

结合土地利用与克里格插值的区域土壤 有机碳空间表征方法

顾成军^{1,2,3}, 史学正¹, 于东升¹

(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; 3. 滁州学院 地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000)

摘要:如何利用有限的土壤采样点准确预测土壤属性一直是研究的热点。基于河北省全国第二次土壤普查数据, 运用方差分析研究了使用土地利用和克里格插值来表征区域表层土壤有机碳空间分布的可行性。结果表明: 土地利用是表层土壤有机碳密度空间分异的一个影响因子, 可以直接使用土地利用来反映表层土壤有机碳密度在空间上的分布和变化。但单一的土地利用对土壤有机碳密度空间分异的反映能力还不是很高, 而土地利用与普通克里格插值结合以后能显著地提高对土壤有机碳空间分异的解释水平。因此区域空间上可以将土地利用与普通克里格插值结合起来表征表层土壤有机碳密度的空间分布。

关键词: 土地利用; 土壤有机碳; 克里格插值; 空间分布

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0039-04

Indicating Method on Spatial Distribution of Regional Soil Organic Carbon by Combining Land Use and Kriging

GU Cheng-jun^{1,2,3}, SHI Xue-zheng¹, YU Dong-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science,

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. Geographic Information and Tourism College, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: How to use limited soil samplings to predicate an accurate spatial distribution of soil properties is always a hot issue. Method of using land use and Kriging to indicate soil organic carbon spatial distribution was explored by variance analysis with the data of Hebei Province of the Second National Soil Survey. The results showed that land use was a factor impacting soil organic carbon spatial variation and could be used to reflect the spatial distribution of soil organic carbon. But the independent reflecting ability of land use to variation of SOC density in the surface was not very high, land use and ordinary Kriging interpolation in combination could significantly increase explanatory strength of SOC spatial variation. Therefore, Kriging interpolation could be combined with land use to indicate the spatial distribution of regional soil organic carbon in the topsoil.

Key words: land use; soil organic carbon; Kriging; spatial distribution

准确表征土壤有机碳的空间分布是土壤有机碳研究的基础。从已有研究来看, 土壤有机碳的空间分布在空间尺度较小且地形条件相对简单的区域可以使用基于地统计分析的克里格插值进行预测^[1], 而在空间尺度较大且环境条件复杂的区域多用土壤有机碳的相关因子来反映^[2]。为进一步提高预测精度, 一

些学者还通过将土壤有机碳相关因子与克里格插值结合的方法来表征土壤有机碳的空间分布^[3]。

区域尺度上不同土地利用的土壤有机碳含量对比研究很多, 大多数研究结果都表明不同土地利用的土壤有机碳存在显著差异^[4-7]。因此土地利用有时候能够反映出土壤有机碳的空间差异, 是区域土壤有机

碳空间分异的一个影响因子。土地利用也被一些学者作为土壤有机碳的空间分异单元用,来表征土壤有机碳的空间分布或进行碳库估算^[2,8]。但不足的是相对于其他相关因子如土壤类型,单一的土地利用对土壤有机碳的空间预测能力还比较低。

目前将土地利用与克里格插值结合起来表征区域土壤有机碳空间分布的研究还不多,是否可以通过普通克里格插值来提高土地利用对土壤有机碳的空间表征精度尚不确定。因此本文选择河北省作为研究区域,基于全国第二次土壤普查数据,对比土地利用与普通克里格插值结合前后对土壤有机碳空间预测精度的差异,分析使用克里格插值来提高土地利用对土壤有机碳空间预测精度的可行性,为区域土壤有机碳空间分布的准确表征提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北省位于北纬 36°03′—42°40′,东经 113°27′—119°50′,总面积 18.6 万 km²。该省气候上属温带大陆性季风气候,大部分地区四季分明。年平均气温 0~13℃,自北向南升高。年平均降水量 300~800 mm,地区分布不均匀。水热状况自东南向西北呈现有规律的变化趋势。全省地势西北高,东南低。有高原、山地和平原三种地貌类型,分别占该省面积的 9.3%,49.5%,41.2%。植被和土地利用上显示出不同地貌单元之间的明显差异性。高原主要是以多年生草本植物为主的温带草原,部分水分较好的地区分布有森林;山地主要是温带落叶阔叶林和灌草丛,宽阔平坦的盆地和谷地多辟为农田;平原主要是耕地,是该省粮棉的主产区。

