

基于地形单元的土壤有机质空间变异研究*

黄 魏 韩宗伟 罗 云 张春弟

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 为克服传统地形分类方法中仅依据单一指标(如高程)的缺点,以钟祥市土壤有机质空间分布为例,综合由30 m精度数字高程模型生成的地形因子,依据其在不同地形条件下的层次组合规律构建地形分类规则,精确地划分为13种典型地形单元,并运用普通克里金法对不同地形单元内的土壤样本插值,获得相应区域的土壤有机质空间分布。通过组合各地形范围内的结果,以获取蕴含地形因素影响的有机质空间分布。研究发现,地形起伏较大的地形单元的预测精度与全局预测结果精度相似度达0.75,而地势平缓区域内的预测精度大幅度提升,比全局预测结果精度提升了16.39%,因此基于地形单元的空间预测可以精确有效地获取土壤有机质空间特征。利用地形分区获取较高精度的有机质空间分布,进一步探讨了有机质地统计学研究中地形的协同影响。

关键词: 地形单元 土壤有机质 地统计 空间变异

中图分类号: S159 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0161-07

Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Topographic Unit

Huang Wei Han Zongwei Luo Yun Zhang Chundi

(College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The spatial distribution of soil organic matter (SOM) has intimate connection with topography, but the synergy effect of topography for SOM spatial redistribution was frequently ignored in the study of SOM by traditional geostatistics. In order to investigate the influence of different topography on the spatial distribution of SOM, the method of SOM spatial interpolation based on topographic unit was proposed. Firstly, the terrain factors such as slope, aspect, topographic wetness index and topographic position index were calculated from the digital elevation data (30 m × 30 m). Secondly, the topographic units were precisely divided into 13 different classical types more subtly by integrating the terrain factors, which effectively avoided the traditional terrain classification method that only based on elevation data. The regions were divided, which was based on terrain classification rules formed by the distribution of terrain factors in different landforms. Thirdly, soil samples were collected in different topographic types, and the distribution of SOM for each sample set in different topographic units was generated by ordinary Kriging. Then, the corresponding results of interpolation for each sample set were segmented based on topographic unit region, and combining the result in each region, the spatial distribution of SOM based on topographic unit was obtained. Finally, verification and comparison with the accuracy of each SOM distributions were performed, which were obtained by using topography based geostatistics and traditional global geostatistics, respectively. The results of experiment for researching the SOM distribution in Zhongxiang City showed that higher accurate and efficacious spatial layout of SOM can be acquired by geostatistics based on topographic units, especially in the gently topography region, the precision was increased by 16.39%. The SOM prediction accuracy in the rest of the terrain unit was similar to the global prediction accuracy with Pearson correlation coefficient of 0.75. Using geomorphic zoning to obtain

收稿日期: 2014-06-12 修回日期: 2014-07-25

* 国家自然科学基金资助项目(41171174)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102401)

作者简介: 黄魏,副教授,博士,主要从事精细数字土壤制图和资源环境信息工程研究, E-mail: ccan@mail.hzau.edu.cn

higher accuracy for spatial distribution of SOM, and the influence of topography was considered in the study of SOM geostatistics.

Key words: Topographic unit Soil organic matter Geostatistics Spatial variability

引言

有机质是土壤重要的组成成分和肥力特征,明确土壤有机质的空间变异,可为挖掘有机质对土壤质量^[1]、水土保持^[2-3]、土壤肥力^[4]及农林业可持续发展^[5]等方面的作用提供依据,因此,开展土壤有机质空间分布研究具有十分重要的意义。土壤是一个时空连续的变异体,具有高度的空间异质性,不论在大尺度还是小尺度上,土壤的空间异质性均存在^[6],作为土壤成分的有机质蕴含同样的特征,已经有学者就有机质空间分布开展了研究^[7-9]。陈锋锐等^[10]应用多元地统计方法研究了四川省西南部凉山彝族自治州正南端土壤有机质空间分布;张世文等^[11]以地形指数和分类变量作为辅助信息预测了北京市密云县土壤有机质空间格局;李启全等^[12]基于神经网络模型和地统计学方法探讨了四川盆地三台县土壤养分空间分布。由现存大量研究成果可知,地统计学理论在目前土壤有机质空间分布研究中占有重要的地位。

