

长期耕作条件下小尺度农田土壤有机质空间变异性

张法升^{1,2}, 刘作新¹, 曲 威^{1,2}, 亢振军^{1,2}, 沈业杰^{1,2}

(1. 辽宁省节水农业重点实验室, 中国科学院沈阳生态应用研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 采用 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 高密度网格采样的地统计学方法, 进行了小尺度 (10.24 hm^2) 土壤耕层 ($0\sim 30\text{ cm}$) 有机质的空间分布特征量化研究。研究发现, 取样区内土壤有机质空间分布表现出弱变异性, $CV \leq 1.84\%$, 但整体含量偏低, $SOM \leq 1.04\%$; 东西、南北、东南和西南四个方向上半方差函数的差异性表明, 有机质空间分布具有异向性, 基于各向同性假设和各向异性的半方差函数结构分析以及 Kriging 估计都能很好地反映取样区土壤有机质的空间变异性, 但后者在估计结果精度和真实性方面要优于前者。

关键词: 土壤有机质; 空间变异; 异向性; 半方差函数; Kriging 估计

中图分类号: S153.6+21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)02-0167-05

土壤有机质 (Soil Organic Matter) 是土壤的重要组成部分。尽管土壤有机质只占土壤总质量的很小一部分 (耕作土壤表层有机质含量通常 $\leq 5\%$), 但对土壤物理、化学和生物等特性及各种过程能产生重要影响, 并在土壤肥力、植物生长等方面都有着积极的作用和意义^[1~4]。然而, 土壤作为一个连续体, 土壤有机质的分布并非均一, 而是呈现空间异质性, 传统的耕作方式就很难做到因地制宜的施肥管理, 因此掌握土壤有机质的空间变异规律有利于准确了解土壤有机质空间分布状况, 可为土壤农化分析取样和农田养分的精准管理提供科学依据。

土壤有机质空间变异研究自 20 世纪 70~80 年代开始, 到目前, 国内外学者在不同土壤类型, 不同研究尺度上做了大量土壤有机质空间变异研究, 其中农田尺度上利用地统计学分析土壤有机质空间变异特征一直是相关领域的研究热点^[5~10]。以往土壤有机质空间变异研究大多在各向同性假定条件下进行的, 但土壤形成过程的复杂性以及不同方向上长期农田耕作管理措施的差异性使得土壤有机质空间分布并非象人们假定的那样, 实际研究中, 土壤有机质的空间分布各向同性是相对的, 而各向异性则是绝对的^[11]。已有学者在土壤特性异向性分布方面做了一定研究^[12~14], 但由于各向异性条件下地统计学分析和预测空间变异性会比各向同性假设条件下复杂很多, 实际研究中应用还是不多, 而考虑各向异性或以方向变异性为研究目标的小尺度农田土壤有机质空间变异研究更是鲜有报道。

本研究以农田小尺度 (10.24 hm^2) 耕作土壤为研究对象, 运用地统计学分析土壤有机质的空间变异规律, 探明研究区土壤有机质空间分布特征, 通过比较各向异性条件和各向同性假设条件下的 Kriging 估计结果, 探讨取样区一定采样尺度各向异性条件下土壤有机质空间变异性的分析和预测, 以及其近似为各向同性的可行性, 期望得到有利于取样区以后土壤有机质调查和预测采样工作的科学结论。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省西北部阜新市 ($121^{\circ}01'E \sim 122^{\circ}56'E$, $41^{\circ}41'N \sim 42^{\circ}56'N$)。阜新市受东亚季风影响, 属北温带大陆性气候, 多年平均气温 $7.1^{\circ}\text{C} \sim 7.6^{\circ}\text{C}$ 之间, 年平均降水量 480 mm , 且年内分配极不均匀, 60% 集中在 $6\sim 8$ 月份, 年平均水面蒸发量为 $1\,746\text{ mm}$, 属半干旱地区。阜新市农业人口占总人口 50% 以上, 粮食作物种植面积占耕地面积 75% , 主要为玉米、大豆和花生, 种植方式主要为玉米轮作, 部分有花生、大豆等间作和轮作。取样区设在阜新市阜新蒙古族自治县马蹄营子村节水农业示范区, 该区域地势平坦, 极端高差小于 3 m , 土壤为砂壤质褐土, 作物主要为玉米。由于我国的土地分配制度的特点, 多年以来取样区农田为若干农户耕作, 耕作方向为自南向北, 因而研究区域的农田呈现南北带状分布。

