

地统计学在湿地土壤养分空间异质性研究中的应用

白军红, 余国营, 王国平

(中国科学院长春地理研究所 中国科学院湿地研究中心, 吉林 长春 130021)

摘要: 在地统计学的区域化变量理论和变异函数的基础上建立了一套对湿地土壤养分的空间异质性进行定量化的较系统且完整研究的方法, 通过向海湿地的案例研究, 证实了该方法在湿地土壤养分空间异质性研究中具有较强的操作性和准确性。

关键词: 湿地; 土壤养分; 空间异质性; 地统计学; 研究方法

中图分类号: X11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 0267(2001)05 - 0311 - 04

Application of Geostatistics in Spatial Heterogeneity of Soil Nutrients in Wetlands

BAI Jun-hong, YU Guo-ying, WANG Guo-ping

(Changchun Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130021 China)

Abstract: Geostatistics is a new method of spatial analysis which is developed in recent years, its variograms is suited to research quantitatively characters of spatial structure variation of regionalized variable and capable of reflecting fully the constructive property of regionalized variable. In this paper the authors intend to research quantitatively the spatial heterogeneity of soil nutrients in wetlands by the theory of regionalized variable and variograms of geostatistics. Based on the theory of regionalized variables and variograms of geostatistics, the systematic and complete method on quantitative research on the spatial heterogeneity of soil nutrients in wetlands is established. A case study on Xianghai wetland confirms that it was efficient and accurate to study on the spatial heterogeneity of soil nutrients in wetlands.

Keywords: wetlands; soil nutrients; spatial heterogeneity; geostatistics; investigative method

1 引言

土壤空间变异性 (spatial heterogeneity) 是指在土壤质地相对均一的区域内, 土壤的特性参数、土壤水分运动的某些经验参数以及土壤中的有关状态变量的数值, 在同一时刻不同空间位置并不相等的性质。土壤空间异质性的研究始于 70 年代初, Burgess, warrick 等许多国外土壤学家对土壤物理性质 (如水分、透水率、湿度) 空间变异性规律做了大量的研究^[4-6], 但大都停留在对土壤空间异质性的定性描述上。80 年代初, 空间异质性已经成为土壤科学研究的重要内容^[7], 并开始由定性描述转向定量研究,

还引进了 Kriging 内插技术, 进一步研究了 Cokriging 内插、puctual Kriging 内插等技术, 并用于土壤制图。此后部分化学性质在空间上的变异性开始进入诸多学者的研究领域。国内对土壤性质空间变异性的研究起步较晚。80 年代对旱地上土壤的空间变异性、水稻土物理性质的空间变异性进行了研究。90 年代, 一些学者对土壤的某些化学特性的空间变异性进行了研究, 现在已开始把 GIS 应用于土壤的空间变异性研究中。但到目前为止, 国内外对湿地土壤的养分的空间异质性研究较少, 而且湿地土壤养分的空间异质性研究对湿地保护与恢复有重要的理论指导价值。

2 湿地土壤养分空间异质性研究引入地统计学的依据

湿地是处于水陆交错带的特殊的生态系统, 其独特的生境以及生物地球化学过程孕育了特殊的土壤类型。湿地土壤养分含量是湿地土壤肥力的重要标志, 它有贫营养、中营养及富营养之分^[12], 不同的土壤肥力导致不同的湿地生产力。湿地土壤肥力是土壤

收稿日期: 2000 - 09 - 18; 修订日期: 2000 - 12 - 07

基金项目: 湖沼三期项目“松嫩平原霍林河流域沼泽资源环境动态效应与优化管理(ZKHZ - 03 - 06)”及中国科学院知识创新项目“松嫩平原内陆盐碱湿地水陆相互作用过程与区域生态环境安全(Kzcx - 302)”

作者简介: 白军红(1976—), 男, 河北石家庄人, 中国科学院长春地理研究所在读博士, 主要从事水资源开发利用和管理、湿地环境及河口生态、元素生物地球化学等方面的研究。