已有研究表明土壤有机质空间变异会受地貌类型、土壤类型、耕作管理、土地利用方式等各种因素的影响^[13-14],而基于地统计学研究方法中,常忽略这些因素对有机质质量比空间再分配的协同作用。对于其中地貌类型对有机质空间分布的影响,已有研究者开展了系列的研究。付晓婷^[15]提出了基于地貌分区的土壤养分空间变异性分析方法,但其地貌分区的划分标准并不明晰,且地貌类型的尺度较大,这是传统地形分类中仅依据单一指标(如高程)划分而存在的问题。对于地貌分区,韦金丽等^[16]采用DEM高程分级、坡度分级相结合的方式,该方法并不十分精确,但为运用多维量化指标划分地形单元提供了依据。田瑞云等^[17]提出的基于DEM的地形单元多样性指数概念和算法研究中,综合了高程、坡度、坡位、坡向、汇流量和水域信息等地形要素,明确制订了地形单元的分类标准,划分出更加精细的典型地形单元。精确合理的划分地形单元可为分地形研究土壤属性空间分布奠定基础。

为进一步探讨地形对有机质空间分布再分配的协同影响,以更全面、更科学的角度研究土壤有机质空间分布,本文选取地貌类型对土壤有机质空间变异的影响为研究点,提出基于地形单元的土壤有机

质空间变异研究方法,为利用地形分区获取较高精度的有机质空间分布研究提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况及数据来源

研究区是湖北省钟祥市,如图1所示,地理位置为东经112°07′~113°00′,北纬30°42′~31°36′,处于中纬度地区,属北亚热带季风气候区,年平均气温15.9℃,多年平均降水量为1496.8 mm。该市地处湖北中部、汉江中游,属鄂中丘陵区。汉江将钟祥市分为东、西两部分,在东西方向上,两侧地貌由中部向两侧依次为平原、丘陵、山地,呈马鞍形地势。成土母质以第四纪粘土、近代河流冲积物为主。共有水稻土、潮土、黄棕壤、石灰(岩)土、紫色土、草甸土等6个土类、14个亚类、44个土属、241个土种^[18]。

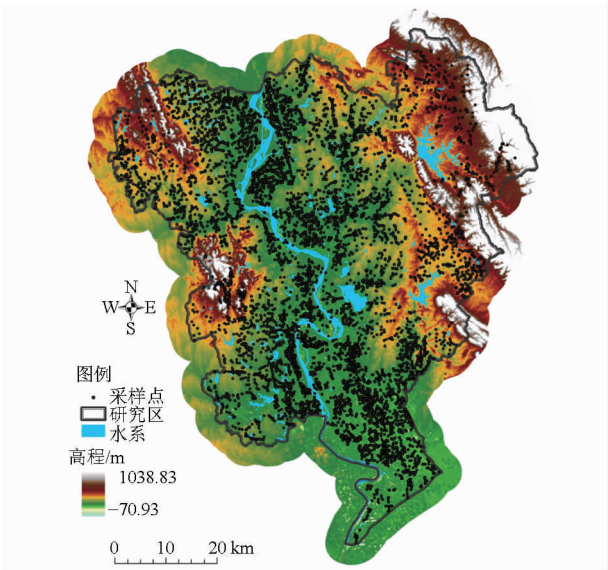


图1 研究区示意图

Fig.1 Map of study area

图1中6485个采样点的采样时间是2005—2006年间,采样方法为随机采样,各种地形下采样间距不均匀,但各地形和土壤类型上均布置了采样点。山区内部分区域由于无法抵达或GPS信号不稳定等因素而未采集土壤样本;大口国家森林公园位于钟祥市东部,为不破坏公园内的生态环境,该保护区内没有采样。精度为30 m的数字高程模型(Digital elevation model, DEM)由国际科学数据共享平台(<http://datamirror.csdb.cn/admin/datademMain.jsp>)提供;研究区边界是比例尺1:50000的2009年钟祥市行政区划边界。土壤有

机质质量比采用重铬酸钾-硫酸溶液-油浴法测定(参照 NY/T 1121.6—2006)。

1.2 地形单元划分与分区样本设计

土壤属性的空间分布规律研究中,地形因子代表的空间特征及环境效应不尽相同^[19],因而常作为综合指标衡量土壤环境的影响^[20-22]。本研究中选择坡度(β)、坡向(α)、地形湿度指数(Topographic wetness index, TWI)、地形位置指数(Topographic position index, TPI)等 4 个地形因子,利用 30 m 精度高程数据,在 ArcGIS 9.3 地理信息系统平台中分析得到,其中地形位置指数运用田瑞云等提出的反距离加权法^[17]修正。地形因子在各种地形条件下分布规律不同,依据地形因子的这一特征,可将研究区划分为不同的地形单元。

