植物营养与肥料学报 2006,12(1):37－43
Plant Nutrition and Fertilizer Science

稻田土壤养分空间变异与合理取样数研究

许红卫[1], 高克异[1], 王 珂[1], 周 斌[1], J. S. Bailey[2]
(1 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所,浙江杭州 310029; 2 北爱尔兰农业与环境部,英国)

摘要: 以嘉善县陶庄农场内一块 0.52hm^2 的水稻田为研究区,采用地统计方法和常规统计方法进行土壤 pH 及养分(全氮、全碳、速效钾、速效磷、速效镁、速效锰、速效铜、速效锌)的空间变异及其合理取样数目研究。结果表明,各土壤养分在田间尺度均存在一定的空间变异,全氮、全碳、速效钾、速效磷等主要养分的空间格局呈南北向条带状,与农户经营田块的方向基本一致; 不同农户耕种、管理下的 4 田块的土壤养分差异显著; 反映土壤肥力的土壤全碳、全氮等养分的合理取样数目在 95% 的置信度和 5% 的相对误差条件下为 4～5 个,基本上每个农户经营田块为 1 个,即可反映土壤养分的真实情况。因此,试验区以 N 素管理为主的精确田间管理的土壤采样可以采用以农户经营地块为单位的混合样采样方式,以减少土壤采样量和分析成本。

关键词: 稻田; 土壤养分; 空间变异; 地统计学; 合理取样数目
中图分类号: S158　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2006)01-0037-07

Spatial variability of soil nutrients in paddy field and their appropriate sampling sizes

XU Hong-wei[1], Gao Ke-yi[1], WANG Ke[1], ZHOU Bin[1], J. S. Bailey[2]
(*1 Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang Univ., Hangzhou 310029, China; 2 Department of Agriculture for Northern Ireland, Agricultural and Environmental Science Division, UK*)

Abstract: An understanding of the spatial components of variability in soil nutrients is essential, before any decision can be made as to how many fertilizer rates are likely to be appropriate for the field. The objectives of the present study were to examine the spatial variabilities of soil pH and nutrients, and to determine their appropriate sampling size by the means of conventional statistics and geostatistics. The area selected for this study was a 0.52 hectare paddy field divided into four blocks, which were cultivated separately by four farmers, at Taozhuang farm in Jiashan county. The soil nutrients analyzed consisted of total N, total C, available K, available P, available Mg, available Mn, available Cu, available Zn. The results showed that the data sets of soil properties except pH and total N were all normally distributed, and the data set of total N was also normally distributed through log transformation. All the soil nutrients were found to vary across the field to some extent. And that soil pH had the least difference within the field, whilst available Mn had the greatest one. The spatial patterns of main nutrients, such as total N, total C, available K and available P, were zonal in south-north direction, same as the direction of the blocks. The difference among 4 blocks cultivated by four farmers was prominent. For a 95% confidence with 5% of population mean, the estimated number for pH would be only one, which meant that only one sample was needed for the whole area. Those for soil total N and total C would be 4 to 5 samples, i.e., one block needed only one sample. All these results indicated that the farmers' fertilization habits could affect the spatial variability of those soil nutrients. It was concluded that soil could be sampled in farmer unit for site-specific management to N fertilization at this farm.

Key words: paddy field; soil nutrients; spatial variability; geostatistics; the appropriate sampling size

收稿日期: 2004-12-09　　**修改稿收到日期**: 2005-04-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(40101014); 浙江省教育厅项目(20020766)资助。
作者简介: 许红卫(1966—),女,浙江上虞人,博士,副教授,主要从事农业信息技术应用研究。

