DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.037

杨华蕾, 王晓晴, 张美薇, 等. 多种两步模式的三维制图方式在丘陵区林地土壤有机碳预测中的对比[J].水土保持学报,2024,38(2):351-363. YANG Hualei, WANG Xiaoqing, ZHANG Meiwei, et al. Comparison of different two-step models of three-dimensional mapping approaches for soil organic carbon prediction in hilly woodlands[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):351-363.

多种两步模式的三维制图方式在丘陵区林地 土壤有机碳预测中的对比

杨华蕾¹,王晓晴¹,张美薇¹,郭倩¹,王会利²,曾令涛¹,崔宇培¹,孙孝林¹ (1.中山大学地理科学与规划学院,广州 510006;2.广西壮族自治区林业科学研究院,南宁 530002)

摘 要:[目的]为了探讨多种两步模式三维制图方法的准确度影响因素及其规律。[方法]以华南典型丘陵区 1 个面积约 5 km²的林场内土壤有机碳为研究对象,分别使用样条函数、指数函数和幂函数作为深度函数,普通克里格和随机森林作为水平制图方法,以及两步模式的 2 种不同制图形式(称为形式 A 和 B),进行土壤有机碳含量的三维预测制图,并探究不同的深度函数、水平制图方法或制图形式对两步模式三维制图结果的影响规律。[结果](1)深度函数在很大程度上决定制图结果在垂直和水平方向上的变异,表现在制图结果的变异在 3 个深度函数之间差异较大,其中指数函数上的变异最大,幂函数上最弱,而水平制图方法(普通克里格与随机森林)对制图结果的垂直变异影响不大,但对表层的空间变异影响较大;(2)样条函数由于模拟的深度曲线与实测点吻合得最好,因而准确度最好,表现在基于样条函数的三维制图一致性相关系数(CCC)为 0.72~0.75,均高于同种制图形式下的其他函数(CCC 为 0.64~0.74),而水平制图方法中普通克里格的制图效果好于随机森林,表现在前者的 CCC 为 0.67~0.75,后者的 CCC 为 0.64~0.72;(3)两步模式的 2 种制图形式对准确度的影响较小,仅在底层的准确度上表现出形式 A(即水平预测制图深度函数模拟值)好于形式 B(即水平预测制图深度函数参数);(4)所有制图方式中,普通克里格与样条函数相结合的制图形式 A 的准确度最高,决定系数(R²)达 0.76,一致性相关系数(CCC)为 0.75,均方根误差(RMSE)为 3.50 g/kg。[结论]在两步模式的三维土壤制图中,首先应考虑样条函数作为深度函数,其次依据研究区的景观条件和样本量,考虑水平制图方法,最后,尽量采用两步模式的第一种制图形式。

关键词:三维制图;土壤有机碳;深度函数;两步模式

中图分类号:K903

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)02-0351-13

Comparison of Different Two-Step Models of Three-Dimensional Mapping Approaches for Soil Organic Carbon Prediction in Hilly Woodlands

YANG Hualei¹, WANG Xiaoqing¹, ZHANG Meiwei¹, GUO Qian¹, WANG Huili²,

ZENG Lingtao¹, CUI Yupei¹, SUN Xiaolin¹

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China)

Abstract: [Objective] In order to investigate the influencing factors and variation rules of accuracy of various two-step models of 3D mapping methods. [Methods] Soil organic carbon in a forest with an area of about 5 km² in a typical hilly region of South China was mapped. Spline functions, exponential functions and power functions were used as depth functions, ordinary kriging and random forest were used as horizontal mapping methods and two different mapping forms (called forms A and B) were used. The 3D prediction mapping of soil organic carbon was carried out, and the influence of different depth functions, horizontal mapping methods and mapping forms on the 3D mapping results of two-step model was explored. [Results] (1) The depth function largely determined the variation of mapping results in vertical and horizontal directions, which

收稿日期:2023-10-17

修回日期:2023-11-10

录用日期:2023-12-16

网络首发日期(www.cnki.net):2024-03-06

资助项目:国家自然科学基金项目(42071062,41771246)

第一作者:杨华蕾(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事数字土壤制图研究。E-mail: yanghlei@mail2.sysu.edu.cn 通信作者:孙孝林(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事数字土壤制图研究。E-mial;sxiaolin@mail.sysu.edu.cn 352 水土保持学报 第 38 卷

showed that the variation of the mapping results was significantly different among the three depth functions. Exponential function had the largest variation and power function had the weakest variation, while horizontal mapping methods (ie. ordinary kriging and random forest) had little influence on the vertical variation of mapping results. However, the spatial variation of surface layer was greatly affected by the horizontal mapping methods. (2) The accuracy of spline function was the best because the simulated depth curve was in the best agreement with the measured values. The consistency correlation coefficients (CCC) of the 3D mapping based on the spline function were 0.72 and 0.75, which were higher than the other functions in the same form of 3D mapping (CCC were between 0.64 and 0.74). For the horizontal mapping methods, the accuracy of the ordinary kriging was better than that of the random forest, the CCC of the former was between 0.67 and 0.75, the latter was between 0.64 and 0.72; (3) The two mapping forms of the two-step model had little influence on accuracy. Only in the case of prediction for bottom layer, form A (i.e., horizontally mapping simulated walues of a depth function was better than form B (i.e., simulating parameters of a depth function).(4) Among all 3D mapping methods, the form A, with ordinary kriging and spline functions, had the highest accuracy, generating coefficient of determination (R^2) of 0.76, CCC of 0.75, and root mean square error (RMSE) of 3.50 g/kg. [Conclusion] In the two-step model of 3D soil mapping, firstly, the spline function should be considered as the depth function. Secondly, the horizontal mapping method should be considered according to the landscape conditions and sample size. Finally, the first mapping form of the two-step model should be adopted as far as possible.

