

基于地图直接对比的土壤空间表达尺度效应研究*

——以封丘土壤属性制图为例

孙志英¹ 赵彦锋^{2†} 张化楠² 程道全³

(1 河南省国土资源调查规划院, 郑州 450016)

(2 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001)

(3 河南省土壤肥料站, 郑州 450002)

摘要 将封丘县 3 608 个土壤样点分为 3 463 和 145 个点, 分别构成制图数据总集和验证数据总集, 再从制图数据总集中通过 4%~96% 的多尺度随机抽样, 构成 17 个制图子集。分别按 Kriging、IDW 和以点代面法对土壤有机质、有效磷和速效钾进行预测制图, 基于地图直接对比计算制图子集和制图数据总集制图结果的相关系数以评价土壤属性图变化的尺度效应, 并与验证数据集评价的多尺度制图结果进行了对比。最后, 采用多子集制图结果的变异系数指示多尺度地图表达的不确定性, 并将其与基于 Kriging 估值方差及随机模拟的不确定性表达进行了对比。研究表明, 基于地图直接对比可发现, 制图效果与样本数量具有显著的分形关系, 且分形维数受制图方法和土壤属性空间可变性的双重影响; 同样条件下以 Kriging 方法最小, 而以点代面法最大; 以土壤速效钾最小, 而土壤有效磷最大。验证数据集实测值和估计值的相关系数及均方根误差没有表现预期的分形特征。Kriging 估值方差及随机模拟表达的单一尺度制图不确定性明显受采样点分布与 Kriging 估值大小影响, 而基于地图直接对比的多尺度制图的不确定性更客观地反映土壤自然变异, 其中土壤有机质、土壤速效钾有较强规律可循, 而土壤有效磷则没有规律。

关键词 地图直接对比; 土壤空间表达; 尺度效应

中图分类号 S159.9; O159 **文献标识码** A

关于土壤空间表达尺度效应的研究较多的集中在两个方面。一类研究探讨应用土壤数据过程中尺度效应所导致的后果, 如土壤有机碳储量的估值差异、流域径流氮、磷输出的差异等^[1-4]。另一类研究重在揭示土壤空间变异本身随尺度变化的特征, 又可以分为随采样幅度变化特征和随采样密度变化特征^[5]。在采样密度变化条件下, 土壤空间变异特征的刻画主要涉及到变异函数模型变化、土壤属性值统计特征变化、估值置信度变化、制图精度比较等^[6-16]。如 Garten Jr 等^[6]研究了美国 Tennessee 州一个落叶混交林地 1、5、10、50、250、500m 采样间距土壤属性统计特征变化, 发现矿质结合态的土壤有机碳、土壤铵态氮、黏粒含量在 10m 以下采样间距内的变异和 50—500m 采样间距内的可变性相当, 而土壤 C/N 等的统计变异性则明显随采样间

距增加而增加。Debaene 等^[7]在田间尺度以 35m 网格采集 398 个有效土壤样品, 以其中 199 个为验证集, 以另外 199 个为制图集, 以预测相关系数和均方根误差评判了以 20 为等间距递增情况下 20~199 个样品对土壤属性的预测效果, 发现 79 个样品即可达到较好的预测效果。张发升等^[8]研究表明当采样密度降低时, 土壤有机质变异系数变化无明显规律, 但变异相关范围显著增大, 结构性变异比例呈下降趋势。王志刚等^[9]比较了 888、400、250、150、50 个样点条件下如皋市土壤有机质和有效磷空间变异函数图, 发现 250 个样点比较合适。徐英等^[10]在河套平原研究了采样间距 25m、50m、75m、100m、200m 条件下土壤水分和盐分变异函数曲线的结构性差异。潘瑜春等^[11]在北京大兴区研究了采样数变化对土壤全氮均值、峰度等统计特征的影响, 并

* 国家自然科学基金项目(40801080, 40971128)资助

† 通讯作者, E-mail: yfzhao@zsu.edu.cn

作者简介: 孙志英(1979—), 女, 河南安阳人, 博士, 工程师, 主要从事土壤地理和土地管理研究。E-mail: zhyysun@163.com

收稿日期: 2013-10-12; 收到修改稿日期: 2014-02-16

计算区域土壤全氮均值统计推断的置信度。

分析可知,当前研究报道中直接针对图形本身如何变化的案例很少。笔者认为:首先,空间表达的尺度效应更直接的是研究多尺度数据制图结果的变化而不是制图数据本身的统计特征变化,尽管后者对前者有影响,但二者不能互相代替。其次,有关制图结果的评价,当前普遍采用估值精度判断,常用的是将独立验证数据集的实际值和预测值的相关系数、均方根误差、平均绝对误差、离散方差等作为制图效果评判标准^[7,13-15]。该法以离散的若干验证点对的平均符合程度评判地图质量,必然受到验证集样点布局代表性的影响。尽管具有相当数量且均匀分布的验证样点数有利于提高评判结果的可信度,但由于事先对研究对象空间变异并无所知,一个样点所能代表的面积大小就可能处处不同:在变异小的地方代表性大而在变异大的地方代表性小,可能导致地理空间上的均匀布点实际代表性不高。此外,熟悉制图者均知在真实采样点位置及其附近制图精度较高,反之精度较低,那么验证点集与制图点集的几何关系也会影响评价。

GIS 技术突破了一般数学手段仅能对数据集合之间相关性分析的限制,可对图形之间的相关性直接进行比较,避免了“抽样检验”这一间接过程导致的误差,可以提供新的研究视角和认知。鉴于此,本文立足于直接研究“空间格局表达结果”,并以地图直接比较的方式考察该结果随采样数量变化的尺度变化。在收集研究区大量采样数据条件下,设计了多尺度抽样方案,采用不同的制图方法、针对

不同变异特征的土壤属性进行研究,以分形方法分析不同样点数条件下土壤属性图与最大样点数条件下土壤属性图相似性程度的变化来探讨尺度效应规律。土壤物理参数的分形维数计算、以多比例尺地图表达的土壤多样性分形规律在国内外已经有一定报道^[16-17],但基于直接比较计算地图之间相似性的分形规律研究还鲜见报道,本文将予以探讨。此外,本文还分析了多尺度估值的不确定性与基于单一尺度 Kriging 误差方差和随机模拟估值的不确定性的机理差别;并在地图直接比较的基础上,分析了土壤属性的多尺度估值不确定性及影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

封丘南临黄河(图 1),属于黄河泛滥平原,高程极差小,地形形成与近代几次重要的黄河决口有关,西部地形主要受封丘西南角大功决口和原阳县的祥符朱决口影响,形成由西南向东北倾斜的扇形平原;东部地形主要受贾台决口影响,地形由东南向西北倾斜(图 2)。在历次大小不同的决口扇之间,形成交接洼地,为地形较低地区。地形和受地形影响的河流冲积过程深刻影响着封丘的土壤发生,加上风沙、盐碱等因素,该区土壤类型复杂,参考土属划分^[18],可归纳为 8 种实际分布面积较大的土壤制图单元,即①风砂土、②褐土化两合土、③灌淤土、④两合土、⑤砂壤土、⑥淤土、⑦轻盐砂壤土、⑧轻盐两合土(图 3)。

