

## 单种复合类型单元土壤全量元素空间变异的幅度效应\*

王秀虹<sup>1, 2</sup> 于东升<sup>1, 2†</sup> 潘月<sup>1, 2</sup> 徐志超<sup>1, 2</sup> 王玺洋<sup>1, 2</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 土壤属性变异性的幅度效应研究对土壤数字制图、土壤调查及农业生产均具有重要意义。针对江西东乡县研究区域水田—中潜灰鳞泥田(土种)一种土地利用与土壤的复合类型单元, 设定了8个土壤采样幅度研究区, 并利用多层次嵌套布点方法在每个采样幅度区分别布设60个采样点, 共采集337个样点的土壤表层(0~20cm)样品; 运用多种函数拟合分析手段, 揭示单种复合类型单元(水田—中潜灰鳞泥田)土壤全氮、全磷、全钾含量的空间变异性随采样幅度的变化特征。结果表明, 土壤全量元素的空间变异性均具有明显的幅度效应特征, 全氮、全磷、全钾含量的变异系数均随采样幅度的拓展而逐渐增加, 而增加趋势则逐渐变缓。不同土壤全量元素空间变异性体现出不同的幅度效应特征, 土壤全氮、全磷变异系数(%)的幅度效应刻画函数为 $CV = b \times D^a$  ( $R^2 > 0.87$ ,  $p < 0.001$ ), 土壤全钾为 $CV = e^{(a/D + b)}$  ( $R^2 > 0.93$ ,  $p < 0.001$ ),  $D$ 为幅度表征指标(km); 不同土壤全量元素变异系数随采样幅度快速与缓慢变化的幅度分界点位置存在明显差异, 表明基于复合类型单元的土壤多属性调查采样布点与分析策略需要统筹考虑。研究结果对于红壤丘陵区县域土壤调查样点合理布设具有重要的启示和参考价值。

**关键词** 土壤全量元素; 空间变异; 幅度效应; 土地利用与土壤复合类型单元; 红壤丘陵区

**中图分类号** S159.2 **文献标识码** A

土壤是一个不均匀变化的连续自然体, 即使在土壤类型相同的区域, 同一时刻土壤属性在不同的空间位置也会表现出不同的特征<sup>[1-4]</sup>。我国土壤类型众多<sup>[5]</sup>, 土地利用方式多样<sup>[6]</sup>, 土壤属性空间变异性尤为复杂<sup>[1]</sup>。研究土壤属性空间变异性及其定量化表达, 对制定合理高效的土壤野外调查采样方案<sup>[7]</sup>, 提升土壤制图精度<sup>[8]</sup>, 满足土壤精准管理要求, 促进精确农业发展<sup>[9]</sup>等具有重要的理论与现实意义。

对土壤属性的变异性, 从田间到区域等不同幅度均开展了许多研究工作。在田间幅度上, 李彦

等<sup>[10]</sup>在新疆石河子148团对面积为494 m × 884 m的样地土壤含水率的空间变异进行了研究, 结果显示在不同深度上(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm), 土壤含水率均表现为中等强度变异。在县域幅度上, Zhang等<sup>[11]</sup>在红壤丘陵区采用经典统计学方法, 研究分析了4种采样分类单元(网格采样单元、土壤类型分类采样单元、土地利用类型分类单元、土地利用与土壤复合类型采样单元)对土壤有机碳(SOC)空间变异性的影响, 结果显示不分类的网格采样单元的SOC空间变异性最大, 平均变异系数达到47%; 土地利用与土壤复合

\* 国家重点研发计划专项(2016YFD0200301)、国家自然科学基金项目(41571206)和国家科技基础性工作专项(2015FY110700-S2)资助 Supported by Special Project of the National Key Research and Development Program (No.2016YFD0200301), the National Natural Science Foundation of China (No. 41571206) and Special Project of the National Science and Technology Basic Work (No.2015FY110700-S2)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dshyu@issas.ac.cn

作者简介: 王秀虹(1990—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事土壤空间变异性研究。E-mail: wangxiuhongshuibao@163.com

收稿日期: 2016-12-27; 收到修改稿日期: 2017-03-13; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-03-30

类型单元 (Lu-SoTy) 的SOC平均变异系数最小。在区域幅度上, 刘付程等<sup>[12]</sup>采用经典统计学方法研究了太湖流域土壤全氮含量 (STN) 的变异性, 结果显示STN的变异系数为20.7%, 属于中等强度变异。显然, 这些结果均是分别基于某种单一的或固定的研究区幅度上研究获得的, 并未涉及不同幅度区域对土壤属性空间变异性影响的研究。