自然界中地形单元类型复杂多样,基于代表性、全面性、可行性原则,依据研究区实际情况选取 13 种地形类型,在 ArcGIS 9.3 的栅格计算器工具中按照图 1 中地形因子组合情况划分出目标单元类型。其中,依据王红提出的坡度分级标准^[23]设置坡度分级指标;参照钟祥市山脉走向和光照方向将坡向划分为南/西南、北/东北 2 类;参考 Weiss 对 TPI 的分级标准^[24]提出 TPI 值的分级指标,其中 SD 代表 TPI 的标准偏差;根据 TWI 的算法原理、Palmer 干旱指数的分级标准^[25-26]和实际情况,提出以 2.5 为界的 TWI 分级指标;以上分类规则中未涉及的区域归类为低洼地形单元。

结合实地数据将研究区中水域剔除,然后依照图 2 中的分类规则将钟祥市划分为 13 种地形单元,结果如图 3 所示。由图 3 可知,地形单元将钟祥市划分成 14 个分区,结合实地数据比较地形单元划分结果,确认图 2 中未涉及的其他区域是水域或低洼地带,且地形单元的分布与实际情况相符。

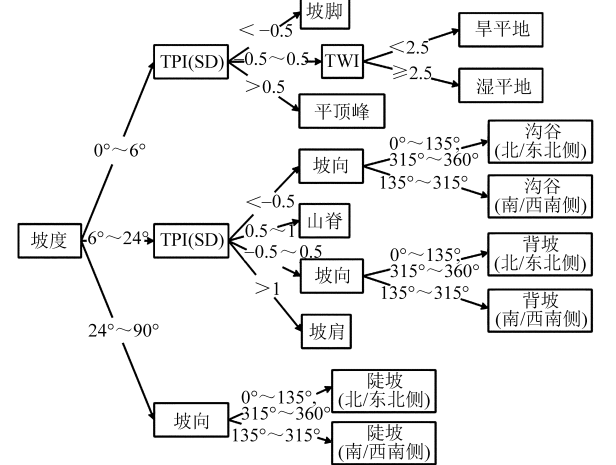


图 2 地形单元划分指标

Fig. 2 Indicators of topographic partition units

依据地形单元分区划分采样点,获取的各地形下采样点集和地形单元统计特征如表 1 所示。由表 1 可知钟祥市辖区内大部分地形为湿平地,其次为旱平地,分布最少的地形是陡坡(南/西南侧);从变程、均值和标准差可知,不同地形下土壤有机质质量比的离散程度相近;由峰度和偏度可知,各地形单元下土壤有机质质量比分布规律差异明显,而各地形条件下具体的有机质空间分布差异还有待使用地统计插值方法和空间自相关分析获取。

将各类地形下的土壤有机质质量比作为观测变量,通过全局自相关方法分析钟祥市不同地形单元内的土壤有机质空间分布特征。各地形单元面积大小不等,且采样数量不同,土壤有机质蕴含的内在方差不稳定性可能不满足空间自相关分析中隐含的数据稳定性假设,从而造成 Moran's I 推断出错误的结果。要素的分布由于采样设计或施加的聚合方案而可能偏离,为消除其影响,进行全局自相关分析时,采用行标准化方法^[27]对土壤有机质数据进行标准化。

