

不同采样密度下土壤特性的空间变异特征及其推估精度研究

姚丽贤 周修冲 蔡永发 陈婉珍

(广东省农业科学院土壤肥料研究所 广州 510640)

摘要 对3种采样密度下的土壤特性进行了空间变异结构研究,并在此基础上对土壤特性的推估精度进行了比较。土壤空间变异结构在不同采样密度下的变化随土壤的特性而定,土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、P 及 S 的变异分别符合不同的半方差模型,土壤 OM、Ca 及 Mg 则均符合同一模型;采样密度与模型的拟合度、变异的有效变程及空间相关性均没有必然联系。对模型拟合度均达显著水平的土壤特性进行推估,土壤 OM 及 S 的推估精度随采样密度的提高而增加,但土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 Ca 没有表现出同样的规律。

关键词 土壤特性;采样密度;空间变异;推估精度

中图分类号 S159

土壤特性普遍存在着空间变异^[1,2],并且土壤特性的空间变异是造成作物产量甚至作物品质变异的重要因素^[3,4],因此,土壤的空间变异在土壤采样策略与土壤养分管理的应用中日益受到重视^[5,6]。

在近年的研究报道中,通常只在某一采样密度下研究土壤特性的空间变异^[7,8],对不同采样密度下土壤特性的变异情况极少进行研究。Wilson 等人指出,采样密度及布局会影响到土壤水文特性的空间分布图及属性值^[9],Muller 则在第3种采样密度半方差拟合较差的情况下,比较了2种采样密度下土壤 C 的推估精度,认为在较大采样密度下的误差通常较小^[10]。土壤特性的空间变异结构是进行各种空间插值、制作空间分布图及土壤特性推估的基础^[11,12],本文在原始采样网格的基础上进行抽取,形成不同的采样密度,探讨采样密度对土壤特性空间变异结构的影响,并在不同采样密度下对土壤特性的推估精度进行了研究。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究在广东省三水区大塘镇大塘村蔬菜基地进行,面积约 100 hm^2 。该村东倚广东省主要水系北江,土壤母质为河流冲积物,质地多为砂土或砂壤土,长期主要进行叶菜与瓜果类蔬菜轮作,每年约种植蔬菜 4~5 茬。

1.2 土样采集及分析

在蔬菜基本收获完毕晒田期间进行样本采集。用 GPS (Garmin 12c) 指导定位、采用网格采样法进行采样,样点分布见图 1。采样间距为 50 m \times 50 m,共采集 305 个土样。土样经风干、剔除杂质后送往北京中-加合作实验室,应用土壤养分状况系统研究法分析各种养分含量,pH 在水:土比为 2.5:1 下用复合电极测定。

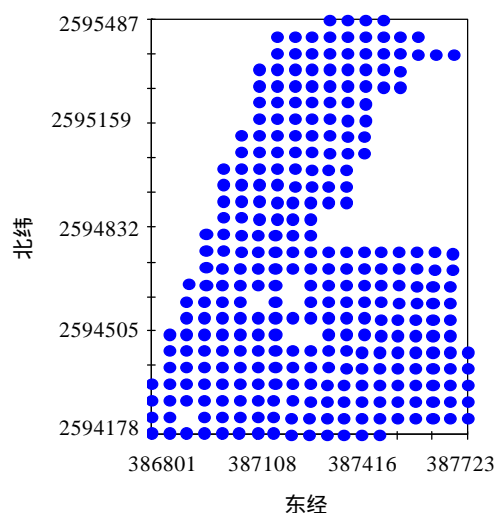


图 1 研究区域原始采样点位示意图

Fig. 1 Sketch map of location of the original sampling points

1.3 数据处理分析

在原始 50 m \times 50 m (简称为 I_{50}) 采样点位图的基础上,分别在东西向及南北向每隔 1 行及 2 行对原始采样点进行抽取,分别形成 100 m \times 100 m (简

写为 I_{100}) 及 $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ (简称为 I_{150}) 的采样密度, 然后再分别进行半方差模型拟合, 根据拟合的模型把 3 种采样密度的样点进行 Bloc Kriging 插值, 绘制出土壤特性的空间分布图, 分别提取 305 个原始样点中的 74 个样点 (与 I_{100} 下的样点相同) 的估值, 并计算其均方根误差 ($RMSE$), 公式如下^[10]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_{tested} - x_{estimated})^2}$$

