

农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究*

徐丹¹ 刘昌华¹ 蔡太义^{1,2} 张世恩³

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;
3. 郑煤集团芦沟煤矿, 郑州 452300)

摘要: 以河南省新郑市为研究区, 分别采用三维克里格(Kriging)插值法和三维反距离加权(IDW)插值法模拟不同深度土壤有机质和全氮含量的三维空间分布特征, 并采用交叉验证法, 比较2种三维空间插值方法的预测精度。研究表明, 有机质和全氮沿不同土层深度(0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm)均表现出明显的空间分布差异, 3种深度土壤有机质含量的平均值变化范围为11.31~15.48 g/kg, 全氮的变化范围为0.48~0.79 g/kg, 均随土层加深而降低; 土壤有机质和全氮的三维空间分布表达的信息量更加丰富, 可直观展示任意土体切面的养分含量分布信息; 通过三维克里格方法得到的有机质插值结果的预测精度高于反距离加权法, 全氮亦然, 三维克里格插值法更能真实反映土壤养分的三维空间分布特征。

关键词: 土壤有机质 全氮 三维模拟 空间分布 插值方法

中图分类号: S153; S151.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0157-07

3D Spatial Distribution Characteristics of Soil Organic Matter and Total Nitrogen in Farmland

Xu Dan¹ Liu Changhua¹ Cai Taiyi^{1,2} Zhang Shien³

(1. School of Surveying & Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

3. Lugou Coal Mine, Zhengzhou Coal Industry (Group) Co., Ltd., Zhengzhou 452300, China)

Abstract: The three-dimensional (3D) spatial distribution characteristics of farmlands' soil organic matter and total nitrogen were revealed in Xinzheng City, and the related technical methods and train of thought were provided. The methods of 3D Kriging interpolation and 3D inverse distance weighted interpolation were comprehensively used to simulate the 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen content in different depths, and their prediction accuracies were compared by using the cross validation method. The results showed that soil organic matter and total nitrogen had significantly different spatial distribution difference along the different soil depths (0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm), the mean range of soil organic matter content in three depths varied from 11.31 g/kg to 15.48 g/kg, and the mean range of soil total nitrogen content was 0.48~0.79 g/kg, and both of them were decreased with the increase of soil depth. The amount of information that 3D spatial distribution of soil organic matter and total nitrogen expressed was more abundant, which was able to directly show the distribution information of the nutrient content in soil arbitrary section. The prediction accuracy of interpolation results of organic matter obtained through 3D Kriging method was higher than that obtained through inverse distance weighting method, and the result of total nitrogen was the same. 3D Kriging interpolation method could more veritably reflect the 3D spatial distribution characteristics of soil nutrients.

Key words: Soil organic matter Total nitrogen Three-dimensional simulation Spatial distribution Interpolation methods

收稿日期: 2015-09-14 修回日期: 2015-10-08

* 国家自然科学基金资助项目(41371133)

作者简介: 徐丹, 博士生, 主要从事土壤空间变异研究, E-mail: xudan66@126.com

通讯作者: 刘昌华, 教授, 博士生导师, 主要从事土地复垦和土地信息系统研究, E-mail: lchnj@163.com

引言

土壤是一个在时间上具有动态性,空间上(水平和垂直方向)具有差异性的三维连续体^[1],因此土壤特性的空间分布是一个真三维动态的环境现象^[2-3],其空间变异包括两个方面,即土壤垂直剖面 and 水平分布的变异^[4]。目前,土壤特性空间变异的研究主要集中在二维水平方向上,一般通过数据、二维表面图和剖面图来解释和显示土壤信息,但通过这几种形式获得的信息比较片面和孤立,无法直接展示土壤特性的三维形态^[5-6]。有研究表明,土壤盐分含量在垂直方向上呈现一定的表聚趋势,即含盐量较高的区域,土壤盐分在强蒸发作用下会随水逐渐向上运移^[7],因此,研究土壤特性的空间变异,尤其是三维空间分布特征对研究土壤元素的空间分布规律、田间精确管理以及实现农业可持续发展具有重要意义。