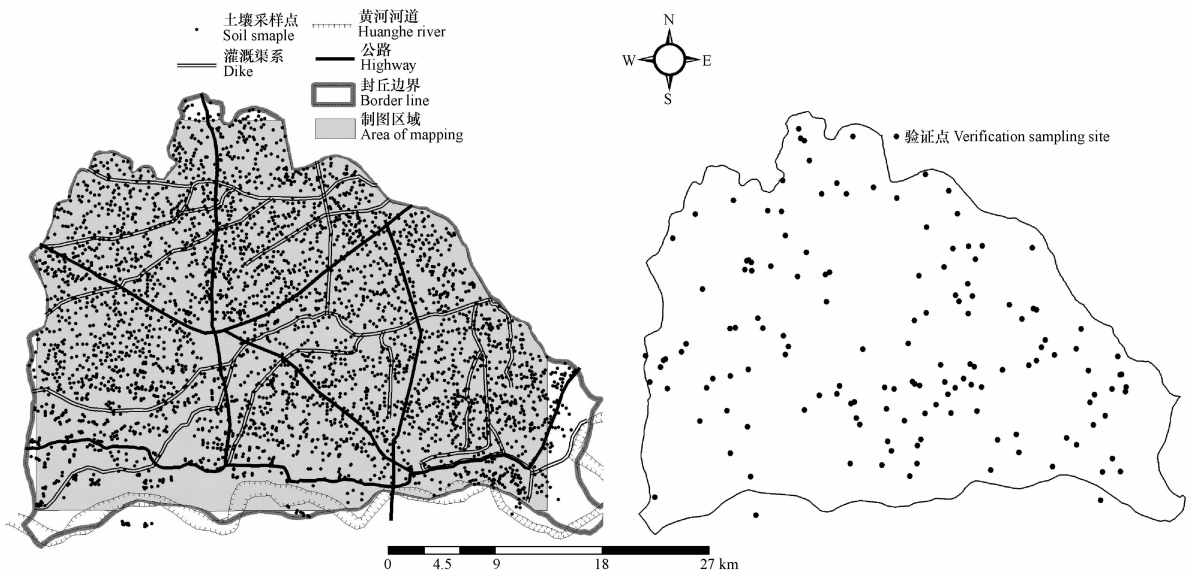


图 1 封丘县土壤样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in Fengqiu County

1.3 研究方法

Kriging 法和 IDW 法是常用预测制图方法,在此不再赘述。以点代面法 (Polygon value represented by point value, PRP) 是农业部耕地地力评价系统采用的土壤属性制图方法,该法采用以下方式对图斑赋值:(1)用 1:5 万土壤图和 1:1 万土地利用图、行政区划图叠加生成赋值图斑,仅对其中的农用地进行赋值,非农用地用空白表示。当图斑内有一个采样点时,此点的养分值即为图斑属性值;若图斑内有多个点时,其值为多点平均值;(2)对不含采样点的图斑,取相邻同种土属或土种的已赋值图斑的平均值;对相邻图斑未找到相同土属或土种已赋值图斑的,取同一村或同一乡镇耕地图斑的平均值。(3)经多次迭代运算,基本所有图斑均可得到赋值,最后仅对个别孤立且无采样点图斑取所有图斑均值。

研究方案:具体研究方法分 5 步:(1)从 3 608 个样点中随机抽取 145 个点作为验证数据集(图 1);其余 3 463 个点作为实验数据总集进行多尺度抽样:按照 4%、6%、8%、16%、18%、20%、22%、24%、32%、40%、48%、56%、64%、72%、80%、88%、96% 的比例进行随机抽样,共得到 17 个数据子集,样本数变幅为 138~3324。(2)计算土壤有机质、有效磷和速效钾的一般统计特征。(3)对各数据集分别进行变异函数建模,分别利用 kriging 法、IDW 法和以点代面法制作土壤属性图,均以 40m 大小的栅格显示,其中非农用地图斑均以空白显示,并按统一边界裁剪(图 1 所示制图区域)。(4)在 ArcGIS 中用 band collection statistic 工具计算 17 个样本子集制图结果与实验总集 3 463 个样本制图结果的相关系数,并分析相关系数随样点数变化的分形特征,以此表征土壤空间表达的尺度效应。(5)基于抽样比例 8%、16%、24%、32%、40%、48%、56%、64%、72%、80%、88%、96% 等间距变化的 12 个子集的制图结果,用 cell statistic 工具计算同一栅格点 12 次取值的变异系数,并生成变异系数图,以此表征多尺度制图的空间不确定性。为确保结论可靠,(1)~(5)研究过程重复 3 遍。

2 结果

2.1 土壤属性统计特征的尺度效应

表 1 列出第 1 遍研究中各数据集的统计特征,其中有机质变异系数较小,中值和均值较接近,概

率分布函数的峰值相对较大,偏度一般为 < 1 的正值,经检验呈对数正态分布;速效钾中值和均值也较接近,峰值、偏度均相对最低,呈正态分布;而有效磷的变异系数明显高于速效钾和有机质,中值、均值有明显差别,偏度和峰值均较大,呈非正态分布。变异函数分析表明,有效磷没有明显的空间结构性,而有机质和速效钾在全量样本分析时均表现为弱空间相关,结构性变异比例分别为 22.5% 和 25.4% (表 2)。不同数量尺度下抽样子集的统计参数对比表明,自第 138 至第 3 463 个数据,均值、中值和变异系数的变化不大,而峰度、偏度则变化明显。这说明,对于区域期望值估算,要求的数据量并不大;但对于数据分布型的估计,则不同抽样可能产生较大偏差。落实在空间上,意味着不同数量的抽样子集制图结果可能产生明显差异,即土壤制图的尺度效应可能较明显。

在 Kriging 插值前,对各数据集的有机质和速效钾分别进行最优变异函数模型筛选(表 2)。以第一遍研究为例(表 2),结果表明,在样点数较少时,所拟合的变异函数模型参数均有变化,在大约 1 000 个样点时,有机质和速效钾的变异函数模型趋于稳定,意味着变异函数模型变化也将影响制图尺度效应。

2.2 基于地图直接对比的制图精度尺度效应

根据统计特征,有效磷未满足地统计学插值的数学条件,仅对土壤有机质和速效钾采用 Kriging 插值制图。IDW 法和以点代面法无数学条件限制,3 种土壤属性制图均可采用。图 4~图 5 分别列举在 277(8%)、554(16%)、831(24%) 个样点数条件下土壤有机质的 Kriging 制图结果和土壤有效磷的 IDW 制图结果,可以看出属性的空间渐进性变化特征。

从 ArcGIS 中求取 17 个随机抽样集与全量样本集制图结果之间的相关系数和每个样本集的样点数,各自取对数,做双对数图,求取土壤属性空间格局表达精度的分形维数。3 种方法结果见图 6~图 8,它们的双对数图均明显呈直线形式,直线回归系数接近 1。对 Kriging 法而言,3 遍研究得到有机质的分形维数为 0.129、0.165、0.179;速效钾的分形维数为 0.100、0.110 和 0.116。分形维数越低空间格局刻画详细程度对采样密度变化的响应越迟缓,该结果说明采用 Kriging 方法速效钾制图的空间格局变异受采样密度影响小、有机质受其影响大。对 IDW 而言,3 遍研究结果有机质的分形维数为 0.232、

