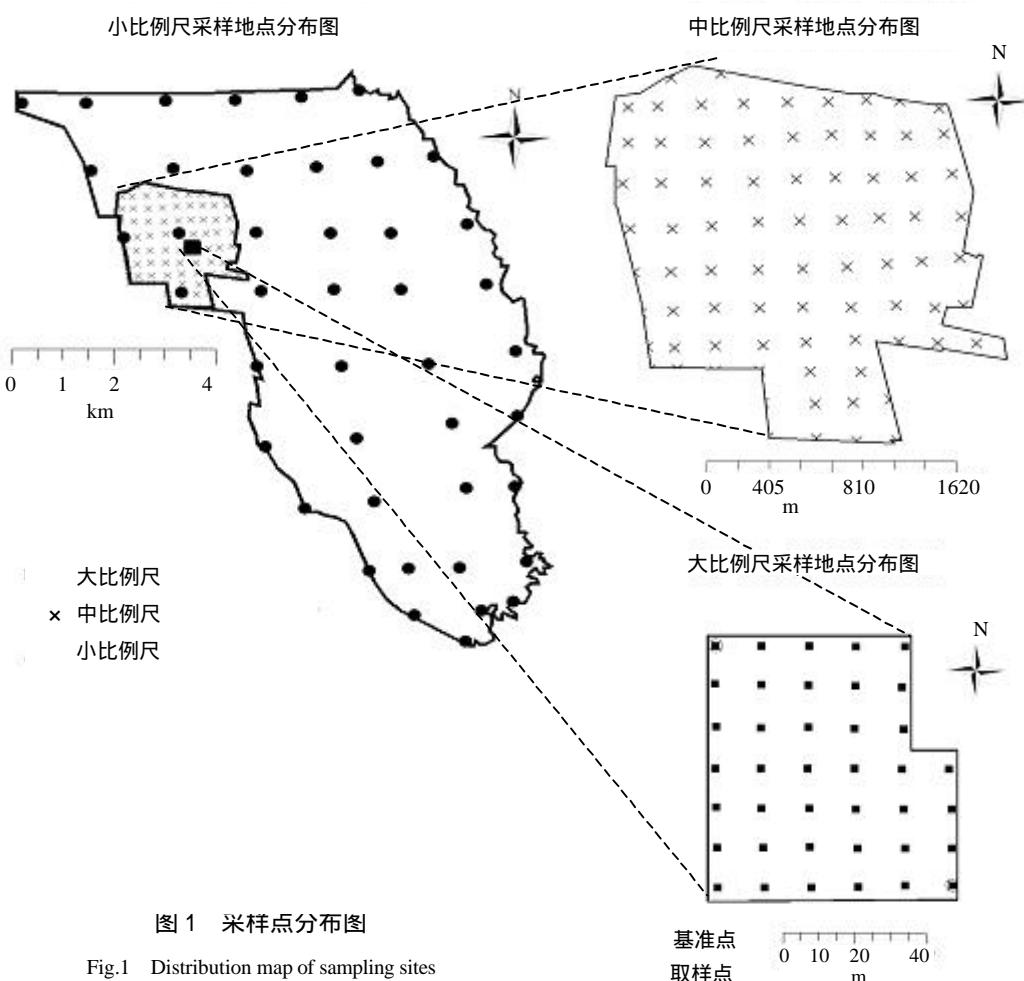


图1 采样点分布图

Fig.1 Distribution map of sampling sites

2 结果与分析

2.1 土壤养分空间变异的统计特征

土壤养分空间变异统计特征值说明(表1),土壤有机质含量、全N含量、有效P含量最大值、最小值、极差/平均值均有较大差别,表明不同尺度下,土壤养分含量在不同地点存在明显差异,也即存在明显的空间分布差异。大比例尺下,C.V.较小,在中小比例尺下C.V.较大,表明小面积上土壤养分空间变异较小,而在大面积上采样土壤养分空间变异较大。在3种土壤养分中,不同比例尺下C.V._{有机质}<C.V._{有效P}<C.V._{全N},表明土壤有机质含量空间变异较小,而有效P、全N含量空间变异相对较大。

