

江叶枫, 郭 熙, 叶英聪, 等. 南方丘陵山区耕地土壤养分空间变异及合理采样数[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(3): 568-574.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.03.013

南方丘陵山区耕地土壤养分空间变异及合理采样数

江叶枫¹, 郭 熙¹, 叶英聪^{1,2}, 孙 凯¹, 饶 磊¹, 李伟峰¹, 李 捷¹, 王澜珂¹

(1. 江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西农业大学林学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 以江西省兴国县丘陵山区为例, 取2 398个样点并测定其土壤有机质、有效磷和速效钾含量。运用半变异函数分析土壤养分的空间变异特征, 再基于普通克里金法对样点以固定比例进行随机抽样, 根据均方根误差波动的绝对值确定一个区间后, 采用数学二分法进一步研究取样数。结果表明, 有机质的变异系数最大, 有效磷次之, 速效钾最小; 土壤有机质、有效磷和速效钾含量呈现中等空间相关性且变程较小; 兴国县丘陵山区土壤有机质、有效磷和速效钾的合理采样数分别为1 366、1 170、1 690, 合理采样密度分别为1 hm² 0.044个、0.038个、0.055个。

关键词: 土壤养分; 二分法; 空间变异; 合理取样数

中图分类号: S159.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)03-0568-07

Spatial variation and reasonable sampling number of soil nutrients in southern China hilly and mountainous regions

JIANG Ye-feng¹, GUO Xi¹, YE Ying-cong^{1,2}, SUN Kai¹, RAO Lei¹, LI Wei-feng¹, LI Jie¹, WANG Lan-ke¹

(1. Key laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology/Academy of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: A total of 2 398 soil samples were collected throughout Xingguo county, Jiangxi province, for detection of the contents of soil organic matter (SOM), available phosphorus (AP), and available potassium (AK). The semi-variogram parameters was used to analyze the spatial variation characteristic of soil nutrients. Random sampling at a fixed ratio was made based on the ordinary Kriging method. After a certain interval was achieved based on the absolute value of root mean square error, the reasonable sampling number was studied by dichotomy. The results showed the coefficient of variation decreased in the order of SOM>AP>AK. SOM, AP and AK contents presented moderate spatial dependence and small range. The reasonable sampling number of SOM, AP and AK were 1 366, 1 170 and 1 690, respectively, and sampling density were 0.044/hm², 0.038/hm² and 0.055/hm², respectively.

Key words: soil nutrient; dichotomy; spatial variation; reasonable sampling number

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361049); 江西省自然科学基金项目(20122BAB204012); 江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)

作者简介: 江叶枫(1994-), 男, 江西余干人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源与环境方面研究。(E-mail) jiangyf0308@163.com

通讯作者: 郭 熙, (E-mail) xig435@163.com

土壤养分是土地生产力的基础, 受气候、母岩等因素的综合作用, 土壤养分的空间分布具有空间变异性^[1]。研究土壤养分的空间变异需要大量的采样点进行空间插值以保证精度, 然而进行大

规模密集采样并不现实,不仅费时费力,往往精度还不理想。因此,如何在保证空间建模精度的同时合理确定采样点的数量始终是土壤研究学者关注的一个重点和难点问题^[2],得到越来越多的学者关注^[3-5]。

国内外众多学者利用高精度曲面建模^[6]、地统计建模^[7-8]、回归建模^[9]、神经网络建模^[10]和3S技术建模^[11]对土壤养分空间变异及合理采样数进行了比较深入的研究,并取得了显著成就。张志霞等^[3]研究了黄土丘陵地区不同尺度下土壤有机碳的空间变异性,认为不同尺度下有机碳的变异程度不同。王珂等^[12]在一块7.9 hm²的牧草地上运用经典统计学确定了土壤有效钾的采样个数为62个。阎波杰等^[5]分析了县域尺度下土壤重金属的空间变异性及合理采样数的确定,发现用地统计学进行合理采样的精度高于经典统计学方法。王晋民等^[13]分析了村级尺度下栗钙土农田土壤养分空间变异性,结果表明土壤有机质、水解氮、速效钾空间变异性弱,而速效磷空间变异性强,采样密度为0~11 m。雷能忠等^[14]、于雷等^[15]、赵倩倩等^[4]、张佳佳等^[16]、张忠启等^[17]对县域尺度下土壤养分和最佳取样数进行了探索。前人研究结果表明,不同尺度下、不同地形单元、不同土壤养分的合理取样数差异明显。综合国内外研究状况,发现专门针对不同地形土壤养分空间变异及合理采样数的系统研究还相对比较缺乏,而研究不同地形下(特别是丘陵山区)合理采样数量可以提高工作效率和降低试验成本^[16]。