式中, N 为抽提的原始样点个数, x_{tested} 是土壤特性的测定值, $x_{estimated}$ 是土壤特性的估值。

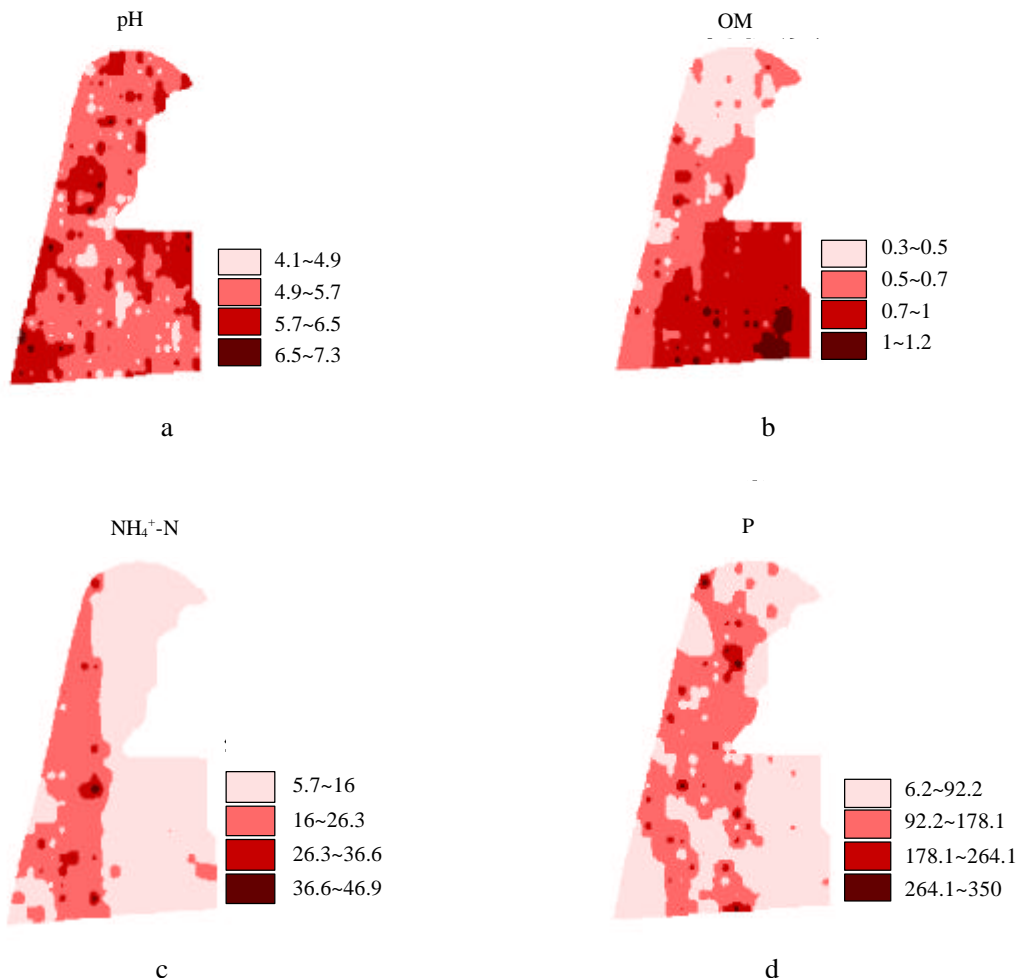
试验数据用 Arcview 制作土壤特性的空间分布图, 用 GS^+ 进行半方差分析。已有较多研究对半方差函数进行了介绍^[13,14], 本文不再作详细说明。

2 结果与分析

2.1 原始采样密度下的土壤特性空间分布特征

根据施肥情况调查, 当地农民施用有机肥较少,

长期施用通用型的复合肥及过磷酸钙, 一般不单独施用 K 肥。土壤特性的空间分布图显示, 土壤 pH 及 K 呈现大块状低值分布中存在小块碎状高值分布, 表明这两者在土壤中的分布较为均匀(图 2 a、e)。土壤 OM 从北向南逐渐增加, 东南部出现大块状的相对高值区。土壤有机质的空间变化主要受从北至西南方向的土壤质地从砂土-砂壤土-壤土的渐变规律影响(图 2 b)。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 则在研究区域的西部呈现从东北到东南相对高值的垂直带状分布(图 2 c), 影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 空间分布的原因有待进一步研究。土壤 P 在中部表现为大块状高值分布(图 2 d), 土壤 Ca、Mg 及 S 的空间分布与土壤 OM 类似, 但比 OM 更趋于小块状分布(图 2 f~h)。土壤养分的空间分布图表明常规施入的肥料加剧了土壤矿质养分空间变异程度。