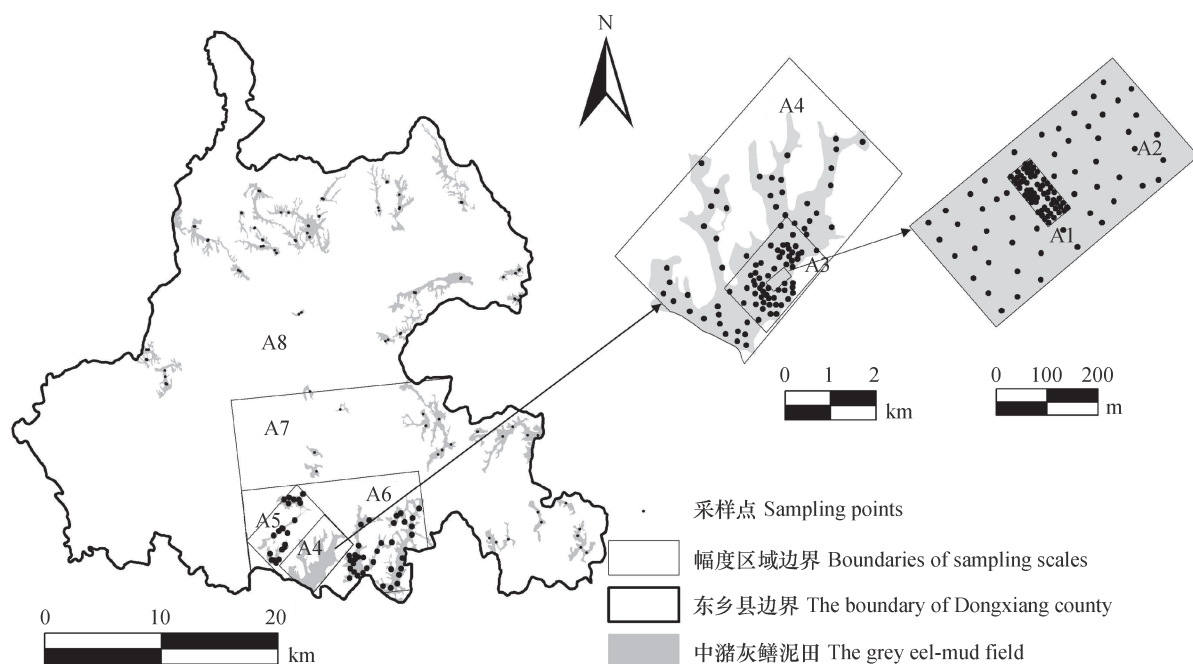
近年来, 土壤属性空间变异性随研究区幅度的变化特征研究也有报道。王美艳等<sup>[13]</sup>利用全国第二次土壤普查的1 875 个旱地土壤剖面数据, 研究了黄淮海农业区旱地土壤各深度层次SOC的空间变异性, 结果显示各层次SOC的平均变异系数均随行政区幅度的增大而提升。王丹丹等<sup>[14]</sup>利用全国第二次土壤普查的1 041 个土壤剖面数据, 研究了东北地区旱地STN空间变异性, 结果也表明STN的变异性随着研究区域幅度的增大逐渐提升 (县级 < 地市级 < 省级 < 大区幅度), 并揭示了STN平均变异系数 (CV) 与研究区面积 ( $S$ ) 的数量关系, 即  $CV = a \times \ln S + b$  ( $R^2 > 0.9, p < 0.05$ )。Zhang等<sup>[15]</sup>在红壤丘陵区县域幅度范围内, 采用经典统计学方法研究分析结果表明, 水田、旱地、林地SOC的空间变异性均随着研究区幅度拓展呈现出增加的趋势。这些幅度变化的效应特征均是基于某种土地利用方式下多种类型土壤空间变异影响下所带

来的, 同种土地利用方式及相同类型土壤属性的空间变异随研究幅度的变化规律依然不十分清楚, 导致基于土地利用与土壤复合类型单元 (Lu-SoTy) 布设土壤调查采样点密度的确定依据明显不足。在分析土壤属性不同幅度的变异性时, 不同幅度的土壤样点数并不相同, 很难说清土壤属性空间变异性在不同研究区幅度上的差异性, 是由土壤样点数还是由研究区幅度大小不同所引起。因此, 本研究在我国南方红壤丘陵区, 针对同一土地利用与土壤复合类型单元 (Lu-SoTy), 通过多层次嵌套布点方法<sup>[11, 15]</sup>, 在确保不同研究幅度下土壤样点总数一致的前提下, 揭示土壤属性空间变异性随研究区幅度的变化特征, 为基于土地利用与土壤复合类型单元 (Lu-SoTy) 合理布设土壤调查采样点提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江西省东乡县 (116°20' ~ 116°51'E, 28°02' ~ 28°30'N), 地处江西省东北山区向鄱阳湖平原过渡地段, 总面积约为1 270 km<sup>2</sup> (图1)。该县属亚热带湿润季风气候, 气候温和, 光热充足, 雨量充沛, 无霜期长, 年平均温度18.0 °C,



注: A1 ~ A8为研究区幅度.下同 Note: A1 to A8 means the scale of soil sampling district respectively. The same as below

图1 研究区幅度及采样点布设方案示意图

Fig. 1 Scale of the soil sampling district and distribution of sampling points

年降水量2 180 mm。地形以低丘为主,南北多高丘,丘陵面积占51%,平原岗地面积占49%。土地利用方式以水田、旱地、林地为主(中国土地利用数据库)。土壤成土母质有第四纪红色黏土、泥质岩类风化物、红砂岩类风化物、石英岩类风化和花岗岩类风化物等<sup>[16]</sup>。全县土壤类型以红壤和水稻土土类为主,其中水稻土主要包括淹育、潜育和潜育型水稻土3个亚类,红壤土类仅有1个红壤亚类<sup>[18]</sup>。2014年12月通过对研究区1:5万土地利用(主要考虑水田、旱地、林地)与土壤类型矢量图的空间叠加分析,发现水田—中潜灰鱗泥田(土种)复合类型单元在研究区农业用地类型中分布最广,总面积可达42 km<sup>2</sup>。

### 1.2 样品采集与分析

选择研究区农业用地类型中分布最为广泛的水田—中潜灰鱗泥田复合类型单元作为研究单元。依据该复合类型单元的空间分布特征,在全县设置8个幅度研究区,从小到大依次为A1~A8,其中A8为县域幅度(图1,表1),并且较低一级的幅度区域位于较高一级的幅度区域内部。采用多层次嵌套布点方法<sup>[11, 15]</sup>,充分考虑样点空间分布的广度和均匀度,在8个幅度区域的研究单元内各布设土壤

样点60个。其中,高一级幅度区域与低一级幅度区域的研究单元重叠部分的土壤样点,全部作为低一级幅度单元的样点;低幅度区域研究单元上的样点在此基础上再增补至60个,这样在全县范围内共布设样点337个。2014年12月份晚稻收割后采集表层(0~20 cm)土壤样品,采集时用GPS记录每个采样点的经纬度。