对田间土壤养分空间变异的研究和了解是确定田块肥料投入和精确施肥的基础。国外对土壤空间变异性的研究始于70年代，Burgress、Warrick等[1-2]许多土壤学家对土壤物理性质(如水分、透水率、湿度)空间变异性规律做了大量的研究，但大都停留在对土壤空间变异性的定性描述上。到80年代空间变异已经成为土壤科学研究的重要内容[3]，并开始由定性描述转向定量研究，还引进了Kriging内插技术，进一步研究了Cokriging内插、puctual Kriging内插等技术，并用于土壤制图。此后部分化学性质在空间上的变异性开始进入诸多学者的研究领域。国内对土壤空间变异性研究起步较晚，80年代对旱地土壤的空间变异性、水稻土物理性质的空间变异性进行了研究。90年代，一些学者对土壤的某些化学特性的空间变异性进行了研究，并开始把GIS应用于土壤的空间变异性研究中。但迄今为止，多数研究着重讨论了土壤物理性质、土壤盐分的变化问题以及北方旱地的土壤养分的空间变异等[4-9]，对稻田土壤养分方面的研究较少。而且，国内外学者在研究土壤空间变异性时，大多研究地形、土壤成土因素等自然条件引起的土壤特性的空间变异。而我国高产稻区的水稻土经过长期的耕作，人为土壤的特性十分明显，除了要研究自然条件引起的变异以外，必须十分重视人为因素造成的变异，例如农户之间因不同管理造成的农田之间土壤肥力的差异等等。为此，本研究采用传统统计学方法和地统计学方法研究四相邻农户水稻田土壤养分的空间变异性，特别是四农户不同管理下的土壤养分的差异，以及合理取样数目，旨在了解试验田不同管理方式下土壤养分的空间变异特征，根据水稻土的自然属性和人为影响显著的特点，探索适合水稻土特点和特定管理模式的土壤采样方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于嘉善县陶庄农场内一块0.52 hm^2的水稻田。根据全国土壤普查结果，该田块土壤母质为河湖相沉积物，属湖泥土，质地为重壤，pH为6.0。自联产承包以来，该田块分别由四农户承包耕种，每年种植一季中稻，冬季基本抛荒。

1.2 采样与分析

将该地块图形输入到Arcview地理信息系统软件中，根据预先确定的采样方案确定各采样点的位置及坐标，样点间距为1～15m不等，总共为84个(图1)。用全站仪确定田块四周边的样点后，用皮尺测量确定其它采样点。取0—15cm的表层土壤，在取样半径约1m的圆形区域内多点混合取样，用四分法取大约1kg的土样带回实验室。采样时间为2002年4月。土样经风干、磨碎及过筛后，由北爱尔兰农业部农业与环境研究实验室按英国农业部标准常规分析方法进行一系列土壤养分(全N、全C、速效P、速效K、速效Cu、速效Zn、速效Mn和速效Mg)含量的测定。其中土壤pH采用1:2.5土水比的悬浊液测定；土壤全N和全C利用Leco CN-2000燃烧分析仪分析；土壤速效P采用Olsen法测定，土壤速效K、Mn和Mg含量用醋酸铵溶液浸提，火焰光度法测定；土壤速效Cu、Zn含量采用EDTA提取，AAS法测定。

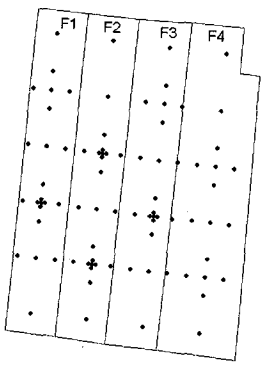

图1 样区采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites

1.3 研究方法

1.3.1 地统计分析和克立格内插 地统计分析是以区域化变量为核心和理论基础，以空间相关和变异函数为基本工具的一种数学地质方法，一般以半方差图作为描述空间变异性的工具[10]。半方差函数表示了一定范围内的变量属性的空间依赖性，半方差的值r反映出变量的空间分异性，可用公式(1)计算：

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

式中，h为一定的间隔距离；$N(h)$为该范围内的观察点数；$Z(X_i)$为观察点X_i的属性值。

克立格插值方法是地统计中最为常用的插值法，是一种局部估计的加权平均。它对各观察点的权重的确定是通过半方差图分析，根据统计学上无偏和最优的要求获取的。点状克立格插值，又叫一般克立格插值法，是基于点状测点的一种克立格插

值方法。

本研究应用 SPSS 统计软件对各土壤养分数据进行常规统计分析,应用 GS⁺ 地统计软件对各土壤养分数据进行地统计分析,采用一般点克立格法内插未采样点的值并制图。