斜度和峰度反映样本的正态分布特点,斜度反映正态分布双尾特征,峰度反映样本的集中程度,标准正态分布斜度为0,峰度为3。统计特征值表明土壤有机质含量在小比例尺下斜度大,而在大比例尺下基本为0,反映了在小面积上其分布为双尾对称,而在大面积上有机质含量低的样点多,有机质含量高的样点少,呈现一定程度的偏态分布,全N含量和有效P含量也表现类似的偏态分布特点;在大、中比例尺下(除全N外)峰度>3,表明在大、中比例尺下(取样面积小)样点数据集中,而在小比例尺下峰度<3,表明小比例尺下(取样面积大)数据离散度增加,数据的变异程度大。

表1 土壤养分空间变异统计特征值

Table 1 Statistic eigenvalue of soil nutrients spatial variability

	小比例尺			中比例尺			大比例尺		
	有机质 (g/kg)	全N (g/kg)	有效P (mg/kg)	有机质 (g/kg)	全N (g/kg)	有效P (mg/kg)	有机质 (g/kg)	全N (g/kg)	有效P (mg/kg)
最小值	8.119	0.665	9.6	6.52	0.614	7.5	6.995	0.7976	11.2
最大值	16.103	1.428	26.4	16.855	1.761	28.7	16.171	1.9206	27.1
极差	7.984	0.763	16.8	10.335	1.147	21.2	9.176	1.123	15.9
平均值	11.482	0.998	16.8	11.198	1.159	14.08	12.128	1.285	19.197
中值	10.877	0.982	17.3	11.061	1.142	13.4	11.930	1.291	19
标准差	2.278	0.201	4.453	2.089	0.246	3.922	1.986	0.229	3.297
斜度	0.538	0.369	-0.393	0.323	0.125	1.173	0.004	-0.362	0.168
峰度	2.336	2.407	2.221	2.965	2.638	4.691	3.072	3.370	3.062
C.V.	19.8	20.2	26.5	18.6	21.2	27.8	16.4	17.8	17.2
极差/平均值	0.695	0.765	1.000	0.923	0.99	1.506	0.757	0.874	0.828

2.2 不同尺度下土壤养分空间变异结构分布

采用ArcGIS GeoStatistical Analyst对不同尺度采集的土壤样本有机质含量、全N含量、有效P含量进行了半方差分析(表2,图2)。为了便于比较,全部采用球状模型。在小比例尺样本中,采用的空间搜索步长(Lag)为400 m,中比例尺样本中,搜索步长为80 m,在大比例尺样本中,搜索步长为2.4 m。各种养分的空间最大相关距离、空间最小相关距离都大于相应的取样距离(表2),因此可以认为取样距离是“合理的”,采样点间距离小于空间相关距离,适于进行空间变异分析。但是注意到不同比例尺下的空间相关距离差异是非常大的,这实际上与地统计学软件的分析步长(搜索距离)有关,在ArcGIS GeoStatistic Analyst中要求至少5个相邻点参与模型计算,而系统默认为12个样点参与模型计

算,这导致在不同比例尺下“空间相关距离”差异悬殊,因此所谓空间相关距离可能只具有相对意义,它主要反映了土壤养分的空间异向性分布特点。在各种比例尺下,土壤有机质含量、有效P含量、全N含量半方差分布图均呈现线性加平台或二次加平台趋势,说明各种土壤养分均存在较好半方差结构(图2),在短距离内样点具有明显空间自相关,随着距离增加,空间自相关逐渐减弱。一般认为块金方差代表随机变异的量,而基台值代表变量空间变异的结构性方差,块金系数是块金值与基台值的比值。块金系数<25%说明变量具有强烈的空间相关性,25%~50%说明变量具有明显的空间自相关,50%~75%时变量具有中等空间自相关,>75%时变量空间自相关性微弱,变异主要由随机变异组成,不适合采用空间插值的方法进行空间预测^[11]。由表

2 可见在小比例尺下土壤有机质含量、有效 P、全 N 含量均具有强烈的空间自相关，在中、大比例尺下各养分空间变异的块金系数变大，但是仍然属于明显空间自相关，表明土壤有机质含量、有效 P 含量、