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 中国科学院陆地生态系统重点实验室开放课题; 辽宁省重大项目 (2008212003)

作者简介: 张法升 (1984—), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事土壤特性空间分析和节水农业研究。E-mail: fasheng06@163.com。

通讯作者: 刘作新, E-mail: liuzuoxin@yahoo.com.cn。

1.2 取样方法与室内分析

2008 年 3 月在取样区选取面积为 10.24 hm^2 的平坦地块,采用 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 高密度网格设计,取耕层 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土壤样本 1 024 个带回室内分析;室内土壤有机质含量测定采用重铬酸钾氧化-比色法^[15]。取样点分布如图 1。

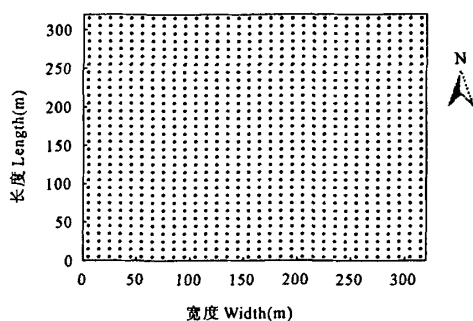


图 1 取样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points

1.3 数据处理方法

1.3.1 地统计学 地统计学是以区域化随机变量理论为基础,变异函数为主要工具,研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性或空间相关和依赖性自然现象的分析方法。20 世纪 70 年代后,地统计学被应用到土壤科学,并逐渐成为描述土壤特性空间变异的有效手段之一^[11,16]。

变异函数,又称半方差函数,是地统计学分析区域化随机变量空间变异结构所特有的基本工具。假设区域化随机变量在点 x 和 $x+h$ 处的值为 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$,那么, $Z(x)$ 关于 h 的变异函数 $\gamma(x, h)$ 为:

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$$

式中, h 为 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 之间的间距,一般 $\gamma(x, h)$ 的值随 h 增大而增加,如图 2。

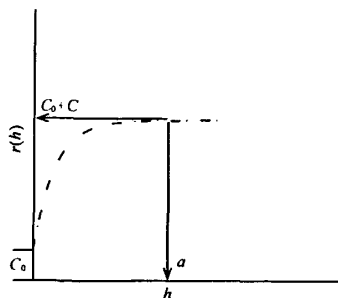


图 2 半方差函数图

Fig. 2 Semi-varianogram

区域化随机变量空间变异由自相关部分和随机部分构成,半方差函数参数基台值 $C_0 + C$,块金值 C_0 和变程 a 是描述区域化随机变量空间变异结构的重要参数。

区域化随机变量在几个方向上变化时要考虑变异函数 $\gamma(x, h)$ 在不同方向上的差别,如果 $\gamma(x, h)$ 在各个方向上的变化都相同称为各向同性,反之称为各向异性。各向异性可分成两类:几何异向性和带状异向性。各向同性的 $\gamma(x, h)$ 比较容易计算和分析,对于各向异性的 $\gamma(x, h)$ 则需要两个或多个方向上的模型套合,即

$$\gamma(x, h) = \sum_{i=1}^n \gamma_i(x, h)$$

Kriging 插值估计是建立在变异函数理论及其结构分析的基础之上,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计的一种方法。对于任意待估点或地块 V 的实际值 $Z_0(x)$,其估计值 $Z_0^*(x)$ 是通过该待估点或待估块段影响范围内的 n 个已知样品值 $Z(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 线性组合得到,即

$$Z_0^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

式中, λ_i 为权重系数,是各已知 $Z(x_i)$ 在估计 $Z_0^*(x)$ 时所占影响大小的系数,而估计 $Z_0^*(x)$ 的好坏主要取决于怎样计算或选择权重系数 λ_i , λ_i 值的确定是由变异函数 $\gamma(x, h)$ 计算出来的,因此,半方差函数 $\gamma(x, h)$ 模型的建立是地统计学分析中至关重要的内容。

1.3.2 数据处理工具 本研究土壤有机质数据统计分析借助软件 SPSS 16.0,地统计学分析运用软件 ArcGIS 9.2 中 Geostatistical Analyst 模块。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