为湿地植物生长供应和协调营养条件和环境条件的能力,它是湿地土壤的物理、化学、生物等性质的综合反映,土壤的理化性质都直接或间接地影响着湿地植被的生长,因此土壤中各种肥力因素并不是孤立的,而是相互联系、相互制约的。不同的湿地类型,土壤肥力差异较大,即使在同一湿地内,土壤肥力也是不均一的,具有高度的空间异质性。

湿地土壤养分变量是一区域化变量,也是一随机函数,但不同于纯随机变量的是它同时具有随机性和结构性特征。经典的 Fister 统计是假设样本之间完全独立,且服从正态分布为前提^[13]。然而近年来许多研究已经表明许多土壤参数在空间上并不是完全独立的,而是在一定范围内存在着空间上的相关性^[8]。因此仅仅运用经典的 Fister 统计方法已经不能满足土壤空间异质性研究的需要。地统计学是近几十年发展起来的一门新的空间分析方法,其变异函数则适合于定量研究区域化变量空间结构变异特征,能够全面反映区域化变量的结构性^[2、14]。诸多地统计学工作者(Webster 1985, 候景儒等 1993)在多年研究的基础上总结出地统计学研究方法是以区域化变量为理论基础,以变异函数为主要工具,用于研究那些在空间分布上即有随机性又有结构性,或空间相关和依赖性的自然现象的最有效的定量研究方法^[8、13]。这就为利用地统计学定量研究湿地土壤养分的空间异质性提供了工作经验和依据。

3 地统计学定量研究方法的基本理论及应用

3.1 湿地土壤空间抽样设计

采用规则网格数据采样法^[2],在所研究的湿地区域,根据湿地的区域特征选择坡度不超过 3°的代表性地段,确定合理的正方形采样面积、采样间距,计算采样点数,根据自身的工作量分析能力,在理论采样点数中随机抽取一定数量(能够满足统计意义)的样点进行采样,在每一样点上挖一临时土壤剖面,测定土壤各种指标,并分层取一定量的土样供实验分析用。

3.2 湿地土壤养分的空间结构性

湿地土壤养分的变异是一种空间上的连续过程,其样点测定值在空间上的分布具有一定的结构^[12、15];由于许多土壤参数在一定距离范围内不一定是完全独立的,而是自相关的。所以在分析土壤的空间变异时还必须考虑样点的坐标系统及样点之间的相关间距或相关域^[14],在研究时可以把在一定位置 $Z(x)$ 上测定土壤养分 Z 设想成是在一个坐标点上测定的。一

个区域化变量 $Z(x)$ 是一个随机变量,它是在某区域内 x 坐标上记录的不同的 Z 值,对于某区域 X 内的任意一坐标点 x_i 都有一随机变量 $Z(x_i)$ 与其相对应,即:

$$Z(x_i) = \{Z(x), x_i \in X\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

变量在点 x_i 与 $x_i + h$ (h 为空间距离/相关间距) 处的数值具有某种程度的自相关,这种自相关依赖于两点之间的间距 h 及变量特征,可以用自相关函数和半方差变异函数来刻画湿地土壤养分的空间变异结构。

自相关函数是指序列中变量在不同位置取值时,相互之间线性相关程度的统计量。而半方差变异函数则反映了不同距离之间的方差变化,半方差即为方差的一半^[10、14]。湿地土壤养分变量满足二阶平稳和本征假设^[2、15],当样本空间足够大时,其理论自相关函数和半方差函数的计算式^[2、10、14]分别为:

$$\rho(h) = \frac{1}{\sigma^2 N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - \bar{Z}(x)] [Z(x_i + h) - \bar{Z}(x + h)] \quad (2)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i + h) - \bar{Z}(x)]^2 \quad (3)$$