1.3.2　合理取样数确定　对于试验田各土壤养分的纯随机采样的合理取样数根据 Cochran[11] 提出的公式计算:

$$n = (t \times Std)^2 / d^2 \qquad (2)$$

式中 n 为需要的采样数,t 为与显著水平 α 相对应的标准正态偏差,Std 为样本标准差,d = 样本平均值 × 相对误差(%)。如果计算所得样本数大于总样本容量 N 的 10%,则应采用不重复抽样公式,即:

$n' = n/(1 + n/N)$。

2　结果与讨论

2.1　土壤养分的统计特征

从表 1 可知,试验田土壤的 pH、全 N、全 C、速效 K、速效 P(Olsen P)、Mg、Mn、Cu、Zn 含量的变异系数在 2.18%—54.86%之间,土壤 pH 的变异系数为最低(2.18%)。其中,Mn 的变异系数最大,达到 54.86%;速效磷次之,为 38.36%。因此,在相同精度下,Mn、速效 P 的采样布点应该比其它土壤特性多。从土壤养分的统计分布特征(表 2)可知,土壤养分含量数据均存在一定程度的左偏和右偏;同时它们都呈一定程度的高峰态,其中 Mn 的峰度特别高。经分布检验,除全 N、pH 外,其它特性在 95%的置信度下均呈正态分布。

表 1　土壤养分的描述统计特征值

Table 1　Descriptive statistical feature values of soil nutrients

土壤养分 Soil nutrients	范围 Range	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV(%)
全氮 Total N(%)	0.16 —0.21	0.185	0.0092	4.97
全碳 Total C(%)	1.65 —2.33	1.974	0.1140	5.78
酸碱度 pH	6.86 —7.59	7.380	0.1609	2.18
速效 P Available P(mg/kg)	5.00 —24.00	9.940	3.8129	38.36
速效 K Available K(mg/kg)	70.00 —120.00	92.350	13.1438	14.23
速效 Mg Available Mg(mg/kg)	330.00 —429.00	382.510	24.6500	6.44
速效 Mn Available Mn(mg/kg)	0.414 —11.30	2.727	1.4959	54.86
速效 Cu Available Cu(mg/kg)	12.00 —14.50	13.230	0.5679	4.29
速效 Zn Available Zn(mg/kg)	1.93 —3.52	2.650	0.2959	11.17

表 2　土壤养分的分布特征检验

Table 2　Test on distribution characteristics of soil nutrients

土壤养分 Soil nutrients	样本数 Sampl. No.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	KS1	KS2	$\alpha_{0.05}$
全氮 Total N(%)	84	0.587	0.957	2.567	2.436	-
全碳 Total C(%)	84	0.550	1.018	0.984	0.881	+ o
酸碱度 pH	84	-1.656	2.340	1.661	1.714	-
速效 P Available P(mg/kg)	84	1.063	1.377	1.252	0.814	+ o
速效 K Available K(mg/kg)	84	0.106	-0.827	0.681	0.707	+ o
速效 Mg Available Mg(mg/kg)	84	-0.298	-0.713	0.696	0.806	+ o
速效 Mn Available Mn(mg/kg)	84	2.625	12.279	1.279	0.685	+ o
速效 Cu Available Cu(mg/kg)	84	0.011	-0.215	0.651	0.573	+ o
速效 Zn Available Zn(mg/kg)	84	0.467	0.946	0.706	0.547	+ o

注:KS1 和 KS2 分别为未变换和经对数变换后的 Kolmogorov-Smirnov 正态统计量。$\alpha_{0.05}$代表置信度为 0.05。"+""o"和"-"分别表示在 0.05 的置信度下呈正态、对数正态分布和不呈此两种分布。

Notes: KS1 and KS2 mean the Kolmogorov-Smirnov test statistic values for normal distribution of unchanged or logarithmic transformed variables. "+""o" and"-"mean normal, logarithmic normal and other distribution at 0.05($\alpha_{0.05}$) confidence level, respectively.