采集的土壤样品经风干、去除动植物残体后,研磨过100目筛备用。土壤全氮含量(TN)采用开氏消煮法测定;土壤全磷含量(TP)采用酸溶—钼锑抗比色法测定;土壤全钾(TK)采用氢氧化钠熔融法测定<sup>[19]</sup>。

### 1.3 采样幅度和土壤全量元素变异性表征指标

根据不同幅度上研究单元的采样点实际位置,运用ArcGIS 10.2.2工具箱中的Calculate Distance Band from Neighbor Count分别计算每个幅度上研究单元样点的最邻近1~8点的平均距离( $D_1 \sim D_8$ ,相当于采样点间距);使用Point Distance工具计算每个幅度上研究单元中样点的所有点最大距离( $D_0$ ,相当于采样点区域范围)。与幅度区域面积( $S$ ,相当于采样点区域范围)指标一起,作为研究单元采样幅度的表征指标(表1)。

表1 幅度表征指标

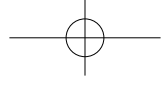
Table 1 Indexes of the scale description

幅度 Scale	最邻近 $n$ 点平均距离								所有点最大距离 Maximum distance of all the points ( $D_0$ ) (km)	面积 Area ( $S$ ) (km <sup>2</sup> )
	Average distance ( $D_n$ ) to the nearest numerous points (km)									
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$		
A1	0.012	0.014	0.017	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.156	0.016
A2	0.038	0.050	0.062	0.071	0.081	0.090	0.097	0.106	0.626	0.249
A3	0.096	0.141	0.175	0.204	0.229	0.251	0.274	0.292	1.801	2.833
A4	0.250	0.349	0.443	0.529	0.664	0.754	0.822	0.890	5.644	20.97
A5	0.410	0.565	0.724	0.886	0.994	1.123	1.273	1.471	8.301	44.97
A6	0.714	0.948	1.241	1.455	1.641	1.853	2.014	2.196	13.97	134.2
A7	1.102	1.673	2.367	2.903	3.451	3.886	4.439	4.760	27.95	428.3
A8	1.862	2.992	3.766	5.219	6.086	6.995	7.611	8.187	42.37	1274

土壤全量元素属性的变异性表征指标主要考虑平均值(Mean)、标准差(SD)、方差(Var.)、峰度(Kurtosis)、偏度(Skewness)、变异系数(CV),使用SPSS 20.0的描述统计模块获得。

### 1.4 数据分析

应用SPSS 20.0的曲线估计模块对幅度表征指标与变异性表征指标进行回归拟合分析。采用9种分析函数:(1)  $y=a \times x+b$ ; (2)  $y=a \times \ln(x)+b$ ;



(3)  $y=a \times (1/x)+b$ ; (4)  $y=a \times x+b \times x^2+c$ ;  
 (5)  $y=a \times x+b \times x^2+c \times x^3+d$ ; (6)  $y=e^{(a \times x+b)}$ ;  
 (7)  $y=b \times x^a$ ; (8)  $y=e^{(a/x+b)}$ ; (9)  $y=e^{-(a \times x+b)}$ ,  
 式中, a、b、c、d为常数; e为自然对数的底; y为  
 变异性指标, 如变异系数(%) ; x为采样幅度指  
 标(km或者 $\text{km}^2$ )。

通过多种幅度、变异性指标以及函数回归拟合  
 分析的结果比较, 选择显著性水平、 $R^2$ 均高的指标  
 及函数作为揭示土壤全量元素变异性随采样幅度  
 变化效应的最佳表征指标及拟合函数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 研究单元土壤全量元素的总体性描述统计特征

县域研究单元所有样点表层土壤TN、TP、  
 TK含量统计特征表明(表2), TN含量基本符合  
 正态分布; 而TP、TK含量不符合正态分布, 经过  
 进一步计算发现TP、TK含量的对数基本符合正态  
 分布。TN、TP、TK含量均值分别为 $2.32 \text{ g kg}^{-1}$ 、  
 $0.63 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $14.23 \text{ g kg}^{-1}$ , 变异系数均处在  
 23%~32%之间, 属于中等强度变异。但是, 这一  
 变异性结果是基于所有采样点在空间上不均匀分布  
 情况下得到的, 不能完全反映研究区域上土壤的  
 空间变异性特征。

### 2.2 不同采样幅度下研究单元土壤全量元素的变异性特征

研究单元不同采样幅度的土壤全量元素属  
 性统计特征(表2)表明, TN、TP、TK含量的最大  
 值、最小值、均值随幅度变化产生不同程度的差  
 异。以均值为例, TN含量在较小幅度(A1~A4)  
 上的均值较在较大幅度(A4~A8)上的均值要  
 大; TP含量均值在各幅度上相差不明显; 而TK  
 含量的均值则随着幅度的拓展呈现逐渐增大的  
 趋势。这表明在不同幅度空间上土壤TN、TP、  
 TK含量均具有不同程度的空间异质性。

各幅度研究单元中, 土壤TN、TP、TK的含  
 量基本符合正态分布(表2), 土壤TN、TP、TK  
 的含量随着幅度的拓展, 偏度值与峰度值的绝对  
 值在整体上呈减少的趋势。表明在较小幅度上,  
 采样点的数据相对集中, 数据的变异程度较小;  
 而在较大幅度上, 采样点的数据相对离散, 数据  
 变异程度相对较大。但是, 土壤TN、TP、TK含  
 量在每个幅度区域上的数据离散程度还是有差  
 别的, 土壤TN含