为此,本研究以江西省兴国县丘陵山区耕地为例,运用普通克里金法、半变异函数、二分法对丘陵山区耕地表层土壤养分空间变异特征进行研究,并在保持空间建模精度和空间结构性的前提下系统探讨兴国县丘陵山区耕地的合理采样数量,为丘陵山区耕地土壤养分科学研究、利用管理和精准农业提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

兴国县(26°03′~26°42′N,115°01′~115°51′E)总面积为3 215.0 km²,东西长84.0 km,南北宽71.5 km。地处中国中亚热带南部,位于江西省中南部,赣州市北部,平固江上游。主要土壤类型有红壤、黄

壤、黄棕壤、紫色土、石灰(岩)土和草甸土等。兴国县地貌类型以低山、丘陵为主,局部有中山、低山,海拔130~1 200 m,是江西省比较典型的山区县之一。丘陵山区耕地总面积为63 352 hm²,占全县耕地总面积的92.88%。

1.2 数据来源与处理

土壤样品采集于2013年,按照全国耕地地力调查与质量评价技术规程,在丘陵山区采用多点混合的方法采集0~20 cm的耕地表层土壤样品2 398个(图1)。每个采样点均以GPS记录其海拔和坐标,每个样点采集样品1 000 g,土壤样品经过自然风干后,在实验室磨碎过筛,用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)油浴加热法测定土壤有机质含量,用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量,用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾含量。

样品采集与农化分析过程中受采样及指标测试误差的影响,土壤养分测量结果存在粗差,粗差在数据中往往表现为明显地偏离平均值的高值或低值,从而对土壤养分空间总体分布与统计分析产生影响。本研究利用IBM SPSS Statistics 22软件采用拉依达准则法对各采样点的养分数据进行异常值处理(2倍标准差),剔除粗差后的有机质样本为2 318个,有效磷为2 284个,速效钾为2 294个。

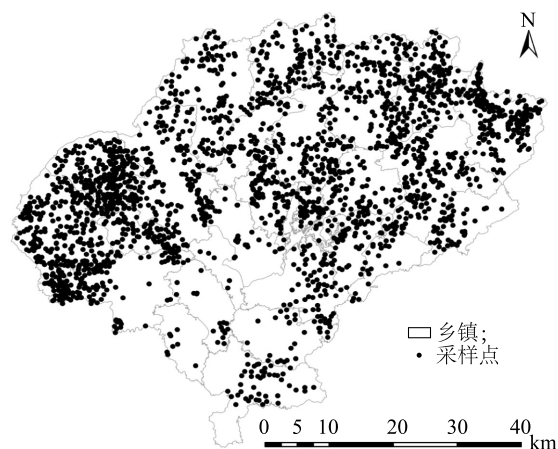


图1 江西省兴国县耕地土壤采样点分布

Fig.1 Sampling sites in the farmland of Xingguo county, Jiangxi province

1.3 研究方法

1.3.1 普通克里金法 相关原理和方法详见文献

[18]~[20]。

1.3.2 合理采样数的确定 利用 ArcGIS10.2 软件从样点集中随机抽取 100 个验证点作为精度对比,其余以固定比例(80%)进行抽取作为建模点,利用普通克里金法对建模点进行插值。首先对预测的样本和均值分别进行最小显著性检验和 t 检验,验证不同采样点下预测值与实测值的差异性。同时确定一个合理取样数区间。采用数学二分法对确定的区间不断进行分割以确定合理取样数。以均方根误差(RMSE)之差的绝对值小于 0.2 和决定系数(R^2)大于 0.8 为判断预测精度的标准,二分法停止的最小间隔为 20 个采样点。二分法的流程图见图 2。