2.2 土壤养分的半方差分析及其空间分布格局

由于半方差函数的计算要求数据符合正态或近似正态分布(偏度值在 -1～1 间)[12],否则可能产生比例效应,从而使实验方差函数产生畸变,抬高基台值和块金值,增加估计误差,甚至会掩盖其固有的结构,因此只对呈正态的全 C、速效 K、速效 P、速效 Mg、速效 Mn、速效 Cu、速效 Zn 含量和呈近似正态的全 N 进行半方差分析,结果见表 3。

表 3 土壤养分的半方差函数及其拟合参数

Table 3 The theoretical semi-variogram models for soil nutrients and their parameter values

土壤养分 Soil nutrients	模型 Model	块金值 Nugget variance	基台值 Sill variance	变程 Range(m)	块金效应 Nugget/Sill(%)	决定系数 R^2
全氮 Total N(%)	球型 Spherical	0.00001	0.00009	14.4	11.11	0.626
全碳 Total C(%)	指数型 Exponential	0.0067	0.0261	212.1	25.67	0.730
速效 K Available K(mg/kg)	指数型 Exponential	18.0	335.5	130.8	5.37	0.986
速效 P Available P(mg/kg)	球型 Spherical	6.68	15.34	29.1	43.50	0.956
速效 Mg Available Mg(mg/kg)	球型 Spherical	63.0	707.1	39.3	8.91	0.883
速效 Mn Available Mn(mg/kg)	球型 Spherical	0.50	5.009	120.8	10.0	0.785
速效 Cu Available Cu(mg/kg)	球型 Spherical	0.147	0.819	169.4	17.95	0.952
速效 Zn Available Zn(mg/kg)	指数型 Exponential	0.518	0.1266	128.7	40.92	0.825

块金值是半方差函数在原点处的数值,表示由实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异;基台值通常表示系统内的总变异,包括结构性变异和随机性变异,基台值越高,表示系统总的空间异质性越高。变程指影响的范围,反映空间依赖的最大距离。块金效应,也称基底效应,是块金值与基台值之比,反映土壤养分的空间依赖性,可表明系统变量的空间相关性的程度。如果块金效应小于 25%时,空间相关性强;在 25%～75%之间时,空间相关性中等;>75%,空间相关性弱[13]。气候、母质、地形、土壤类型等结构性因素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可以使土壤养分的空间相关性减弱,朝均一化发展[14]。决定系数是回归平方和占总平方和的比值,反映与实验变异函数拟合程度的高低。

从表 3 和图 2 可知,试验田土壤的各种养分具有良好的半方差结构,表现出空间相关性,存在一定的空间变异。全 N、速效 K、Mg、Mn、Cu 含量的块金效应小于 25%,具有强烈的空间相关性;全碳、速效磷和 Zn 的块金效应在 25%～75%之间,具有中等空间相关性。从变程看,各种土壤养分的变程并非一致,其相关间距变化范围从全 N 的 14.4m 到全 C 的 212.1m。土壤养分的基台值均为正值,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。图 2 表明,各土壤养分的含量呈现较明显的空间分布格局。全 N 与全 C 的分布格局基本相似,农户 2 管理的田块比较高,而且呈现较为明显的南北向,与自然田块方向一致的条带状分布。具有类似条带分布的还有速效 P、速效 K 和速效 Mg。这也说明了不同农户的施肥方式、施肥量对这些土壤养分的空间变异的影响。

2.3 实验区合理取样数

根据公式 2 计算的各土壤特性在一定的置信水平和相对误差要求下的试验田的合理取样数见表 4。这是在作物推荐施肥中所经常采用的办法。土壤养分的变异越大,为达到一定精度所要求的采样数也会相应加大。从表 1 可以看出,各种养分的变异系数大小顺序为:Mn > P > K > Zn > Mg > TC > TN > Cu > pH。为达到一定精度的各养分采样数也呈一致的顺序(表 4)。如 Mn 的变异系数最大,其所要求的采样数也最高,95%置信水平、5%的相对误差条件下为 71 个样本,而 pH 要求的采样数最少,因为整个区域的 pH 值水平相对均匀,所以只要取 1 个样就能基本反映试验区的土壤酸碱水平。从表 4 还可以看出,随着对置信水平和相对误差条件的降低,各养分所要求的采样数都有较大幅度的下降。这一方面减少了采样成本,但另一方面势必降低对田间土壤特性的空间变异性的表达度和可信度,从而增加了以后的田间精确施肥的误差。因此,在确定合理取样数时,允许误差的取值非常关键。