全 N 含量在大、中、小尺度下进行空间变异分析均是适宜的，但是在小比例尺下这些养分的空间变异结构更好。随着采样尺度增加，各变量的块金系数都趋于增加或稳定，反映用地统计学方法进行变量

表 2 不同尺度下土壤养分的半方差结构

Table 2 Semivariance structure of soil nutrients in different sampling scale

		块金方差	结构方差	块金系数	最小相关距离	最大相关距离
		(c_0)	(c)	$c_0/(c_0+c)$	(m)	(m)
小比例尺	有机质 (g/kg)	0	6.9537	0.00	4016.0	4741.2
	全 N (g/kg)	0.0026	0.055	0.05	4008.0	4741.2
	有效 P (mg/kg)	4.7055	23.389	0.17	4741.2	4741.2
中比例尺	有机质 (g/kg)	1.4476	3.718	0.28	753.7	945.4
	全 N (g/kg)	0.0213	0.0532	0.29	797.2	945.7
	有效 P (mg/kg)	7.0344	11.433	0.38	716.2	945.7
大比例尺	有机质 (g/kg)	2.3531	5.8751	0.29	13.2	28.4
	全 N (g/kg)	0.0331	0.0661	0.33	12.1	28.4
	有效 P (mg/kg)	7.2247	14.399	0.33	12.3	28.4