Keywords: 3D mapping; soil organic carbon; depth functions; two-step model

Received: 2023-10-17 Revised: 2023-11-10 Accepted: 2023-12-16 Online (www.cnki.net): 2024-03-06

土壤是空间上的连续三维实体,不仅其表层对土 壤整体的性质和功能有重要影响,其下层也有重要影 响。例如,BATJES[1]发现,深度在 20 cm 以下的土 壤有机碳储量占 0-100 cm 深度土壤的 68%,无机 碳储量占23%,表明下层土壤中的碳储量对土壤肥 力及气候变化的影响不容忽视。为此,大量研究[2-9] 提出多种三维制图方法对土壤整体进行三维预测和 制图。这些方法可以归纳为三维地统计模式和两步 模式。前者虽然能够同时考虑土壤在水平和垂直方 向上的变异,但是模型比较复杂,难以操作,应用较 少。后者能够融合各种数学模型和机器学习方法,操 作简单,应用十分广泛。同时,一些研究结果[10-13]表 明,两步模式中主要用到的深度函数能更具体地反映 出土壤性质的垂直变异,准确性较高,尤其是在样本 量较少的情况下。例如,VERONESI等[14]在三维制 图土壤圆锥阻力(cone-index)时发现,三维普通克 里格方法在使用90%和50%的样本数时,均方根偏 差(RMSD)分别为 0.54 和 0.57;同样的情况下,多项 式与普通克里格结合的两步模式的 RMSD 分别为 0.47和 0.53。

两步模式三维预测制图模式根据水平制图对象,即深度函数模拟的土壤性质或深度函数的参数,又分为2种不同的制图形式,在本文中分别称为形式 A

和 B。目前,这 2 种形式的应用都比较多。例如,MA-LONE等[2-3]先拟合等面积样条深度函数,再构建函数参数的神经网络模型,预测土壤碳储量和有效水分在垂直和水平方向上的变异及三维制图; ADHIKARI等[11]使用等面积二次样条对 1958 年丹麦土壤剖面(最深 2 m)的质地进行了建模,并使用 Cubist 数据挖掘工具通过回归规则预测了 6 个标准土壤深度的黏土、淤泥、细砂和粗砂含量; LIU等[13] 利用线性函数和幂函数组合形成连续的深度函数模型,模拟从表层至底层土壤有机质的变化,然后通过环境相似度方法对深度函数的参数进行空间插值并发现这种制图方式有利于解释土壤与环境之间的关系。

两步模式不仅具有以上 2 种不同的制图形式,且 采用的深度函数或水平制图方法(如地统计、机器学习 等)也各式各样,从而形成多种多样的两步模式三维预 测制图方式。现阶段,大量研究[14-18]的主要目的是开 发利用不同的深度函数、不同的地统计或机器学习方 法来建立这些三维预测制图方式,或是将其中的一种 方式与三维地统计模式进行比较。截至目前,很少有 研究对利用不同深度函数、不同水平制图方法、不同制 图形式的多种两步模式三维预测制图方式进行比较, 从而分析不同方式的准确性,进而探讨不同深度函数、 水平制图方法、制图形式对制图准确性的影响。 为此,本文以广西南宁国有高峰林场内的1个林地为研究区,采集111个土壤剖面样品,测定土壤有机碳,再使用3种常用的深度函数(即样条函数、指数函数、幂函数)和2种水平制图方法(即普通克里格和随机森林)及2种两步模式的制图形式,构建多种两步模式三维制图方式。通过对土壤有机碳进行小区域的三维预测制图,比较不同方式下的制图准确性,进而分析不同深度函数、水平制图方式及两步模式的制图形式对制图结果的影响,为未来的三维土壤制图提供参考依据,以便于土壤调查制图根据实际情况筛选出最优组合,得到准确性较好的三维土壤制图方式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区南宁市高峰林场林业示范基地 $(22^{\circ}57'08''-22^{\circ}59'19''N,108^{\circ}20'58''-108^{\circ}21'56''E)$,南北相距最大约 4.01 km,东西相距最大约 1.84 km,总面积约 5.52 km² (图 1)。该地区为典型丘陵地形和亚热带湿润季风气候,高程 $130\sim380$ m,年平均气温 21.6 \mathbb{C} ,年平均降水量 1 300 mm。研究区的土壤为古生代泥岩、泥质页岩、砂页岩等沉积岩系上发育形成的赤红壤。历年以来,本区域一直用作林地,自本世纪初,主要种植桉树[19]。

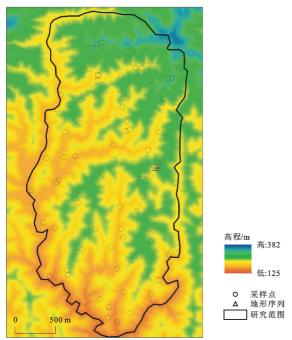


图 1 研究区的数字高程模型与土壤样点

Fig. 1 Digital elevation model of the study area and locations of sampling sites

1.2 环境变量

本文采用 Arcgis10.2 软件,以 1:10 000 数字划线 地图为基础,构建研究区 10 m 数字高程模型(图 1)。 从该数字高程模型中,提取出高程(m)、坡度(%)、坡 向(°)、偏北度(°)、偏东度(°)、偏北指数、偏东指数、太阳辐射(kW/m²)、平面曲率、剖面曲率、地形湿度指数等地形因子作为环境变量,用于土壤制图。由于本研究区面积小,气候、母质、植被等相对均一,因而本文的土壤制图仅考虑地形因素,未考虑其他环境因素。

1.3 土壤采样

本研究于 2017 年 10 月 20 日至 12 月 31 日在研究区内利用条件拉丁超立方抽样方法选择 91 个土壤剖面采样点,同时按照地形序列选择 20 个土壤剖面采样点,共 111 个剖面,剖面位置见图 1。条件拉丁超立方抽样以 6 个主要的地形变量为因子,包括高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率和地形湿度指数,将样点随机地分布在所有这些因子的等概率区间内。地形序列样点主要分布在不同等高线的凸起、凹陷、平直等典型位置上。每个剖面挖掘深至母质,并按照土壤的颜色、质地、松紧度、砾石含量及根系等,划分土壤发生层,最后分层取样,共 513 个样品。这些样品经过风干、研磨过筛之后,在实验室中用重铬酸钾氧化法测定有机碳的含量[20]。每个样品的深度值为取样发生层的中间值。

1.4 两步模式方式

1.4.1 深度函数 本研究按照发生层进行划分采样,因此得到的土壤剖面数据在深度上不连续分布。深度函数是用某种函数对土壤性质的垂直分布进行模拟,将不连续的剖面数据用连续的函数表示,从而获得各个深度位置处连续的土壤性质。

当前,两步模式中常用的深度函数主要有样条函数、指数函数和幂函数等。本文对这 3 种函数都进行应用和探讨。样条函数具有多个形式,其中等面积二次光滑样条[21] (equal-area quadratic smoothing splines,EAQSS)在三维土壤制图中被广泛应用。首先,EAQSS将每层土壤性质当作是以该层深度 (x_i) 为自变量的某函数(f)的平均值,

$$y_i = \overline{f_i} + e_i \tag{1}$$

$$\overline{f_i} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx / (x_i - x_{i-1})$$
 (2)

式中: y_i 为第 i 层的土壤性质;e 为独立且均值为 0、有一定方差的误差。为保证土层内及相邻土层间的土壤性质是连续的,f 必须是连续函数且其一阶导也连续并平方可积,同时还须满足的平滑条件为:

$$f_{i}(x_{i}) = f_{i+1}(x_{i}), f_{i}(x_{i}) = f_{i+1}(x_{i}),$$

 $i = 1, 2, \dots, n-1$ (3)

$$f_{1}^{'}(x_{0}) = 0, f_{n}^{'}(x_{n}) = 0$$
 (4)