近年来,土壤盐分^[7-12]、污染物^[13-15]和水分^[16-18]等方面的三维空间模拟研究较多,而土壤有机质和全氮含量的三维空间分布模拟研究还较少。本文以新郑市农田土壤有机质和全氮为例,分别采用三维克里格(Kriging)插值法和三维反距离加权(IDW)插值法模拟不同深度土壤有机质和全氮含量三维空间分布特征,并比较2种三维空间插值方法的预测精度,探讨更适合模拟土壤养分三维空间分布特征的插值方法。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域为位于河南省中部的新郑市(113°30′~113°54′E,34°16′~34°39′N),属于温暖带半干旱半湿润的大陆性季风气候,四季分明。全年平均气温为14.1℃,1月份温度最低,7月份温度最高。全市降水季节分布非常不均衡,年平均降水量为689.0 mm,多是由东向西递增,易发生干旱和洪涝等灾害。新郑市土地总面积884.59 km²,其中耕地面积548.34 km²,占土地总面积的61.99%,共有3大土壤类型,分别为褐土、潮土和风砂土,其中褐土为该市的地带性土壤,分布面积最广,占全市耕地总面积的69.77%。

1.2 样品采集与处理

采用网格法布设样点,采样总深度为60 cm,采样点平均间距约3 km,选取92个土壤采样剖面,按照0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm对每个土壤剖面分层采样,共采集276个土壤样品,如图1所示,X轴代表正北方向,Y轴代表正东方向,Z轴表示不同

土层深度,为使图示效果更清晰,将Z方向放大60倍。

化验分析方法采用国家或行业标准,土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法^[19],土壤全氮用凯氏法测定。

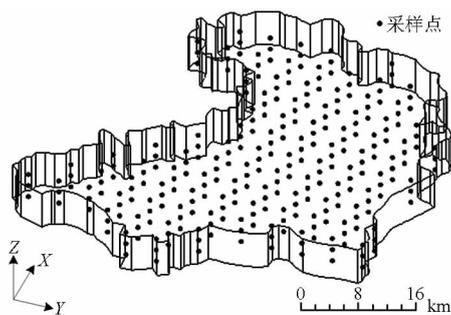


图1 土壤采样点三维空间分布(Z方向放大60倍)

Fig. 1 3D spatial distribution of soil sampling points (Z direction was amplified by 60 times)

1.3 三维空间插值方法

目前常用的三维空间插值方法主要有反距离加权插值法、最近邻点插值法、克里格插值法、三元高次函数逼近方法等^[20],这些插值模型已应用到土体电导率、土壤质地、土壤盐分、土壤污染物、土壤水分等领域。

三维克里格插值方法(Kriging)是二维克里格空间插值模型和方法在三维空间中的扩展,利用已知样本数据在三维空间中的结构性,对待估点进行无偏最优估值,其对三维空间现象的估值结果更可靠^[21-22]。三维克里格方法须在三维空间中采样,并对三维方向上的半方差函数进行结构分析。首先利用三维空间的已知样本数据分别在水平方向(X-Y方向)和垂直方向(Z方向)上构建实验半方差函数并选取合适的理论模型拟合成理论半方差函数,然后对水平和垂直方向的半方差函数进行组合建立三维半方差函数模型,在本征平稳假设条件下,半方差函数的计算公式为

$$r(h_3) = \frac{1}{2N(h_3)} \sum_{i=1}^{N(h_3)} (Z(x_i) - Z(x_i + h_3))^2 \quad (1)$$