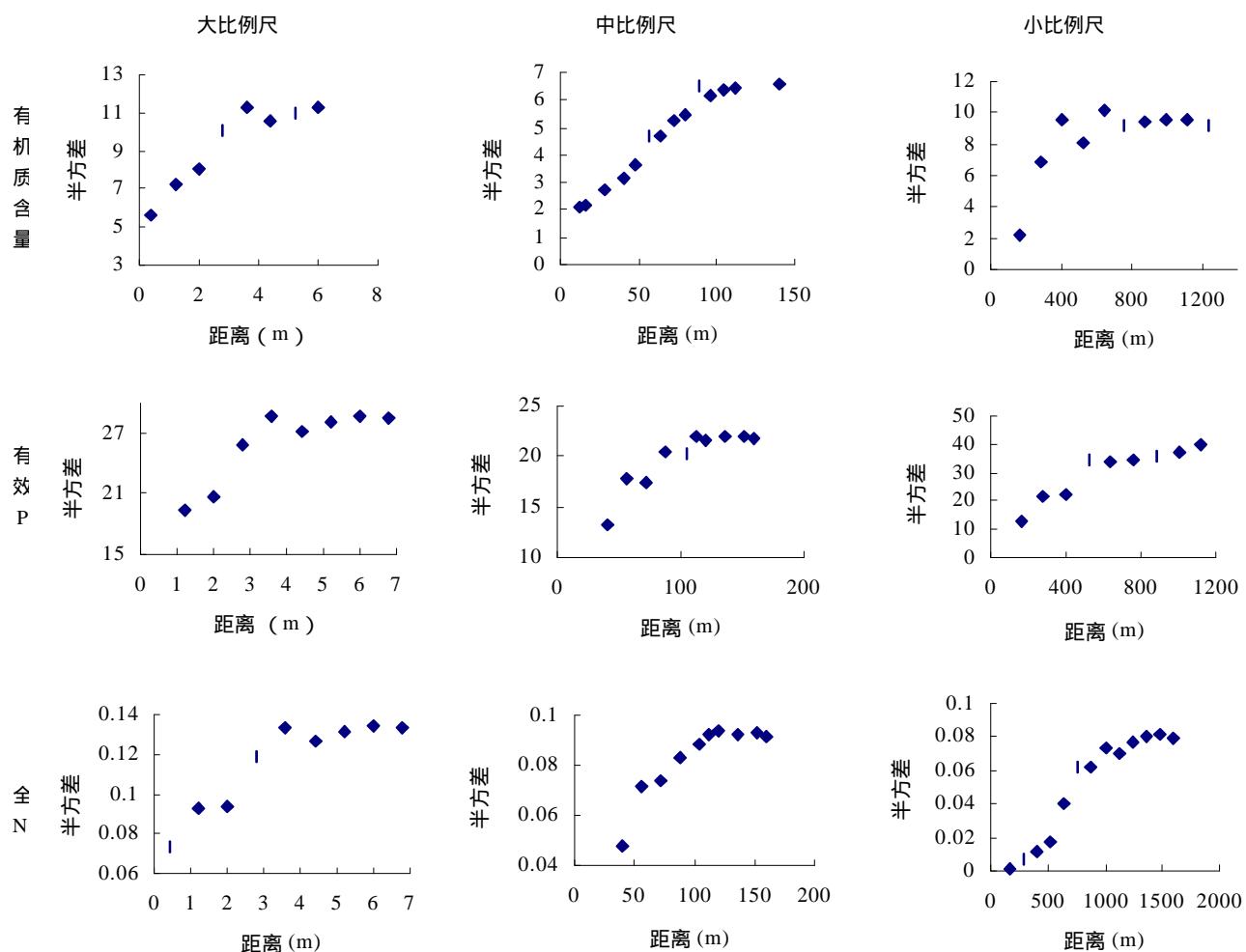


图 2 不同尺度下土壤有机质含量、有效 P、全 N 含量半方差分布图

Fig. 2 Semivariogram of soil O.M. content, Avail. P and total N content in varied scale

的空间分析在较大区域进行比较合适，而面积过小时，由于空间变异趋势微弱，随机变异所占比例相对增加，可能不利于进行空间相关性分析。

2.3 不同尺度下土壤养分空间插值误差估计与交互校验

采用普通 Kriging 方法对不同尺度下的样本以球状模型 (Spherical Model) 分别进行空间插值，然后以交互校验 (cross-validation) 的方法对预测值和实测值进行校验，预测误差、预测值与实测值的相关系数 (r) 见表 3。平均标准化误差 (MSE) 是标准化预测误差与标准化均方差的比值，如果模型预测是无偏估计，MSE 值等于 0。由表 3 可见，总体

上各种比例尺下预测与实测结果偏差很小 (MSE 0.015)。对于 3 个测验变量，在中、小比例尺下比大比例尺下更加接近于无偏估计，而在大比例尺下，有效 P 和全 N 含量的估计比有机质含量的估计更加接近无偏估计。在中等或小比例尺下，3 个变量虽然 MSE 有所差异，但是绝对值很小，表明在中等到小比例尺下，采用空间预测模型对土壤养分进行预测都是合适的。平均标准误差 (ASE) 与均方根误差 (RESE) 的差值反映预测结果对样本空间变异的估计水平，ASE 与 RESE 越接近，反映空间变异水平的估计越准确，ASE > RESE 则预测高估了空间变异，ASE < RESE 则预测低估了空间变异，

表 3 球状模型预测误差与交互检验

Fig. 3 Prediction error of the spherical model and cross-validation

		预测误差				R ^B
		MSE ^A	ASE	RESE	RMSSE	
大比例尺	有机质 (g/kg)	0.0131	0.953	0.455	0.4392	0.9735 ^{**}
	全 N (g/kg)	0.01164	1.666	1.567	0.9354	0.8768 ^{**}
	有效 P (mg/kg)	0.00137	0.116	0.137	1.168	0.7970 ^{**}
中比例尺	有机质 (g/kg)	-0.0012	1.519	1.509	0.9942	0.8834 ^{**}
	全 N (g/kg)	-0.0076	3.163	3.43	1.079	0.6792 ^{**}
	有效 P (mg/kg)	-0.0009	0.18	0.178	0.9913	0.6090 ^{**}
小比例尺	有机质 (g/kg)	-0.0094	1.02	0.872	0.889	0.9225 ^{**}
	全 N (g/kg)	-0.0003	3.007	2.956	0.9952	0.7428 ^{**}
	有效 P (mg/kg)	0.0011	0.111	0.117	1.046	0.6103 ^{**}

A: MSE 为平均标准化误差，RESE 为均方根误差，ASE 为平均标准误差，RMSSE 为均方根标准化误差。

B: 大比例尺 $p_{0.05}=0.304$, $p_{0.01}=0.393$, $df=38$; 中比例尺 $p_{0.05}=0.217$, $p_{0.01}=0.283$, $df=78$; $p_{0.05}=0.288$, $p_{0.01}=0.372$, $df=42$ 。