表1 土壤属性的统计特征
Table 1 Statistic feature of soil properties

样点数 Number	有机质 Organic matter					有效磷 Available P					速效钾 Available K				
	均值 Average (g kg ⁻¹)	中值 Median (g kg ⁻¹)	峰度 Kurt	偏度 Skew	变异系数 CV (%)	均值 Average (mg kg ⁻¹)	中值 Median (mg kg ⁻¹)	峰度 Kurt	偏度 Skew	变异系数 CV (%)	均值 Average (mg kg ⁻¹)	中值 Median (mg kg ⁻¹)	峰度 Kurt	偏度 Skew	变异系数 CV (%)
138	14.3	14.0	2.56	0.65	17.0	15.5	14.4	3.89	1.52	57.2	104	107	0.21	-0.64	22.6
207	14.3	14.1	3.35	0.50	18.6	15.5	13.1	2.80	1.48	60.5	102	105	0.27	-0.54	25.4
277	14.2	14.0	5.72	1.37	19.2	15.9	13.1	2.17	1.40	60.3	100	102	-0.48	-0.24	24.4
554	14.3	14.1	5.41	1.09	19.8	15.0	12.8	5.11	1.85	59.3	101	104	0.22	-0.54	24.3
623	14.1	14.1	6.61	0.88	19.3	15.2	12.7	4.19	1.71	58.3	100	102	0.32	-0.38	26.3
692	14.1	14.0	6.73	1.50	18.9	15.1	12.9	6.16	2.05	60.5	101	103	-0.05	-0.30	24.2
761	14.3	14.1	5.80	1.14	20.2	15.8	13.6	4.97	1.83	58.5	102	103	0.39	-0.27	25.0
831	14.3	14.1	3.42	0.61	18.2	15.8	13.3	5.42	1.96	60.1	102	105	0.23	-0.39	25.4
1 108	14.3	14.1	4.59	0.81	19.4	15.3	13.0	7.52	2.17	61.1	102	104	1.22	-0.21	25.3
1 385	14.2	14.1	4.54	0.69	19.0	15.4	13.1	5.34	1.86	60.3	102	104	0.86	-0.15	25.6
1 662	14.3	14.1	4.53	0.82	18.5	15.5	13.2	6.44	1.94	58.8	102	104	0.85	-0.17	25.1
1 939	14.3	14.1	4.28	0.70	19.5	15.5	13.3	4.55	1.70	59.7	102	104	0.18	-0.37	25.1
2 216	14.3	14.1	4.45	0.92	18.8	15.3	13.1	5.88	1.85	59.0	102	104	0.23	-0.31	24.4
2 493	14.3	14.1	4.49	0.76	18.7	15.4	13.1	4.87	1.73	58.9	102	104	0.67	-0.20	24.7
2 770	14.3	14.1	4.64	0.86	19.0	15.5	13.2	6.70	2.00	60.0	102	104	0.60	-0.23	24.8
3 047	14.3	14.1	4.43	0.78	19.1	15.4	13.1	6.20	1.92	60.1	102	104	0.61	-0.23	24.8
3 324	14.3	14.1	4.55	0.85	18.9	15.4	13.1	5.83	1.87	59.7	102	104	0.53	-0.22	24.6
3 463	14.3	14.1	4.53	0.81	18.9	15.4	13.1	5.98	1.89	59.8	102	104	0.53	-0.24	24.8

0.249、0.249;速效钾的分形维数为 0.193、0.199 和 0.210;有效磷的分形维数为 0.508、0.491、0.489。说明同样条件下, IDW 法受采样密度影响较 Kriging

法更明显。同时,采用 IDW 制图,有效磷制图受采样密度影响显著大于有机质和速效钾,速效钾受影响最小。

表 2 土壤有机质和速效钾的变异函数模型

Table 2 Variogram model of soil organic matter and soil available potassium

样点数 Number	有机质 Organic matter					速效钾 Available potassium				
	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range	步长 Lag	结构性比例 Structural proportion	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range	步长 Lag	结构性比例 Structural proportion
	($\text{g}^{-2}\text{kg}^{-2}$)	($\text{g}^{-2}\text{kg}^{-2}$)	(m)	(m)	(%)	($\text{mg}^{-2}\text{kg}^{-2}$)	($\text{mg}^{-2}\text{kg}^{-2}$)	(m)	(m)	(%)
138	2.44	5.94	5 766	2 000	58.8	354.0	544.3	8 711	2 000	35.0
207	4.93	7.23	18 700	2 000	31.8	533.0	635.9	11 729	2 000	16.2
277	5.87	7.44	10 653	2 000	21.1	489.1	594.4	12 438	2 000	17.7
554	6.13	8.18	15 732	2 000	25.1	409.1	581.3	12 930	2 000	29.6
623	5.90	7.56	23 707	2 000	22.0	484.0	654.0	15 025	2 000	26.0
692	5.83	7.21	16 052	2 000	19.1	464.6	590.5	11 739	2 000	21.3
761	6.83	8.65	16 678	2 000	21.0	450.7	628.9	13 781	2 000	28.3
831	5.81	6.90	19 805	2 000	15.7	486.3	660.7	10 704	2 000	26.4
1 108	5.77	7.56	10 424	1 000	23.6	469.7	646.8	11 853	1 000	27.4
1 385	5.37	7.23	8 497	1 000	25.7	491.3	658.8	11 532	1 000	25.4
1 662	5.13	6.87	8 669	1 000	25.2	451.9	656.0	11 853	1 000	31.1
1 939	5.56	7.56	8 739	1 000	26.4	448.4	648.6	11 853	1 000	30.9
2 216	5.42	6.94	9 718	1 000	22.0	443.9	609.4	11 853	1 000	27.2
2 493	5.36	6.90	7 879	1 000	22.3	461.5	627.4	11 853	1 000	26.4
2 770	5.44	7.02	8 464	1 000	22.5	461.5	632.5	11 853	1 000	27.0
3 047	5.51	7.17	7 934	1 000	23.1	472.1	628.2	11 853	1 000	24.8
3 324	5.51	7.08	8 923	1 000	22.1	463.4	621.3	11 853	1 000	25.4
3 463	5.47	7.06	8 432	1 000	22.5	468.3	627.8	11 853	1 000	25.4

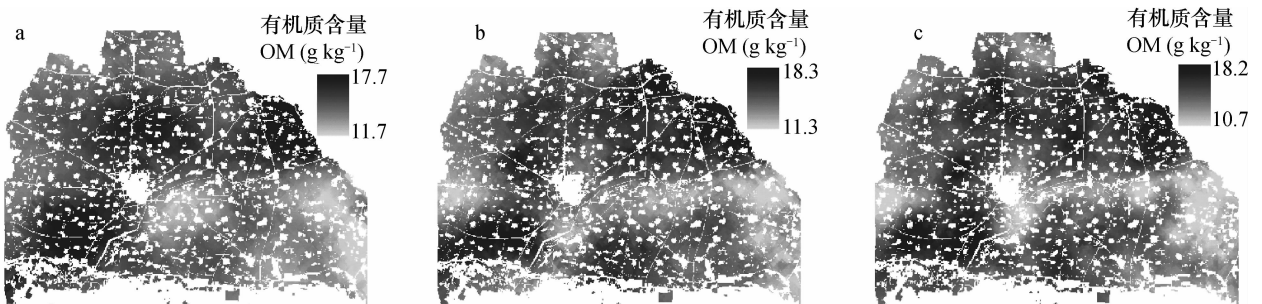


图 4 土壤有机质在 277、554 和 831 个样点条件下的 Kriging 法制图

Fig. 4 Soil organic matter maps with the kriging method based on 277 (a), 554 (b) and 831 (c) sampling sites, separately