式中 $r(h_3)$ ——样本的半方差函数

h_3 ——2个样本点之间的三维空间距离

$N(h_3)$ ——以 h_3 为间距的所有观测点的样本对数

$Z(x_i)$ 、 $Z(x_i + h_3)$ ——点 x_i 、 $x_i + h_3$ 处的样本值

经过半方差函数结构分析,如果数据集存在空间自相关性,则可采用三维克里格方法进行空间插值,公式为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中 $Z(x_0)$ ——待估点的值

n ——待估点周围已知样点的数量

λ_i ——各个样点的权重

反距离加权插值法 (IDW) 是一种多元插值方法,其最大优点是简单,特别适用于空间散乱点,基本原理是两个物体之间距离越近,性质就越相似。它以待估点与已知样点之间的距离为权重进行加权平均,距离待估点越近的样点被赋予的权重就越大。反距离加权插值法与克里格方法有些类似,两者都通过对已知样点赋权重来求待估点的值,可统一用式(2)表示,但是在赋权重时,反距离加权插值法只考虑已知样点与待估点之间的距离,而克里格方法既考虑距离,又重视已知样点的空间分布以及与待估点之间的空间位置关系。

1.4 插值精度评价方法

选用交叉验证法评价 2 种插值模型的预测精度。交叉验证法的原理是依次从原始采样数据中删除一点,其他样点保持不变,用剩余样点预测该删除点的值,并将该点的预测值与实测值进行比较,然后再从所有原始样点中删除另外一点(未被删除过),并用剩余样点预测该点的值,反复进行,直到所有样点都被预测过一次,最后比较所有样点的预测值与实测值,对误差进行统计分析^[23]。采用均方根预测误差 (RMSE) 和平均预测误差 (ME) 作为评价指标,均方根预测误差 (RMSE) 越小,平均预测误差 (ME) 越接近 0,表示插值模型的预测精度越高。

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 19.0 软件对数据进行预处理;应用 GMS 7.1 软件,分别采用三维克里格和反距离加权

插值法绘制土壤有机质和全氮的三维空间分布图。三维插值计算时,根据研究区三维散点图,建立限定网格,得到 7 768 个有效空间网格,插值网格单元尺寸为 110 m × 70 m × 0.1 m。由于垂直方向 Z 的变化范围较小,为获得较佳的三维可视化效果,绘制的所有三维图件的垂直方向均扩大 60 倍。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤有机质和全氮含量统计特征

对研究区不同土层各采样点的土壤有机质和全氮含量进行统计分析(表 1),样本量为 276 个,经过单样本 K-S 检验,土壤各层数据服从或近似服从正态分布。由表 1 可知,各层土壤有机质和全氮含量的平均值变化范围为 11.31 ~ 15.48 g/kg 和 0.48 ~ 0.79 g/kg,均随土层加深而降低。人类对表层(0 ~ 20 cm)土壤的耕作管理比较精细,耕作、施肥、灌溉等农业措施使表层土壤积累较多有机物质,故表层有机质和全氮含量均高于以下各层;而随土壤深度增加,有机质和全氮的来源逐渐减少,但是成土时间在增加,土壤微生物的分解作用导致有机质和全氮含量不断减少。这与陈庆强等^[24]的研究结果相似。王合玲等^[25]研究发现,在艾比湖流域中部,有机质含量随土壤深度增加而降低,但在流域东部和西部,有机质含量则随土壤深度加深而升高。本研究表明,土壤有机质含量随土层加深而减少。这与王合玲等^[25]的研究结论既有一致也有差异,这可能与不同研究区的有机质含量以及地貌背景差异有关,还需进一步深入研究。各层土壤有机质和全氮含量的变异系数分别介于 13.89% ~ 21.40% 和 2.08% ~ 12.66% 之间,有机质的变异系数随土层加深而增大,全氮则反之。

表 1 不同土层土壤有机质和全氮含量统计特征值

Tab. 1 Statistical characteristics of soil organic matter and total nitrogen content in different soil layers