土壤有机质含量实测数据描述性统计结果见表 1。1 024 个土壤样本中,有机质最大含量为 1.04%,最小值为 0.92%,平均值为 0.976%,标准差 0.018%。以上统计特征表明研究区土壤有机质空间分布呈弱变异性, $CV \leq 1.84\%$ ^[17],但总体含量不高, $\leq 1.04\%$ 。土壤有机质较小的偏度 0.039 和 K-S 正态检验 Asymp. Sig. (2-tailed) = 0.210 > 0.05 都表明土壤有机质呈正态性分布。

2.2 半方差函数

图 3 为各向同性假设条件下和东西、南北、东南和西南四个方向上的土壤有机质半方差函数图,各函数的拟合曲线拟合效果较好,参数见表 2。

表 1 土壤有机质描述性统计分析
Table 1 Descriptive statistics of soil organic matter content

指标 Index	样本数 N	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	标准差 SD	偏度 S	K-S* 检验 Sig.
SOM	1024	1.04	0.92	0.976	0.018	0.039	0.210

注:SOM 和 K-S* 分别为土壤有机质含量(%)和 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验。
Note: SOM and K-S* are the abbreviations of soil organic matter content(%) and Kolmogorov-Smirnov normal test, respectively.

图 3 中相同滞后距离下东西、东南和西南方向的半方差函数值都明显高于南北方向,而东西、东南和西南三个方向的半方差函数差别不大;表 3 中基台值 $C_0 + C$ 和变程 a 也表现出类似差异特征,南北方向上的半方差函数基台值 $C_0 + C$ 明显小于东西、东南和西南三个方向,但变程 a 却显著大于这三个方向,而东西、东南和西南三个方向的基台值 $C_0 + C$ 和变程 a 差别不大。以上分析表明取样区内土壤有机质存在关于方向的空间变异性,即异向性。由于取样区尺度不大,成土过程等大尺度因素对土壤有机质含量的影响各方向上基本一致,因此取样区土壤有机质空间分布的异向性主要应该是由长期以来土地耕作管理措施的差异所致。实际调查发现,东西和南北方向分别是取样区农户土地划分和耕作方向,农田土壤有机质对农田管理措施具有动态响应^[18],东西方向上自南向北不同农户的耕作管理措施(如作物种类,种植方式和施肥措施等)的差异性势必造成土壤有机质含量也产生相应差异变化,从而使得东西方向上土壤有机质变异性增多,空间相关范围小,反映在半方差函数上即为较高的 $C_0 + C$ 、很小的变程 a 。南北方向为农户耕作方向,该平行带内土壤有机质受相同的耕作管理措施影响土壤有机质含量变异性较小,相关范围较大,因而半方差函数基台值 $C_0 + C$ 最小、变程 a 最大。

另外,由图 3 可见,四个方向上的变异函数的大体走势与各向同性假设条件下的半方差函数基本相同,且除南北方向外,东西、东南和西南三个方向的半方差函数基台值 $C_0 + C$ 和变程 a 差异不大,这样的异向性变异特征为各向同性假设条件下的半方差函数分析和 Kriging 估计提供了可能性,同时也意味着各向异性的半方差函数模型套合复杂性的降低。表 2 中各向同性假设条件下的半方差函数拟合函数的拟合效果显著,决定系数达到了 0.941,随机性变异比值 $C_0/(C_0 + C)$ 为很小的 0.139,变程 a 为 141.5 m 也较远,说明取样区各向同性假设条件下的地统计学分析可行。

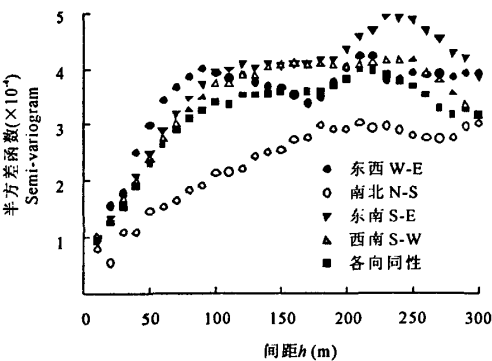


图 3 半方差函数图
Fig.3 Semi-variogram

表 2 半方差函数参数及检验
Table 2 Parameters and test of semivariogram

函数 Model	模型 M	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	块金基台比 $C_0/(C_0 + C)$	变程 $a(m)$	决定系数 R^2	F 检验* P
南北(N-S)	球状 S	0.00001	0.00027	0.357	261.9	0.950	$P < 0.01$
东西(E-W)	指数 E	0.00004	0.00039	0.769	91.9	0.873	$P < 0.05$
西南(SW)	指数 E	0.00005	0.000041	0.122	135.6	0.915	$P < 0.05$
东南(SE)	指数 E	0.00005	0.00040	0.125	148.8	0.922	$P < 0.05$
各向同性(I)	球状 E	0.00005	0.00036	0.139	141.5	0.941	$P < 0.01$

注: *1%和 5%水平下显著性检验表明半方差函数拟合效果较好。
Note: * The 1% and 5% level significance tests showed semi-variograms had good simulation of experienced semi-variance values.

