

内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析^{*}

王其兵 李凌浩 刘先华 贺金生

(中国科学院植物研究所 北京 100093)

摘要 生态系统中生物或非生物因子在空间分布上普遍具有空间异质性。本文应用地统计学的基本原理与方法(半方差分析和无偏插值)对研究区域内的草原土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)空间异质性进行了分析。研究结果表明:SOC和TN的平均含量分别为1.555%和0.1333%,平均变异系数分别为11.2%和12.4%,二者在空间分布方面均具有明显的空间相关性,其空间相关尺度分别为8.19m和8.69m。在此基础上,应用空间局部内插法,绘制了两个因子的空间等值分布图。

关键词 地统计学 空间异质性 土壤有机碳 全氮

SPATIAL HETEROGENEITY OF SOIL ORGANIC CARBON AND TOTAL NITROGEN IN AN XILIN RIVER BASIN GRASSLAND, INNER MONGOLIA

Wang Qibing, Li Linghao, Liu Xianhua and He Jinsheng

(Institute of Botany, CAS, Beijing 100093)

Abstract The spatial distribution of bio- and abiotic factors in ecosystem has the features of spatial heterogeneity in general. In this paper, the spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen was examined using geostatistical tools, such as variograms, kriging. The means of the SOC and the TN were 1.555% and 0.1333% respectively with variance coefficient of 11.2% and 12.7% respectively. The two properties of soil were found spatially dependent significantly and their range of spatial dependence were 8.19m, 8.69m, respectively. With the kriging in the area of sampling, the contour maps for soil organic carbon and total nitrogen were drawn also.

Key words Geostatistics, Spatial heterogeneity, Soil organic carbon, Total nitrogen

现代生态学对不同尺度上生物和非生物因子分布规律的研究证明,生态系统中生物或非生物因子在空间分布上普遍具有空间异质性(Spatial heterogeneity)(Nielsen *et al.*, 1973; Gajem *et al.*, 1981; Hammer *et al.*, 1987; Qian *et al.*, 1995)。生物或非生物因子空间异质性的研究,对于描述生态因子的空间自相关性、绘制生态因子分布图以及设计抽

*本文于1997-12-12收稿,1998-03-10收到修改稿。
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.

中国科学院生物科学与技术特支费(财政部专项)(STZ-1-10)与中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站基金资助。

样方案等,具有重要意义(Richard *et al.*, 1992; 葛剑平等, 1995)。土壤有机碳和氮素不仅是土壤组成的重要部分,而且是生态系统中极其重要的生态因子,因而一直倍受生态学、土壤学等多个学科的关注,目前又成为国际全球变化问题研究的核心研究内容之一。鉴于草地生态系统碳、氮循环在全球变化中的重要作用,因此有关的研究业已引起国内外学者的兴趣(Li *et al.*, 1997)。本文将应用地统计学(Geostatistics)的基本原理与方法,对内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳和全氮的空间分布特征进行了分析。

1 研究地点概况与方法

1.1 研究地点概况

研究地点位于内蒙古温带典型草原区,东经116°40′;北纬43°37′;海拔1186m。土壤类型为栗钙土,地势平坦,年降水量350mm左右,平均气温-1.7°C(陈佐忠, 1988)。此处自1989年建立了一个长期放牧梯度试验研究围栏样地。其植被主要由羊草(*Lymus chinensis*)、冰草(*Agropyron michnoi*)、大针茅(*Stipa grandis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、星毛委菱菜(*Potentilla acaulis*)、糙隐籽草(*Cleistogenes squarrosa*)等组成。整个区域由于受放牧活动的影响,存在不同程度的退化。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集

在面积为100m × 100m,放牧强度为4只羊单位/ha的长期围栏样地内,按南北方向随机建立了5m × 10m的取样小区,首先将小区分为大小均为1m × 1m的50格,在每一格内,用内径为2cm的土钻随机取深度为15cm的土壤样品一个,共50个。然后又在此取样小区内随机设置了一个2m × 2m的取样亚区,将此亚区划分成16个0.5m × 0.5m大小的网格,同上各取土壤样品一个,共16个。

所有样品经风干、剔除杂质、研磨、全部过100目筛后,用于全氮、有机碳的分析。

1.2.2 土壤样品分析方法

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)用重铬酸钾外加热氧化法,全氮(Total nitrogen, TN)用凯氏定氮法,测定结果以土壤干重计。

1.2.3 数据分析

实验数据用地统计学软件包-*GS+*(Version 2)(Gama design software, 1992)进行半方差的计算与半方差图的绘制与插值,半方差的定义为:

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

式中 $\gamma(h)$ 为所有空间相距 h 的点对的平均方差, $N(h)$ 为在空间上具有相同间隔距离 h (又称滞后)的点对数目, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为点 x_i 和与 x_i 相距 h 的点的某一属性或因子的观测值。由此可知, $\gamma(h)$ 仅是滞后 h 的函数,将以 $\gamma(h)$ 为纵轴、 h 为横轴绘制出的 $\gamma(h)$ 随 h 增加的变化曲线,称为半方差图。

根据半方差的定义,当 $h=0$ 时, $\gamma(h)=0$ 。但在实际样本半方差图计算过程中,其近似平滑曲线并不通过原点,而是具有一个正的截距 C_0 ,地统计学上将其定义为块金方差,并把这种现象称为块金效应,它主要来源于远小于抽样间距的空间尺度上存在的差异。

对于具有空间相关性分布的生物或非生物因子的观测值,其半方差先随 h 增加而增大,当 h 增加到一定程度时,半方差便维持到一定水平,不再有明显的增加,此时的 $\gamma(h)$ 称为阈值,与此阈值相对应的空间距离 h 定义为空间自相关尺度或变程(range),以 a 表示。阈值与块金方差之差定义为结构方差(C)。变程是一个重要的基本参数,它给出了随机变量在空间上自相关性的尺度,在变程之内,空间是越靠近在一起的点之间的相关性越大,相距大于变程的点之间不具备自相关性。变程也表示了空间内插的极限距离,在此范围内的内插才具有意义。

为了定量地确定研究对象的空间自相关性以及空间内插计算,GS+软件提供了5种数学模型即线性模型、带阈值的线性模型、球面模型、指数模型和高斯模型供半方差图拟合选择。其中球面模型常用于对两维空间实验数据进行半方差图的拟合(Webster, 1985),该模型函数式为:

$$\gamma(h) = C_0 + C[1.5h/a - 0.5(h/a)^3], 0 \leq h \leq a;$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, h > a;$$

$$\gamma(h) = 0$$

式中各项的意义同上。

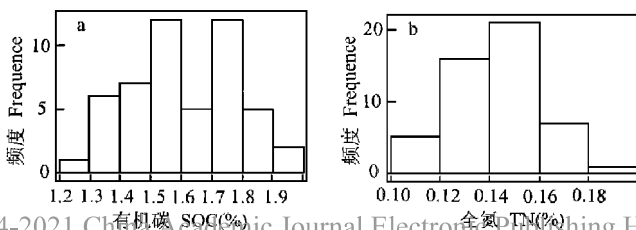
2 研究结果与分析

图1是土壤样品中有机碳和全氮的测定值频度分布柱状图,它表明所测定的土壤有机碳和全氮均呈正态分布。表1是这些测定结果的常规统计数据,从中可见, $5_m \times 10_m$ 采样区和 $2_m \times 2_m$ 采样区内土壤有机碳和全氮的变化范围分别为: 1.223%~1.949%、0.093%~0.172%,变异系数则为6.25%~12.7%,而且在两种大小采样区上的结果也不完全一致(但没有达到统计学意义商德显著差异),说明这两个因子存在空间变异。

表1 土壤有机碳(SOC)与全氮(TN)测定结果统计分析表

Table 1 Summary of classical statistical analysis of soil organic carbon and total nitrogen

项目	采样区	测定值范围	平均值	标准偏差	变异系数
Items	Sampling area	Range (%)	Mean (%)	Standard deviation	Coefficients of variation
SOC	$2_m \times 2_m$	1.453~1.751	1.585	0.099	6.25
	$5_m \times 10_m$	1.223~1.949	1.555	0.174	11.2
TN	$2_m \times 2_m$	0.116~0.161	0.135	0.014	10.4
	$5_m \times 10_m$	0.093~0.172	0.133	0.017	12.7



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.