项目	样本数	深度/cm	最小值/(g·kg ⁻¹)	最大值/(g·kg ⁻¹)	平均值/(g·kg ⁻¹)	标准差/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%
有机质	92	0 ~ 20	8.18	21.75	15.48	2.15	13.89
	92	20 ~ 40	5.70	16.69	11.61	2.22	19.12
	92	40 ~ 60	4.90	16.83	11.31	2.42	21.40
全氮	92	0 ~ 20	0.53	0.99	0.79	0.10	12.66
	92	20 ~ 40	0.45	0.65	0.56	0.04	7.14
	92	40 ~ 60	0.46	0.49	0.48	0.01	2.08

2.2 土壤有机质和全氮三维空间分布模拟

分别采用三维克里格法和三维反距离加权法对研究区土壤有机质和全氮含量进行空间插值,得到有机质和全氮的三维空间分布图(图 2、3)。从图 2 和图 3 可以看出无论是克里格插值还是反距离加权插值,土壤有机质和全氮含量的整体变

化趋势均相似,但克里格插值方法的数据空间分布变化更趋于平缓,而反距离加权插值法的数据整体分布相对离散,这是因为克里格插值法不仅考虑已知样点与待估点的空间位置关系,而且还重视已知样点位置间的相互联系,插值结果更自然,避免异常值的产生;而反距离加权插值法容易