量在整体上的数据离散程度最小; 而土壤TK含  
 量在整体上的数据离散最大; 土壤TP含量数据  
 的离散程度处于TN、TK之间。

土壤TN、TP、TK含量的方差、标准差及  
 变异系数随采样幅度的拓展变化特征各不相同。  
 TN含量的方差与标准差随着幅度的拓展增大,  
 标准差由A1幅度的0.30增加至A8幅度的0.59,  
 方差由A1幅度的0.09增加至A8幅度的0.34;  
 变异系数由A1幅度上11%左右快速增加至A4  
 幅度上的22%左右, 在A5~A8幅度则保持在  
 26%~29%的范围内。TP在A1~A3幅度上,  
 标准差保持在0.1左右, 在A4~A8幅度上处  
 于0.20~0.25范围内, 但每个幅度上的方差均  
 小于0.1; TP含量的变异系数由A1幅度的13.41%  
 快速增加至A3幅度的18.15%, 而在A4~A8  
 幅度上则保持在30%~33%范围内。TK在A2  
 幅度上标准差与方差较A1大, 在A3~A8幅  
 度上分别保持在4.6~6.2、20~40范围内; 变  
 异系数由A1幅度的9.10%快速增加至A2幅  
 度的22.27%, 而在A3~A8幅度上则保持在  
 30%~40%范围内。

土壤TN、TP、TK含量的方差、标准差及  
 变异系数随采样幅度变化也具有共同特征。无  
 论是何种幅度上, 被广泛认为相对均质的单一  
 复合类型研究单元内部, 土壤TN、TP、TK含  
 量也存在空间异质性; 且这种异质性随着采样  
 幅度拓展也具有增大趋势, 当幅度拓展到一定  
 程度, 这种异质性增加趋势逐渐减弱(表2)。  
 但是, 土壤TN、TP、TK含量的异质性随幅度  
 区域的拓展, 各自的变化趋势也存在明显的差  
 异。

本文揭示的不同幅度(最大为县域幅度)上  
 同一种土地利用与土壤类型复合单元的土壤全  
 量元素的变异性规律, 由于农田管理措施(施  
 肥、耕作、灌溉、作物品种等)的差异<sup>[15-17, 20-22]</sup>,  
 如施肥情况的不同, 土壤pH就会有所不同, 这  
 就使得土壤中微生物的群落结构和生命活动产  
 生差异性, 这样微生物对N、P、K这3种元素  
 的代谢就会不同<sup>[23]</sup>, 使得TN、TP、TK的各  
 组成成分在土壤中的行为(游离、固着、沉淀、  
 吸附等)及含量具有差异性<sup>[17]</sup>, 从而宏观上  
 出现N、P、K这3种元素各自的流失、向下层  
 土壤淋溶、及植物吸收等的量不同<sup>[17]</sup>, 因而  
 表层土壤TN、TP、TK的含量的变异性各自表  
 现出不同的特征。随着幅度的拓展, 这种农田  
 管理措施的差异性逐渐增大, 但这些差异性的  
 增加趋势又会变缓, 因此出现文中所述土壤

表2 土壤全氮、全磷、全钾含量在不同幅度研究单元的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of TN, TP and TK in the study area relative to scale

指标 Index	幅度 Scale	样本数 (N)	最小值 Min (g kg <sup>-1</sup> )	最大值 Max (g kg <sup>-1</sup> )	均值 Mean (g kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	方差 Var.	偏度 Kurtosis	峰度 Skewness	变异系数 CV (%)
全氮 TN	全体Total	337	0.50	3.85	2.32	0.55	0.30	-0.547	0.252	23.71
	A1	60	1.51	3.33	2.73	0.30	0.09	-1.083	3.677	10.96
	A2	60	1.10	3.51	2.60	0.38	0.14	-1.208	3.866	14.53
	A3	60	1.62	3.85	2.37	0.44	0.19	0.601	0.880	18.44
	A4	60	0.91	3.21	2.10	0.46	0.21	-0.491	0.433	22.01
	A5	60	0.50	2.74	1.88	0.50	0.25	-0.479	0.283	26.39
	A6	60	0.50	3.43	1.98	0.54	0.29	-0.040	0.248	27.13
	A7	60	0.50	3.43	1.99	0.57	0.33	-0.310	0.334	28.89
	A8	60	0.78	3.57	2.24	0.59	0.34	-0.433	0.458	26.21
全磷 TP	全体Total	337	0.27	1.53	0.63	0.18	0.03	1.522	3.558	28.77
	A1	60	0.49	0.79	0.60	0.08	0.01	0.549	-0.771	13.41
	A2	60	0.31	0.88	0.60	0.09	0.01	0.110	1.097	15.90
	A3	60	0.42	0.86	0.59	0.11	0.01	0.874	0.131	18.15
	A4	60	0.35	1.53	0.60	0.20	0.04	2.213	6.055	33.38
	A5	60	0.27	1.22	0.60	0.20	0.04	1.239	2.088	30.26
	A6	60	0.27	1.22	0.68	0.21	0.04	0.695	0.120	30.87
	A7	60	0.27	1.22	0.64	0.21	0.04	0.804	0.526	32.57
	A8	60	0.28	1.41	0.75	0.25	0.06	0.550	-0.093	33.66
全钾 TK	全体Total	337	4.99	31.61	14.23	4.50	20.25	1.008	0.902	31.62
	A1	60	10.25	15.37	11.88	1.08	1.17	0.535	0.141	9.10
	A2	60	9.48	22.08	13.45	3.00	8.98	1.070	1.047	22.27
	A3	60	6.67	24.90	14.20	5.26	27.70	0.599	-1.135	37.05
	A4	60	8.05	28.72	15.43	4.71	22.20	0.418	-0.366	30.55
	A5	60	8.05	28.72	15.23	4.65	21.62	0.749	0.259	30.54
	A6	60	5.53	31.61	16.18	5.61	31.52	0.616	0.292	34.71
	A7	60	4.99	31.61	15.84	6.20	38.48	0.610	-0.141	39.15
	A8	60	4.99	27.09	15.26	4.67	21.83	0.128	-0.421	30.62