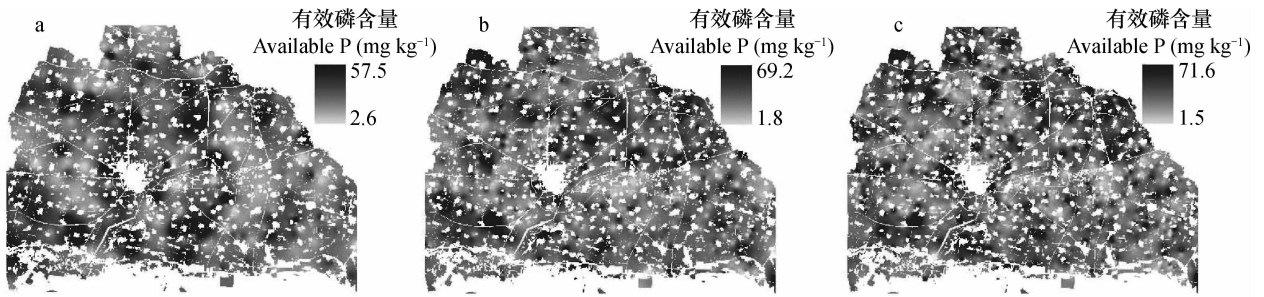
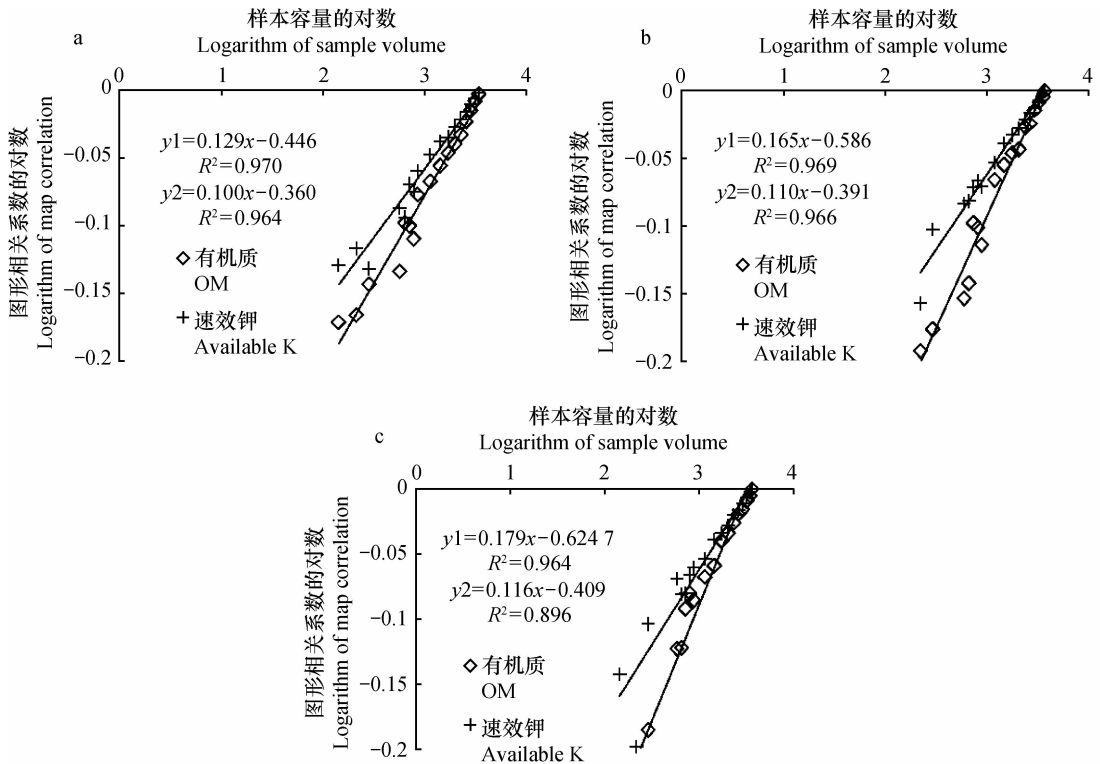


图5 土壤有效磷在277、554和831个样点条件下的IDW制图

Fig. 5 Soil available phosphorus maps with the IDW method based on 277 (a), 554 (b) and 831 (c) sampling sites, separately



注: y_1 、 y_2 、 y_3 分别表示土壤有机质、速效钾、有效磷样本子集与全量样本制图结果的相关系数的对数。下同 Note: y_1 , y_2 and y_3 respectively denotes logarithms of the correlation coefficients in soil organic matter, soil available K and soil available P between maps based on sample subsets and the total samples. The same below

图6 样本数与土壤有机质和速效钾 Kriging 制图精度变化的双对数图

Fig. 6 Double log curves of precisions of the kriging mapping of soil organic matter and soil available K relative to volume of samples

用以点代面法进行研究,3遍研究得到有机质制图受采样数影响的分形维数为0.404、0.399、0.324;速效钾为0.351、0.361、0.333;有效磷为0.674、0.636、0.548。可见,采样密度变化导致的有机质和速效钾空间表达的尺度效应相近,且均显著低于有效磷,这与前两种方法表现的趋势一致。但以点代面法表现的规律没有 Kriging 法和 IDW 法稳定:其中前两次实验的有机质空间表达尺度效应高于速效钾,第三次则略低于速效钾;第三次实验,3种土壤属性空间

表达尺度效应均较前2次降低。3次实验抽样方法相同,只是抽取的具体样点位置不同,这说明以点代面法尺度效应规律受抽样分布影响较 Kriging 法和 IDW 法大,笔者认为这反映了 Kriging 法和 IDW 法插值的连续性、平滑性与以点代面法插值的离散性和突变性特征的区别,前两者降低了样点分布以及样点具体取值对制图结果的影响,使尺度效应表现较小,且规律稳定。其中 Kriging 法平滑效应较 IDW 法更明显,使得其制图的尺度效应最低。

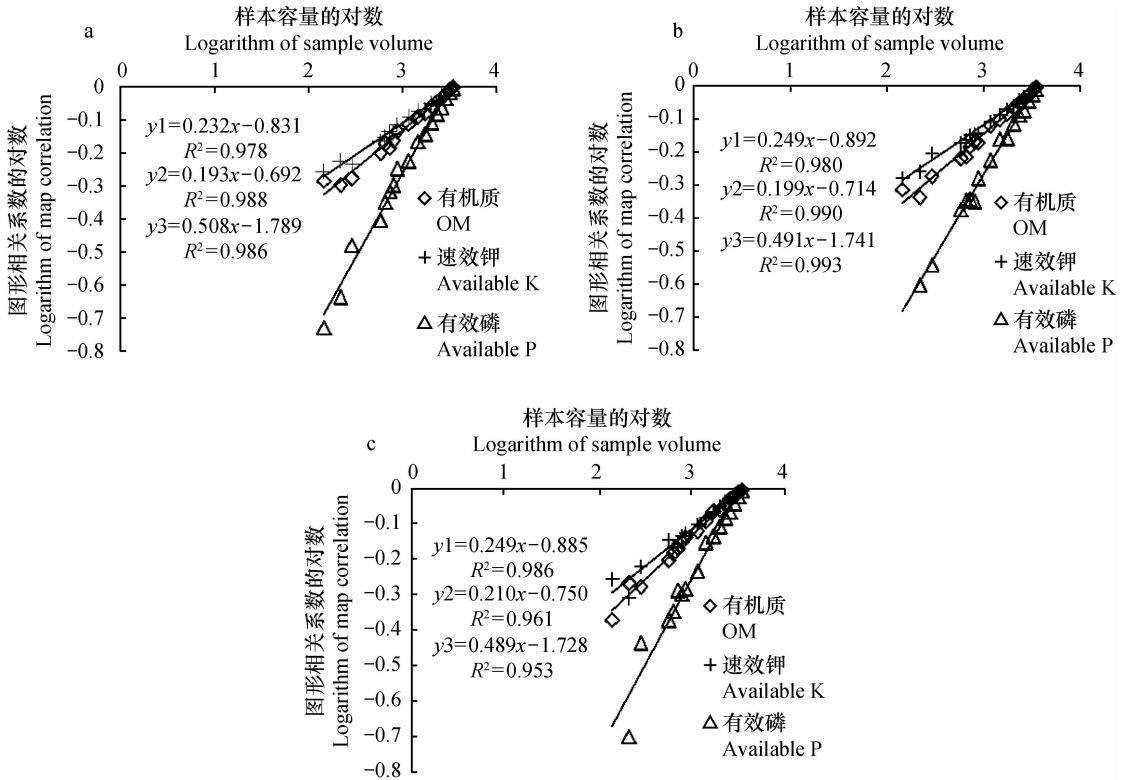


图7 样本数与土壤有机质、速效钾和有效磷 IDW 制图精度变化的双对数图

Fig. 7 Double log curves of precisions of the IDW mapping of soil organic matter, soil available K and soil available P relative to volume of samples