表 3 结果说明，对土壤有机质含量，大比例尺下空间变异程度被高估，小比例尺下空间变异被低估，而中比例尺下可以准确估计。而对于有效 P 含量和全 N 含量，在各种比例尺下模型的空间预测结果可以准确反映变量的空间变异。标准化均方根误差 (RMSSE) 也可以反映模型预测结果对空间变异预测的准确性，RMSSE 接近 1，反映空间变异被准确估计， <1 表明空间变异被高估， >1 表明样本的空间变异被低估。研究结果同样说明，中等到小比例尺下，各变量的空间变异可以被准确估计，在大比例尺下，有机质含量空间变异被高估，在小比例尺下被低估。从交互校验 (Cross-Validation) 预测值与实测值相关系数看，所有项目都达到极显著水平，但是土壤有机质含量在大或小比例尺时预测与实测结果相关系数非常高，在中比例尺下相对较小。变量间比较，土壤有机质含量和全 N 含量实测值与预

测值间相关系数高，而土壤有效 P 含量的实测与预测值间相关系数较小，这与有机质含量、全 N 含量受人类农业活动影响较小，空间变异规律明显，而土壤有效 P 含量容易受到人类农业活动影响大的认识是一致的。

3 结 论

(1) 在研究区域内，大比例尺土壤有机质含量、有效 P 含量、全 N 含量的明显中等空间变异，大比例尺下，土壤养分空间变异较小，中小比例尺下，空间变异增加。

(2) 在各种比例尺下，土壤养分均存在典型半方差结构，在大中比例尺下，各养分块金系数为 0.28 ~ 0.38，表明土壤养分具有明显空间相关；而在小比例尺下，块金系数介于 0 ~ 0.17 之间，表明土壤养分具有强烈空间自相关，其中有机质含量具有恒定

的空间自相关(块金系数为0),而有效P含量的空间自相关程度相对较弱。取样尺度不同,土壤养分的空间自相关距离存在尺度上的差异。

(3) 空间插值和交互检验结果表明,球状模型空间插值结果与实测结果符合性很好,交互检验均达到极显著水平,在小比例尺下其估计比大比例尺下估计精度更高。不同养分的空间预测结果质量不尽相同,土壤有机质含量空间预测符合度最高。本结论是对各种土壤养分采用相同的空间插值模型结果。如果采用不同的空间插值模型进行选择,结论可能会有变化。

本研究结果初步证明,不同比例尺下土壤养分均适宜采用地统计学模型进行空间分析与预测,因此地统计学技术作为研究养分空间变异的重要工具,将在土壤养分空间变异、土壤采样容量控制、精准/精细施肥推荐中发挥重要作用。本研究中小比例尺下比大比例尺插值分析空间预测结果更好,表明地统计学技术在较大区域养分变异和预测优势明显。

研究发现虽然土壤有效P含量的半方差结构比有机质、全N含量差,空间插值预测误差比有机质、全N含量的大,但仍然可以达到满意要求。这可能和研究区域包括P肥施肥措施都是整齐划一、没有差异或差异很小,造成土壤P素养分空间变异趋势主要和土壤基础养分有关。这种规律是否在小农户分散经营的地区同样存在,尚需要进行深入研究。