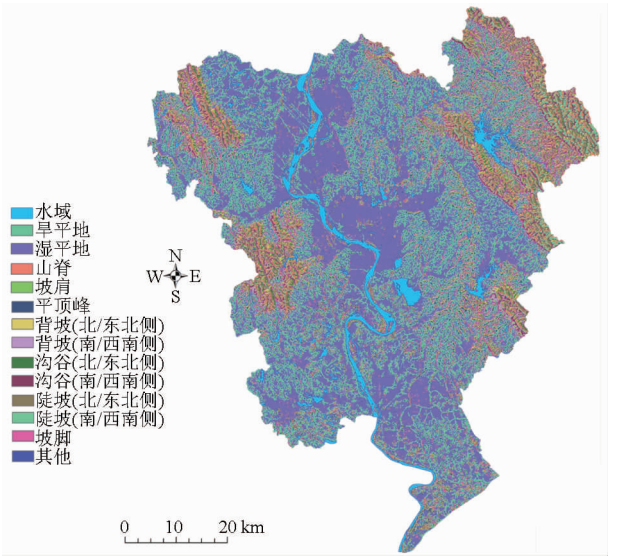


图 3 地形单元分区图

Fig. 3 Topographic partition units map

1.3 基于地形单元的土壤有机质预测

依据地理学第一定律知,具有空间位置属性的因子特征越相近,对应的土壤信息越相似,反之亦然。因此同种地形单元下,地形条件相近,地形因素在空间距离上差异较小,对土壤有机质空间分布的影响规律一致;而对于不同地形单元,地形条件不同,地形因素在空间距离上差异较大,各因素对土壤有机质空间分布的影响程度存在差异^[28]。因此,将全部研究区按照同一规则研究土壤景观关系和土壤养分的空间分布并不妥,为此,可依据地形条件将研究区划分为不同地形单元,单独分析各地形单元内

表 1 地形单元分区内采样点有机质描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistics of soil organic matter (SOM) in each topographic partition unit

地形单元	面积比例/%	样本数	土壤有机质质量比/(g·kg ⁻¹)					峰度	偏度
			最小值	最大值	变程	平均值	标准差		
旱平地	22.69	1 268	5.00	60.00	55.00	26.42	10.10	-0.31	0.37
湿平地	39.62	3 590	5.00	60.00	55.00	24.54	9.61	-0.12	0.48
山脊	4.53	169	6.42	51.50	45.08	24.91	9.93	-0.51	0.43
坡肩	2.45	170	6.70	60.00	53.30	25.72	11.06	0.27	0.74
平顶峰	5.23	154	5.00	60.00	55.00	24.53	9.72	1.11	0.63
背坡a	5.20	176	5.00	60.00	55.00	27.39	11.76	-0.42	0.36
背坡b	3.99	167	5.00	58.90	53.90	26.28	10.14	-0.01	0.47
沟谷a	2.74	127	7.96	60.00	52.04	27.97	11.95	-0.01	0.67
沟谷b	3.58	93	5.00	54.40	49.40	27.34	11.68	-0.62	0.22
陡坡a	1.22	73	7.30	60.00	52.70	26.44	12.07	-0.41	0.48
陡坡b	0.68	99	5.00	60.00	55.00	28.43	11.98	0.40	0.56
坡脚	6.74	302	6.19	60.00	53.81	31.49	11.23	-0.30	0.29
低洼	1.32	97	5.60	59.20	53.60	24.40	9.80	0.99	0.78
整体	100	6 485	5.00	60.00	55.00	25.58	10.20	-0.04	0.51

注:面积比例是地形单元面积与研究区总面积的比值,a表示该地形单元下的北/东北侧,b表示该地形单元下的南/西南侧,下同。

的土壤景观关系和土壤养分的空间分布。传统的有机质空间插值过程中并没有考虑地形对预测结果的影响,而本研究在预测过程中引入地形参数,弥补了地形对最终结果的影响。

首先采用地统计学中使用最普遍的普通克里金方法分别对相同地形单元下的土壤采样点进行空间预测;然后依据已经划分的地形单元范围裁剪对应区域内采样点的预测结果,得到各地形单元下的土壤有机质空间分布图,因此可将相同地形下采样点周围精度最高的预测结果保留,使不同地形下的区域分配给对应地形下的采样点预测;再将不同地形单元下的有机质空间分布图拼接,得到研究区基于地形单元的有机质全局分布图;最后设置验证点,确保每种地形单元下验证点数量至少占该地形单元内采样点个数的5%。运用这些验证点点位上有机质的实测值和预测值,可以探索分地形拼接得到的有机质预测结果和全部采样点普通全局有机质预测结

果的精度。通过对比研究区内不同地形单元下验证点的实测值和预测值的差异,选取均方根误差(Root mean square error, RMSE)和相关系数评价指标,利用这2个指标定量分析2种预测方法的差异和优劣。其中均方根误差衡量预测值同实测值间的偏差,该值越小,则表明预测值越接近实测值,精度越高,反之亦然;相关系数表征预测值与实测值相关关系的密切程度,该指标越接近于1,则表明预测值与实测值间关系越紧密,反之亦然。比较它们的均方根误差和相关系数的差异,开展精度评价,从而验证本研究所提出方法的有效性。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质空间自相关分析