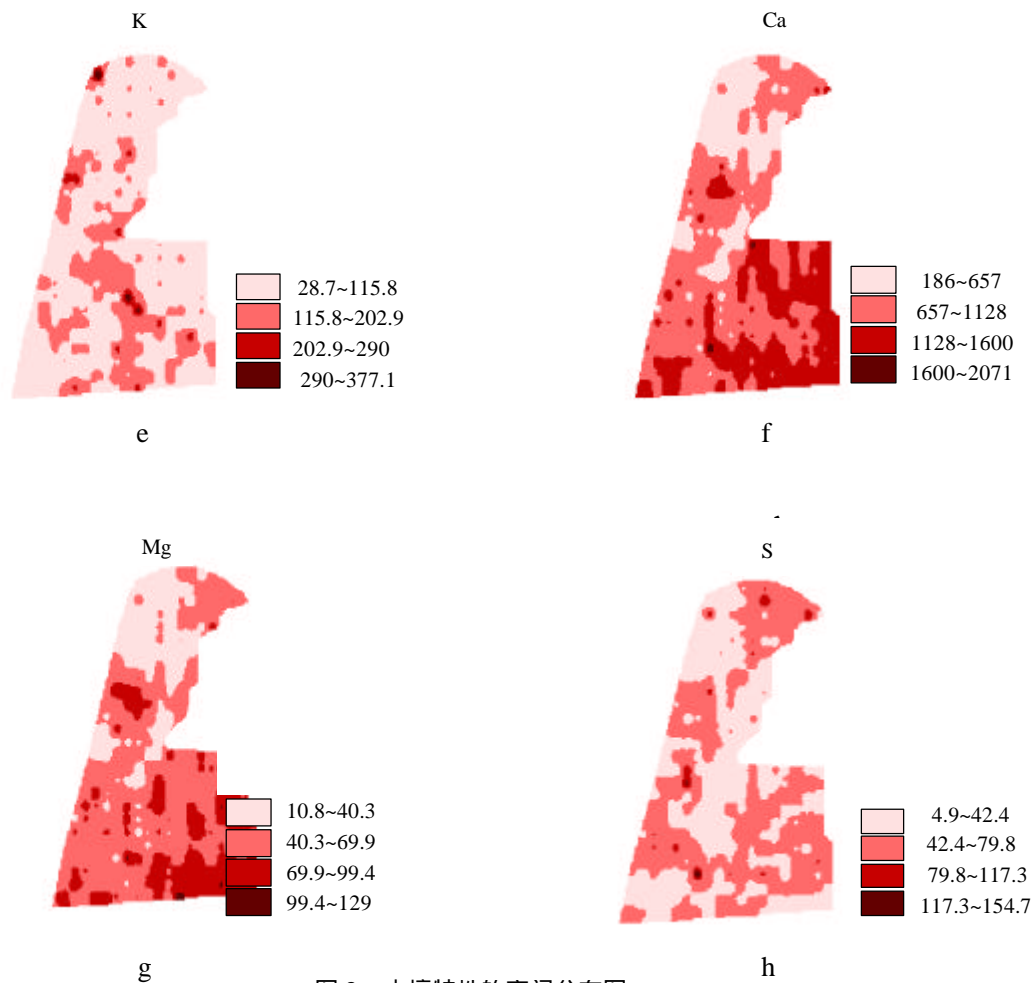


图 2 土壤特性的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of soil properties

2.2 不同采样密度下土壤特性的空间变异结构分析

利用地统计学方法对不同采样密度下的土壤特性进行了半方差分析,表 1 为半方差函数特征值。在不同采样密度下,土壤空间变异的半方差最适模型及模型的拟合度随土壤的特性而定。土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、P 及 S 在不同密度下的空间变异结构分别符合不同的模型,而土壤 OM、Ca、Mg 的空间变异结构均可用高斯模型拟合,土壤 K 的最适模型均为指数模型。土壤 OM、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Ca、S 在 3 种密度下的模型拟合度均达到显著或极显著水平,土壤 pH 值只有在 I_{150} 时模型达到显著水平,土壤 P、K 在不同密度下的模型均未达到显著水平,土壤 Mg 在 I_{50} 及 I_{100} 下的拟合度均为极显著模型,但在 I_{150} 下的拟合度较差。

有效变程表明土壤特性的空间依赖距离。从半方差模型拟合程度达到显著水平的土壤 OM、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Ca 及 S 的有效变程来看,即使土壤特性在