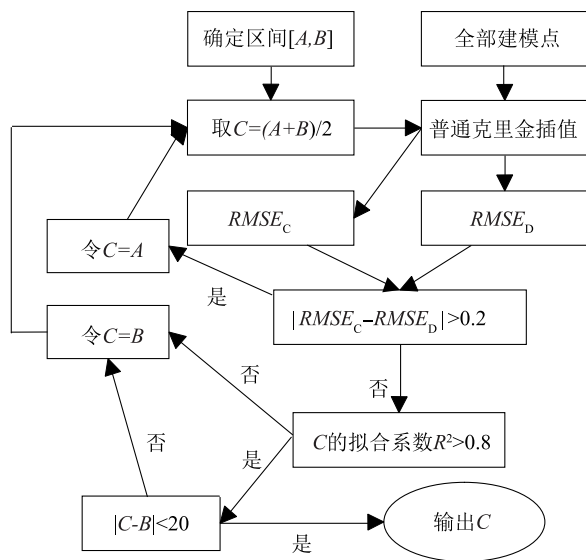


图 2 二分法流程图

Fig.2 Schematic map of dichotomy

2 结果与分析

2.1 兴国县耕地土壤养分的描述性统计分析

兴国县耕地土壤各养分的描述性统计见表 1。耕地表层土壤有机质、有效磷和速效钾的平均值分别为 14.97 g/kg、18.06 mg/kg 和 101.68 mg/kg,按照第二次土壤普查养分分级标准,土壤有机质为四级,有效磷为三级,速效钾为三级。由平均值、中位数和标准差可知,土壤有机质和有效磷分布相对均匀,而速效钾分布相对比较离散。

从峰度系数和偏度系数可以看出 3 种土壤养分大致符合正态分布。变异系数(CV)反映样点数据的空间变异程度,当 $CV \leq 10\%$ 时为弱变异性, $10\% < CV < 100\%$ 时为中等变异性, $CV \geq 100\%$ 时为强变异性。由表 1 可见,3 种土壤养分的变异系数均为中等变异性,变异系数由大到小依次为有机质>有效磷>速效钾。

2.2 不同取样数下土壤养分的空间变异分析

半变异函数法是描述土壤养分空间变异性的最有效方法,是对土壤养分属性进行空间插值的基础^[19]。通过对半变异函数的拟合可以得到变程、块金值和基台值。块金值与基台值的比值称为块金效应($<25\%$, 表现为强空间相关性; $25\% \sim 75\%$, 中等空间相关性; $>75\%$, 弱空间相关性),如果该值较大说明随机部分引起的空间异质性程度起主要作用^[19]。由表 2 可见,随着采样点数量的下降,土壤有机质、有效磷和速效钾的块金效应均呈下降趋势,且大部分小于 25%,变程为 3 000 m 左右。说明土壤有机质、有效磷和速效钾的空间相关性较强,空间自相关的范围比较小,可以在保证精度的情况下合理地减少 3 种土壤养分采样数量。

表 1 兴国县土壤养分的描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistics of soil nutrients in Xingguo county

土壤养分	样点数	平均值 (mg/kg)	中位数 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)	峰度系数	偏度系数
有机质	2 318	14 970.00	14 900.00	4 420.00	29.53	-0.11	0.08
有效磷	2 284	18.06	17.70	4.15	22.98	-0.05	0.23
速效钾	2 294	101.68	101.00	12.57	12.36	-0.05	0.16

2.3 土壤养分合理采样数确定

首先对土壤各养分不同取样数预测结果与 100

个验证样点进行最小显著性检验(LSD)和独立样本 t 检验,发现不同取样数下预测值与实际值没有显

著差异,可以通过减少取样数来达到预期的精度。由表3可知,随着建模点减少,均方根误差呈增大趋势,这一方面减少了采样成本,另一方面也会降低对

丘陵山区土壤养分空间变异研究的解释度和可信度,因此,最小显著性检验和 t 检验显得尤为重要。

表2 不同采样数下土壤养分的半变异函数参数

Table 2 Semivariogram parameters of nutrients in the soils with different number of samples