TN、TP、TK含量变异性的各自变化情况。而更大区域范围，不同类型的土壤属性变异性还应归结于环境要素差异，即土壤类型、土地利用方式、气候、成土母质等要素的差异<sup>[14]</sup>。在不同幅度上土壤属性产生差异的主导因素不同，土壤调查采样布点应采取相应策略。

### 2.3 研究单元土壤全量元素变异性与采样幅度的函数拟合特征

研究单元土壤全量元素变异性指标与采样幅

度指标间9种函数的拟合分析结果显示，土壤全量元素的变异性指标CV与幅度指标 $D_1$ 、 $D_0$ 、 $S$ 在所有9种拟合函数中的显著性比例最高，可达50%以上。因此，本文选择CV、 $D_1$ 、 $D_0$ 、 $S$ 作为土壤全量变异性幅度效应特征的代表指标（表3），并以此进一步判断土壤全量变异性幅度效应的最优拟合函数与幅度表征指标。

采用幅度区总面积（ $S$ ）作为幅度表征的指标，并不能完全反映研究单元的实际面积；采用幅

表3 土壤全量元素变异系数与幅度指标函数拟合特征

全量元素 Total elements	Table 3 Fitting of functions between spatial variability of soil total elements and scale index															
	函数 Function				最邻近1点平均距离 Average distance to the closest one point ( $D_1$ )				所有点最大距离 Maximum distance of all the points ( $D_0$ )				面积 Area (S)			
	a	b	c	d	$R^2$	a	b	c	d	$R^2$	a	b	c	d	$R^2$	
全氮 TN	(1)	7.176	17.798		0.500	0.302	18.017			0.486	0.007	20.167			0.220	
	(2)	3.632	27.243		0.932***	3.279	116.976			0.933***	1.640	17.628			0.927***	
	(3)	-0.190	24.924		0.707**	-2.407	24.530			0.656*	-0.205	23.580			0.496	
	(4)	28.436	-11.940	13.989	0.898**	1.296	-0.025	14.296			0.886**	0.044	0.000	18.101		0.556
	(5)	49.441	-45.615	12.407	0.962**	2.092	-0.081	0.001	12.850			0.148	0.000	0.000	16.086	0.773
	(6)	1.438	16.966		0.456	1.015	17.169			0.440	1.000	19.131			0.200	
	(7)	0.193	27.728		0.932***	0.174	16.078			0.938***	0.087	16.635			0.937***	
	(8)	-0.011	3.211		0.808**	-0.137	3.190			0.761**	-0.012	3.138			0.605*	
	(9)	0.695	0.058		0.456	0.985	0.057			0.396	1.000	0.052			0.200	
全磷 TP	(1)	9.309	20.807		0.486	0.391	21.093			0.473	0.010	23.683			0.255	
	(2)	4.577	32.859		0.856***	4.152	19.889			0.866***	2.073	20.727			0.856***	
	(3)	-0.231	29.799		0.604*	-2.097	29.298			0.553*	-0.241	28.088			0.394	
	(4)	31.349	-12.378	16.858	0.734*	1.451	-0.026	17.128			0.735*	0.045	0.000	21.747		0.426
	(5)	74.070	-80.867	25.234	0.887*	3.041	-0.138	0.002	14.239			0.174	0.000	0.000	19.244	0.620
	(6)	1.494	19.612		0.463	1.017	19.867			0.447	1.000	22.253			0.231	
	(7)	0.205	33.330		0.876***	0.186	18.666			0.886***	0.093	19.371			0.879***	
	(8)	-0.011	3.377		0.649*	-0.136	3.354			0.621*	-0.011	3.299			0.459	
	(9)	0.669	0.051		0.463	0.983	0.050			0.447	1.000	0.045			0.231	
全钾 TK	(1)	6.325	25.703		0.180	0.271	25.827			0.182	0.005	28.064			0.052	
	(2)	4.278	35.636		0.600*	3.938	23.430			0.624*	1.998	24.141			0.638*	
	(3)	-0.303	34.201		0.835**	-3.967	33.715			0.826**	-0.372	32.438			0.755**	
	(4)	33.722	-15.387	20.795	0.487	1.541	-0.031	21.078			0.484	0.054	0.000	25.380		0.315
	(5)	52.595	-45.643	11.148	0.511	2.084	-0.070	0.001	20.091			0.132	0.000	0.000	23.861	0.372
	(6)	1.360	22.816		0.176	1.013	23.016			0.172	1.000	25.488			0.058	
	(7)	0.212	37.212		0.611*	0.195	20.312			0.635*	0.099	21.041			0.649*	
	(8)	-0.016	3.558		0.938***	-0.208	3.534			0.940***	-0.020	3.471			0.900***	
	(9)	0.735	0.044		0.176	0.987	0.043			0.172	1.000	0.039			0.058	

注：\*\*\*. 在  $p < 0.001$  水平差异显著；\*\*. 在  $p < 0.01$  水平差异显著；\*. 在  $p < 0.05$  水平差异显著；Note: \*\*\* signifies significant difference at 0.001 level; \*\* significant difference at 0.01 level; \* significant difference at 0.05 level (1)  $y = a + b \ln(x) + b$ ; (2)  $y = a \times x + b$ ; (3)  $y = a \times (1/x) + b$ ; (4)  $y = a \times x + b \times x^2 + c \times x^3 + d$ ; (5)  $y = a \times x + b \times x^2 + c \times x^3 + d$ ; (6)  $y = e^{(a \times x + b)}$ ; (7)  $y = b \times x^a$ ; (8)  $y = e^{(a/x + b)}$ ; (9)  $y = e^{- (a \times x + b)}$