式中:n 为深度 x_i 节点的总数。为了从土层的平均数据中模拟出任意深度位置的土壤性质,EAQSS用函

数的最小化来拟合 f,

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{f_i})^2 + \lambda \int_{x_0}^{x_n} [f'(x)]^2 dx \qquad (5)$$

式中:前一项表示数据的保真度,即降低公式(1)中的误差 e;后一项表示粗糙度,即 f 的平滑程度; λ 为平衡保真度和粗糙度的参数,取值如 10,1,0.1 等。线性二次样条函数^[21]满足以上要求,且形式简单,在大量研究中得到了应用,用公式表示为:

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$$
 (6)

式中: β_0 、 β_1 、 β_2 为未知系数。

一些研究考虑到土壤有机碳通常随着土层深度 的增加而呈现出指数级下降趋势,因而建议采用自然 对数为底数的指数函数来模拟土壤有机碳的垂直变 异,公式为:

$$S = a \exp(-bD) \tag{7}$$

式中:a 和 b 为>0 的 2 个参数;D 为土层深度。可以看出,这种函数表征土壤有机碳与土层深度之间的对数函数关系。幂函数的应用较少,其形式为:

$$S = k_0 D^{k_1} \tag{8}$$

公式(8)包含 k_0 和 k_1 2个参数。尽管少数研究还采用多项式作为深度函数,例如,VERONESI等[14]使用深度的六次方和三次方,但多项式的形式实际上与样条函数一致,如公式(6)即为二次多项式。一方面,深度的次方难以估计;另一方面,多项式不具有像样条函数那样的平滑及保真过程。因此,在样条函数之外进行多项式深度函数模拟的研究已不常见。本文也因此未采用这种深度函数。

1.4.2 水平方向上的制图 三维土壤制图的研究^[22-28]采用多种方法进行水平方向上的制图,如地统计、随机森林、地理加权回归、相似度推理等。本文选择广泛使用的普通克里格和随机森林进行水平方向上的预测,也有研究^[19]对这2种方法进行详细介绍。本文在R软件中,使用最大似然法对预测对象(深度函数模拟的土壤有机碳、深度函数的参数)分别建立基于球状、高斯和 Mate'rn 函数的变异模型,且 Mate'rn 函数的光滑指数取值为0.1~4.0,间隔为0.1,进而根据赤池信息准则(AIC),选择 AIC 最低的变异模型进行普通克里格空间预测。本文的随机森林通过R软件实现,将预测对象(深度函数模拟的土壤有机碳、深度函数的参数)作为预测变量,将环境变量作为模型的解释变量。

1.4.3 三维制图 两步模式是指分 2 步来实现三维制图。第 1 步是用深度函数(如样条函数、指数函数、线性函数等)模拟土壤性质在垂直深度方向上的变异;第 2 步是用地统计或机器学习方法对深度函数预

测的土壤性质再进行水平方向上的预测制图,或对深度函数的参数进行水平方向上的预测,再用回深度函数进行垂直方向上的预测制图,从而得到三维立体土壤图。如前所述,两步模式根据水平方向上预测制图对象的不同,即深度函数模拟的土壤性质或深度函数的参数,又分为 A 和 B 2 种形式。制图形式 A 是对深度函数模拟的土壤性质进行水平方向上的空间预测。本文首先依据土壤发生层的采样深度和土壤有机碳含量,利用深度函数拟合出每 10 cm 厚度的土壤有机碳含量;然后,对所有剖面上每 10 cm 厚度的模拟值进行水平方向上的预测;最后,将所有 10 cm 厚度水平方向上的土壤有机碳含量预测值按深度顺序进行叠加,形成三维土壤图。因此,本文制图结果的垂直分辨为 10 cm。由于本文使用的环境变量分辨率为 10 m,因此水平方向上的制图分辨率为 10 m。

制图形式 B 是对深度函数的参数进行水平方向上的空间预测。首先,本文对每个土壤剖面,依据土壤发生层的采样深度和土壤有机碳,计算出每个剖面点上深度函数的参数;然后,对每个剖面点上这些参数值分别进行水平方向上的预测,从而得到空间上每个点的参数预测值;接着,将这些参数预测值输入到相应的深度函数中,得到每个点上各深度的土壤有机碳含量;最后,与形式 A 相同,将每个深度上水平分布的土壤有机碳含量进行叠加,形成三维图。同样地,这种制图形式下的垂直分辨率也为 10 cm,水平方向上的分辨率也为 10 m。

1.5 验证方式

本文采用十折交叉验证的方法来评价三维制图的准确性。其中,所有函数在不同形式下的验证集和训练集保持一致。本文选用常见的准确性评价指标,包括均方根误差(root mean square error, RMSE)、决定系数(coefficient of determination value, R^2)、一 致 性 相 关 系 数 (concordance correlation coefficient, CCC):

$$RMSE \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[Z^{'}(x_{i}) - Z(x_{i})\right]}{n}}$$
 (9)

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} [Z(x_{i}) - Z'(x_{i})^{2}]}{\sum_{i=1}^{n} [Z(x_{i}) - \overline{Z}(x_{i})^{2}]}$$
(10)

$$CCC = \frac{2\rho\sigma_{Z}\sigma_{Z'}}{\sigma_{Z'}^{2} + \sigma_{Z}^{2} + (\mu_{Z'} - \mu_{Z})^{2}}$$
(11)

式中: $Z(x_i)$ 为在样点i的土壤有机碳实际观测值; $Z(x_i)$ 为实际观测值的平均值; $Z'(x_i)$ 为模型模拟的预测值;n为样点数量; μ_Z 和 $\mu_{Z'}$ 分别为实际观测和模型预测的平均值; σ_Z 和 $\sigma_{Z'}$ 为对应的方差; ρ 为

 $\sqrt{R^2}$,表示预测值和实际值之间的相关系数。 RMSE 越小, R^2 和 CCC 越接近 1,说明模型预测的准确性越高,反之则越低。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳描述性统计特征

表 1 为土壤有机碳含量及其在各个深度区间上的描述性统计值。111 个土壤剖面划分513 个发生层。在所有发生层上,土壤有机碳含量平均为9.82 g/kg,在0.89~40.11 g/kg 变异,变异系数为71.60%,属于强

变异。随着土层深度的增加,有机碳含量的平均值逐渐降低。尽管有机碳含量在 0—30 cm 土层较高,但 30 cm 以下所有深度上有机碳含量平均值加和后与 0—30 cm 相当,前者为 44.87 g/kg,后者为 52.20 g/kg。这说明下层土壤有机碳含量在整个剖面中的占比并不低。在不同土层深度上,土壤有机碳的变异系数为25.00%~39.00%,多为中等变异,明显低于全部 513 个土层上土壤有机碳含量的变异系数。这间接说明,土壤有机碳在水平方向上的变异低于垂直方向上的变异。