在 ArcGIS 9.3 软件中运用空间统计模块计算13种地形单元内和全区域下土壤有机质的全局空间自相关程度,结果如表2所示。

表 2 各类地形单元分区内有机质全局空间自相关显著性检验

Tab. 2 Significance test for global Moran's I of SOM in each topographic partition unit

	旱平地	湿平地	山脊	坡肩	平顶峰	背坡a	背坡b	沟谷a	沟谷b	陡坡a	陡坡b	坡脚	低洼	整体
Moran's I	0.28	0.24	0.28	0.32	0.17	0.30	0.21	0.33	0.29	0.28	0.20	0.36	0.25	0.34
z 分数	33.79	73.80	8.04	9.53	4.64	8.46	5.99	7.00	4.66	3.80	3.54	13.06	4.30	131.21
p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注:z 分数是标准差的倍数,p 表示概率,z 与 p 相关联,|z| > 1.96 时 p < 0.05,即置信度大于 95%。

各种地形单元下土壤有机质全局 Moran's I 均为正值,p 均小于 0.001,因此可推断县域内各地形单元下的土壤有机质的空间分布不是随机的,而是表现出非常显著的空间聚集性,且不同地形单元下的聚集效应不同,土壤有机质在各类地形单元下存

在非常显著的空间正相关关系,其中有机质在坡脚区域内的空间聚集性最高,在陡坡区域内的空间聚集性最低。由以上分析可知不同地形单元下的土壤有机质空间分布规律不同,为更加精细地研究县域内土壤有机质的空间分布状况,可将研究区依据地

形单元分区,探索不同地形条件下的土壤有机质空间分布规律。

2.2 土壤有机质空间预测结果和分析

采用普通克里金预测方法对不同地形下的土壤有机质进行空间预测,保留各地形单元对应区域内

的土壤有机质空间分布,并将其拼接得到全区域土壤有机质分布,结果如图 4a 所示;而运用全区域采样点空间插值得到的土壤有机质空间分布结果如图 4b所示。

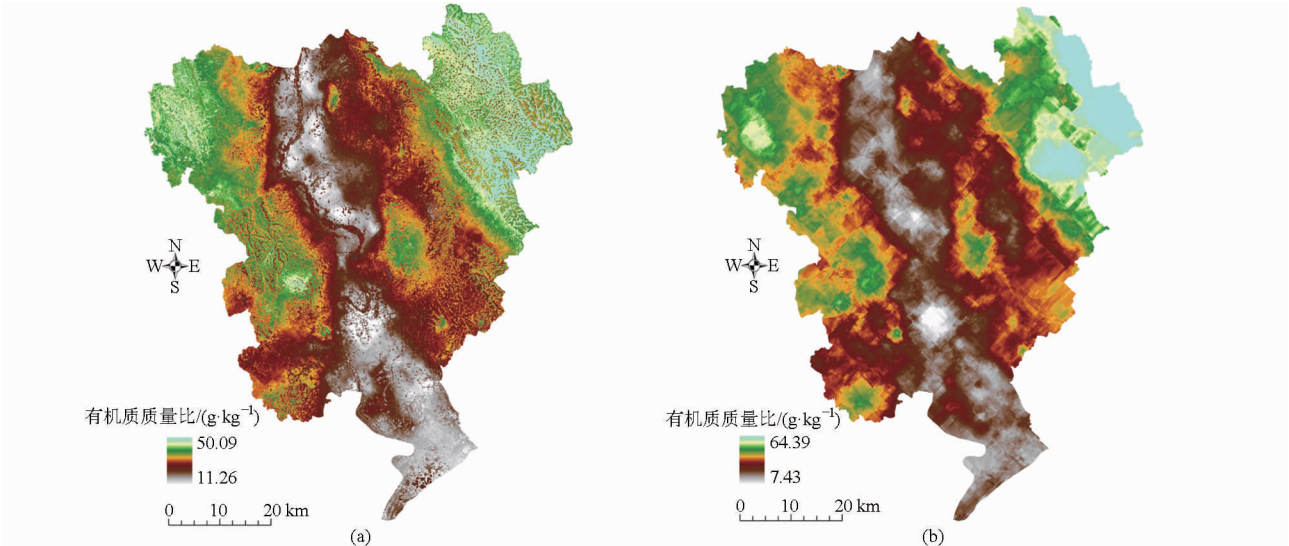


图 4 土壤有机质空间分布
Fig.4 Spatial distribution of SOM
(a) 分地形预测 (b) 全局预测

由图 4 可知,土壤有机质分地形的空间预测结果(图 4a)和全局空间预测结果(图 4b)在整体趋势上一致,都呈现出中部区域内有机质质量比低、东西部两侧区域内高的特征,并且北部区域普遍比南部区域高,而该区域内地形特征是中部为汉江,东北部 and 西北部都有山脉,北部为丘陵,而中部和南部是汉江平原,可见土壤有机质的空间分布与地貌特征相吻合,这也进一步验证了地形与土壤有机质的空间分布存在联系。