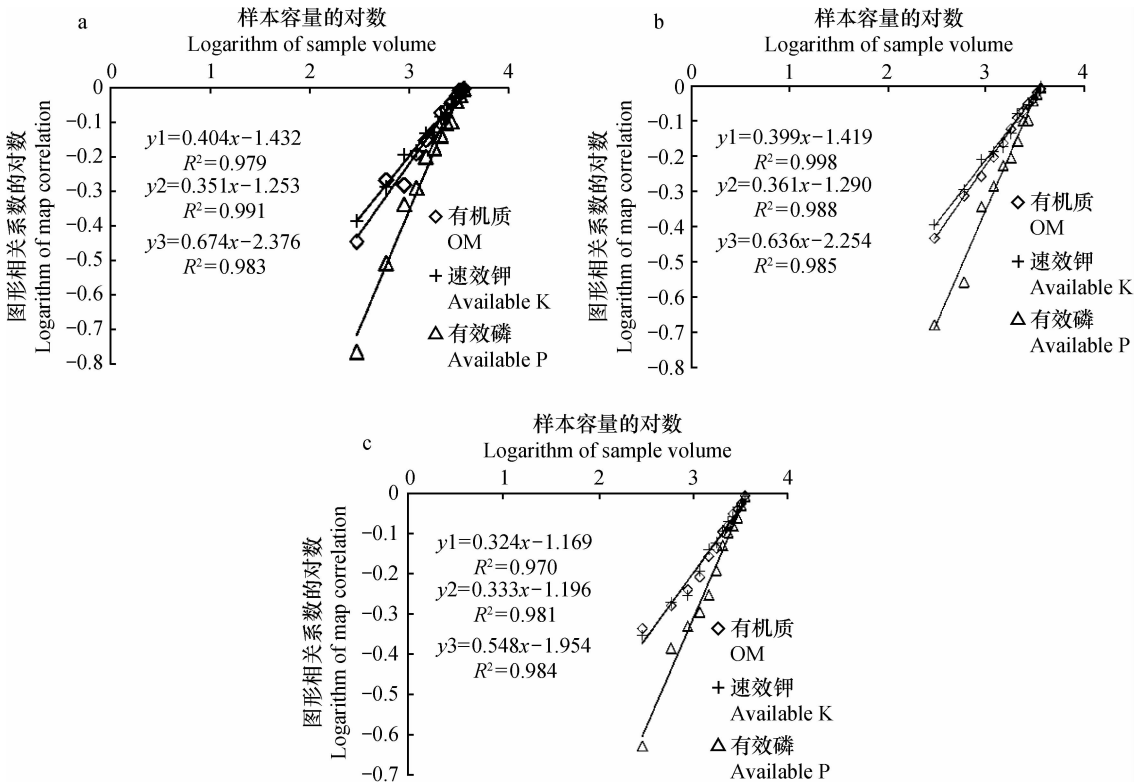


图8 样本数与土壤有机质、速效钾和有效磷以点面法制图精度变化的双对数图

Fig. 8 Double log curves of precisions of the PRP mapping of soil organic matter, soil available K and soil available P relative to volume of samples

2.3 基于验证点集检验的制图精度尺度效应

随制图子集样点数增加,独立验证子集实测值与预测值相关系数 r 有增加的趋势(表3),但表现不明显。以 r 值为判断标准,Kriging 法的 r 值变化区间最小,以点代面法 r 值变化区间最大,说明前者受采样密度影响效应小,而后者受其影响大,这与前述结论一致。但不同的是 r 值变化没有呈现较强的规律性,如果列出 r 值变化与采样数变化的双对数图,它们明显不呈一条直线。若强制拟合其直线

斜率(即分形维数),有机质 Kriging 法作图为 0.079;IDW 法为 0.144、以点代面法为 0.169,均明显低于地图直接比较表现出的分形维数。速效钾和有效磷表现出类似规律,不再赘述。同样,均方根误差尽管也有随样点数增加而降低的微弱趋势,但双对数直线回归方程不显著,且直线斜率较低,如 Kriging 法、IDW 法和以点代面法有机质作图独立数据集验证的均方根误差随样点数变化的直线斜率只有 0.016、0.061 和 0.069,没有分形规律(表4)。

表3 预测值与实测值相关系数 r 随样点数量的变化

Table 3 Correlation coefficient r between predicted and measured values relative to number of sampling sites

样点数 Number	有机质 Organic matter			速效钾 Available K			有效磷 Available P	
	PRP ¹⁾	IDW	Kriging	PRP	IDW	Kriging	PRP	IDW
277	0.340	0.342	0.465	0.231	0.369	0.428	0.022	0.162
554	0.288	0.308	0.433	0.336	0.498	0.519	0.025	0.131
831	0.223	0.249	0.416	0.401	0.510	0.508	0.153	0.240
1 108	0.325	0.416	0.470	0.293	0.359	0.519	0.156	0.213
1 385	0.459	0.389	0.462	0.468	0.516	0.561	0.037	0.166
1 662	0.257	0.329	0.439	0.294	0.432	0.500	0.089	0.304
1 939	0.350	0.464	0.492	0.361	0.513	0.538	0.124	0.191
2 216	0.414	0.409	0.503	0.496	0.504	0.543	0.191	0.188
2 493	0.419	0.495	0.485	0.528	0.540	0.554	0.171	0.222
2 770	0.390	0.411	0.489	0.433	0.488	0.531	0.200	0.217
3 047	0.431	0.485	0.494	0.521	0.531	0.562	0.255	0.224
3 324	0.443	0.484	0.480	0.499	0.529	0.557	0.129	0.179
3 463	0.403	0.449	0.495	0.493	0.532	0.553	0.186	0.226

注:1) PRP:以点代面法。下同 Note: 1) PRP: Polygon value represented by point value. The same below

表4 验证集均方根误差随样点数量的变化

Table 4 Root mean square error (RMSE) of the verification dataset relative to number of sampling sites

样点数 Number	有机质 Organic matter			速效钾 Available K			有效磷 Available P	
	PRP	IDW	Kriging	PRP	IDW	Kriging	PRP	IDW
277	3.07	2.76	2.49	30.11	26.95	25.84	11.61	9.86
554	3.22	2.87	2.50	28.00	24.80	24.53	11.71	9.97
831	3.17	2.95	2.53	28.00	24.56	24.55	10.75	9.55
1 108	3.05	2.58	2.45	29.66	27.19	24.53	11.45	9.74
1 385	2.76	2.66	2.46	26.16	24.25	23.72	12.37	9.91
1 662	3.02	2.79	2.49	29.21	25.63	24.66	11.12	9.18
1 939	2.98	2.47	2.42	27.97	24.49	24.24	11.07	9.68
2 216	2.84	2.63	2.40	25.43	24.59	24.01	10.73	9.75
2 493	2.71	2.41	2.43	24.51	23.92	23.86	10.90	9.56
2 770	2.83	2.58	2.42	26.57	24.87	24.12	10.83	9.68
3 047	2.71	2.45	2.42	24.68	24.06	23.80	10.07	9.55
3 324	2.61	2.45	2.44	25.10	24.10	23.86	11.19	9.71
3 463	2.75	2.54	2.42	25.24	24.07	23.80	8.05	9.55

采用独立验证数据集验证是当前常用的制图精度判断方法,该法用以判断同一采样尺度下制图方法优劣是可行的。横向比较表 3 ~ 表 4 发现:Kriging 方法优于 IDW,以点代面法最差。但在纵向比较时,几种方法均出现了样点数量较多时精度较低的误判,制图结果变化没有尺度效应特征,这显然不符合逻辑;而采用地图直接比较法得到的制图结果呈强烈的尺度效应规律,符合客观逻辑。该结果显示:第一,在比较不同尺度数据的制图精度时,应该慎重对待独立数据集验证得到的结论。正如前述,验证点集的代表性以及验证点集和制图点集的几何关系,是抽样验证难以回避的逻辑困境。第二,基于对“土壤类型相同和土地利用方式相同时其土壤属性值可比”的经验认同,不管土壤属性变异特征如何,以点代面法往往更易于被认为是一种普适性的方法。一些土壤学者承认以点代面法至少具有发生学原理作为推测的机理;而插值法则是一种数学方法,似乎不重视“土壤知识”。但本文研究表明,以点代面不仅不适合对空间随机性变异的土壤属性进行制图,而且对于空间相关性较强的土壤属性制图效果亦不理想。在土壤属性空间变异具有结构性趋势时,插值方法不仅利用了各个点本身的信息,而且挖掘了各点取值之间的联系所带来的附加信息。以点代面法以多边形作为表达媒介,将连续性的空间分割为离散化的均值斑块,对单点信息和趋势性信息利用均不充分。对连续性空间划分边界,仅适合在土壤或地形突变的条件下。