受数据点集群的影响,其在尊重实测数据值的情况下,会着重强调原始数据集的局部波动性,经常

会出现一种孤立点数据明显高于周围数据点的“鸭蛋”分布模式。

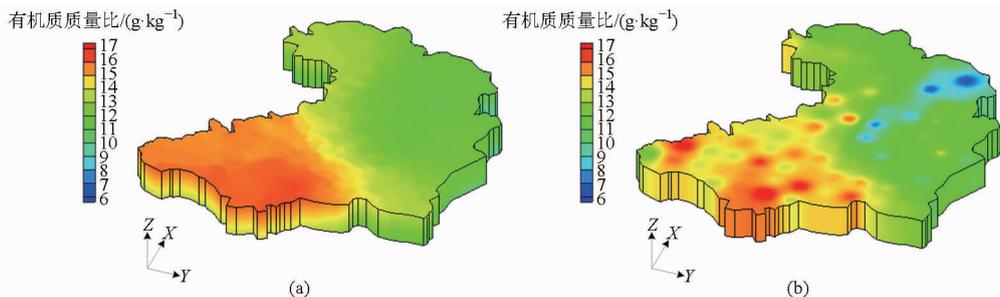


图2 土壤有机质三维空间分布

Fig.2 3D spatial distribution of soil organic matter

(a) Kriging (b) IDW

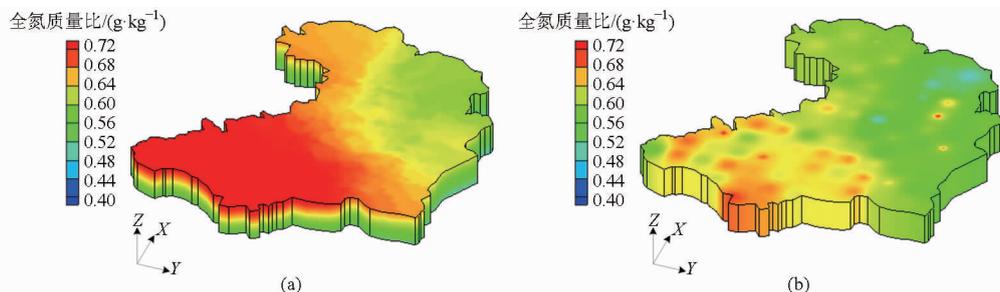


图3 土壤全氮三维空间分布

Fig.3 3D spatial distribution of soil total nitrogen

(a) Kriging (b) IDW

根据研究区土壤有机质和全氮含量的空间分布特征,在垂直方向上分别对研究区3个典型纵断面($A-A'$ 、 $B-B'$ 、 $C-C'$)的土壤有机质和全氮含量的分布情况进行细致剖析。图4和图5分别为克里格插值和反距离加权插值得到的土壤有机质和全氮纵断面空间分布图,可以看出,有机质和全氮含量分布在不同层面上均显现出不同的空间连续性,整体均表现出表层含量高的区域,其下层含量也普遍较高的趋势。分别对比图4a和图4b、图5a和图5b可以发现,在垂直方向上,通过克里格插值方法得到的2种土壤养分含量的空间分布特征具有更明显的层次性,养分含量由表层向下层逐渐递减,变化比较明显,而反距离加权插值结果中土壤各层养分含量变化则不明显,只有部分区域养分含量分布表现出较显著的差异性。

图4和图5中 $A-A'$ 截面纵贯研究区南北方向, $B-B'$ 截面纵贯研究区偏南部区域的的东西方向, $C-C'$ 截面纵贯研究区偏北部区域的的东西方向。由图4b可看出, $A-A'$ 截面上,研究区南部(A 附近)土壤有机质含量较高,且有机质分布在某些区域上呈现V形,说明土壤有机质含量随土层深度的增加而逐渐降低,呈现一定表聚趋势,研究区北部(A' 附近)区域的上下土层有机质含量无明显差异; $B-B'$ 截面上,研究区西部(B 附近)区域的各土层有机质

含量变化较小,而研究区东部(B' 附近)有机质含量呈现一定表聚趋势; $C-C'$ 截面上,研究区西部(C 附近)区域的上下土层有机质含量差异不明显,而东部(C' 附近)上层土壤有机质含量明显高于下层,变化比较明显。由图5b可看出, $A-A'$ 截面上,研究区南部(A 附近)表现为上下层全氮含量差异明显,而研究区北部(A' 附近)的上下土层全氮含量则无明显差异; $B-B'$ 截面上,研究区西部(B 附近)区域的各土层全氮含量变化较小,而研究区东部(B' 附近)全氮含量变化明显,呈现一定表聚趋势; $C-C'$ 截面上,研究区西部(C 附近)区域全氮含量变化不明显,而东部(C' 附近)上层全氮含量明显高于下层,变化较显著。

2.3 三维克里格插值、反距离加权插值和实测值对比分析

表2为土壤有机质和全氮含量的实测值和预测值的统计结果。经过三维克里格法和反距离加权法插值后,土壤有机质和全氮的平均值、中值和实测平均值、中值相差较小,而最大值、标准差、变异系数均小于实测数据,但最小值比实测值大,预测有机质含量的变化范围(8.69~16.34 g/kg和6.20~17.79 g/kg)均小于实测值的变化范围(4.90~21.75 g/kg),全氮亦然,这说明2种插值方法对原始采样数据都有一定程度的压缩作用,主要原因是克里