局部细节中,2 种预测方法的结果不同:分地形单元的预测结果更加精细,精细程度与地形单元的分布规律一致,边界平滑且为渐变过程,土壤有机质质量比为 11.26 ~ 50.09 g/kg,而普通全局预测结果比较连续,同一土壤有机质质量比的区域较大,边界粗糙且为突变过程,土壤有机质质量比为 7.43 ~ 64.39 g/kg。由以上分析可知,2 种方法的预测结果存在明显差异,通过定性分析难以判定它们的优劣,因此还需利用验证点进行定量分析,用以评价各自的优缺点。

2.3 土壤有机质空间预测精度对比与验证

由 IBM SPSS Statistics 21 计算,得到 2 种预测方法精度的统计结果如表 3 所示。在山脊、坡肩、平顶峰、沟谷(北/东北侧)、低洼 5 种地形单元下,有机质的分地形预测结果优于全局预测结果,由均方根误差可知,精度平均提升了 16.39%,预测值更接近

表 3 土壤有机质空间分布精度检验					
Tab.3 Accuracy test for spatial distribution of SOM					
地形 单元	采样密度/ (点·km ⁻²)	均方根误差/ (g·kg ⁻¹)		相关系数	
		分地形预	全局预	分地形预	全局预
		测值	测值	测值	测值
旱平地	1.27	8.81	8.04	0.61 **	0.67 **
湿平地	2.05	7.46	7.06	0.56 **	0.61 **
山脊	0.85	5.79	6.81	0.92 **	0.86 **
坡肩	1.57	8.66	10.29	0.90 **	0.85 **
平顶峰	0.67	6.55	7.08	0.80 *	0.76 *
背坡a	0.77	11.04	10.45	-0.12	0.08
背坡b	0.95	10.81	9.04	-0.16	0.46
沟谷a	1.05	6.85	7.31	0.86 *	0.85 *
沟谷b	0.59	9.30	8.09	0.56	0.69
陡坡a	1.35	22.27	17.93	-0.02	0.05
陡坡b	3.32	9.08	6.94	0.87	0.88
坡脚	1.02	10.57	8.78	0.51 *	0.68 **
低洼	1.67	5.02	8.01	0.58	-0.01
整体	1.47	8.20	7.65	0.58 **	0.65 **

注: * 表示 $p < 0.05$ 水平上显著相关, * * 表示 $p < 0.01$ 水平上显著相关。

实测值。对于其余地形单元,局部地势起伏较大,分地形预测结果与全局预测结果相比:在均方根误差上,前者平均比后者大 1.51 g/kg,两者的相关性为 0.93,可见 2 种方法预测值同实测值间的偏差存在一定的差异,但相似程度很高;在相关系数上,前者

平均比后者小 0.15,两者的相关性为 0.75,可见 2 种方法预测值与实测值相关关系的密切程度不尽相同,而相似程度依然很高。由此可知在起伏较大的地形单元下,分地形的有机质预测精度与全局的预测精度相似程度较高,这些地形下基于地形单元的土壤有机质空间分布结果与全局预测结果差异不大。

综上所述,在 13 种地形单元中,山脊、坡肩、平顶峰、沟谷(北/东北侧)、低洼地形单元内,分地形预测的土壤有机质空间分布预测精度优于全局预测结果,这些都出现在局部地势较为平缓的区域,如山顶附近和谷底附近,相应区域内的土壤有机质有聚集或者流失的现象,对应有机质质量比相对较高或者较低,对于有机质质量比变程的边缘值预测结果精度相对较高;而其他地形单元下,分地形的有机质预测精度近似于全局的预测精度,相应区域内的地形处于过渡地带,对应的有机质质量比处于其变程范围内的中间值,其变化规律并不明确,使预测值误差较大。无论采用哪种预测方法,结果都存在一定的误差,原因在于用于预测的采样数据数量有限,而采用的普通克里金插值方法只保留了研究区全局变异的整体趋势,而过滤掉了局部细节信息,最终使空间预测精度存在一定的局限性。