此外,与土壤有机质和速效钾相比,有效磷 r 值较低;且随着样点数增加,有效磷 r 在同一方法条下的相对变化幅度、不同方法之间 r 差值的变化幅度均呈现较大不确定性。如当样点数为 1 662 时,以点代面法和 IDW 法的 r 值分别为 0.089 和 0.304。而当样点数为 2 216 时,二者 r 值分别为 0.191、0.188。这说明,对于空间变异随机性较强的土壤属性,其制图精度低和精度评价的不确定性大是固有特征,当其不符合 Kriging 插值的数学条件时,用 IDW 法或以点代面法替代进行制图,并不意味着能在避免理论批判的同时得到一张可用的图。

2.4 多尺度空间估值的不确定性

Kriging 误差方差是常用的空间估值不确定性评价方法之一,但该方法深受样点布局影响。如图 9a 所示土壤有机质 Kriging 误差方差分布,有样点的位置方差小,而样点稀疏地区方差大。基于条件数据

进行多次随机模拟获取区域大于某个阈值的概率分布图,或者不同位置大于某概率的阈值分布图,也是常见的空间不确定性表达方法^[19-20]。有关研究证明,局部随机模拟出现概率最大的仍是基于条件数据的 Kriging 插值结果,即多次模拟的期望值。同时,基于特定位置多次模拟取值理论上服从正态分布,且该正态分布的方差正等于 Kriging 估值的误差方差^[21-22]。因此,该位置取值的变异系数实际上决定于 Kriging 估值误差标准差(相当于多次模拟值的标准差)与 Kriging 估值结果(相当于多次模拟的平均值)。由于多次模拟标准差分布受样点分布影响,若样点分布均衡,则模拟值标准差的空间变化较小,则随机模拟的变异系数与 Kriging 估值结果呈显著反比关系。图 9b 所示土壤有机质 200 次随机模拟结果的变异系数分布图与图 10a 所示 Kriging 估值结果对比有力验证了上述结论。

因此,基于单次(单尺度)采样的估值不确定性评价实质上是研究者在一次特定采样条件限制下对制图结果主观信任度的度量,不代表特定位置实际多次采样将会出现的取值概率分布,也不能用以解释多尺度采样产生的制图结果不确定性。本研究以 8%、16%、24%、32%、40%、48%、56%、64%、72%、80%、88%、96% 比例递进的 12 个抽样尺度的数据,按不同方法作图,求局部估值在 12 张图上取值的变异系数;且把同样过程重复 3 遍。以土壤有机质为例,图 11a ~ 图 11c 展示了第 1 遍计算结果:Kriging 方法的多尺度局部估值的变异系数具有较小的变化区间,IDW 和以点代面方法则相反;但不同方法所得估值变异系数图有显著相关性,IDW 法与 Kriging 法的相关系数为 0.489、IDW 法与以点代面法的相关系数为 0.520、Kriging 法与以点代面法的相关系数为 0.420。同种方法 3 遍抽样计算结果之间也具有高度相关性(表 5);以 IDW 法相关性最大,以 Kriging 法相关性最小。主要原因在于 Kriging 估值变化区间和变异程度小,但这正导致不同批次研究结果对相对差异的响应敏感;其他两种方法虽然局部估值变异大,却掩盖了多次研究结果的相对差异。

此外,同样条件下,有效磷多尺度估值的变异系数取值区间均显著大于有机质和速效钾,其多尺度估值变异系数 3 遍计算结果相关性也低于有机质和速效钾,说明有效磷多尺度估值不确定性高于有机质和速效钾。

表5 第1遍与第2、3遍多尺度估值变异系数图的相关性

Table 5 Correlations between the CV map of the 1st round of multi-scaled assessment and the CV maps of the 2nd and 3rd rounds

方法 Method	有机质 Organic matter		速效钾 Available K		有效磷 Available P	
	2 nd	3 rd	2 nd	3 rd	2 nd	3 rd
	Kriging	0.66	0.65	0.65	0.68	—
IDW	0.85	0.85	0.83	0.83	0.77	0.78
PRP	0.77	0.79	0.80	0.81	0.63	0.59

不同方法或不同抽样批次条件下计算结果的差异反映了制图方法、抽样方法对多尺度空间估值不确定性判断有不同程度影响;但它们之间的显著相关性又说明不同制图方法和抽样反映的估值不确定性也有共性:受土壤自身变异特征影响。以全量样本制作的土壤属性图为土壤自身变异的最接近表达,发现有机质 Kriging 插值与其多尺度变异系数相关性为 -0.116 (图 10a、图 11a),速效钾 Kriging 插值与其多尺度变异系数相关性为 -0.587 ,均达到极显著水平(图 12)(以栅格数 1000 为参考自由度,0.01 显著水平临界值为 0.081);有效磷 IDW

法插值与其多尺度变异系数图之间的相关性则仅为 0.062 (图 13)。如果对照 DEM 和土壤类型图(图 2~图 3),有机质多尺度估值变异较大地区在大功决口西北地形较高部位的灌淤土和砂壤土区以及原黄河决口大溜留下的风沙土区;速效钾多尺度估值变异较大地区是原来风沙土分布区和东部贯台决口扇上缘的砂壤土和轻盐砂壤土地区。根据土壤地球化学知识,砂型或砂壤型土壤质地上有机质和速效钾的本底值一般较低,而本底值越低对耕作培肥等人为因素干扰的响应越敏感,制图不确定性就会增加。但受当地“重氮轻钾”的施肥模式

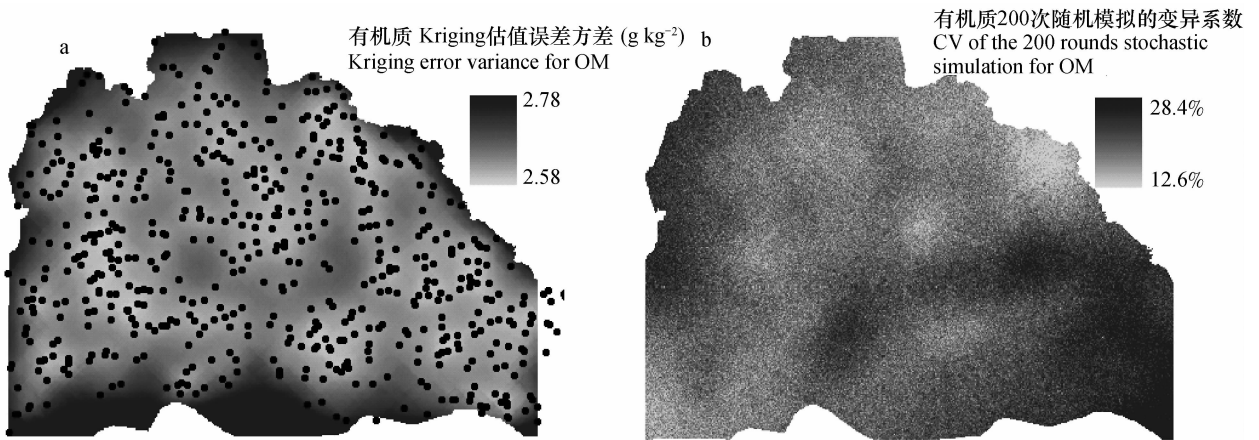


图9 基于 277 个样点的土壤有机质 Kriging 估值误差方差(a)和随机模拟变异系数分布(b)

Fig. 9 Error variance of Kriging (a) and distribution of variable coefficient of stochastic simulation (b) of soil organic matter based on 277 sample site