2.3 Kriging 估计结果与评价
Kriging 估计分别为各向异性条件下基于东西、南北和西北三个方向套合模型和各向同性假设条件

下的 Ordinary Kriging 估计,两种估计结果以及统计比较见表 3 和图 4。

表 3 两种 Kriging 估计值统计特征
Table 3 Statistical characteristics of two Kriging estimations

数据 Data	样本数 N	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	估计标准差 δ_E
实测值 Measured data	1024	1.040	0.920	0.976	0.018	1.84	—
Kriging 估计 a* Kriging estimation a	1024	1.021	0.935	0.976	0.016	1.67	0.00865
Kriging 估计 b* Kriging estimation b	1024	1.020	0.944	0.976	0.015	1.58	0.00943

注：* a、b 分别为各向异性条件下基于套合模型和各向同性假设条件下土壤有机质 kriging 估计。

Note: * a and b are the Kriging estimations of soil organic matter based on the combination model of anisotropical semi - variograms and isotropical semi - variogram model, respectively.

2.3.1 Kriging 估计结果统计特征比较 表 3 给出了两种 Kriging 估计结果的统计特征值,可以看出两种估计结果的均值与实测数值的均值基本一致,但在最大值、标准差和变异系数方面,这三个统计值关系为:各向同性假设条件下小于各向异性条件下的估计值,且都小于实测数据,而最小值的统计数的比较特征正好相反,各向同性假设条件下的估计最大,各向异性条件下的估计次之,实测数据最大。以上分析可见,Kriging 估计对取样区土壤有机质的估值存在平滑效应,且各向同性假设条件下估计结果的平滑效应要大于各向异性条件下的 Kriging 估计结

果。

2.3.2 Kriging 估计结果 图 4a、b 分别为各向异性条件下基于套合模型和各向同性假设条件下土壤有机质 Kriging 估计图。从图 4a、b 可以看出两种 Kriging 估计图都能很好地再现取样区土壤有机质的空间变异性,尤其是南北方向上的带状分布趋势和东西方向上变化的复杂性。各向异性条件下基于套合模型和各向同性假设条件下土壤有机质 kriging 估计标准差 δ_E 分别为 0.00865 和 0.00943(表 3),说明两种估计的精度都达到了一定的水平。

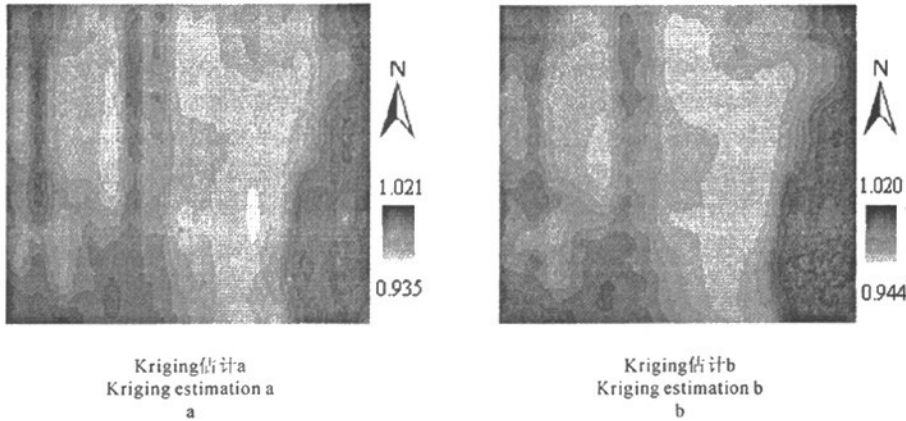


图 4 Kriging 插值估计图
Fig.4 Maps of Kriging estimation

进一步比较分析,各向同性假设条件的估计图 4b 较各向异性条件下基于套合模型的估计图 4a 有更强的平滑效应,平均化后的估计图 4b 有失真感觉,图 4b 中南北方向的带状分布和东西方向的异向性较图 4a 模糊;再从二者的估计标准差 δ_E 来看,两者虽然都很小,但 Kriging 估计 b 估计标准差较 Kriging 估计 a 增加了 8.21%,显然 Kriging 估计 a 的估计精度要优于 Kriging 估计 b。因此各向异性条件下基于套合模型的 Kriging 估计在精度和真实性方面上