表 1 研究区 0-120 cm 土壤有机碳描述统计特征

Table 1 Statistics of organic carbon in 0-120 cm soil of the study area

土层深度/cm	数量/个	最小值/	平均值/	中值/	最大值/	上 VE 光	心应	松 庄	赤呂を粉 / 0/
工层休度/cm		$(g \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	标准差	偏度	峰度	变异系数/%
所有深度	513	0.89	9.82	7.10	40.11	7.03	1.34	4.56	71.6
0-10	32	10.33	21.80	21.96	34.44	5.62	0.28	2.69	25.8
10-20	94	5.55	18.15	17.32	40.11	6.30	1.10	4.96	34.7
20-30	72	4.40	12.25	11.81	24.63	4.49	0.78	3.52	36.7
30-40	60	3.95	7.75	7.13	18.34	2.96	1.59	5.67	38.1
40-50	49	2.11	6.83	6.61	14.11	2.20	0.71	4.19	32.2
50—60	44	2.65	5.87	5.39	11.46	2.24	0.75	2.70	31.2
60—70	41	1.20	5.05	5.06	8.06	1.56	-0.27	3.25	30.9
70—80	31	1.80	4.80	4.65	7.30	1.15	-0.27	3.92	23.9
80—90	28	2.40	4.08	3.97	5.97	1.03	-0.01	1.86	22.3
90—100	20	1.13	4.07	4.13	6.22	1.23	-0.34	3.23	30.3
100—110	30	0.89	3.56	3.62	6.47	1.38	0.15	2.94	38.6
110—120	12	1.02	2.86	3.08	3.85	0.90	-0.69	2.46	31.4

2.2 土壤有机碳垂直分布模拟

图 2 为样条函数、指数函数和幂函数模拟的土壤 有机碳垂直分布。从图 2 可以看出,表层的有机碳含 量明显高于下层。同时,随着土层深度的增加,土壤 有机碳的变异逐渐减少,表现在模拟曲线逐渐汇聚。 由表 1 可知,除 0—30 cm 和 90 cm 以下之外,样点实 测值在每个深度层上的变异系数总体上表现为土层 越深,变异系数越小。这说明深度函数模拟的土壤有机碳较为合理。然而,3个深度函数模拟的土壤有机碳在垂直方向上也具有一定的误差,表现在有些模拟曲线偏离实测值。总体上,3个深度函数中,样条函数与实测值吻合得较好,而指数函数和幂函数有较多偏离实测值。这说明样条函数模拟的土壤垂直分布优于其他2个函数。

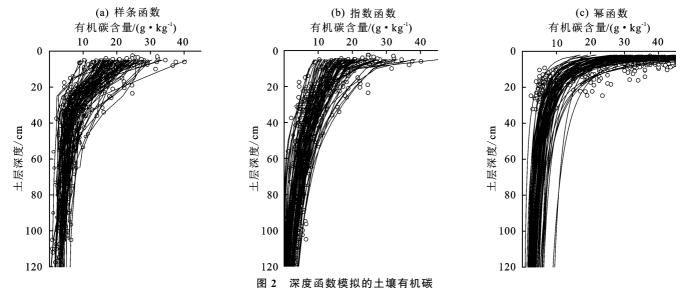


Fig. 2 Soil organic carbon content simulated using depth functions

表 2 为 111 个剖面点上指数函数和幂函数参数值的统计值。样条函数在每个剖面点上具有不同的深度节点,无法统一形成共同参数,因而在表 2 中没有统计结果,也没有在下文开展制图形式 B 的三维预测制图。从表 2 可以看到,这些参数的变异系数为 26.92%~70.19%,表明水平方向上这些参数具有一定的空间变异性,尤其是幂函数的参数 k_0 ,变异最强烈。

表 2 深度函数参数的统计特征

Table 2 Statistics of parameters of depth functions

函数	参数	最小值	平均值	中值	日上法	标准差	变异
					取人诅		系数/%
指数函数	а	8.80	19.12	17.47	49.79	7.32	38.40
	b	0.01	0.02	0.02	0.07	0.01	47.80
幂函数	k_0	19.57	75.10	60.60	455.30	52.71	70.20
	k_1	-1.08	-0.63	-0.62	-0.26	0.16	26.90

2.3 制图形式 A 的三维制图

制图形式 A 是将深度函数模拟的每 10 cm 土层中土壤有机碳含量用于变异函数模拟,再用于水平空间预测。变异函数模拟结果见图 3。函数的参数值列于表 3。在图 3 中,表层 0—40 cm 的变异比 40—120 cm 明显,中下层的变异函数拟合结果趋于水平。

在表 3 中,样条函数模拟的土壤有机碳含量在 0—40 cm 深度内的块金值与基台值的比值大部分都大于 25%,说明该深度区间上模拟的土壤有机碳含量具有较强的空间自相关性;在 40—80 cm 深度上,变异函数在研究区的空间范围上几乎为水平直线,说明该深度区间上模拟的土壤有机碳含量几乎不存在空间自相关性;80—120 cm 深度区间上模拟的土壤有机碳含量的变异函数具有较大的块金效应,在75%左右,说明空间自相关性较弱。指数函数模拟的土壤有机碳含量在 0—20 cm 具有中等空间自相关性,在 60—120 cm 不具有空间自相关性。幂函数模拟的土壤有机碳含量在 0—10 cm 具有中等空间自相关性,在 10—120 cm 的变异函数虽然具有<25%的块金效应,但变程较大,因而其空间自相关性也较弱。

图 4 为三维预测制图的结果。为了能看清上下层之间内部层上的空间变异情况,该图仅展示每 30 cm 深度处的预测制图结果。其中,图 4a~图 4c 显示基于普通克里格的两步模式制图形式 A 所预测的土壤有机碳含量三维图。同时,图 5a~图 5c 用箱型图详细地显示每 10 cm 深度上预测结果的统计值。垂

直方向上,3 个制图结果均反映随着土层深度的增加,土壤有机碳含量呈降低趋势。这种垂直变异在指数函数上最大,而在幂函数上较弱,尤其是 10 cm 深度以下。水平方向上,3 个制图结果也反映明显的空间变异。在 10—20 cm 土层深度,指数函数预测结果的水平空间变异性最明显,表现在东北小范围和西南大面积区域土壤有机碳含量较高,而其他地方较低(图 4b);在下层 90—120 cm 深度,样条函数预测结果的水平空间变异性最明显(图 4a)。

图 4f~图 4h 是基于随机森林的两步模式制图形式 B 所预测的土壤有机碳含量三维图。同样地,这 3 个深 度函数预测的土壤有机碳具有不同的水平和垂直变异。 指数函数依然具有最明显的垂直变异和表层上最明显 的水平变异。这些结果表明,深度函数在很大程度上决 定制图结果在水平方向上和垂直方向上的变异。