土壤养分	采样数	模型	块金值	基台值	块金效应(%)	变程(m)
有机质	2 218	S	3.24	17.76	18.24	3 217
	1 774	S	3.27	17.34	18.86	3 193
	1 419	E	3.02	17.11	17.65	3 058
	1 135	S	3.18	17.01	18.69	3 299
	908	E	2.98	16.87	17.66	3 000
	726	S	2.85	16.45	17.33	3 054
有效磷	2 184	S	1.59	16.03	9.92	2 810
	1 747	E	1.43	16.18	8.84	2 806
	1 398	S	1.44	17.17	8.39	2 812
	1 118	S	1.80	16.60	10.84	2 788
	894	E	2.46	17.51	14.05	33 074
	715	S	1.97	17.65	11.16	3 058
速效钾	2 194	E	13.23	140.10	9.44	3 853
	1755	S	11.77	138.77	8.48	3 691
	1 404	S	10.81	135.79	7.96	3 558
	1 123	E	12.33	139.70	8.83	3 550
	898	S	13.12	137.72	9.53	3 555
	718	S	129.40	170.05	76.10	47 968

S表示球状模型;E表示指数模型。

从有机质的均方根误差和决定系数变化情况看,当建模样点不小于1 419个样点时,均方根误差缓慢上升,但波动范围均在0.200 g/kg左右,拟合系数达到86.3%,插值后的结果可以比较稳定地预测整个兴国县丘陵山区耕地土壤有机质的空间分布。但是,当建模点下降至1 135时,均方根误差出现大幅度上升,达到0.283 g/kg,超出了预设误差范围。因此将有机质采样数的确定区间定为(1 135, 1 419)。

从有效磷的均方根误差和决定系数变化情况看,当建模点数不少于1 398个时,均方根误差虽然在缓慢上升,但波动仍在精度范围之内,拟合系数也在89.7%以上。但随机取样下降到1 118个建模点时,均方根误差波动范围超过0.200 mg/kg。因此将有效磷采样数的确定区间定为(1 118, 1 398)。

从速效钾的均方根误差和决定系数变化情况看,当建模点数低于718个时均方根误差出现大幅度下降,拟合系数也在不断减少,说明速效钾在建模点太少时精度难以保证。结合采样数1 755和1 404的均方根误差和拟合系数,将速效钾采样数的确定区间定为(1 404, 1 755)。

为了得到比较精确的采样数,用数学二分法对各养分采样数的确定区间再进行划分。从有机质的确定区间(1 135, 1 419),选取1 277作为第1个二分点,以全部建模点的均方根误差为基准,拟合系数80%和误差绝对值相差0.200 g/kg为界限,在误差允许范围内则减少采样点,反之则增加。得到1 277、1 348、1 366、1 384 4个二分点,其拟合系数分别为83.1%、80.6%、84.9%和84.7%,均方根误差与全部建模点分别相差0.241 g/kg、0.285 g/kg、0.180 g/kg和0.185

g/kg。若再进行二分,则采样间隔小于 20 个样点,因此将有机质的合理采样数定为 1 366。

表 3 不同采样数下克里金插值精度、最小显著性检验以及 t 检验

Table 3 Kriging interpolation precision, LSD test and t test of nutrients in the soils with different sampling numbers

土壤养分	采样数	分布类型	均方根误差	拟合系数	P 值(LSD 检验)	P 值(t 检验)
有机质	2 218	正态	2.356	0.897	0.582	0.633
	1 774	正态	2.418	0.880	0.672	0.711
	1 419	正态	2.481	0.863	0.539	0.589
	1 135	正态	2.639	0.807	0.608	0.647
	908	正态	2.613	0.823	0.420	0.468
	726	正态	2.956	0.660	0.732	0.752
有效磷	2 184	正态	1.661	0.922	0.986	0.987
	1 747	正态	1.688	0.916	0.986	0.986
	1 398	正态	1.760	0.897	0.920	0.924
	1 118	正态	1.868	0.880	0.961	0.962
	894	正态	1.919	0.844	0.827	0.829
	715	正态	1.939	0.837	0.750	0.753
速效钾	2 194	正态	5.074	0.921	0.910	0.919
	1 755	正态	5.170	0.913	0.870	0.883
	1 404	正态	5.349	0.897	0.860	0.874
	1 123	正态	5.616	0.869	0.964	0.967
	898	正态	5.710	0.859	0.994	0.995
	718	正态	7.724	0.448	0.511	0.476