不同采样密度下具有相同空间变异模型,但其空间依赖距离仍然差别甚大,如土壤 OM 在 I_{150} 下的有效变程约是 I_{100} 下的 2 倍多。表 1 的数据同时显示,有效变程并没有随着采样密度的提高而增大,两者之间没有表现出必然的规律。

基底效应反映土壤特性空间变异的空間相关程度。按照区域化变量空间相关性程度的分级标准,变量基底效应 < 25% 时,具有强烈的空间相关性,变异主要由空间自相关因素引起,在 25% ~ 75% 之间,变量具有中等的空间相关性, > 75% 时,变量的空间相关性较弱,变异由主要随机因素引起^[15]。在本研究中,不同采样密度下的土壤 OM、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 Ca 的变异均分别具有相近强度的空间相关性,土壤 S 在 I_{50} 及 I_{100} 下具有中等相关性,而在 I_{150} 下的空间相关性强烈。因此,不同采样密度可能影响到变异空间相关性的判断,对确定引起土壤变异的主要因素产生较大的影响。

表 1 不同采样密度下的土壤特性半方差函数特征值
Table 1 Semi-variance parameters of nutrients in soil at different sampling intensities

项目	基底值 (C ₀)	基台值 (C+C ₀)	有效变程(m)	基底效应(%) (C ₀ /C+C ₀)	最适模型	R ²	F	
pH	I ₅₀	0.360	0.727	5386.7	49.5	高斯	0.307	3.54
	I ₁₀₀	0.363	0.727	9330.0	49.9	指数	0.133	1.23
	I ₁₅₀	0.407	0.815	9330.0	49.9	指数	0.455	6.68*
OM	I ₅₀	0.017	0.164	2120.0	10.4	高斯	0.992	992.0**
	I ₁₀₀	0.016	0.145	1744.2	11.0	高斯	0.989	719.27**
	I ₁₅₀	0.012	0.560	3781.1	2.1	高斯	0.993	1134.86**
NH ₄ ⁺ -N	I ₅₀	0.100	49.790	372.0	2.0	指数	0.787	29.56**
	I ₁₀₀	0.100	38.050	438.0	2.6	指数	0.798	31.60**
	I ₁₅₀	0.100	45.310	235.6	2.2	高斯	0.826	37.98**
P	I ₅₀	3300.00	6601.00	9330.0	50.0	指数	0.168	1.62
	I ₁₀₀	4080.00	8161.00	5386.7	50.0	高斯	0.022	0.18
	I ₁₅₀	2330.00	8204.00	2146.0	28.4	线形有基台值	0.327	3.89
K	I ₅₀	2417.00	4835.00	9330.0	50.0	指数	0.013	0.11
	I ₁₀₀	2410.00	4821.00	9330.0	50.0	指数	0.328	3.90
	I ₁₅₀	3230.00	6470.00	9330.0	49.9	指数	0.299	3.41
Ca	I ₅₀	72200.0	355400.00	2494.2	20.3	高斯	0.977	339.8**
	I ₁₀₀	37000.00	284800.00	1978.0	13.0	高斯	0.984	492.0**
	I ₁₅₀	87000.00	485000.00	2224.0	17.9	高斯	0.839	41.69**
Mg	I ₅₀	285.00	1180.90	2101.0	24.1	高斯	0.965	220.57**
	I ₁₀₀	148.00	1006.900	1668.0	14.7	高斯	0.939	123.15**
	I ₁₅₀	600.00	3310.00	4248.7	18.1	高斯	0.247	2.62
S	I ₅₀	457.00	1124.90	4596.9	40.6	高斯	0.782	28.70**
	I ₁₀₀	336.00	882.900	2864.8	38.0	高斯	0.790	30.10**
	I ₁₅₀	410.00	2672.00	7095.0	15.3	指数	0.486	7.56*

F_{0.05}=5.32; F_{0.01}=11.26

2.3 不同采样密度下土壤特性估值的比较

对土壤特性的推估是在土壤特性空间分布图的基础上进行。本研究选取不同密度下半方差模型均达到显著水平的土壤 OM、NH₄⁺-N、Ca、S 进行养分的推估，计算估值的均方根误差，以此衡量采样密度对养分推估的准确性。表 2 显示，土壤 OM 及 S 在采样密度较大时，推估误差较小，较为真实地反映了 OM 及 S 在土壤中的空间分布状况，当采样密度减少时，对土壤 OM 及 S 推估的误差增大，精度降低。然而，土壤 NH₄⁺-N 及 Ca 的情况有所不同。

表 2 土壤特性估值的均方根误差 (RMSE) 比较
Table 2 Comparison of RMSE of estimated value of soil properties