还是要优于各向同性假设条件的 Kriging 估计。

3 结 论

取样区土壤有机质空间分布表现为弱变异性 $CV \leq 1.84\%$,但整体含量偏低, $SOM \leq 1.04\%$,应该注意采取增加施入有机肥或秸秆还田等措施,提高土壤有机质含量,改善土壤条件,确保土壤的可持续利用。

取样区多年来长期耕作管理措施的局部差异性

导致土壤有机质在空间分布上表现出异向性特征。在 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 采样尺度下,相比各向同性假设条件的地统计学分析,各向异性条件下基于套合模型的 kriging 估计能更接近实际地反映土壤有机质的空间分布状况,这一点可由弱的平滑效应、更小的估计标准差和更为真实的 kriging 估计图体现出来。尽管如此,各向同性假设条件下的半变异函数结构分析、Kriging 估计也能很好地反映研究区土壤有机质的空间变异性,如拟合度较高的半方差函数、较小的估计方差、良好的结构性比例和变异范围等。

一般而言,如果研究主要目的不是方向变异性,研究区土壤有机质空间变异分析和估计可在各向同性假设条件下进行,但对于估计精度有特殊要求或异向性空间变异分析等研究,各向异性条件下基于套合模型的 kriging 估计则更有优势。

参考文献:

- [1] Sparling G P, Vesely E T, Wheeler D, et al. What is soil organic matter worth? [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(2): 548—557.
- [2] Singer M J, Munns D N. *Soils: an introduction* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996: 36—37.
- [3] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 32—49.
- [4] 刘思春, 吕家珑, 马爱生, 等. 有机质对黄壤土持水性与水肥效应的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 65—68.
- [5] 王学锋, 章 衡. 土壤有机质的空间变异性 [J]. *土壤*, 1995, 27(2): 85—89.
- [6] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变异性特征 [J]. *农业工程学报*, 1999, 15(3): 33—38.
- [7] 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.
- [8] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 等. 甘肃省灌溉土壤养分空间变异特征 [J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 70—74.
- [9] 黄元仿, 周志宇, 苑小勇, 等. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征 [J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2776—2781.
- [10] 张法升, 刘作新, 张 颖, 等. 农田土壤有机质空间变异的尺度效应 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2009, 26(3): 350—356.
- [11] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 35—101.
- [12] 徐 英, 陈亚新. 土壤盐特性空间变异的各向同性近似探讨 [J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(4): 14—17, 24.
- [13] 史海滨, 陈亚新. 土壤水空间变异性的套合模型及区域信息估值 [J]. *水利学报*, 1994, (7): 70—77, 89.
- [14] 张世熔, 黄元仿, 李保国. 冲积平原区土壤颗粒组成的趋势效应与异向性特征 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 56—60.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106—110.
- [16] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives [J]. *Geoderma*, 1999, 89(1—2): 1—45.
- [17] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究 [J]. *水利学报*, 1985, (9): 10—21.
- [18] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应 [J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 787—796.

Spatial variability of soil organic matter in long-term small scale across cultivated crop land

ZHANG Fa-sheng^{1,2}, LIU Zuo-xin¹, QU Wei^{1,2}

KANG Zhen-jun^{1,2}, SHEN Ye-jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Liaoning Water-saving Agriculture, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The data collected from a 10.24 hm^2 crop land in dense grid of $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ were used to analyze the spatial variability of the surface (0 ~ 30 cm) soil organic matter (SOM) by geostatistics method. Within the study area, soil organic matter had weak variability as $CV \leq 1.84\%$, but it was entirely low in the content no more than 1.04%. The differences between semivariograms among the four directions showed that soil organic matter had anisotropical distribution characteristics. Both Kriging estimation based on the isotropical semivariogram model and the combination model of anisotropical semivariogram made satisfiable predication, however, the latter had better accuracy and reality than the anterior.

Keywords: soil organic matter; spatial variability; anisotropy; semi-variogram; Kriging estimation