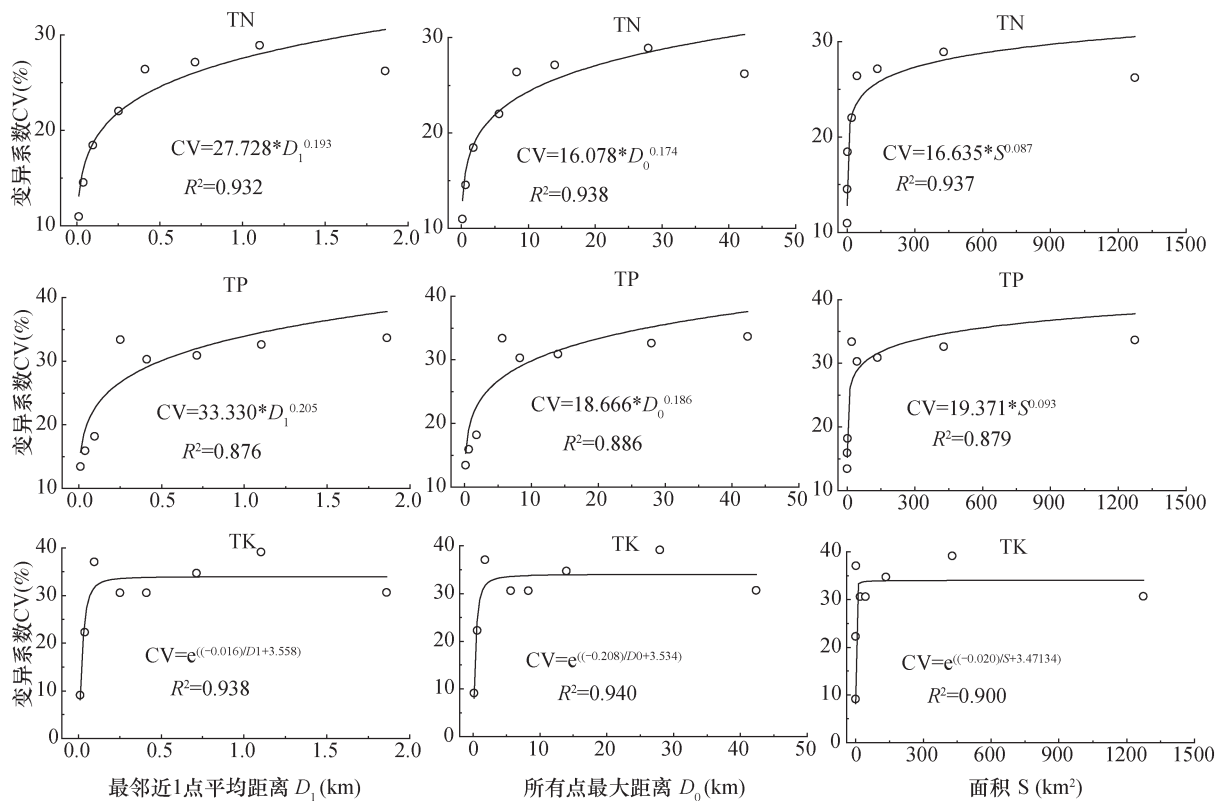
度区最邻近1点平均距离 ( $D_1$ ) 作为幅度表征的指标, 又未能充分反映采样点与复合类型单元空间形状等的相互关系; 采用幅度区所有样点最大距离 ( $D_0$ ) 作为幅度表征指标, 也不能反映各采样点空间分布的均匀性, 这三种幅度指标在参与表征土壤全量元素空间变异的幅度效应方面均存在一定程度的缺陷。因此, 本文选取了3种幅度指标拟合同时显著, 且显著性水平最高的函数; 在显著性水平一致的情况下, 选择 $R^2$ 数值最大的函数, 作为分析揭示研究单元土壤TN、TP、TK含量变异性幅度效应特征的最佳拟合函数。其中, 土壤TN、TP变异性幅度效应的最佳拟合分析函数为函数(7), TK为函数(8)(表3)。这与王丹丹等<sup>[14]</sup>在大区域幅度上揭示土壤属性变异性幅度效应采用的函数(2)具有明显不同, 本文同时考虑了三种幅度指标反映土壤属性变异幅度效应的显著性, 而后者仅考虑了区域面积(S)指标的显著性, 缺乏均匀性等样点空间分布特征指标的显著性分析。同时, 综

合考虑土壤TN、TP、TK含量的变异系数(CV)与3种幅度指标( $D_1$ 、 $D_0$ 、S)的拟合函数显著性效果, 因而选择 $D_1$ 、 $D_0$ 一起作为幅度表征的指标。

2.4 研究单元土壤全量元素变异性的幅度效应特征

土壤全量元素变异系数CV随幅度指标( $D_1$ 、 $D_0$ )的变化曲线表明, 土壤TN、TP、TK含量的变异系数在整体上随幅度的拓展而逐渐增加, 而增加的趋势则逐渐变缓, 不同土壤全量元素变异系数随采样幅度快速与缓慢变化的幅度分界点位置存在明显差异(图2), 如TN、TP、TK分别在大于A4、A5、A3幅度之后, 异质性增加的趋势更为缓慢。

不同土壤全量元素所体现的变异性幅度效应特征具有明显差异。在变异性系数随幅度快速变化的阶段, TK变异系数变化速率最快; 而在缓慢变化阶段, TK变异系数变化速率最慢, 甚至基本维持在34%左右的特定水平上, 但TN、TP变异系数在本研究幅度范围并未能达到这种水平。微积分数学分析结果表明, 整个研究区域上TN、TP、



注:  $D_1$ 为所在幅度上所有采样点的最邻近1点平均距离, km;  $D_0$ 为所在幅度上所有采样点的最大距离, km; S为采样点所在幅度的总面积, km<sup>2</sup> Note:  $D_1$  stands for the average distance from one point to all the nearest points, km;  $D_0$  for maximum distance between all the sampling points, km; and S for the total area the sampling points cover relative to scale, km<sup>2</sup>