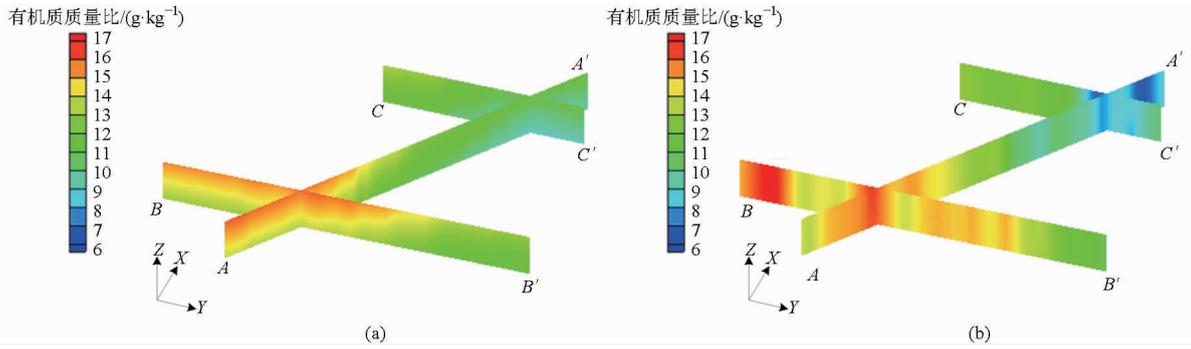


图 4 土壤有机质纵断面空间分布

Fig.4 Spatial distribution of organic matter in soil profiles

(a) Kriging (b) IDW

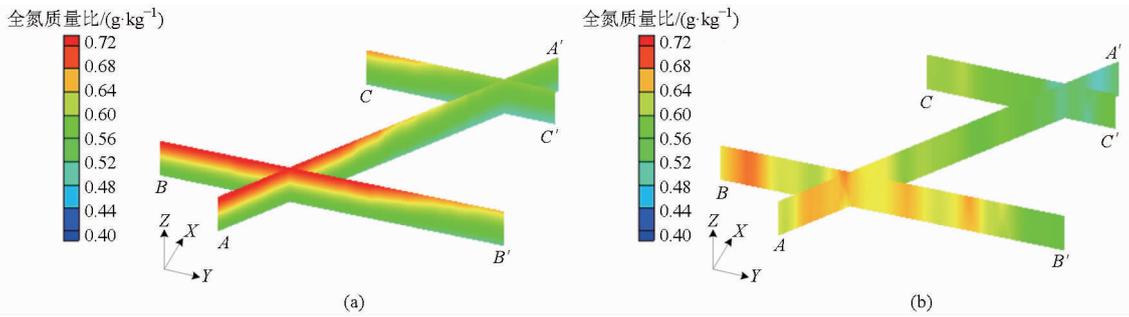


图 5 土壤全氮纵断面空间分布

Fig.5 Spatial distribution of total nitrogen in soil profiles

(a) Kriging (b) IDW

表 2 土壤有机质和全氮含量的实测值和预测值统计结果

Tab.2 Statistical results of measured and predicted values of soil organic matter and total nitrogen

项目	数据源	最小值/(g·kg ⁻¹)	最大值/(g·kg ⁻¹)	平均值/(g·kg ⁻¹)	中值/(g·kg ⁻¹)	标准差/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%
有机质	实测值	4.90	21.75	12.80	12.59	3.11	24.30
	Kriging 预测值	8.69	16.34	12.35	12.23	1.89	15.30
	IDW 预测值	6.20	17.79	12.62	12.51	1.88	14.90
全氮	实测值	0.45	0.99	0.61	0.56	0.14	22.95
	Kriging 预测值	0.49	0.75	0.59	0.60	0.08	13.56
	IDW 预测值	0.48	0.72	0.60	0.60	0.04	6.67

格法和反距离加权法对预测值均具有明显的平滑效应^[26],在一定程度上降低了土壤养分的空间变异性。

2.4 预测精度分析

以土壤有机质为例,将通过三维克里格插值法和反距离加权插值法获得的原始样点的预测值与实测值进行相关分析(图 6),可以看出,2 种插值方法得到的预测值和实测值均具有良好的相关性,预测精度较高,克里格方法比反距离加权方法具有更好的相关性(决定系数 $R^2 = 0.4158 > 0.3592$)。表 3 为 2 种插值模型的交叉验证结果,对比发现,通过三维克里格方法得到有机质含量的插值结果的预测精度高于反距离加权法(均方根预测误差 $2.3912 < 2.5908$,平均预测误差 $0.0445 < 0.3571$,也更接近于 0),全氮亦然。因此,相对于三维反距离加权插值模型,克里格插值模型更适合模拟土壤有机质和