采样密度	OM (g/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	Ca (mg/L)	S (mg/L)
I ₅₀	1.18	0.84	191.0	16.83
I ₁₀₀	1.25	0.55	188.5	18.56
I ₁₅₀	1.36	4.83	232.4	20.36

这两者均在 I₁₀₀ 下的推估误差最小，I₅₀ 次之，在 I₁₅₀ 时的误差最大，精度最差。

3 结论

(1) 本研究区域土壤为酸性，除 NH₄⁺-N 及 S 较缺乏外，其他养分含量较高，出现 P 素累积情况，养分变异系数在 35.6% ~ 69.2% 之间，符合正态分布 (土壤 NH₄⁺-N 例外)。

(2) 采样密度对土壤空间变异结构的影响随土壤的特性而定。不同采样密度下，土壤 pH、NH₄⁺-N、P 及 S 分别符合不同的半方差模型，土壤 OM、Ca、Mg 均可用高斯模型拟合，采样密度对模型的拟合度、变异的有效变程及空间相关性均没有必然影响。

(3) 土壤养分估值的均方根误差表明，对土壤 OM 及 S 的推估精度随采样密度的增加而提高，对土壤 NH₄⁺-N 及 Ca 的推估在 I₁₀₀ 下最准确，在 I₅₀

时次之, 在 I_{150} 时精度最差。

参考文献

- 1 Yost RS, Uehara G, Fox RL. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi- variogram. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1028 ~ 1032
- 2 Itaru Okuda, Masanori Okazaki, Takusei Hashitani. Spatial and temporal variations in the chemical weathering of basaltic pyroclastic materials. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59: 887 ~ 894
- 3 Timlin DJ, Pachepsky Y, Snyder VA, Bryant RB. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62 (3): 764 ~ 773
- 4 Bahman Eghball, James S. Schepers. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield. *Agronomy Journal*, 2003, 95 (2): 339 ~ 346
- 5 van Groenigen JW. The inference of variogram parameters on optimal sampling schemes for mapping by kriging. *Geoderma*, 2000, 97: 223 ~ 236
- 6 Juang KW, Liou DY, Lee DY. Site-specific phosphorus application based on the Kriging fertilizer-phosphorus availability index of soils. *J. Environ. Qual.*, 2002, 31: 1248 ~ 1255
- 7 Gert Verstraeten, Jean Poesen. Regional scale variability in sediment and nutrient delivery from small agricultural watersheds. *J. Environ. Qual.*, 2002, 31: 870 ~ 879
- 8 Kui-wei Juang, Dar-yuan Li. Comparison of three nonparametric Kriging methods for delineating heavy-metal contaminated soils. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29 (1): 197 ~ 205
- 9 Wilson JP, Spangrud DJ, Nielsen G, Jacobsen JS, Tyler DA. Global positioning system sampling intensity and pattern effects on computed topographic attributes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62 (5): 1410 ~ 1417
- 10 Mueller TG, Pierce FJ. Soil carbon maps: Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, 67 (1): 258 ~ 267
- 11 Robertson GP. *GS⁺: Geostatistics for the environmental sciences*. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA. 2000
- 12 Yi-Ju Chien, Dar-Yuan Lee, Horng-Yuh Guo, Kun-Huang Houg. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Science*, 1997, 162 (4): 291 ~ 298
- 13 沈思渊. 土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望. *土壤学进展*, 1989, 17 (3): 11 ~ 24, 35
- 14 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
- 15 Cambardella CA, Moonman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen KL, Turco RE, Konopka AE. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 1501 ~ 1511

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES AT DIFFERENT SAMPLING INTENSITIES AND ACCURACY OF THEIR ESTIMATION

YAO Li-xian ZHOU Xiu-chong CAI Yong-fa CHEN Wan-zhen

(Soil & Fertilizer Institute, Guangdong Academy of Agricultural Science, Guangzhou 510640)

Abstracts Spatial variability of soil properties was studied, and comparison in estimation accuracy was conducted between three different sampling intensities. The structure of soil spatial variation change with sampling intensities and soil properties. Variation of soil pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, P and S was best fitted with their corresponding semi-variation model, respectively, whereas that of soil OM, Ca and Mg could be simulated by the same one model. Sampling intensities did not have anything certain with the fitting degree of models, effective range and spatial dependence of variation. Soil properties with significant model-fitting degree were estimated, with results showing that the accuracy of estimation with soil OM and S increased with sampling intensity, however, it was not the case with soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and Ca.

Key words Soil property, Sampling intensity, Spatial variability, Estimation accuracy