1.2 资料来源

土地利用空间数据来自中国科学院资源环境科学数据中心提供的 20 世纪 80 年代 1:10 万河北省土地利用数据库 (<http://www.resdc.cn/dataResource/dataResource.asp>)。一级类型为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用地 6 大类。经统计,河北省土地利用主要以耕地、林地和草地为主,分别占 52.71%,19.58%和 18.14%,这三类土地利用共占河北省总面积的 90.43%。为便于讨论,本研究只选择耕地、林地和草地三类土地利用进行分析。由于其它三类土地利用的图斑比较破碎,在表征河北省土壤有机碳空间分布时,先用 ArcGIS 软件对这三类图斑进行了融合处理。土壤剖面数据来自第二次全国土壤普查^[9],包括《中国土种志》、《河北土种志》和河北省地级市土种志,共计典型土壤剖面 851

个。土壤剖面信息包括剖面地理位置、土壤类型、母质类型、剖面描述、土层划分、土层厚度、有机质含量等。土壤剖面的土地利用是根据剖面的土地利用和植被覆盖描述按照耕地、林地和草地三种土地利用类型进行分类。

对于一定深度 $D(\text{cm})$ 的土壤有机碳密度 D_{soc} 的计算公式如下:

$$D_{\text{soc}} = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \delta_i \%) \times \rho_i \times C_i \times T_i}{100} \quad (1)$$

式中: D_{soc} ——厚度为 D 土层的 SOC 密度(kg/m²); n ——土层数; $\delta_i \%$ ——第 i 层 > 2 mm 砾石含量; ρ_i ——第 i 层土壤容重(g/cm³); C_i ——第 i 层 SOC 含量(g/kg),由土壤有机质含量乘以 0.58(Bem-melen 转换系数)得到^[10]; T_i ——第 i 层土层厚度(cm)。由于土地利用主要对表层土壤有机碳密度影响比较大^[11-12],所以本文只估算 0—20 cm 深的土壤有机碳密度。

1.3 研究方法

(1) 土地利用法。对不同土地利用的土壤有机碳密度进行方差分析,如果有显著差异,说明土地利用对土壤有机碳密度有显著影响,可以使用土地利用作为分类变量直接对土壤有机碳密度的空间分异进行预测。土地利用对土壤有机碳空间分异的解释能力根据不同土地利用土壤有机碳密度回归方程的决定系数 R^2 来确定^[13]。

(2) 土地利用与克里格插值结合的方法。先将剖面土壤有机碳密度去除土地利用类型的均值,然后再用普通克里格插值对残差进行进一步预测。空间上土壤有机碳密度最终预测值为土地利用类型均值与残差预测值之和。预测能力通过剖面点实测值与预测值回归分析的决定系数 R^2 判定。普通克里格插值预测的方法和原理可以参考相关文献^[14]。

描述性统计、方差分析和回归分析采用 SPSS 13.0 软件,半方差函数及理论模型拟合利用地统计学软件 GS+ 7.0,克里格插值是在 ArcGIS 9.2 下完成。

2 结果与分析

根据 851 个土壤剖面统计,河北省表层土壤有机碳密度最小值为 0.09 kg/m²,最大值为 16.50 kg/m²,平均土壤有机碳密度 2.44 kg/m²,变异系数 91.2%,为高度变异。

2.1 土地利用表征土壤有机碳空间分布

河北省主要土地利用表层平均土壤有机碳密度见表 1,三种土地利用平均土壤有机碳密度以林地最

大 6.68 kg/m^2 , 其次是草地 2.67 kg/m^2 , 耕地最小为 1.84 kg/m^2 。变异系数为 $56.5\% \sim 85.8\%$, 平均变异系数 68.4% , 均小于河北省土壤有机碳密度变异系数。表 2 方差分析结果表明三种土地利用的平均土壤有机碳密度间有显著差异 ($P < 0.001$), 说明土地利用对土壤有机碳密度有显著影响, 是土壤有机碳密度空间分异的一个影响因子, 因此土地利用能够反映出河北省表层土壤有机碳密度在空间上的分布和变化。

土地利用表征的河北省土壤有机碳密度空间分布如图 1a 所示。从图 1a 可以看出河北省表层土壤有机碳密度空间分布的总体趋势是西北部主要是林地和草地, 土壤有机碳密度较高, 而东南部主要是耕

地, 土壤有机碳密度较低。回归分析表明土地利用能够解释剖面土壤有机碳密度空间分异的 28.2% ($P < 0.001$)。

表 1 河北省主要土地利用的土壤有机碳密度统计

土地利用	剖面数	最小值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	最大值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	平均值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	标准偏差/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	变异系数/%
耕地	508	0.13	11.82	1.84	1.04	56.5
林地	55	0.15	16.50	6.68	4.21	63.0
草地	288	0.09	13.65	2.67	2.29	85.8