全氮的三维空间分布特征,这与韩霁昌等^[7]和刘庚等^[15]的研究结果相似。

表 3 不同模型插值结果的交叉验证

Tab.3 Cross validation of interpolation results of different models

项目	插值模型	均方根预测误差	平均预测误差
有机质	Kriging	2.3912	0.0445
	IDW	2.5908	0.3571
全氮	Kriging	0.1330	0.0009
	IDW	0.1687	0.0139

3 结论

(1) 研究区农田土壤有机质和全氮含量沿不同土层深度(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)均表现出明显的空间分布差异,各土层土壤有机质和全氮含量的平均值变化范围为 11.31~15.48 g/kg 和

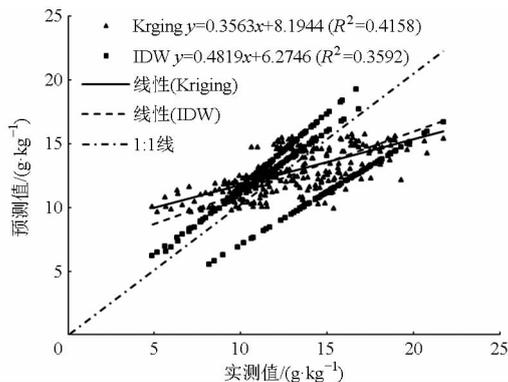


图6 土壤有机质含量预测值和实测值相关分析

Fig.6 Correlation analysis of predicted and measured values of soil organic matter

0.48 ~ 0.79 g/kg, 均随土层加深而降低; 各层土壤有机质和全氮含量的变异系数分别介于 13.89% ~ 21.40% 和 2.08% ~ 12.66% 之间, 有机质的变异系

数随土层加深而增大, 全氮则反之。

(2) 对研究区土壤有机质和全氮的空间分布进行三维模拟, 以图形图像方式直观展示土壤养分的三维空间分布, 与二维空间分布图相比, 其表达的信息量更加丰富, 可以同时获取有机质和全氮含量在水平方向和垂直方向的空间分布信息, 并可对其进行旋转、平移、放大、缩小、切割等, 直观展示任意土体切面的土壤养分含量分布。

(3) 不同插值模型对土壤有机质和全氮含量的三维空间分布的预测结果存在较大差异, 本文对克里格法和反距离加权法在土壤养分三维空间分布中的应用进行对比研究, 发现三维克里格法插值结果的预测精度均高于反距离加权法, 三维克里格插值法更适合模拟土壤有机质和全氮的三维空间分布特征。