3 结 论

(1)在一定精度需求范围内,当研究区范围很大时,可考虑将研究区依照地形单元分区,根据各

范围下采样的复杂程度安排研究进展,在确保各区域研究精度的情况下,对各分区土壤养分的空间分布进行系统的研究,最终合并为全局范围下的成果,而在局部地势较为平缓的地形单元内,选择基于地形单元的土壤有机质空间分布预测方法能够获得更优精度的预测结果。虽然该方法在部分区域内得到的分地形的有机质预测结果与全局预测结果近似,但对于整体而言,前者展示了更详尽的空间细节。

(2)本方法不仅提高了研究土壤有机质空间分布的效率,更为研究土壤有机质空间分布提供了一种可以融合地形因素的方法。

(3)依照地形单元将采样点数据分区,改变了单位区域下的采样点间距,采样密度与均方根误差呈现显著性水平很低的负相关,其相关性在分地形预测下的值和全局预测下的值分别为 -0.03 和 -0.11,而采样密度与相关系数呈现显著性水平很低的正相关,其相关性在分地形预测下的值和全局预测下的值分别为 0.28 和 0.12。这些相关性正负特征与真实情况吻合,当单位面积下的采样数量增多时,获取的该区域下的土壤属性的空间分布就越接近实测值;而由相关性大小可知,采样密度与 2 种方法的预测精度相关性很弱,但仍然存在差异,采样密度对分地形预测精度的影响程度较大,对全局预测精度的影响较小,2 种方法预测精度的变化与采样密度有关,但采样密度并不是影响该研究精度变化的主导因素。

参 考 文 献

1 赵业婷,常庆瑞,李志鹏,等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 140 - 148. Zhao Yeting, Chang Qingrui, Li Zhipeng, et al. Spatial characteristics of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land of Weiwei Tableland Area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 140 - 148. (in Chinese)

2 刘通,梁音,曹龙熹. 县域尺度土壤有机质与土地利用动态耦合关系定位对比研究——以渭北旱塬区长武县为例[J]. 土壤, 2012, 44(4): 652 - 657. Liu Tong, Liang Yin, Cao Longxi. Localization comparison on dynamic coupling relationship between land use change and soil organic matter at county scale—a case of Changwu county in Weihe Arid Plateau region[J]. Soils, 2012, 44(4): 652 - 657. (in Chinese)

3 Marchetti A, Piccini C, Francaviglia R, et al. Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: a key indicator to assess soil degradation status in Central Italy[J]. Pedosphere, 2012, 22(2): 230 - 242

4 赵明松,张甘霖,王德彩,等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 1 - 11. Zhao Mingsong, Zhang Ganlin, Wang Decai, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai alluvial plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 1 - 11. (in Chinese)

5 李忠芳,徐明岗,张会民. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1264 - 1269. Li Zhongfang, Xu Minggang, Zhang Huimin. Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1264 - 1269. (in Chinese)

6 张泽,吕新,吕宁,等. 基于 GIS、RS 的滴灌棉田土壤养分精确管理分区研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 125 - 132. Zhang Ze, Lü Xin, Lü Ning, et al. Defining agricultural management zones using remote sensing and GIS techniques: a case study of drip-irrigated cotton fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 125 - 132. (in Chinese)

7 Kölbl A, Müller-Niggemann C, Schwark L, et al. Spatial distribution of SOM parameters during paddy soil evolution[C] // EGU General Assembly Conference Abstracts, 2010, 12: 2770.