两关系式中都仅仅是相关间距 h 的函数,与坐标点位置无关。二者存在着诸多的异同点,在特定的条件下可以换算。但一般认为自相关函数强调的是测定值之间的线性相关,而半方差反映的是变异结构,不限于测定值之间的线性关系。区域化变量存在着空间上的依赖性,当 h 增加时,值之间的差异也会增加。

3.3 理论变异函数的模型^[2、14、15]

实际上理论变异模型是 $r(h)$ 未知的,必须从有效的空间取样数据中去估计,对各种不同的 h 值可计算出一系列的 $r^*(h)$ 值,因此需要用一个理论模型去拟合这些 $r^*(h)$ 值。

理论变异函数模型主要有球状模型(见图 1)、指数模型、高斯模型、幂函数模型、抛物线模型等。对湿地土壤养分空间变异的半方差拟采用应用最广的球状模型进行拟合。

球状模型的表达式如下:

图 1 球状理论变异函数模型

$$\gamma(h) \begin{cases} C_0 + C(3h/2a - h^3/2a^3) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (6)$$

式中 C_0 为块金常数或块金方差, $C_0 + C$ 为基台值, C 为拱高或结构方差, a 为变程。

3.4 克立格 (Kriging) 内插法^[10,14,16]

在实际的土壤调查中,因只能在一定量的离散点位上采样和测定土壤养分的性质,所以对没有采样的点位的土壤养分的性质就必须进行估计和判断。克立格法 (Kriging) 是利用区域化变量的原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计的一种方法。与一般的估计方法相比,其优点在于最大限度地利用了空间取样所提供的各种信息。主要的克立格法有点克立格法 (puctual Kriging)、块段克立格法 (block Kriging)、协同克立格法 (Co - Kriging)、泛克立格法 (Universal Kriging) 以及对数正态克立格法 (Nonnormal Kriging) 等,根据样本的分布特征,采取最优的克立格内插法。克立格内插法实质上是实行局部估计的加权平均值,设在一区域内采样点 X_0 处某一养分变量的估测值为 $Z^*(x_0)$,其周围在相关范围内有 n 个已测定值 $Z(x_i) \quad i=1, 2, \dots, n$ 。通过 n 个测定值 $Z(x_i)$ 的线性组合来求估测值 $Z^*(x_0)$:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (7)$$

$Z^*(x_0)$ 为未采样点上的内插估计值, $Z(x_i)$ 是邻近采样点上的测定值, n 为邻近点的采样点的个数, λ_i 是每个邻近采样点的测定值的权重。由 (7) 表明内插估计值的精度取决于权重 λ_i 的选取,所以 Kriging 内插的关键是 λ_i 的求解。

由于克立格法是一种无偏最优估计, λ_i 的确定应满足

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = 0 \quad (8)$$

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\}^2 = \min \quad (9)$$

利用拉格朗日原理,可由 (5) - (9) 式可推导出 λ_i 与半方差之间的矩阵方程:

$$A \cdot \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = B \quad (10)$$

(10) 式中:

$$A = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1N} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2N} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \cdots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix}$$

矩阵 A 中的 γ_{ij} 是各采样点的测定值之间的半方差值, 矩阵 B 中 r_{i0} 则为采样点 x_i 和内插点 x_0 之间的半方差值, λ_i 即为加权系数或权重, μ 为拉格朗日算子。由 (10) 式解出 λ_i , 代入 (7) 式可求出内插估计值 $Z^*(x_0)$ 。

3.5 结果分析

对计算结果以及半方差图进行空间变异结构分析,寻找其变异规律并探究其变异原因。

3.6 地统计学研究方法应用案例

采用上述方法定量研究了向海湿地土壤中全氮和全磷以及有机质的空间变异性,如图 2。其中,自相关函数图表明在一定范围内,自相关函数值大于零,并随着点间距的增大而减小即其相关性逐渐减弱。半方差图则反映了在一定范围内,偏差随间距的增大而增大的过程。通过对其进行克立格内插对其进行局部估计,从而能够了解湿地土壤养分在整个区域内的分