图2 东乡县土壤全量元素的变异系数随幅度拓展的变化

Fig. 2 Variation of CV of soil total elements with scale in Dongxiang County, Jiangxi Province

TK含量的变异系数随着幅度的拓展逐渐增加，而增加的趋势则逐渐变缓，这与图2所示的结果相一致；土壤全量元素变异系数随采样幅度快速与缓慢变化的幅度分界点也有差异，以 $D_0$ 为例，TN幅度分界点为 $D_0 = 6.756$  km，TP为 $D_0 = 9.061$  km，TK为 $D_0 = 3.408$  km（此时，曲线的切线与横轴夹角约为 $30^\circ$ ），这个幅度的分界点与图2所示的结果相一致。

土壤TN、TP、TK含量的变异性体现出不同的幅度效应，主要是由于农田管理措施不同<sup>[15-17, 20-21]</sup>，导致TN、TP、TK在土壤中的各种形态及其行为的不同<sup>[17]</sup>而产生幅度效应的差异性。这种不同土壤全量元素变异性体现出的幅度效应特征的差异，表明基于复合类型单元的土壤属性调查采样布点与分析策略需要统筹考虑，只考虑单属性指标，在变异性系数随幅度快速变化的阶段应加强采样点的布设，而在缓慢变化阶段可以适当减弱采样点的布设；若同时考虑多属性指标，由于每个土壤属性指标的幅度效应规律不同，先考虑每个土壤属性指标的采样点布设情况，之后统筹布设完整的采样点，并根据幅度效应规律做出土壤样品的分析。

### 3 结 论

基于单一的土地—土壤复合类型单元的土壤全量元素的变异性均具有明显的幅度效应特征，土壤全氮、全磷、全钾含量的变异系数均随采样幅度拓展而逐渐增加，但增加趋势则逐渐变缓。不同土壤全量元素变异系数随采样幅度快速与缓慢变化的幅度分界点位置也有差异，基于复合类型单元的土壤多属性调查采样布点与分析策略需要统筹考虑。本文所揭示的单一的土地利用—土壤复合类型单元下土壤全量元素的空间变异性随幅度变化的特征，对于县域土壤调查的样点合理布设具有重要的启示和参考价值。本文仅探讨了研究区水田—中潜灰鳊泥田这一种复合类型单元的土壤全量元素的变异系数在县域范围内随幅度拓展的变化特征，其他复合类型单元是否也具有同样变化特征还需验证；由于充分考虑研究单元的空间分布形态，幅度选取的连续性规则不十分清晰，在一定程度影响了幅度效应特征分析。如何利用多种幅度表征指标（ $D_1$ 、 $D_0$ 、 $S$ ）共同表达和揭示土壤全量元素变异的幅度效应，克服单一指标幅度效应表征缺陷问题，还需进一步研究。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Davis A A, Stolt M H, Compton J E, et al. Spatial distribution of soil carbon in southern New England hardwood forest landscapes. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 ( 3 ) : 895—903
- [ 2 ] Guo Y Y, Amundson R, Gong P, et al. Quantity and spatial variability of soil carbon in the conterminous united states. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 ( 2 ) : 590—600
- [ 3 ] Lugato E, Simonetti G, Morari F, et al. Distribution of organic and humic carbon in wet-sieved aggregates of different soils under long-term fertilization experiment. *Geoderma*, 2010, 157 ( 3 ) : 80—85
- [ 4 ] Zhang S L, Ted H, Zhang X Y, et al. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: A case study of soil available phosphorus and total phosphorus. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 ( 11 ) : 1775—1789
- [ 5 ] 全国土壤普查办公室. 中国土种志（第一卷）. 北京：农业出版社，1993：前言1—5  
State Soil Survey Office of China. *China Soil Series (The First Volume) (In Chinese)*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1993: objective 1—5
- [ 6 ] 中国自然资源丛书编撰委员会. 中国自然资源丛书（土地卷）. 北京：中国环境科学出版社，1996：49—61  
China Books Compiling Committee of Natural Resources. *China natural resources series (The Volume of Land) (In Chinese)*. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1996: 49—61
- [ 7 ] 李海滨，王政权，王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*，1998，9（6）：651—657  
Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. *Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification (In Chinese)*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9 ( 6 ) : 651—657
- [ 8 ] 郭旭东，傅伯杰，马克明，等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. *应用生态学报*，2000，11（4）：557—563  
Guo X D, Fu B J, Ma K M, et al. *Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS A case study in Zunghua City of Hebei Province (In Chinese)*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 ( 4 ) : 557—563
- [ 9 ] Nanni M R, Povh F P, Dematte J A, et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. *Scientia Agricola*, 2011, 68 ( 3 ) : 386—392
- [ 10 ] 李彦，雷晓云，申祥民，等. 膜下滴灌土壤水分监测