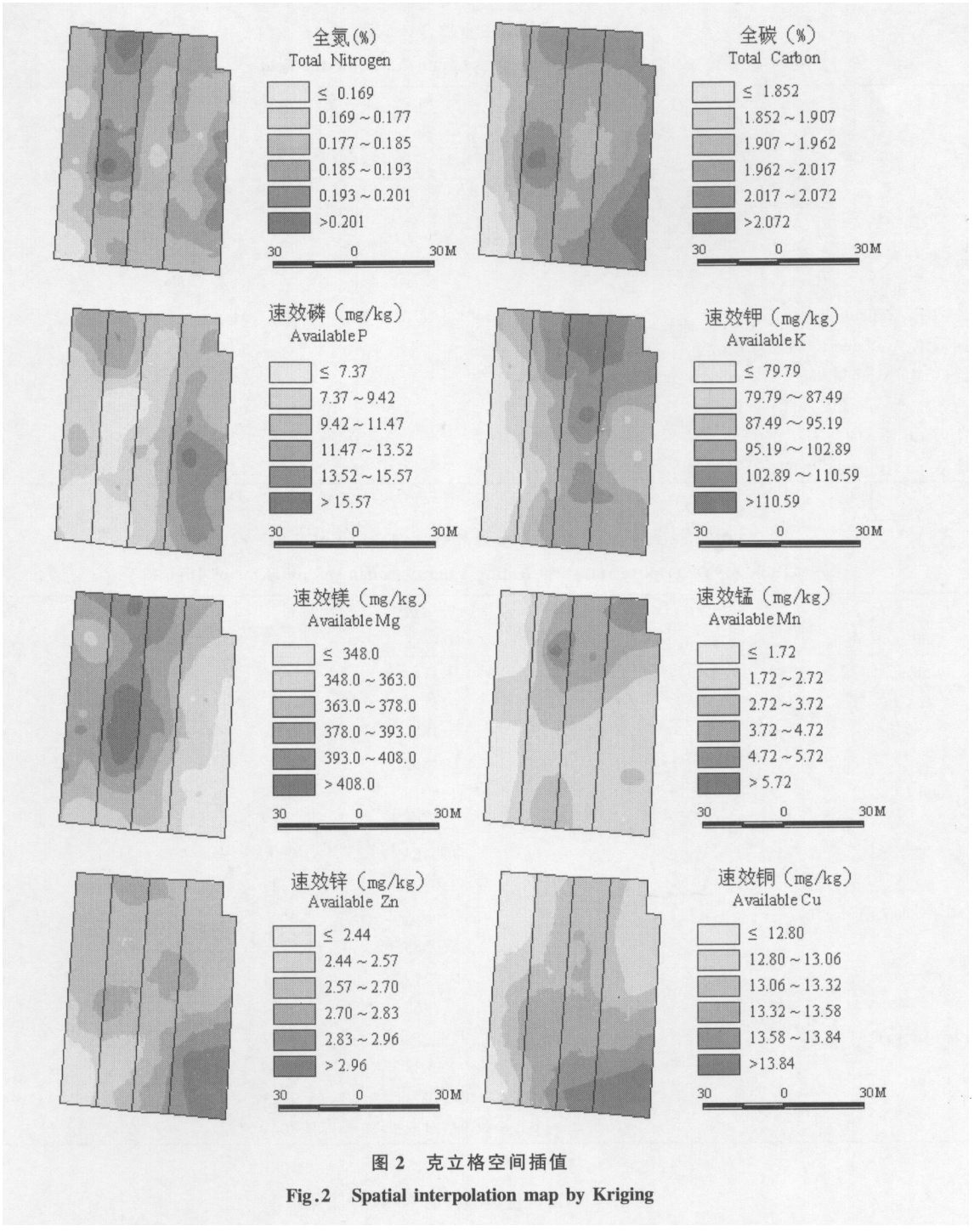

图 2　克立格空间插值

Fig.2　Spatial interpolation map by Kriging

2.4　不同农户管理下土壤养分的差异

2.4.1　4 田块土壤养分的统计特征　不同农户管理下的 4 小田块主要土壤养分的统计特征见表 5。从表 5 可以看出,4 小田块的土壤养分存在较为明显的差异。农户 1 的稻田各主要土壤养分的含量相对较低,而农户 3、4 的稻田各主要土壤养分的含量均相对较高,这可能与各农户习惯的施肥方式、施肥量等不同的稻田管理有关。

2.4.2　4 小田块土壤养分的差异显著性检验　对 4 小田块的土壤养分进行多独立样本 K-W 检验,结果(表 6)看出,除 Zn 以外,各相伴概率均小于显著水平 0.05,说明除 Zn 外,4 小田块各土壤养分的差异为极显著或显著。这 4 块稻田的成土母质、质地、地形、气候等自然条件完全一致,其土壤养分的差异主要是由 4 农户不同的田间管理造成的。因此,可以认为,施肥方式、施肥量等人为因素对水稻土特性的空间变异,特别是对水稻土养分的空间变异有较大影响。

表4 试验田土壤合理取样数

Table 4 Appropriate sampling sizes for the field

土壤养分 Soil Nutrients	置信水平 Given level					
	95%			90%		
	相对误差 Relative error					
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
全氮 Total N(%)	4	1	1	3	1	1
全碳 Total C (%)	5	1	1	4	1	1
酸碱度 pH	1	1	1	1	1	1
速效 P Available P (mg/kg)	62	34	20	55	28	15
速效 K Available K (mg/kg)	23	8	4	17	6	2
速效 Mg Available Mg (mg/kg)	7	2	1	5	1	1
速效 Mn Available Mn (mg/kg)	71	49	32	67	42	26
速效 Cu Available Cu (mg/kg)	3	1	1	2	1	1
速效 Zn Available Zn (mg/kg)	16	5	2	12	3	2

表5 4田块主要土壤养分的描述统计特征值

Table 5 Descriptive statistical feature values of main soil nutrients of 4 blocks