对比同一深度函数、同一制图形式下 2 种水平制图方法之间的结果,可以看出,样条函数、幂函数下的预测结果差别不大,而指数函数实际上也只是在 30 cm 深度以上差异较大。但是,在水平空间变异性上,随机森林下的三维图与普通克里格的相比,水平空间变异明显较小。例如,图 4b 与图 4g 中的 30 cm 深度;图 5f~图 5h 箱型图中的箱子明显比图 5a~图 5c中的小。这些结果表明,不同的水平制图方法对制图结果的垂直变异影响不大,但对水平方向上的变异影响较大。显然,这主要是因为不同的水平制图方法本身构建预测模型的原理及预测方法的不同。随机森林构建的是决策树模型,而普通克里格构建的是方差变异模型,因而在水平方向上造成很大的差异。

2.4 制图形式 B 的三维制图

如前所述,样条函数的节点参数在不同的剖面上不统一,不能用于制图形式 B 中的三维制图。因此在形式 B 的制图过程中,仅对比指数函数和幂函数参数的制图效果。

图 6 和表 4 分别展示这些参数的变异函数及其 参数。可以看出,指数函数的参数 a 和幂函数的 2 个 参数都具有较大的块金效应,说明它们的自相关性较 弱;指数函数参数 b 的块金值、基台值以及块金效应 都为 0,属于纯块金效应。图 7 显示 2 种水平制图方 法预测的深度函数参数,图 7b 中指数函数参数 b 在 整个研究区几乎一致,约等于平均值 0.02(表 2)。其 他参数有不同程度的空间变异特征。

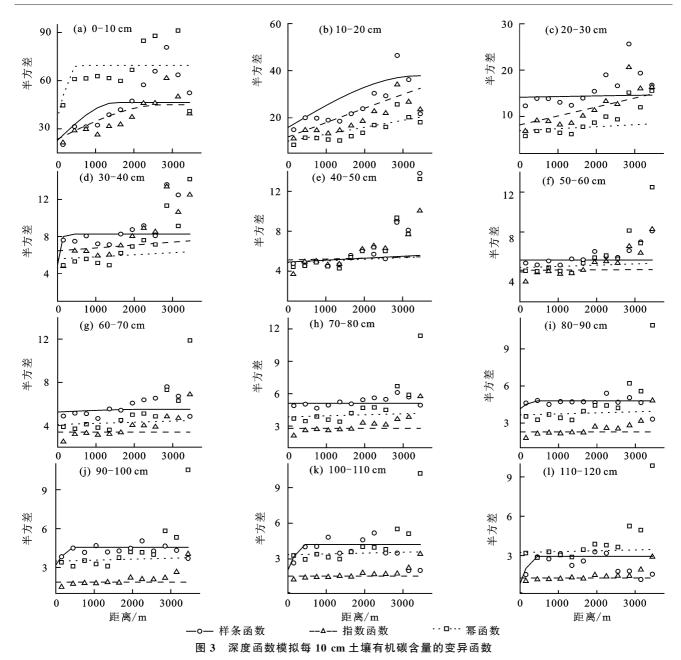


Fig. 3 Depth function simulation of the variation function of soil organic carbon content per 10 cm 表 3 深度函数模拟每 10 cm 土壤有机碳含量的变异函数

Table 3 Variogram parameters of soil organic carbon simulated using depth functions for each 10 cm layer

土层深度/	样条函数			指数函数			幂函数			
cm	模型	块金	基台	模型	块金	基台	模型	块金	基台	
0—10	高斯模型	23.56	21.45	球状模型	22.67	23.79	球状模型	36.11	33.41	
10-20	Matern 模型	15.88	21.96	球状模型	11.86	48.75	高斯模型	10.11	754.48	
20-30	高斯模型	14.13	0.58	Matern 模型	8.16	611.02	Matern 模型	6.92	104.62	
30-40	高斯模型	4.91	3.34	球状模型	6.45	93.05	高斯模型	5.58	52.14	
40-50	Matern 模型	4.91	65.09	球状模型	5.12	30.38	Matern 模型	4.87	37.83	
50—60	Matern 模型	5.19	0	球状模型	4.16	3.75	球状模型	4.42	45.10	
60-70	球状模型	5.26	0.25	Matern 模型	3.40	0	球状模型	4.10	45.57	
70—80	球状模型	5.12	0	高斯模型	2.79	0	球状模型	3.85	33.99	
80—90	球状模型	4.15	0.65	Matern 模型	2.29	0	Matern 模型	3.66	38.98	
90—100	球状模型	3.19	1.38	高斯模型	1.88	0	球状模型	3.49	22.69	
100—110	球状模型	2.06	2.16	高斯模型	1.55	0	球状模型	3.35	25.36	
110-120	球状模型	0.85	2.08	高斯模型	1.28	0	球状模型	3.23	32.58	

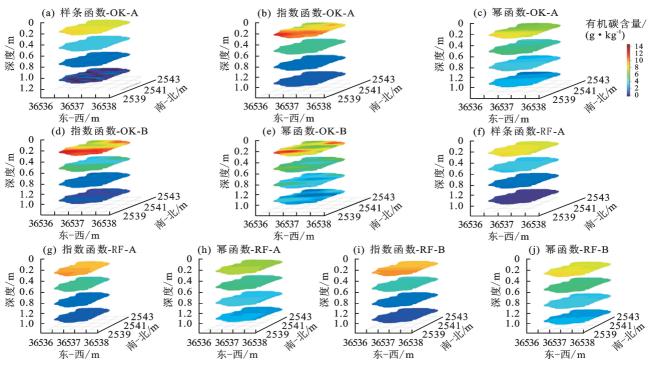
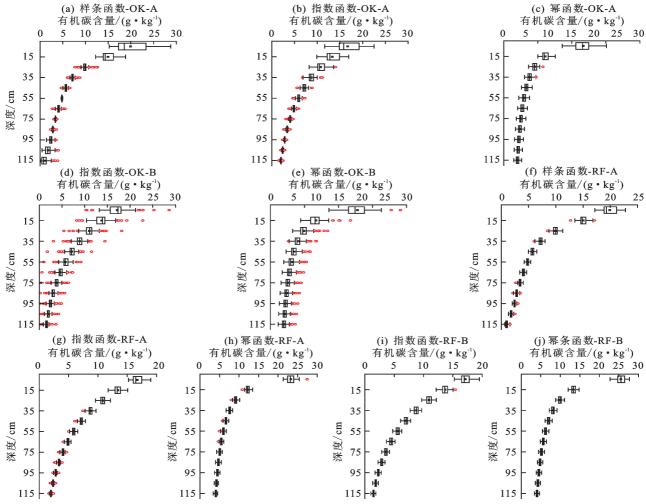