- 合理采样数目的初步研究. 灌溉排水学报, 2011, 30 (2): 46—48
- Li Y, Lei X Y, Shen X M, et al. Rational sampling numbers of soil moisture monitoring for cotton with film mulched drip irrigation system (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30 (2): 46—48
- [11] Zhang Z Q, Yu D S, Shi X Z, et al. Effect of sampling classification patterns on SOC variability in the red soil region, China. Soil & Tillage Research, 2010, 110 (1): 2—7
- [12] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. 地理研究, 2004, 23 (1): 63—70
- Liu F C, Shi X Z, Yu D S, et al. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin (In Chinese). Geographical Research, 2004, 23 (1): 63—70
- [13] 王美艳, 史学正, 于东升, 等. 黄淮海农业区旱地土壤有机碳变异性的空间尺度效应. 土壤, 2013, 45 (4): 648—654
- Wang M Y, Shi X Z, Yu D S, et al. Scale effects of soil organic carbon variability of uplands in Huang-Huai-Hai agriculture region of China (In Chinese). Soils, 2013, 45 (4): 648—654
- [14] 王丹丹, 岳书平, 林芬芳, 等. 东北地区旱地土壤全氮空间变异性对幅度拓展的响应. 土壤学报, 2012, 49 (4): 625—635
- Wang D D, Yue S P, Lin F F, et al. Response of spatial variability of soil total nitrogen to expansion of uplands in scale in northeast China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (4): 625—635
- [15] Zhang Z Q, Yu D S, Shi X Z, et al. Priority selection rating of sampling density and interpolation method for detecting the spatial variability of soil organic carbon in China. Environment Earth Science, 2015, 73 (5): 2287—2297
- [16] 胡敏, 任涛, 廖世鹏, 等. 不同含钾物料对土壤钾素含量动态变化影响. 土壤, 2016, 48 (1): 48—52
- Hu M, Ren T, Liao S P, et al. Effects of K-bearing materials on dynamic changes of soil K contents (In Chinese). Soils, 2016, 48 (1): 48—52
- [17] Davies J, Tipping E, Rowe E, et al. Long-term P weathering and recent N deposition control contemporary plant-soil C, N, and P. Global Biogeochemical Cycles, 2016, 30 (2): 231—249
- [18] 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室. 江西土壤. 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 10—14
- The Land-use Authority in Jiangxi Province, Jiangxi Province, Soil Survey Office. Soils in Jiangxi Province (In Chinese). Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1991: 10—14
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12—228
- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12—228
- [20] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变异性特征. 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 (In Chinese). Transactions of the CSAE, 1999, 15 (3): 33—38
- [21] 杨奇勇, 杨劲松. 不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征. 水土保持学报, 2010, 24 (3): 100—104
- Yang Q Y, Yang J S. Spatial variability of soil organic matter and total nitrogen at different scales (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (3): 100—104
- [22] 李典友, 潘根兴, 陈良松, 等. 安徽六安市表层土壤有机碳的空间分布及尺度变异分析. 生态与农村环境学报, 2008, 24 (4): 37—41
- Li D Y, Pan G X, Chen L S, et al. Spatial distribution and variability of topsoil organic carbon content at different scales in Liuan City, Anhui Province, China (In Chinese). Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24 (4): 37—41
- [23] 夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化. 土壤学报, 2015, 52 (3): 697—705
- Xia X, Shi K, Huang Q R, et al. The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 697—705

## Scale Effect on Spatial Variability of Soil Total Elements in Single Complex Type Unit of Land Use-Soil Type

WANG Xiuhong<sup>1, 2</sup> YU Dongsheng<sup>1, 2†</sup> PAN Yue<sup>1, 2</sup> XU Zhichao<sup>1, 2</sup> WANG Xiyang<sup>1, 2</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** 【Objective】 Effects of sampling scale on spatial variability of soil properties are of great significance to soil digital mappings, soil survey, and agricultural production. So, in this study, a tract of the grey eel-mud field (Soil Species), a special land use—soil type complex unit (Lu-SoTy), in Dongxiang County, Jiangxi Province, a hilly red soil region in South China was selected as an object. Using the multi-level nesting sampling protocol to ensure that the total number of soil sampling points remains unchanged whatever sampling scale is used, the study is to exposit characteristics of spatial variability of soil total element concentrations with soil sampling scale and provide important implications and scientific references for rationalizing layout of sampling points based on Lu-SoTy. 【Method】 In the light of spatial distribution of soil sampling points, eight soil sampling scales (from the smallest to the largest is coded in turn as A1 ~ A8) were designed with smaller scales located inside larger ones. By taking into full account vastitude and uniformity of spatial distribution of the sampling points, each soil sampling scale had 60 points distributed evenly. Using the multi-level nesting sampling protocol, 337 sampling points were laid out across the County. In December 2014 after the crop of late rice was harvested, soil samples were collected from the 0 ~ 20 cm topsoil layer at all the sampling points for analysis of soil total element concentrations. Scale characterization indices were calculated using ArcGIS 10.2.2, variability characterization indices using SPSS 20.0, and regression fitting analysis of scale characterization indices and variability characterization indices, using SPSS 20.0. Based on the level of significance and  $R^2$  of the regression, the best characterization indices and the best fitting functions were screened out. 【Result】 Results show that the scale effects on spatial variation of soil total elements are obvious; and coefficients of variation (CV) of TN, TP and TK go up with expansion of the sampling scale, but the increasing rates display a decreasing trend; the scale effects on the spatial variability differed with soil total element: the best fitting function for characterizing the scale effects on CV (%) is  $CV = b \times D^a$  for TN and TP ( $R^2 > 0.87$ ,  $p < 0.001$ ), and  $CV = e^{(a/D + b)}$  ( $R^2 > 0.93$ ,  $p < 0.001$ ) for TK ( $D$  is a scale index of sampling points; namely: average distance to the nearest one point or maximum distance (km) of all the sampling points); the shifting points of scale effects between rapid and slow changes of CV varied with soil total element, for example, the shifting point of TN, TP and TK is  $D_0 = 6.756$  km,  $D_0 = 9.061$  km and  $D_0 = 3.408$  km, respectively (at this point, the angle between the tangent to the curve and the horizontal axis is about  $30^\circ$ ). All the findings demonstrate that independent sampling protocols and analysis skills need to be considered in studying spatial distribution of different soil total elements. 【Conclusion】 The scale effects characteristic of spatial variability of soil total elements in soil of a special complex Land Use-Soil Type unit, could provide important implications and scientific references for laying sampling points at county scale soil surveys in hilly red soil regions.

**Key words** Soil total elements; Spatial variability; Scale effect; Complex type unit of Land Use-Soil Type; Hilly red soil region

(责任编辑：檀满枝)

<http://pedologica.issas.ac.cn>