有效磷采样数的确定区间为(1 118, 1 398), 选取 1 258 作为第 1 个二分点, 以全部建模点的均方根误差为基准, 拟合系数 80% 为界限, 在误差允许范围内则减少采样点, 反之则增加。从而得到 1 258、1 188、1 170 和 1 153 4 个二分点, 其拟合系数分别为 94.4%、89.3%、89.9% 和 88.4%, 均方根误差与全部建模点分别相差 0.031 mg/kg、0.112 mg/kg、0.515 mg/kg 和 0.472 mg/kg。有效磷均方根误差波动较大, 拟合系数整体呈下降趋势。在 1 153 和 1 170 个建模点时均方根误差达到极端低值, 与全部建模点的均方根误差之差超过 0.200 mg/kg, 表明在利用有效磷取样点插值时存在一个最佳建模数, 超过或者低于这个建模数时均方根误差都会增大, 由于两者不能再继续二分下去因此将有效磷的合理采样数定为 1 170 个。

从速效钾的确定区间(1 404, 1 755)选取 1 580

作为第 1 个二分点, 以全部建模点的均方根误差为基准, 拟合系数 80% 和误差绝对值相差 0.200 mg/kg 为界限, 在误差允许范围内则减少采样点, 反之则增加。从而得到了 1 580、1 668、1 690、1 679 和 1 711 5 个二分点, 其拟合系数分别为 90.2%、90.2%、90.8%、89.2% 和 92.1%, 均方根误差与全部建模点分别相差 0.023 mg/kg、0.221 mg/kg、0.153 mg/kg、0.343 mg/kg 和 0 mg/kg。速效钾均方根误差随着样点数的减少而缓慢上升, 拟合系数也呈下降趋势, 因此将速效钾的合理采样数定为 1 690 个。

2.4 不同取样数下土壤养分的空间分布

为了更直接地分析土壤养分合理采样点与全部采样点的空间分布特征, 进一步说明合理采样点的必要性和充分性。绘制了全部建模点和合理建模点之间的空间分布图以及它们栅格叠加的相对误差

图。在宏观上,土壤各养分的最佳取样点与全部训练建模点的空间分布大概一致,可见根据较少的样点信息就可以插值得到比较真实的土壤养分空间分布信息,说明合理确定采样点的必要性。再从微观上分析,以最佳采样点建模与全部训练点建模对土壤养分进行空间插值,将空间插值结果进行叠加分析,取其绝对值,得到不同样点土壤养分插值的相对误差。根据误差的像元数量比重(表4)可以知道,有机质采样点中84.91%的地区预测精度在0 g/kg到1.5 g/kg之间,有效磷有79.89%的地区预测精度在0 mg/kg到1.5 mg/kg之间,而速效钾有86.35%的地区预测精度在0 mg/kg到2.5 mg/kg之间,这表明合理确定采样点的充分性。少数预测误差比较大的区域可能受丘陵地区海拔、土壤类型、植被覆盖率和土壤侵蚀程度所影响^[3],为此在丘陵地区应该加大保护植被的力度和适当地改造梯田,同时加强对土壤侵蚀因素的控制。

表4 兴国县土壤养分预测误差的像元数量统计

Table 4 Pixel statistics of predicted errors of soil nutrients in Xingguo county

土壤养分	误差范围	像元数	比重(%)
有机质(g/kg)	0~1.5	273 144	84.91
	1.5~4.0	44 326	13.78
	4.0~12.0	4 216	1.31
有效磷(mg/kg)	0~1.5	256 980	79.89
	1.5~4.0	57 686	8.61
	4.0~10.0	7 020	2.18
速效钾(mg/kg)	0~2.5	277 765	86.35
	2.5~8.0	39 840	12.38
	8.0~21.0	4 081	1.27

3 讨论

县域尺度是中国耕地地力评价、测土配方施肥、土壤信息系统建立和土壤环境监测的基础尺度。兴国县是山区县,地形地貌复杂导致采样成本上升,因此在县域尺度下丘陵山区合理采样点数量的确定既是节约成本的关键又是保证精度的重要因素。本研究结果表明,土壤有机质、有效磷和速效钾的空间相关性较强,这与以往研究结果^[4,9,20]一致,但空间自相关的范围比较小。原因有2个:首先,兴国县丘陵