图1 SOC和TN测定值频度分布

Fig. 1 The frequency distribution for determined values of SOC and TN

TN 与 SOC 的回归分析表明,二者存在着极显著的线性关系,其方程为:

$$\text{TN} = 0.0082 + 0.0806 \text{SOC}, r = 0.829^{**}$$

这与以往的许多类似研究相一致。

为了定量描述 SOC 和 TN 在空间尺度上的变异特征,下面引入了地统计学方法,依次对 SOC 和 TN 进行了半方差分析和局部空间插值。表2是 SOC 和 TN 球面半方差模型参数,图2是 SOC 和 TN 的半方差图。

表2 SOC 和 TN 球面半方差模型参数

Table 2 Parameters of the spherical models to SOC and TN variograms

项目 Items	块金方差 Nugget variance (C_0)	结构方差 Structural variance (C)	阈值 Sill	空间相关度 Spatial dependence (%)	变程 Range	相关系数 Correlation coefficient (r)
SOC	7.2×10^{-3}	3.73×10^{-2}	4.45×10^{-2}	84.0	8.19	0.910
TN	7.7×10^{-5}	3.23×10^{-4}	4×10^{-4}	81.2	8.69	0.894

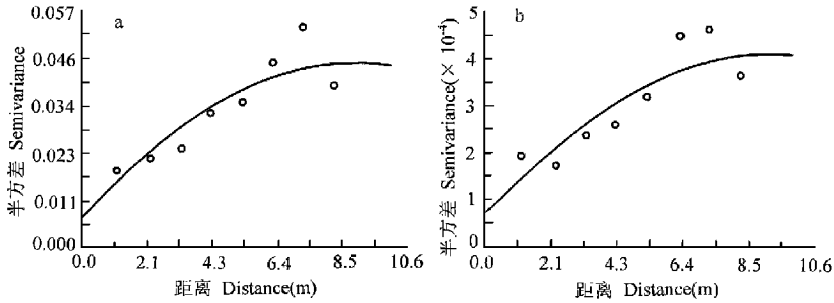


图2 土壤有机碳和全氮半方差图

Fig. 2 Semivariograms for SOC and TN a-SOC b-TN

表2中的相关系数(r 值)均达到极显著水平,表明所建立的模型可信。SOC 和 TN 的空间相关度($1 - C_0/\text{sill}$)分别为84%和81.2%,说明 SOC 和 TN 在空间分布上都存在显著的空间自相关性。

从图2中可见, SOC 和 TN 的半方差先随取样点之间距离的增加,较迅速地增加,当取样点间的距离增加到一定程度后半方差稳定在一个数值上,半方差图变为近乎平行于 x 轴的直线,此时的转折点分别在8.19m 和8.69m 处(表2)。这两个距离即分别为 SOC 和 TN 的空间自相关尺度。当取样距离大于这个尺度时, SOC 和 TN 则是随机的。从图2中还可见, SOC 和 TN 的半方差图十分相似,再次说明 SOC 和 TN 具有相似的空间分布格局,这正是二者具有极显著的线性关系的结果。

建立半方差图拟合模型的另一重要作用是用于空间上随机变量的估计或内插,即通过对某一生物或非生物因子在空间上已抽样的数据推测任一未抽样点上的数值,并进而绘制生态因子空间等值分布图。假设在一个区域内测量地点为 x_i , 变量观测值 $Z(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 则未测点 x_0 的估计值可用 n 个样本点的线性组合来表示(Webster, 1985; 葛剑平等, 1992; Qian *et al.*, 1995; Gamma, 1992) :

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda Z(x_i) \quad (\lambda - \text{已测点的权重})$$

本文根据上式,在 $5\text{m} \times 10\text{m}$ 的网格内每隔 5cm 作一次插值,共14661个,其统计结果见表3。

表3 采样区($5\text{m} \times 10\text{m}$)插值统计表

Table 3 Statistic of Kriged values in $5\text{m} \times 10\text{m}$ grid

项目	插值数	平均值	标准偏差	变异系数
Items	Number of interpolation	Mean(%)	Standard deviation	Variance coefficient(%)
SOC	14661	1.55	0.11	7.1
TN	14661	0.13	0.01	7.7