表 2 不同土地利用土壤有机碳密度的方差分析

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F	P
组间	1184.98	2	592.49	166.66	.000
组内	3014.67	848	3.55		
总和	4199.65	850			

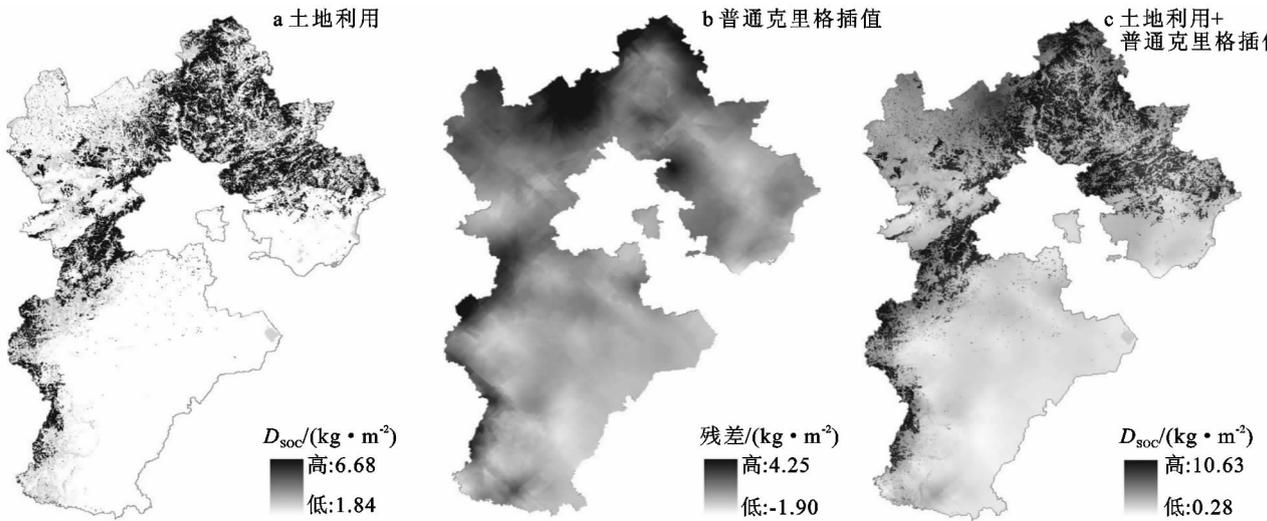


图 1 不同方法表征的河北省土壤有机碳密度空间分布

2.2 土地利用与克里格插值结合表征土壤有机碳空间分布

对剖面土壤有机碳密度去除土地利用均值后的残差进行 K-S 检验, 结果为正态分布。残差半方差拟合模型及参数见表 3, 拟合模型为指数模型, 决定系数 R^2 为 0.705, 模型拟合结果较好。模型的块金方差占基台方差的 50% , 属于中等程度的空间自相关,

表 3 土壤有机碳密度残差半方差函数拟合模型参数

模型	块金常数(C_0)	基台值($C_0 + C$)	$C/(C_0 + C)$	变程/m	决定系数	残差
指数模型	1.69	3.39	0.50	53900	0.705	1.620

将土地利用表征的土壤有机碳密度空间分布与普通克里格插值预测的残差空间分布进行叠加, 如图 1c 所示。与土地利用表征的河北省土壤有机碳密度空间分布图 1a 相比, 土地利用与普通克里格插值结合不仅能够反映出土壤有机碳密度不同土地利用之间的差异, 而且能够反映出同一土地利用内土壤有机碳密度的空间分异, 因此要比单独使用土地利用表征的土壤有机碳密度的空间分布效果要好。回归分析

因此可以使用普通克里格插值对残差进行空间预测, 结果如图 1b 所示。从预测结果来, 河北省西北部表层土壤有机碳密度的残差空间分布值较高, 而东南部残差的分布值相对较低。说明根据土地利用来预测河北省土壤有机碳密度的空间分布时, 在西北部, 对土壤有机碳密度的估计值总体上要低于实际值, 而东南部总体上会高估土壤有机碳密度值。

表明, 土地利用与普通克里格插值结合能够解释剖面土壤有机碳密度空间分异的 43.0% ($P < 0.001$)。

3 讨论

在土壤有机碳的各相关因子中, 以土壤类型尤其是低级土壤分类对土壤有机碳空间分异的反映能力较好, 碳库估算也多以土壤类型作为土壤有机碳的基本空间分异单元进行估算^[15-16]。由于土壤有机碳作