山区耕地图斑分布比较零散、破碎程度相对较高;其次,兴国县丘陵山区海拔高、地形复杂、土壤侵蚀比较严重。海拔的增加支配温度、水、热资源的再分布,导致土壤养分积累程度不同,而由于丘陵山区坡度大、土质疏松和汛期多降雨等导致土壤侵蚀严重,从而使得土壤养分分布不均。通过二分法对合理采样数进行研究,发现土壤有机质、有效磷和速效钾的合理采样数分别为1 366、1 170、1 690,拟合系数分别为84.9%、89.9%、90.8%,合理采样密度分别为1 hm² 0.044个、0.038个、0.055个。

在地形复杂的兴国县丘陵山区,由于气候、母质、生物、时间、人类耕种等因素的影响,耕地土壤养分存在空间变异性,而经济、交通、机械化发展使得不同海拔、坡度、土壤侵蚀程度下土壤养分含量存在较大差异。因此,不同尺度、不同地形单元下描述不同土壤养分空间变异性所需样点数不一,而相同样点数下不同采样方式的土壤养分空间建模精度也不一。总之,在研究土壤养分空间变异和合理采样数时应充分考虑研究区域地形地貌、对象、采样方式、建模方法甚至时间尺度等因素,这样才能在提高工作效率和节约成本的同时提高精度。

参考文献:

- [1] FRANKLIN J. Predictive soil mapping: a review[J]. Progress in Physical Geography, 2003, 27(2): 171-197.
- [2] 姚荣江,杨劲松,姜 龙.黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究[J].水土保持学报, 2006, 20(6): 89-94.
- [3] 张志霞,许明祥,刘 京,等.黄土高原不同地貌区土壤有机碳空间变异与合理取样数研究[J].自然资源学报, 2014, 29(7): 2103-2113.
- [4] 赵倩倩,赵庚星,姜怀龙,等.县域土壤养分空间变异特征及合理采样数研究[J].自然资源学报, 2012, 27(8): 1382-1391.
- [5] 阎波杰,潘瑜春,赵春江.区域土壤重金属空间变异及合理采样数确定[J].农业工程学报, 2008, 24(S2): 260-264.
- [6] 史文娇,杜正平,宋印军,等.基于多重网格求解的土壤属性高精度曲面建模[J].地理研究, 2011, 30(5): 861-870.
- [7] 郭 熙,郭晓敏,谭雪明,等.农田钾素空间变异插值模型研究——以江西省泰和县苏溪养分监测村为例[J].江西农业大学学报(自然科学), 2003, 25(4): 528-531.
- [8] SHI W, LIU J, DU Z, et al. Surface modelling of soil pH[J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 113-119.
- [9] 张素梅,王宗明,张 柏,等.利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J].农业工程学报, 2010, 26(5): 188-194.
- [10] 沈掌泉,周 斌,孔繁胜,等.应用广义回归神经网络进行土壤空间变异研究[J].土壤学报, 2004, 41(3): 471-475.

- [11] 麻万诸,吕晓男,陈晓佳.“3S”技术在土壤养分空间变异研究中的应用[J].农业网络信息,2009(7):13-16.
- [12] 王珂,沈掌泉,JOHNS B,等.精确农业田间土壤空间变异与采样方式研究[J].农业工程学报,2001,20(3):33-36.
- [13] 王晋民,王俊鹏,胡月明,等.栗钙土农田土壤养分空间变异特性及采样方法研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):59-63.
- [14] 雷能忠,王心源,蒋锦刚,等.不同地形与取样数的 Kriging 插值精度对比研究——以舒城县土壤全氮空间分异为例[J].水文地质工程地质,2008,35(5):86-91.
- [15] 于雷,魏东,王惠霞,等.江汉平原县域尺度土壤有机质空间变异特征与合理采样数研究[J].自然资源学报,2016,31(5):855-863.
- [16] 张佳佳,傅伟军,杜群,等.地形和采样数量对浙江省森林凋落物碳密度插值精度的影响[J].应用生态学报,2013,24(8):2241-2247.
- [17] 张忠启,于法展,于东升,等.红壤区土壤有机碳时间变异及合理采样点数量研究[J].土壤学报,2016,53(4):891-900.
- [18] 史舟,李艳.地统计学在土壤学中的应用[M].北京:中国农业出版社,2006:69-70.
- [19] 刘东海,李双来,陈云峰,等.武汉市汉南区土壤有机质和养分时空变异研究[J].中国土壤与肥料,2014(4):24-28.
- [20] 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[J].应用生态学报,2000,11(4):557-563.

(责任编辑:张震林)