图 4 不同方法预测的每 30 cm 深度土壤有机碳含量三维图

Fig. 4 Predicted three-dimensional maps of soil organic carbon content at each 30 cm layer



注: 箱形图中间的竖线表示土壤有机碳含量的中位数,两侧竖线表示最大值和最小值,红点表示异常值,黑点表示平均值。

图 5 每 10 cm 深度土壤有机碳含量的箱形图

Fig. 5 Box-plots of soil organic carbon content per 10 cm depth http://stbcxb, all journal.com.cn

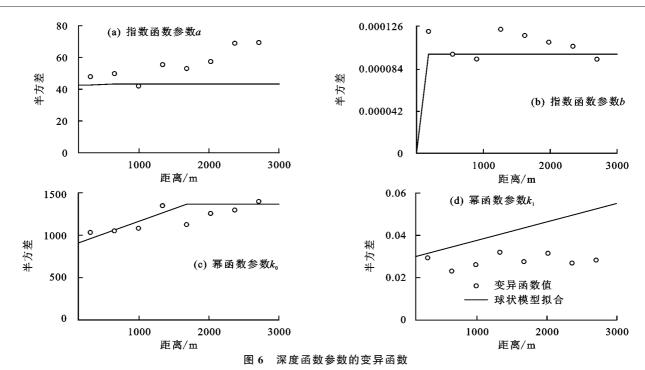


Fig. 6 Variogram of depth function parameters

表 4 深度函数参数的变异函数参数

Table 4 Variogram of depth function parameters

函数形式	参数	模型	块金	基台	块金效应
+K *k- ~ *k-	а	球状	42.60	11.03	0.79
指数函数	b	球状	0	1.03E-4	0
官之料	k_0	球状	1 031.33	385.06	0.73
幂函数	k_1	球状	0.03	0.01	0.80

随机森林预测的深度函数参数在空间趋势上与普通克里格有较大不同(图 7)。

其中,指数函数参数 a (图 7a)和幂函数参数 k_o (图 7g)的空间变异相对较小,而指数函数参数 b (图 7f)和幂函数参数 k_1 (图 7h)的空间变异相对较大。同时,随机森林的预测结果没有普通克里格那样非常明显的逐渐过渡特征,而是过渡较不规则,这与 2 种方法所依据的原理有关。随机森林采用大量的回归树模型进行预测,而普通克里格采用一定范围内已知样点的加权平均进行预测估计。

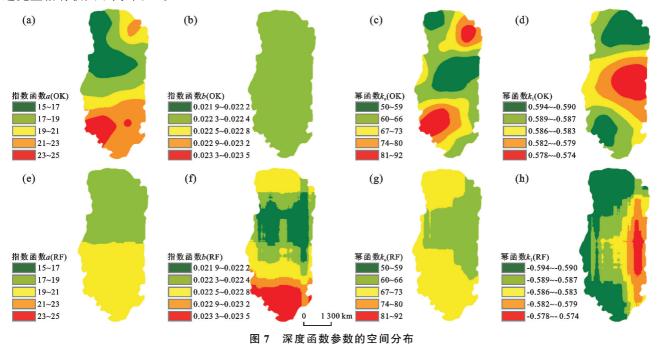
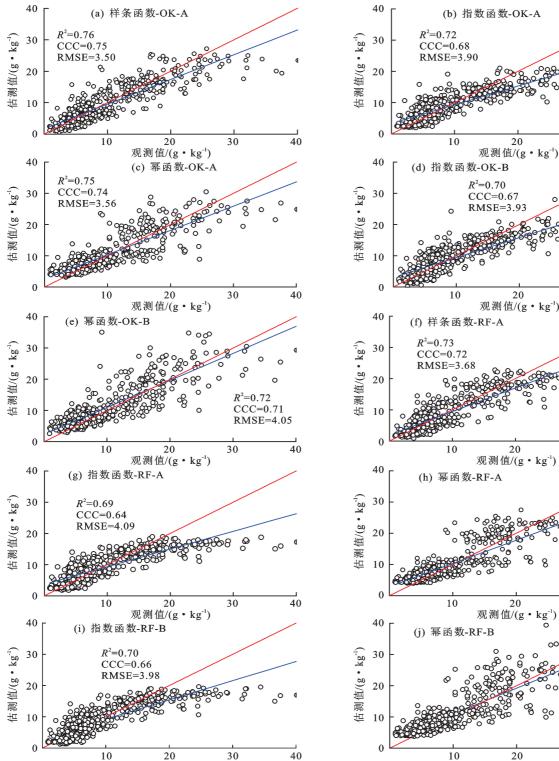


Fig. 7 Spatial distributions of depth function parameters

由于深度函数参数的预测制图结果不同,制图形式 B 的结果也有较大不同,如图 4d~图 4e、图 4i~图

4j 及图 5d~图 5e、图 5i~图 5j。然而,同一深度函数、同一水平制图方法但不同制图形式的结果非常相

近,例如,图 4b 和图 4d 分别为基于指数函数和普通 克里格的2种三维制图形式,其结果比较相近。这说 明不同的制图形式的影响较小,而深度函数和水平制 图方法影响较大。正如制图形式 B 的结果所表明的 特点:深度函数和水平制图方法很大程度上决定结果 的垂直变异和水平变异,尤其是前者。



观测值/(g・kg⁻¹)

土壤有机碳/(g・kg-1)

土壤有机碳含量三维预测制图的准确性

Accuracies of 3D maps of soil organic carbon content

2.5 三维制图的准确性

图 8 显示了基于十折交叉验证的三维制图准确 性。无论是基于普通克里格还是随机森林,第1种制 图形式下,RMSE、R2和CCC3个准确性指标一致表 明,样条函数的准确性最好,其次是幂函数,最差是指 数函数。

20

20

20

20

20

观测值/(g・kg⁻¹)

趋势线

30

30

30

0 $R^2 = 0.72$

30

0 0

> 0 $R^2 = 0.71$

30

CCC=0.71 RMSE=4.00

CCC=0.72 RMSE=3.73

40

40

40

40

40

在第 2 种制图形式下,RMSE 的结果表明,指数函数的准确性略高于幂函数,而 R² 和 CCC 的结果则表明,指数函数的准确性略低于幂函数。因此,整体上,由于 CCC 综合了以误差和一致性 2 个方面的准确性评价,可以认为制图形式 B中,指数函数的准确性略低于幂函数。综合制图形式 A 和 B,本文中,基于样条函数和普通克里格的制图形式 A 准确度最好,可作为本研究区最好的土壤有机碳三维制图方法。