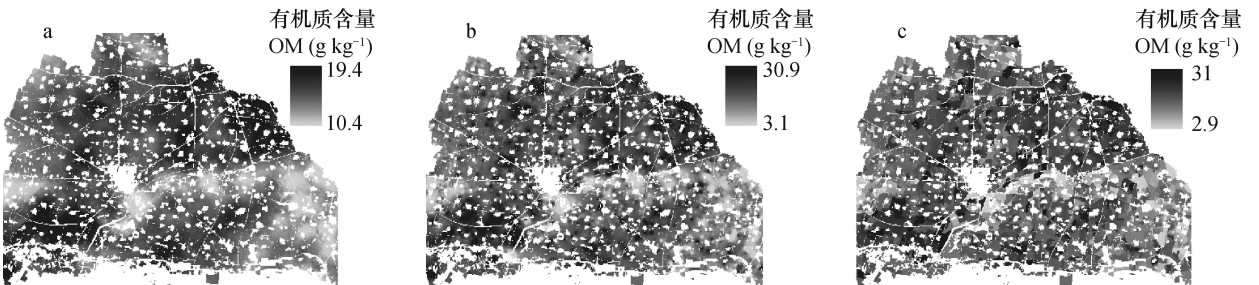


图 10 基于 3 463 个样点的土壤有机质 Kriging 制图(a)、IDW 制图(b)和以点代面法制图(c)

Fig. 10 Soil organic matter mapping with the Kriging (a), IDW (b) and PRP (c) methods, separately based on 3 463 sampling sites

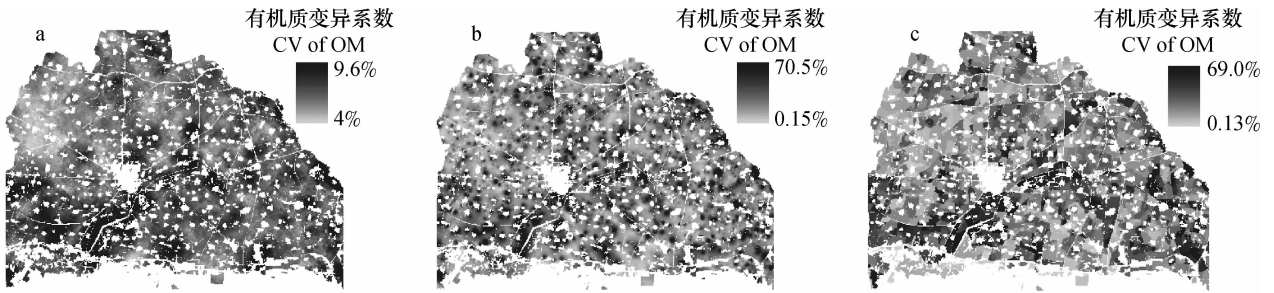


图 11 基于 Kriging 法 (a)、IDW 法 (b) 和以点代面法 (c) 的土壤有机质多尺度制图变异系数

Fig. 11 Variable coefficient of multi-scaled soil organic matter mapping with the kriging (a), IDW (b) and PRP (c) methods, separately

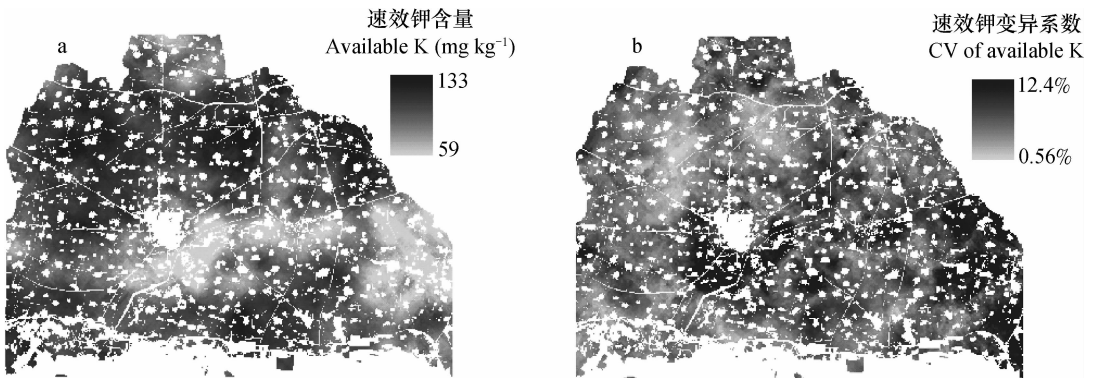


图 12 基于 3 463 个样点的土壤速效钾含量 (a) 与基于 Kriging 法的多尺度制图变异系数 (b) 对比

Fig. 12 Comparison between soil available K maps based on 3 463 sampling sites (a) and on the kriging multi-scaled mapping method (b) in variable coefficient

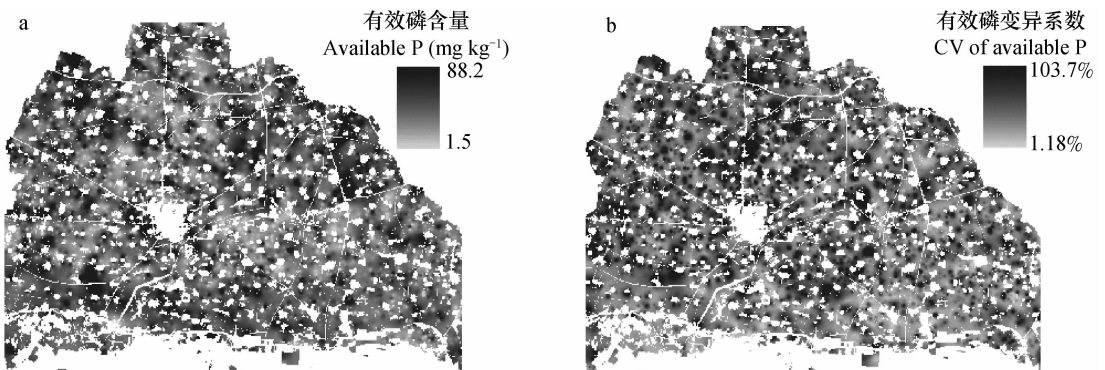


图 13 基于 3 463 个样点的土壤有效磷含量 (a) 与基于 IDW 法的多尺度制图变异系数 (b) 对比

Fig. 13 Comparison between soil available P maps based on 3 463 sampling sites (a) and on the IDW multi-scaled mapping method (b) in variable coefficient

及对不同类型土壤培肥利用重视程度差异的影响,使得有机质和钾的空间不确定性规律并不一致,土壤有机质估值的不确定性与其含量的相关性大大降低,这与其随机模拟的不确定性表述具有显著差异。土壤有效磷普遍受人为施肥影响,全局估值精度低,局部估值不确定性高,不再赘述。

3 结论

用地图直接对比方法研究了封丘县土壤属性制图受采样数影响的尺度效应:制图结果在 Kriging、IDW 和以点代面 3 种方法下均有较严格的分形规律,同样数据条件下, Kriging 法分形维最小,制图结果受采样数影响最小,以点代面法则最大。同样

方法条件下,土壤速效钾空间表达分形维最小,土壤有机质次之,而土壤有效磷最大,其尺度效应规律与制图对象空间变异的结构性强弱有明显对应关系。基于独立验证数据集预测值和实际值的相关系数 r 和均方根误差RMSE对制图精度评判表明, r 和RMSE变化随采样数变化波动性大、趋势性弱,没有较好揭示客观存在的空间表达尺度效应规律。据此,作者认为基于独立验证数据集评判制图效果对单一尺度数据是适用的,但用于制图的尺度效应研究则应慎重。

对于土壤有效磷等空间随机性变异较强的制图对象,制图结果的不确定性是其固有特征。它们不符合地统计学制图条件,但采用IDW或以点代面法所得地图的可信性同样较低。对于结构性变异较强的土壤有机质和速效钾,仍以Kriging方法制图最优,以点代面法最差。说明“土壤类型相同和土地利用方式相同时其土壤属性值可比”的推论运用于制图实践并不具有优势,基于插值的空间连续性表达较基于多边形斑块的离散化表达更可靠。