图 2 向海湿地土壤养分的自相关函数图和半方差函数图
半方差曲线拟合方程为

$$\gamma(h) \begin{cases} C_0 + C(3h/2a - h^3/2a^3) & h > a \\ C_0 + C_1 & 0 < h \leq a \end{cases}$$

Figure 2 Correlative and semi - variance diagrams of nutrients towards sea wetland

布和变异规律,与实测值相比较,插值误差较小,结果较理想。

4 结语

变异函数定量工具将湿地土壤养分的空间变异与成土因子和成土过程联系起来,使人们能够更深入理解湿地土壤的成土过程以及湿地土壤养分的空间变异规律,半方差图更直观地反映了湿地土壤养分的空间变异尺度和方向及分布格局,这些给湿地土壤养分空间异质性定量分析提供了重要的依据和指导。引入克里格内插方法实行局部估计,不仅考虑了待估样点与邻近样点的空间位置以及各邻近样点彼此之间的位置关系,而且还利用了已测样点区域化变量的空间分布的结构特征。这样就避免了系统误差的出现,使估计值更精确。

采用此定量方法对向海湿地土壤养分的空间异质性进行了初步探讨,所得结果与实际情况基本一致,有力证明了这套方法的可操作性以及准确性。高新技术的飞速发展,“3S”技术的广泛应用,为地统计学的引入提供了新的契机。在区域化变量理论的指导下,通过对RS(遥感)获取的数据实时监测湿地的空间特征及动态变化,据此合理设计采样点位和采样网格间距,利用GPS(全球定位系统)实现野外采样点的坐标定位,在GIS(地理信息系统)上把测定值和估计插值建成一个图形数据与属性数据相结合的湿地土壤养分信息数据库,运用地统计学模块(如GEOEAS地统计学软件)研究湿地土壤养分的空间异质性。“3S”技术与地统计学的结合将会极大地推进湿地土壤养分空间异质性研究的进程。

参考文献:

- [1] Yongs E G. Soil physical theory and heterogeneity[J]. *Agricul Water Manage*, 1983, (6): 223 - 228.
- [2] 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.
- [3] Li H and J F Reynolds. On definition and quantification of heterogeneity [J]. *Oikos*, 1995, **73**(2): 280 - 284.
- [4] Burgess T M and webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I The semivariogram and punctual Kriging[J]. *Soil Sci*, 1980, (31): 315 - 331.
- [5] Warrick A W and Nielsen D R. Spatial variability of soil physics. "Application of soil physics", Hillel, D., Academic Press, New York, 1980. 319 - 344.
- [6] 沈思渊. 土壤空间变异性:事实,调节和应用[J]. 国外农学 - 土壤肥料, 1988, 2: 35 - 42.
- [7] Alemi M H, Azari A B and Nielsen D R. Kriging and univariate modeling of a spatial correlated date[J]. *Soil Technology*, 1988, **1**(2): 117 - 132.
- [8] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[J]. *Advanced in Soil Sci*, 1985, (3): 1 - 71 .
- [9] 雷志栋. 土壤性质空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 9: 10 - 21.
- [10] 吕 军. 水稻土物理性质空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1990, **27**(1): 8 - 14.
- [11] 陈志熊. 封丘地区土壤水分平衡研究 I. 田间土壤湿度的空间分异[J]. 土壤学报, 1989, **26**(4): 309 - 314.
- [12] William J Mitsch and James G Gosselin. *Wetlands*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1986: 89 - 93.
- [13] 侯景儒, 郭先裕. 矿床统计预测及地统计学的理论与应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993.
- [14] 梁春祥, 姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1993, **30**(1): 69 - 77.
- [15] 沈思渊. 土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望[J]. 土壤研究进展, 1989, 2: 11 - 25.
- [16] 周慧珍, 龚子同. 土壤空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1996, **33**(3): 232 - 240.