在插值的基础上,所绘制的SOC、TN空间分布等值图见图3,该图直观地反映了SOC与TN在空间上的分布。

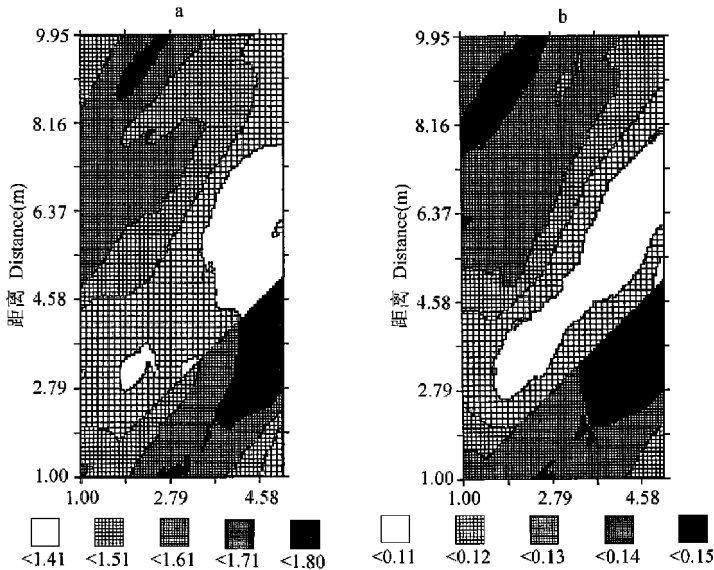


图3 SOC和TN空间分布等值图

Fig. 3 Contour maps for SOC and TN

a·SOC b·TN

3 讨论

地统计学起源于本世纪50年代南非的矿业研究中,原主要应用于矿体中黄金含量的估测,80年代初,生态学、土壤学开始重视这一理论(Trangmer *et al.*, 1985; Richard *et al.*, 1992),但我国至今仍缺乏这方面的工作。本文通过对SOC、TN实验数据的半方差分析,发现研究区域内的SOC、TN具有显著的空间异质性,其空间相关尺度分别为 8.19m 和 8.69m ,空间分布特征十分相似。这一趋势也是国外许多同类研究的基本结果(Raul *et al.*, 1995; Jackson *et al.*, 1993 a; 1993 b)。

根据现有的文献,不同生态系统中同种土壤理化性质的空间自相关尺度一般是不同的,这种差异主要是由于植被结构不同、表层土壤的再分配引起的(Paul *et al.*, 1991; Raul *et al.*, 1995)。草原受放牧活动的影响,土地变得裸露,枯落物分布不均匀是分析草原生态系统土壤空间异质性形成机制不可忽视的因素(Raul *et al.*, 1995)。本区土壤有机碳强烈地受放牧活动的影响(Li *et al.*, 1997),植被稀疏,主要优势植物空间相关性尺度在40~50m之间(刘先华等, 1998),由此推测,研究区域土壤有机碳和全氮的空间异质性形成也将受到放牧活动的强烈影响,其具体机制有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 陈佐忠, 1988: 锡林河流域地形与气候概况, 草原生态系统研究(第3集), 北京: 科学出版社, 13~22。
- 葛剑平、郭海燕、仲莉娜, 1995: 地统计学在生态学中的应用(I), 东北林业大学学报, **23**(2) 88~94。
- 刘先华、韩苑鸿、李凌浩, 1998: 放牧压力对内蒙古温带典型草原物种分布空间异质性的影响, 植物生态学报, **22**(5)。
- Gajem Y. M., Warrick A. W. & Myres D. E., 1981: Spatial dependence of physical properties of a typic torrifluent soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**: 709~715。
- Gamma Design Software, 1992: GS+, *Professional Geostatistics for the PC* (version 2)。
- Hammer R. D., O'Brien R. G. & Lewis R. J., 1987: Temporal and spatial soil variability on three forested landtypes on the mid Cumberland plateau. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **51**: 1320~1326。
- Jackson R. B. & Caldwell M. M., 1993a: Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. *Journal of Ecology*, **81**: 683~692。
- Jackson R. B. & Caldwell M. M., 1993b: The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics. *Ecology*, **74**: 612~614。
- Li Linghao, Chen Zuozhong & Wang Qibing *et al.*, 1997: Changes in soil carbon storage due to overgrazing in *Leymus chinensis* steppe in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Journal of Environmental Sciences*, **9**(4) 486~490。
- Nielsen D. R., Biggar J. W. & Erh K. T., 1973: Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, **42**: 215~259。
- Paul B. H., Ingrid C. B. & William K. L., 1991: Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and openings in North American shortgrass steppe. *Plant and Soil*, **138**: 247~256。
- Qian H. & Klika K., 1995: Spatial variability of humus forms in some coastal forest ecosystems of British Columbia. *Ann. Sci. For.*, **52**: 653~666。
- Raul S. L., Jorge O. S. & Patricia N. H., 1995: Impact of grazing on soil nutrients in a Pampean grasslands. *Journal of Range Manage.*, **49**: 452~457。
- Richard E. R., David J. M., Journel A. G. *et al.*, 1992: Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, **62**(2) 277~314。
- Trangmar B. B., Yost R. S. & Uehara G., 1985: Application of Geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, **38**: 45~95。
- Webster R., 1985: Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science*, **3**: 1~70。