土壤养分 Soil nutrients	农户 Farmers	范围 Range	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV(%)	偏度 Skewness
全氮 Total N(%)	1	0.16—0.19	0.1782	0.0066	3.70	-0.8
	2	0.18—0.21	0.1921	0.0093	4.84	0.57
	3	0.17—0.19	0.1811	0.0046	2.54	0.46
	4	0.17—0.20	0.1868	0.0082	4.39	0.01
全碳 Total C(%)	1	1.65—1.97	1.8718	0.0718	3.84	-1.23
	2	1.9—2.33	2.0425	0.1064	5.21	0.93
	3	1.85—2.06	1.9453	0.0606	3.12	0.57
	4	1.81—2.26	2.0321	0.1111	5.47	0.22
速效磷 Available P(mg/kg)	1	6.0—16.0	9.50	2.464	25.94	0.93
	2	5.0—19.0	7.9583	4.2781	53.76	1.49
	3	7.0—13.0	9.1579	1.5371	16.78	0.58
	4	10.0—24.0	13.7368	3.5877	26.12	1.38
速效 K Available K(mg/kg)	1	70.0—96.0	77.0	6.8522	8.90	1.51
	2	80.0—119.0	93.0833	9.5595	10.27	1.17
	3	86.0—120.0	104.79	8.7723	8.37	-0.19
	4	82.0—111.0	96.74	8.704	9.00	0.08

表6 4小田块土壤养分的K-W检验结果

Table 6 Results of Kruskal-Wallis test on soil nutrients of 4 blocks

统计值 Statistical values	全氮 Total N	全碳 Total C	酸碱度 pH	速效 P Available P	速效 K Available K	速效 Mg Available Mg	速效 Mn Available Mn	速效 Cu Available Cu	速效 Zn Available Zn
	(%)			(mg/kg)					
卡方统计量 Chi-square	31.881	36.905	13.529	31.218	47.425	52.165	31.845	13.467	6.252
自由度 df	3	3	3	3	3	3	3	3	3
相伴概率 Asymp. Sig.	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.100