基于样条函数的制图形式 A 的准确性最好可能是由于样条函数采用深度节点,最大化地保持与实测点的一致性(图 2)。指数函数在 2 种形式下都比幂函数略差,可能是因为指数函数的曲线由于相对固定(公式 7),而幂函数的曲线比较灵活,会根据实测值的变化而相对变化(公式 8)。因而,指数函数的模拟值比幂函数更加偏离实测值。指数函数和幂函数的制图形式 A 优于形式 B,可能是因为形式 A 下,深度函数已经比较准确地反映每一个深度上土壤有机碳的变化,能比较真实地代表实测值。形式 B 由于深度函数的参数本身具有一定的误差,再经过克里格中的变异函数模拟之后,又带有变异函数模拟的误差,因而误差被放大,所以准确性较差。

对比同一深度函数、同一水平制图方法的 2 种三维制图形式,可以看出,2 种形式的准确度还因深度函数和水平制图方法的不同而具有不同的规律。在普通克里格制图方法下,制图形式 A 在指数函数和幂函数为深度函数的情况下,都优于制图形式 B。在随机森林方法下,制图形式 A 在指数函数为深度函数时,准确度略差于形式 B,但在幂函数为深度函数时,准确度略好于形式 B。可见,三维制图形式不能决定准确度。这可能是因为不同的制图形式对结果的影响较小。

对比同一深度函数、同一制图形式下,2种水平制图方法的准确度,可以看到,普通克里格方法的制图准确度普遍优于随机森林。这可能是因为本文的研究区面积比较小,剖面样本量不大,导致机器学习方法未能充分发挥优势。相反,普通克里格发挥了其所依据的地理学第一定律——空间位置越相近则越相关的优势。因此,水平制图方法也是影响三维制图准确性的重要因素。

为了探讨三维制图的准确度是否随着深度的变 化而不同,本文还按照每30 cm 深度分别进行准确度 评价(表 5)。从表 5 可以看出, RMSE 在上层一般比 下层大。这主要是因为表层土壤有机碳含量本身较 高。因此,本文不依据 RMSE 来评价制图准确度随 深度的变化而变化的规律。除了RMSE之外,其他2 个指标在制图形式 A 下的结果均表明,所有模型的 准确度通常随着深度的增加而降低,但在底层(90-120 cm 深度)又大部分突然增加到接近第 2 层(30-60 cm 深度)的准确度,特别是普通克里格方法。这可 能是因为深度增加,样本量逐渐减少,深度函数模拟的 误差逐渐变大。但在底层,制图准确度大部分又突然 增加,尤其是采用普通克里格作为水平制图方法(图 4),可能是因为越往下层,标准偏差越小(表 2),因而有 机碳含量的空间变异本身很小,误差因而也不大。在 形式 B下,这 2个指标则一致表明,制图准确度随着深 度的增加而降低,并没有表现出形式 A 下的底层突然 增高现象。这主要是因为深度函数的参数主要由上层 的大量样本决定,因而水平预测制图所得的深度函数 参数对上层的代表性较好,对下层的代表性则越往下 越差,并没有像形式 A 那样,由底层的深度函数模拟值 本身来决定。这也反映出两步模式的2种制图形式对 结果的影响主要表现在底层的差别上。

表 5 普通克里格与随机森林与各个深度函数组合的验证结果

Table 5 Verification results of the combination of ordinary Kriging, random forest, and various depth functions

验证结果	土层 - 深度/cm -	形式 A							形式 B				
		样条函数		指数	指数函数		幂函数		指数函数		幂函数		
		OK	RF										
RMSE	0-30	4.838	5.003	5.460	5.705	4.994	5.169	5.305	5.516	5.662	5.596		
	30-60	2.426	2.410	2.528	2.558	2.427	2.368	2.621	2.462	2.461	2.435		
	60-90	1.697	1.731	1.470	1.428	1.565	1.534	1.652	1.638	1.736	1.565		
	90—120	1.901	1.992	1.559	1.584	1.549	1.556	1.943	1.978	1.611	1.570		
	0-30	0.519	0.494	0.504	0.500	0.502	0.457	0.503	0.504	0.468	0.451		
R^{2}	30-60	0.136	0.097	0.158	0.121	0.119	0.107	0.131	0.151	0.183	0.122		
K	60-90	0.072	0.063	0.033	0.057	0.007	0.005	0.019	0.049	0.053	0.027		
	90—120	0.197	0.140	0.171	0.044	0.110	0.005	0.016	0.039	0.016	0		
	0-30	0.474	0.426	0.354	0.298	0.493	0.445	0.376	0.328	0.461	0.444		
CCC	30-60	0.101	0.076	0.121	0.088	0.076	0.061	0.109	0.122	0.152	0.074		
	60—90	0.035	0.031	0.026	0.045	0.005	0.002	0.015	0.033	0.041	0.014		
	90-120	0.079	0.034	0.070	0.013	0.075	0.001	0.005	0.008	0.010	0		

3 结论

(1)深度函数在很大程度上决定制图结果在水平方向上和垂直方向上的变异,表现为制图结果的变异在3个深度函数之间差异较大,其中指数函数上的变异最大,而幂函数上最弱;并且3种深度函数中,样条函数的准确度最好,主要是因为样条函数模拟的深度曲线与实测点吻合得最好。

(2)水平制图方法对制图结果的垂直变异影响不大,但对水平方向上的变异影响较大;本文中,普通克里格的制图准确度优于随机森林,主要是因为本文的研究区较小且样本量不大,导致随机森林的优势未能充分发挥。

(3)两步模式的2种形式对制图结果的影响较小,并没有因为深度函数、水平制图方法的不同而表现出不同的规律,仅在底层的准确度上表现出制图形式A优于形式B。

因此,在两步模式的三维土壤制图中,首先应考虑样条函数作为深度函数,其次依据研究区的景观情况和样本量,考虑水平制图方法,最后,尽量采用两步模式的制图形式 A。本文仅在小范围、大比例尺情况下进行土壤有机碳的探讨,对其他景观条件、不同的样本数、其他水平制图方法、其他土壤属性(如质地、pH等)等未作分析,未来还需要在这些不同的情况下进一步分析。

参考文献:

- [1] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47 (2):151-163.
- [2] MALONE B P, MCBRATNEY A B, MINASNY B. Empirical estimates of uncertainty for mapping continuous depth functions of soil attributes[J]. Geoderma, 2011, 160(3/4):614-626.
- [3] MALONE BP, MCBRATNEY AB, MINASNY B, et al. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity [J]. Geoderma, 2009,154(1/2):138-152.
- [4] LACOSTE M, MINASNY B, MCBRATNEY A, et al. High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape [J]. Geoderma, 2014,213:296-311.
- [5] VASQUES G M, GRUNWALD S, COMERFORD N B, et al. Regional modelling of soil carbon at multiple depths within a subtropical watershed [J]. Geoderma, 2010,156(3/4):326-336.
- [6] GRIMM R, BEHRENS T, MÄRKER M, et al. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island: Digital soil mapping using Random