参考文献

- 1 Zhou S, Ke W, Bailey JS. Sampling strategies for soil available K and P at field scale. *Pedosphere*, 2000, 10 (4): 309 ~ 315
- 2 Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microorganisms and physico-chemical soil properties. *Biol. Fertile. Soils*, 1998, 27: 315 ~ 334
- 3 白由路, 金继运, 杨俐苹. 不同尺度的土壤养分变异特征与管理, 见: 金继运, 白由路主编. 精准农业与土壤养分管理, 北京: 中国大地出版社, 2001, 51 ~ 57
- 4 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 程明芳. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究. *土壤学报*, 2003, 40 (1): 79 ~ 88
- 5 Sadler EJ, Busscher WJ, Bauer PM, Karlen DL. Spatial scale requirement for precision farming: a case study in the southeastern USA. *Agronomy Journal*, 1998, 90 (2): 191 ~ 193
- 6 刘付程, 史学正, 王洪杰, 张庆利. 苏南典型地区土壤锌的空间分布特征及其与土壤颗粒组成的关系. *土壤*, 2003, 35 (4): 330 ~ 333
- 7 Alexandra NK, Donald GB. Correlation of corn and soybean yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 2000, 92 (1): 75 ~ 83
- 8 Sadler EJ, Bauer PJ, Busscher WJ, Millen JA. Site-specific analysis of a droughted corn crop: II. water use and stress. *Agronomy Journal*, 2000, 92 (3): 403 ~ 409
- 9 Bowman RA, Halvorson AD. Crop rotation and tillage effects on phosphorus distribution in the central Great Plain. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 1418 ~ 1422.
- 10 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000, 30 ~ 58, 81 ~ 83
- 11 Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, et al. Filed scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 1501 ~ 1511

CHARACTERS OF SOIL NUTRIENT SPATIAL VARIABILITY IN DIFFERENT SCALE

LEI Yong-wen¹ WEI Chang-zhou¹ LI Jun-hua¹ HOU Zhen-an¹ YE Jun¹ BAO Bai-yang²

(1 Department of Resources and Environment Science, Agronomy College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000;

2 Fangcaohu Farm, Xinjiang Production and Construction Corps, Hutubi, Xinjiang 833006)

Abstract Soil samples different in scale were taken, and organic matter (O.M.), total nitrogen (Total N) and available phosphorus (Avail. P) were measured to study the feasibility and adaptability of GeoStatistic in analyzing soil spatial variability. Results indicated that soil O.M., avail. P and total N appeared in normal symmetrical distribution in samples large in scale but in samples medium or small in scale, they showed a slight skew distribution. The C.V. of

(下转第391页)

POLLUTION OF HEAVY METALS IN METAL DEPOSITS OF WESTERN LIAONING AND ITS ASSESSMENT

ZHOU Xiu-yan¹ WANG En-de¹ WANG Hong-zhi²

(¹ Resources and Civil Engineering Institute, Northeastern University, Shenyang, 110004;

² Liaoning Environmental Monitoring Central Station, Shenyang, 110031)

Abstract An investigation and assessment of pollution of soils was carried out at metal mining, smeltery, and farmland irrigated with sewage in Western Liaoning. The results indicated that concentrations of heavy metals in these sites were higher above the background values. The high concentrations of Cd, Pb and Zn, in particular, should arouse more attention since they were well over the Governmental Standards in China for soils of agricultural use. Some companion relations existed between various metals, such as Pb with Cd and Zn. It is concluded that by using the I_{geo} method for determination, the degree of contamination was higher in the mining area and by using the RSP method it was higher in the soil around the smeltery.

The heavy metals in the soil mainly come from untreated sewage used for irrigation, disposal of tailings and slurry from metal ore mining.

Key words Heavy metals, Contamination, Assessment, Source

(上接第381页)

different soil nutrients ranged between 0.17~0.27, showing a significant spatial variability, namely, when large in scale, soil spatial variability is low and when medium or small in scale, the variability is high (with small C.V. and kurtosis). A typical semivariogram structure was observed in samples of all scales, showing that the Geostatistic method works in analyzing soil nutrient spatial variability in samples of all scales. In samples small in scale soil nutrients have strong spatial autocorrelation (nugget value is among 0~0.17), and soil O.M. content constant spatial autocorrelation, while in samples medium or large in scale, the soil nutrient spatial autocorrelation is medium, but weak with soil Avail. P. Spatial interpolation and cross-validation showed that spatial prediction data and measured data fitted very well with the spherical model, and that no matter whether large, medium or small in scale, spatial analysis and prediction with the Geostatistical technology is a useful tool in soil spatial variability analysis and precision fertilization. The precision of prediction is higher in small scale than in large or medium scale. Among soil O. M., soil total N and soil available P, the prediction of soil O. M. has the highest precision.

Key words Soil spatial variability, Interpolation, Sampling scale