3 结论

1)试验田水稻土土壤养分在田间尺度内存在一定的空间变异,全C、全N、速效K、速效P等主要养分的空间格局呈南北向条带状,与自然田块的方向基本一致。但这种变异是否对水稻的生长及其产量造成影响,还需要进行土壤、产量等空间变异的一体化研究。

2)在一定置信度和允许误差水平条件下,试验田各土壤养分的合理取样数有较大差异。其中反映土壤肥力的土壤全C、全N等养分的合理取样数在95%的置信度和5%的相对误差条件下为4～5个,基本上每个农户经营田块为1个,即可反映土壤养分的真实情况;而速效P、速效Mn的空间变异较大,要求的合理取样数目也较多。

3)在不同农户的耕种、管理下,4小田块的土壤养分存在显著差异。可以肯定,农户不同的经营方式与施肥习惯等人为因素对水稻田田间土壤养分的变异起主导作用。

4)基于上述结果,建议试验区以N为主的精确田间管理可以以农户经营地块为单位,并采用以农户为单元的混合样采样方式,有可能大大减少土壤采样量和分析成本;而对于以P为主的精确田间管理,由于P肥往往是定点施用,土壤中迁移较小,由此造成速效P的田间变异较大,因此,采样时不能采用以农户为单元的混合样采样方式来减少取样数。本研究结果在南方稻区是否具有代表性,还需要在更多地区、更大范围作进一步研究。

参考文献:

[1] Alemi M H, Azari A B, Nielsen D R. Kriging and univariate modeling of a spatial correlated date[J]. Soil Technology, 1988, 1(2): 117-132.

[2] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[A]. Stewart B A. *Advanced in soil sci.*[M]. New York: Springer-Verlag New York Inc. 1985. 3: 1-71.

[3] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等. 土壤性质空间变异性初步研究[J]. 水利学报,1985(9): 10-21.
Lei Z D, Yang S X, Xu Z R *et al*. Primary research on spatial variability of soil property[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985(9):10-21.

[4] 史海滨,陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值[J]. 水利学报,1994(7): 70-77.
Shi H B, Chen Y X. Combination structure model of soil moisture spatial variability and regional information estimation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(7): 70-77.

[5] Russo D. A geostatistical approach to solue transport in heterogeneous fields and its applications to salinity management[J]. Water Resour Res., 1984, 20(9): 1260-1270.

[6] 周慧珍,龚子同, Lamp J. 土壤空间变异性研究[J].土壤学报,1996,33(3): 232-240.
Zhou H Z, Gong Z T, Lamp J. Study on soil spatial variability[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(3): 232-240.

[7] 李菊梅,李生秀.几种元素在土壤中的空间变异[J].干旱地区农业研究,1998,16(2): 58-63.
Li J M, Li S X. Spatial variation of some nutrient elements in soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(2): 58-63.

[8] 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[J]. 土壤学报,2003,40(1): 79-88.
Huang S W, Jin J Y, Yang L P, Ceng M F. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the grain crop region in Yutian County[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 79-88.

[9] 胡克林,李保国,林启美,等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报,1999,15(3): 33-38.
Hu K L, Li B G., Lin Q M *et al*. Spatial variability of soil nutrient in wheat field[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(3): 33-38.

[10] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社,1999.
Wang Z Q. Geo-statistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999.

[11] Coran W G. Sampling Techniques (3rd ed.)[M]. John Wiley and Sons. Inc., New York, 1997.

[12] GS$^+$ manual, Gamma design[CP/CD]. Software, 2000.

[13] 孙波,赵其国,周国年. 低丘红壤肥力的时空变异[J]. 土壤学报,2002,39(2): 190-198.
Sun B, Zhao Q G, Lü G N. Spatio-temporal variability of red soil fertility in low hill region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 190-198.

[14] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y *et al*. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Tai Wan soil[J]. Soil Science, 1997, 162(4): 151-162.