- Forests analysis[J].Geoderma, 2008, 146(1/2): 102-113.
- [7] MEERSMANS J, VAN WESEMAEL B, DE RIDDER F, et al. Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium)[J].Geoderma,2009,152(1/2):43-52.
- [8] MISHRA U, LAL R, SLATER B, et al. Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary Kriging[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(2):614-621.
- [9] KEMPEN B, BRUS D J, STOORVOGEL J J. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions [J]. Geoderma, 2011,162(1/2):107-123.
- [10] TEKIN Y, KUL B, OKURSOY R. Sensing and 3D mapping of soil compaction[J]. Sensors, 2008, 8(5): 3447-3459.
- [11] ADHIKARI K, BOU KHEIR R, GREVE M B, et al. High-resolution 3-D mapping of soil texture in Denmark [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (3):860-876.
- [12] ODGERS N P, MCBRATNEY A B, MINASNY B. Digital soil property mapping and uncertainty estimation using soil class probability rasters[J]. Geoderma, 2015, 237/238:190-198.
- [13] LIU F, ZHANG G L, SUN Y J, et al. Mapping the three-dimensional distribution of soil organic matter across a subtropical hilly landscape [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(4):1241-1253.
- [14] VERONESI F, CORSTANJE R, MAYR T. Mapping soil compaction in 3D with depth functions[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124; 111-118.
- [15] ORTON T G, PRINGLE M J, BISHOP T F A. A one-step approach for modelling and mapping soil properties based on profile data sampled over varying depth intervals[J].Geoderma,2016,262:174-186.
- [16] WANG S, ZHUANG Q L, WANG Q B, et al. Mapping stocks of soil organic carbon and soil total nitrogen in Liaoning Province of China[J].Geoderma, 2017, 305:250-263.
- [17] SONG X D, WU H Y, JU B, et al. Pedoclimatic zone-based three-dimensional soil organic carbon mapping in China[J].Geoderma, 2020, 363; e114145.
- [18] VAN MEIRVENNE M, MAES K, HOFMAN G. Three-dimensional variability of soil nitrate-nitrogen in an agricultural field[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 37(3): 147-153.
- [19] 杨谦,王晓晴,孙孝林,等.基于 REML 的普通克里格和 回归克里格在土壤属性空间预测中的比较[J].土壤通报,2018,49(2):283-292.
 - YANG Q, WANG X Q, SUN X L, et al. Comparing prediction accuracies of ordinary Kriging and regression Kriging with REML in soil properties mapping[J].Chi-

- nese Journal of Soil Science, 2018, 49(2): 283-292.
- [20] BISHOP T F A, MCBRATNEY A B, LASLETT G M. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines[J]. Geoderma, 1999, 91 (1/2):27-45.
- [21] LIU F, WU H Y, ZHAO Y G, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(3):328-340.
- [22] 张世文,宁汇荣,高会议,等.基于各向异性的区域土壤 有机碳三维模拟与空间特征分析[J].农业工程学报, 2016,32(16):115-124.
 - ZHANG S W, NING H R, GAO H Y, et al. Three-dimensional simulation and spatial characteristics of soil organic carbon based on anisotropy in region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16):115-124.
- [23] 贺勇,胡克林,李卫东,等.华北冲积平原区土壤剖面质 地层次空间分布的三维随机模拟[J].土壤学报,2008,45 (2):193-200.
 - HEY, HUK L, LIW D, et al. Stochastic simulation of three-dimensional spatial distribution of soil profile textural layers in alluvial plain, North China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2):193-200.
- [24] 陈冲,胡克林,贺勇.农田土壤质地空间分布的三维随机模拟及其不确定性评价[J].土壤,2013,45(2):1319-1325. CHEN C, HU K L, HE Y. 3-D stochastic simulation and uncertainty assessment of soil texture at field scale [J].Soils,2013,45(2):1319-1325.

(上接第 350 页)

- [37] 张磊,贾淑娴,李啸灵,等.亚热带米槠天然林凋落物和根系输入变化对土壤磷组分的影响[J].生态学报,2022,42(2):656-666.
 - ZHANG L, JIA S X, LI X L, et al. Effects of litter and root inputs changes on soil phosphorus fractions ina subtropical natural forest of *Castanopsis carlesii* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2):656-666.
- [38] 贾兴永,李菊梅.土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J].中国土壤与肥料,2011(6):76-82.

 JIA X Y, LI J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2011(6):76-82.
- [39] 曾晓敏.亚热带典型森林植被类型下土壤磷素特征及 其影响因素[D].福州:福建师范大学,2020.

- [25] 姚荣江,杨劲松,赵秀芳,等.沿海滩涂土壤盐分空间分布的三维随机模拟与不确定性评价[J].农业工程学报,2010,26(11):91-97.
 - YAO R J, YANG J S, ZHAO X F, et al. Three-dimensional stochastic simulation and uncertainty assessment on spatial distribution of soil salinity in coastal region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(11):91-97.
- [26] 李洪义,史舟,唐惠丽.基于三维普通克立格方法的滨海 盐土电导率三维空间变异研究[J].土壤学报,2010,47 (2):359-363.
 - LI H Y, SHI Z, TANG H L. Research on three-dimension spatial variability of soil electrical conductivity of coastal saline land using 3D ordinary Kriging method [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2):359-363.
- [27] 张忠启,史学正,于东升,等.红壤区土壤有机质和全氮含量的空间预测方法[J].生态学报,2010,30(19):5338-5345.

 ZHANG Z Q, SHI X Z, YU D S, et al. Spatial prediction of soil organic matter and total nitrogen in the hilly red soil region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30 (19):5338-5345.
- [28] 郭龙,张海涛,陈家赢,等.基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较[J].土壤学报,2012,49(5):1037-1042.
 - GUO L, ZHANG H T, CHEN J Y, et al. Comparison between co-kriging model and geographically weighted regression model in spatial prediction of soil attributes [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5):1037-1042.
 - ZENG X M. Characteristics of soil phosphorus under typical vegetation types in subtropical forests and the affecting factors[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2020.
- [40] 贾淑娴,吴传敬,刘小飞,等.采伐剩余物的处理方式对 杉木幼林土壤磷组分及其有效性的影响[J].应用生态 学报,2019,30(11):3662-3670.
 - JIASX, WUCJ, LIUXF, et al. Effects of harvest residue treatments on soil phosphorus fractions and availability in a young Chinese fir plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3662-3670.
- [41] 苏莹莹.环太湖林带磷素时空变异及土壤吸附作用研究[D].南京:南京林业大学,2012.
 - SU Y Y. Study on the spatial-temporal variablity of phosphorus and soil adsorption in forest belt surrounding Taihu Lake [D]. Nanjing: Journal of Nanjing Forestry University, 2012.