参 考 文 献

- 1 李天杰, 赵焯, 张科利, 等. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- 2 Mohanty B P, Kanwar R S. Spatial variability of residual nitrate-nitrogen under two tillage systems in central Iowa: a composite three-dimensional resistant and exploratory approach[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(2): 237 - 251.
- 3 姜健. 基于 VTK 土壤养分三维可视化研究与实现[J]. 农业网络信息, 2011(3): 10 - 13.
Jiang Jian. Study on VTK-based visualization of soil nutrients and its implementation[J]. *Agriculture Network Information*, 2011(3): 10 - 13. (in Chinese)
- 4 吕宁, 吕新, 马莉, 等. 基于 GIS 的滴灌棉田土壤养分空间变异及预测方法比较研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 403 - 408.
Lü Ning, Lü Xin, Ma Li, et al. Comparative study of soil nutrient spatial variability and prediction methods in drip-irrigated cotton field based on GIS[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(2): 403 - 408. (in Chinese)
- 5 Van Meirverme 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.
- 6 Garbout A, Munkholm S J, Hansen S B, et al. The use of PET/CT scanning technique for 3D visualization and quantification of real-time soil/plant interactions[J]. *Plant and Soil*, 2012, 352(1 - 2): 113 - 127.
- 7 韩霖昌, 李晓明, 孙剑虹, 等. 卤泊滩典型田块土壤盐分三维空间分布研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 847 - 854.
Han Jichang, Li Xiaoming, Sun Jianhong, et al. Research on three dimensional spatial distribution of soil salinity in a typical field of Lubotan area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(5): 847 - 854. (in Chinese)
- 8 李洪义, 史舟, 唐惠丽. 基于三维普通克里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 Hongyi, Shi Zhou, Tang Huili. 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. (in Chinese)
- 9 Li H Y, Shi Z, Webster R, et al. Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil[J]. *Geoderma*, 2013, 195 - 196(1): 31 - 41.
- 10 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 100 - 106.
Wu Yakun, Liu Guangming, Yang Jingsong, et al. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(3): 100 - 106. (in Chinese)
- 11 刘广明, 吴亚坤, 杨劲松, 等. 基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 78 - 82.
Liu Guangming, Wu Yakun, Yang Jingsong, et al. Regional 3 - D soil salt spatial variability based on electromagnetic induction technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 78 - 82. (in Chinese)
- 12 云安萍, 鞠正山, 胡克林, 等. 基于距离反比法的土壤盐分三维空间插值问题研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 148 - 156.
Yun Anping, Ju Zhengshan, Hu Kelin, et al. Exploring problem of three dimensional interpolation of soil salinity using inverse distance weighting method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 148 - 156. (in Chinese)
- 13 Glassley W E, Nitao J J, Grant C W. Three-dimensional spatial variability of chemical properties around a monitored waste emplacement tunnel[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62 - 63(4): 495 - 507.
- 14 Arbia G, Lafratta G, Simeoni C. Spatial sampling plans to monitor the 3 - D spatial distribution of extremes in soil pollution

- surveys[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2007, 51(8): 4069 – 4082.
- 15 刘庚,毕如田,权腾,等. 某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究[J]. *生态学报*, 2014, 34(11): 2876 – 2883.
Liu Geng, Bi Rutian, Quan Teng, et al. 3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2876 – 2883. (in Chinese)
- 16 程亚南,刘建立,吕菲,等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 115 – 122.
Cheng Ya'nán, Liu Jianli, Lü Fei, et al. Three-dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of soil hydraulic properties based on CT images[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22): 115 – 122. (in Chinese)
- 17 Tsiampousi A, Zdravković L, Potts D M. A three-dimensional hysteretic soil-water retention curve[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(2): 155 – 164.
- 18 Beff L, Günther T, Vandoorne B, et al. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using electrical resistivity tomography[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2013, 17(2): 595 – 609.
- 19 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- 20 Li L, Revesz P. Interpolation methods for spatio-temporal geographic data[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2004, 28(3): 201 – 227.
- 21 Pan G, Moss K, Heiner T, et al. A Fortran program for three dimensional Cokriging with case demonstration[J]. *Computers & Geosciences*, 1992, 18(5): 557 – 578.
- 22 Triantafilis J, Odeh I O A, McBratney A B. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(3): 869 – 878.
- 23 靳国栋,刘衍聪,牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. *长春工业大学学报*, 2003, 24(3): 53 – 57.
Jin Guodong, Liu Yancong, Niu Wenjie. Comparison between inverse distance weighting method and Kriging[J]. *Journal of Changchun University of Technology*, 2003, 24(3): 53 – 57. (in Chinese)
- 24 陈庆强,沈承德,孙彦敏,等. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 1 – 8.
Chen Qingqiang, Shen Chengde, Sun Yanmin, et al. Mechanism of distribution of soil organic matter with depth due to evolution of soil profiles at the Dinghushan biosphere reserve[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 1 – 8. (in Chinese)
- 25 王合玲,张辉国,秦璐,等. 新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4969 – 4980.
Wang Heling, Zhang Huiguo, Qin Lu, et al. The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 4969 – 4980. (in Chinese)
- 26 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 Rongjiang, Yang Jingsong, Zhao Xiufang, et al. Three-dimensional stochastic simulation and uncertainty assessment on spatial distribution of soil salinity in coastal region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 91 – 97. (in Chinese)