为碳源或碳汇可能影响全球气候,所以有必要去量化土壤有机碳的变化^[17]。而土地利用是影响土壤有机碳含量高低的一个重要因子,当土地利用发生改变以后,土壤有机碳含量会随之发生变化^[18]。目前,随着遥感技术的发展,土地利用的空间变化能够通过遥感数字影像快速获取,而且土地利用的类别往往比较少。因此相对于其它相关因子例如土壤类型等,以土地利用表征土壤有机碳的空间分布或进行制图不仅方便快捷,还可以通过不同时期土地利用的对比来预测土壤有机碳的动态变化。

目前很多的研究也表明了土地利用对区域土壤有机碳空间分异有很好的解释能力,是区域土壤有机碳空间分异的一个重要影响因子。例如 Bell 等^[2]对英国纽卡斯尔南部(55 km²)的研究表明,土地利用对土壤有机碳空间预测能力能达到 44%。但在较大的空间区域,土地利用对土壤有机碳空间分异的解释能力相对较差,例如张忠启^[19]对江西余江县的研究表明土地利用只能独立解释土壤有机碳含量空间变异的 32.3%,本研究中土地利用对河北省土壤有机碳的空间变异解释能力仅为 28.2%,同一土地利用类型内还存在较大的空间变异,平均变异系数达到 68.4%(表 1)。而且与常用的土壤有机碳相关因子如土壤类型相比较,土地利用对土壤有机碳空间分异的解释能力往往不如低级土壤分类高。例如 Bell 等^[2]的研究表明土系对土壤有机碳的空间预测能力为 48%,张忠启^[19]在江西余江县研究表明土属能够解释土壤有机碳空间分异的 41.4%,都要高于相同区域土地利用对土壤有机碳空间分异的解释能力。因此对区域土壤有机碳的空间预测,尤其是较大的空间区域,单独使用土地利用效果还不是很好,有必要在土地利用的基础上,进一步提高土壤有机碳的空间预测精度。

将土地利用与其它相关因子结合无疑是提高预测精度的一种方法,但这需要获取其它相关因子的资料。而本研究将土地利用与克里格插值结合,不仅不需要获取其它的空间数据和属性数据,还能将土壤有机碳密度空间分异的解释程度显著提高到 43.0%,在精度上与张忠启和 Bell 等研究的低级土壤分类土属和土系对土壤有机碳空间变异的解释能力也已比较接近^[2,19]。这说明克里格插值能够用来优化土地利用对土壤有机碳的空间预测,是提高区域土壤有机碳空间表征精度的一个有效方法。

4 结论

河北省主要的三个土地利用耕地、林地和草地表

层土壤有机碳密度之间具有显著差异($P < 0.001$),说明土地利用是表层土壤有机碳密度空间分异的一个影响因子。但土地利用仅能预测河北省表层土壤有机碳密度空间分异的 28.2%,而土地利用与普通克里格插值结合以后能将对土壤有机碳密度空间分异的预测能力显著提高到 43.0%。因此区域空间上可以在土地利用的基础上再结合普通克里格插值来优化表层土壤有机碳密度的空间表征。

参考文献:

- [1] 申广荣,葛晓焯,黄秀梅. 上海崇明岛表层土壤有机碳密度的空间分布特征及碳储量估算[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2011,29(6):61-66.
- [2] Bell M J, Worrall F. Estimating a region's soil organic carbon baseline: The undervalued role of land-management[J]. Geoderma,2009,152(1/2):74-84.
- [3] 赵永存,史学正,于东升,等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J]. 土壤学报,2005,42(3):379-385.
- [4] Chaplot V, Bouahom B, Valentin C. Soil organic carbon stocks in Laos: spatial variations and controlling factors [J]. Global Change Biology,2010,16(4):1380-1393.
- [5] White II D A, Welty-Bernard A, Rasmussen C, et al. Vegetation controls on soil organic carbon dynamics in an arid, hyperthermic ecosystem[J]. Geoderma,2009,150(1):214-223.
- [6] Zhang M, Zhang X K, Liang W J, et al. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China [M]. Pedosphere,2011,21(5):615-620.
- [7] Chiti T, Gardin L, Perugini L, et al. Soil organic carbon stock assessment for the different cropland land uses in Italy[J]. Biology and Fertility of Soils,2012,48(1):9-17.
- [8] 徐小明. 通榆县土壤有机碳储量估算及时空分布研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
- [9] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第四卷)[M]. 北京:中国农业出版社,1995.
- [10] 文启孝. 土壤有机质研究方法[M]. 北京:农业出版社,1984.
- [11] Cheng H H, Kimble J M. Characterization of soil organic carbon pools[M]//Lal R, Kimble J M, Follett R F, et al. Assessment Methods for Soil Carbon. London Lewis,2001:117-129.
- [12] Kimble J M, Grossman R B, Samson-Liebiog S E. Methodology for sampling and preparation for soil carbon determinations[M]//Lal R, Kimble J M, Follett R F, et al. Assessment Methods for Soil Carbon. London: Lewis,2001:15-29.