理论分析和案例举证均表明:尽管数学表达形式多样化,基于Kriging误差方差或多次随机模拟概率分布的不确定性判断实质是研究者对制图成果本身的信任度判断,推断结果受采样分布特征和估值结果大小的影响;多尺度空间估值的不确定性则更接近地表达了制图对象事实上的自然变异。通过将多尺度估值变异性图与最大采样数条件下土壤属性图、DEM图、土壤类型图进行比较,本研究认为本底值高低对封丘土壤有机质、速效钾制图不确定性有不同程度影响;其中尤以速效钾显著,而土壤有机质受熟化程度和施肥模式的影响更大,其制图不确定性与本底值关系已大大减弱。土壤有效磷的制图不确定性分布与其自身的变异性一样均呈现较大的随机性。

参考文献

- [1] Galbraith J M, Kleinman P J, Bryant R B. Sources of uncertainty affecting soil organic carbon estimates in Northern New York. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 1206—1212
- [2] Zhao Y C, Shi X Z, Weindorf D C, et al. Map scale effects on soil organic carbon stock estimation in North China. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1377—1386
- [3] Zhong B, Xu Y J. Scale effects of geographical soil datasets on soil carbon estimation in Louisiana, USA: A comparison of STATSGO and SSURGO. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 491—501
- [4] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO_3^- -N loads predictions. *Journal of Hydrology*, 2005, 312: 207—222
- [5] McBratney A B. On variation, Uncertainty and informatics in environmental soil management. *Australia Journal of Soil Research*, 1992, 30: 913—935
- [6] Garten Jr C, Kang S, Brice D J, et al. Variability in soil properties at different spatial scales (1m -1km) in a deciduous forest ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 2621—2627
- [7] Debaene G, Nied ź wiecki J, Pecio A, et al. Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm scale. *Geoderma*, 2014, 214/215: 114—125
- [8] 张发升, 刘作新, 张颖, 等. 农田土壤有机质空间变异的尺度效应. *中国科学院研究生院学报*, 2009, 26(3): 350—356. Zhang F S, Liu Z X, Zhang Y, et al. Scaling effect on spatial variability of soil organic matter in crop land (In Chinese). *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 26(3): 350—356
- [9] 王志刚, 赵永存, 黄标, 等. 采样点数量对长三角典型地区土壤肥力指标空间变异解析的影响. *土壤*, 2010, 42(3): 521—428. Wang Z G, Zhao Y C, Huang B, et al. Effect of sample size on spatial characterization of soil fertility properties in an agricultural area of the Yangtze River Delta region, China (In Chinese). *Soils*, 2010, 42(3): 421—428
- [10] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 1—5. Xu Y, Chen Y X, Shi H B, et al. Scale effect of spatial variability of soil water-salt (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(2): 1—5
- [11] 潘瑜春, 刘巧芹, 阎杰波, 等. 采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响. *土壤通报*, 2010, 41(2): 257—262. Pan Y C, Liu Q Q, Yan B J, et al. Effect of sampling scale on soil nutrition spatial variability analysis (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 257—262
- [12] 张世榕, 孙波, 赵其国, 等. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征. *土壤学报*, 2007, 44(5): 885—892. Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen at multi-scales in hilly region in South China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 885—892
- [13] 于婧, 聂艳, 周勇, 等. 江汉平原典型区农田土壤全氮空间变异的多尺度套合. *土壤学报*, 2009, 46(5): 938—944. Yu J, Nie Y, Zhou Y, et al. Multi-scaled nesting of spatial variability of soil total nitrogen in typical farmland soils of Jiang Han Plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 938—944
- [14] 霍宵妮, 李红, 张微微, 等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 223—229. Huo X N, Li H, Zhang W W, et al. Multi-scale spatial structure of heavy metals in Beijing cultivated soils (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(3): 223—229
- [15] Caniego F J, Espejo R, Martin M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 291—303
- [16] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 81—86. Liu J L, Ma X Y, Zhang Z H. Multifractal study on spatial variability

- of soil water and salt and its scale effect (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 81—86
- [17] Ibáñez J J, Arnold A A, Ahrens R J. The fractal mind of pedologists (soil taxonomists and soil surveys). Ecological Complexity, 2009, 6: 286—293
- [18] 封丘县土壤普查办公室. 封丘土壤. 1984. Soil Survey Office of Fengqiu County. Fengqiu soil (In Chinese). 1984
- [19] Delbari M, Afrasiab P, Loiskandl W. Using sequential Gaussian simulation to assess the field ~ scale spatial uncertainty of soil water content. Catena, 2009, 79: 163—169
- [20] 赵彦锋, 化全县, 陈杰. Kriging 插值和序贯高斯条件模拟的原理比较及在土壤空间变异研究中的案例分析. 土壤学报, 2011, 48(4): 856—862. Zhao Y F, Hua Q X, Chen J. Comparison of Kriging interpolation with conditional sequential gaussian simulation in principles and case analysis of their application in study on soil spatial variation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 856—862
- [21] Luo X C. Spatiotemporal stochastic models for earth science and engineering applications. Montreal, Canada: University of McGill, 1998.
- [22] 赵彦锋, 孙志英, 陈杰. Kriging 插值和序贯高斯条件模拟算法的对比分析. 地球信息科学学报, 2010, 12(6): 767—776. Zhao Y F, Sun Z Y, Chen J. Analyses and comparisons in arithmetic for Kriging interpolation and sequential Gaussian conditional simulation (In Chinese). Journal of Geo-information Science, 2010, 12(6): 767—776

STUDY ON EFFECT OF SCALING ON SOIL SPATIAL EXPRESSION BASED ON DIRECT COMPARISON OF MAPS-A CASE OF SOIL ATTRIBUTE MAPPING IN FENGQIU COUNTY, HENAN PROVINCE, CHINA

Sun Zhiying¹ Zhao Yanfeng^{2†} Zhang Huanan² Cheng Daoquan³

(1 Academy of Land Surveying and Planning, Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

(2 School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(3 Station of Soil and Fertilizer Extension Service, Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

Abstract In Fengqiu County of Henan Province, topsoil samples were collected from 3 608 sampling sites, of which 3 463 sampling sites were chosen to form a master dataset for soil attribute mapping, while the remaining 145 sampling sites were to form a master verification dataset. Then, through 4%~96% multi-scaled stochastic sampling of the former, 17 subsets were formed for mapping of soil organic matter, soil available phosphate and soil readily available potassium using kriging interpolation, inverse distance weight interpolation (IDW) and Polygon value represented by point value (PRP), respectively. Based on direct map comparison between the computerized mapping subsets and the master mapping dataset, correlation coefficients were obtained to evaluate effects of scaling on soil attribute maps, and further more comparison was made with the multi-scaled mapping evaluated with the verification dataset. In the end, variable coefficient of the multi-subset mapping was used to indicate uncertainty of the expression of multi-scaled mapping and comparison was made of this uncertainty with that of the kriging variance and that of the stochastic simulation. Through the direct map comparison, it was found that the relationship between mapping quality and volume of samples was fractal and the fractal dimension was affected dually by mapping method and spatial variability of soil attributes. In the same conditions, the fractal dimension was the smallest with the kriging method and the largest with the PRP method, and the smallest with soil available potassium and the largest with soil available phosphate. The correlation coefficients and Root mean square error (RMSE) between the measured values and forecasted values in the verification dataset did not show any fractal feature as expected. The uncertainty of single-scale mapping expressed by kriging variance and stochastic simulation was significantly influenced by distribution of the sampling sites and value of the kriging estimation, while the uncertainty of the multi-scale mapping based on direct map comparison reflected more objectively natural variation of soil attributes, among which soil organic matter and soil available potassium showed more obvious laws in variation, while soil available phosphate didn't.

Key words Direct map comparison; Spatial expression of soil attribute; Scaling effect

(责任编辑:檀满枝)