- 8 Li Q Q, Yue T X, Wang C Q, et al. Spatially distributed modeling of soil organic matter across China: an application of artificial neural network approach[J]. CATENA, 2012, 104: 210 – 218.
- 9 Mabit L, Bernard C. Spatial distribution and content of soil organic matter in an agricultural field in eastern Canada, as estimated from geostatistical tools[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(3): 278 – 283.
- 10 陈锋锐, 秦奋, 李熙, 等. 基于多元地统计的土壤有机质含量空间格局反演[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 188 – 194.
Chen Fengrui, Qin Fen, Li Xi, et al. Inversion for spatial distribution of soil organic matter content based on multivariate geostatistics[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 188 – 194. (in Chinese)
- 11 Zhang S W, Huang Y F, Shen C Y, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information[J]. Geoderma, 2012, 171 – 172: 35 – 43.
- 12 李启权, 王昌全, 张文江, 等. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 459 – 466.
Li Qiquan, Wang Changquan, Zhang Wenjiang, et al. Prediction of soil nutrients spatial distribution based on neural network model combined with geostatistics[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 459 – 466. (in Chinese)
- 13 宋莎, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. 土壤, 2011, 43(1): 44 – 49.
Song Sha, Li Tingxuan, Wang Yongdong, et al. Spatial variability of soil organic matter and its influencing factors at county scales[J]. Soils, 2011, 43(1): 44 – 49. (in Chinese)
- 14 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 苏中平原南部土壤有机质空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 83 – 89.
Zhao Mingsong, Zhang Ganlin, Li Decheng, et al. Spatial variability of soil organic matter and factor analysis in the south of middle Jiangsu plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(1): 83 – 89. (in Chinese)
- 15 付晓婷. 基于地貌分区的土壤养分空间变异性分析及采样设计研究——以陕西省蓝田县为例[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- 16 韦金丽, 王国波, 凌子燕. 基于高分辨率 DEM 的地形特征提取与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(1): 33 – 36.
Wei Jinli, Wang Guobo, Ling Ziyang. The extraction and analysis of landform characters based on high-resolution DEM[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(1): 33 – 36. (in Chinese)
- 17 田瑞云, 王玉宽, 傅斌, 等. 基于 DEM 的地形单元多样性指数及其算法[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 121 – 129.
Tian Ruiyun, Wang Yukuan, Fu Bin, et al. DEM-based topographic unit diversity index and its algorithm[J]. Progress in Geography, 2013, 32(1): 121 – 129. (in Chinese)
- 18 鲁明星, 徐辉, 贺立源, 等. 湖北省钟祥市耕地土壤养分时空变化分析[J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(4): 431 – 437.
Lu Mingxing, Xu Hui, He Liyuan, et al. The spatial and temporal changes of the farmland soil fertilities in the Zhongxiang City, Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(4): 431 – 437. (in Chinese)
- 19 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区县域土壤有机质空间分布特征及预测[J]. 地理科学进展, 2006, 25(2): 112 – 122.
Lian Gang, Guo Xudong, Fu Bojie, et al. Spatial variability and prediction of soil organic matter at county scale on the Loess Plateau[J]. Progress in Geography, 2006, 25(2): 112 – 122. (in Chinese)
- 20 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 基于环境相关法的土壤属性空间分布特征研究——以黄土丘陵沟壑区小流域为例[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 554 – 558.
Lian Gang, Guo Xudong, Fu Bojie, et al. Spatial distribution of soil properties in a small catchment of the Loess Plateau based on environmental correlation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(4): 554 – 558. (in Chinese)
- 21 王昌昆, 潘贤章, 周睿, 等. 应用基于 PLSR 的土壤-环境模型预测土壤属性[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 237 – 245.
Wang Changkun, Pan Xianzhang, Zhou Rui, et al. Prediction of soil properties using PLSR-based soil-environment models[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 237 – 245. (in Chinese)
- 22 杨勇, 张楚天, 贺立源. 基于贝叶斯最大熵的多因子空间属性预测新方法[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2013, 39(6): 636 – 644.
Yang Yong, Zhang Chutian, He Liyuan. New multifactor spatial prediction method based on Bayesian maximum entropy[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2013, 39(6): 636 – 644. (in Chinese)
- 23 王红, 王均. 国家基本地理单元数据集的初步研究[J]. 测绘科学, 2004, 29(3): 22 – 25.
Wang Hong, Wang Jun. Preliminary study on specification of basic terrain-unit dataset[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3): 22 – 25. (in Chinese)
- 24 Weiss A D. Topographic position and landforms analysis[R]. San Diego, CA: ESRI User Conference, 2001.
- 25 卫捷, 马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊1): 117 – 124.
Wei Jie, Ma Zhuguo. Comparison of Palmer drought severity index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(Suppl.1): 117 – 124. (in Chinese)
- 26 Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington, DC, USA: Weather Bureau, US Department of Commerce, 1965.
- 27 Anselin L, Syabri I, Kho Y. GeoDa: an introduction to spatial data analysis[J]. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 5 – 22.
- 28 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.
Zhang Sumei, Wang Zongming, Zhang Bai, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 188 – 194. (in Chinese)