单施氮肥的硝态氮累积率相当于当年施肥的56.23%残留于土壤中, NP相当于32.01%, M仅相当于5%。配施有机肥是减少土壤硝态氮累积率的有效途径, NPM累积量比NP减少了22.9 kg/hm²。

平衡施肥是保证作物产量, 提高氮肥利用率, 避免过量氮素向环境流失的关键。1997—2006年间的长期试验结果表明, 长期单施氮肥的土壤硝态氮年累积量高达73.5 kg/hm², 氮磷配合施用也高达44.4 kg/hm²。1997年时, M处理在60 cm以下的硝态氮含量与CK、P含量接近, 未发现累积与淋溶现象; 而9 a后, 有机肥处理也出现累积峰。英国洛桑试验站预测厩肥区和化肥区的硝态氮淋溶损失分别为124.25 kg/hm², 表明长期超量施用有机肥造成大量的氮素损失, 依然存在生态风险。但黄土高原地区地下水埋藏深厚, 对地下水污染较小。

参考文献:

- [1] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [2] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [3] Nosengo N. Fertilized to death[J]. *Nature*, 2003, 425: 894-895.
- [4] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, 31(11): 885-89.
- [5] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤氮素淋溶的影响[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 114-116.
- [6] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, (2): 80-87.
- [7] 彭琳, 彭祥林, 卢宗凡. 娄土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的培肥增产作用[J]. *土壤学报*, 1981, 18(3): 212-222.
- [8] 郭胜利, 吴金水, 郝明德, 等. 长期施肥对NO₃-N深层积累和土壤剖面中水分分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 75-78.
- [9] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 23-26.
- [10] 刘晓宏, 田梅霞, 郝明德, 等. 黄土旱塬长期轮作施肥土壤剖面硝态氮的分布与累积[J]. *土壤肥料*, 2001(1): 9-12.
- [11] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [12] Yang S M, Malhi S, Li F M, et al. Long-term effects of manure and fertilization on soil organic matter and quality parameters of a calcareous soil in Northwestern China[J]. *Plant and Soil Sci.*, 2007, 170(2): 234-243.
- [13] Macdonald A J, Poulton P R, Jenkinson D S. The fate of residual 15N labelled fertilizer in arable soil: its availability to subsequent crops and retention in soil[J]. *Plant and Soil*, 2002, 242(1): 123-12738.
- [14] 李世清, 李生秀. 旱地农田生态系统氮肥利用率的评价[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(1): 76-81.
- [15] 党廷辉, 高长青, 彭琳, 等. 长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 61-64, 103.
- [16] 党廷辉, 郭胜利, 郝明德. 黄土旱塬长期施肥下硝态氮深层累积的定量研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(3): 58-60.
- [17] Stolt M H, Drohan P J, Richardson M J. Insights and approaches for mapping soil organic carbon as a dynamic soil property[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(5): 1685-1689.
- [18] Jeny H, Raychaudhuri S P. Effect of Climate and Cultivation on Nitrogen and Organic Matter Reserves in Indian Soils[M]. *Indian Council of Agricultural Research, New Delhi*, 1960.
- [19] 张忠启. 样点布置模式及密度对揭示土壤有机碳空间变异的影响[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2010.

(上接第42页)

- [13] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. *数理医药学杂志*, 2006, 19(1): 51-53.
- [14] 范胜龙, 黄炎和, 林金石. 表征土壤有机碳区域分布的优化空间插值模型研究: 以福建省龙海市为例[J]. *水土保持研究*, 2012, 18(6): 1-5.
- [15] 姜小三, 潘剑君, 李学林. 江苏表层土壤有机碳密度和储量估算和空间分布分析[J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 501-503.
- [16] 袁芳, 赵小敏, 乐丽红, 等. 江西省表层土壤有机碳库储量估算与空间分布特征[J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 268-272.