

森林土壤物理性质的空间异质性研究

王政权, 王庆成

(东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要: 土壤空间异质性是土壤的重要属性之一。采用地统计学的理论和方法, 研究了阔叶红松林上层土壤物理因子的空间异质性。变异函数分析结果表明, 土壤水分、容重、毛管持水量和孔隙度具有明显的空间异质性。在 0~10 cm 土层深, 空间异质性尺度为 11~13 m, 11~20 cm 土层深为 6~8 m, 空间异质性程度随尺度变化。自相关部分的空间异质性在 0~10 cm 和 11~20 cm 土层深为 52.9%~73.7% 和 69.3%~93.6%, 明显大于随机部分的空间异质性。各向异性分析表明, 在空间上水分和孔隙度具有明显的各向异性, 而容重和毛管持水量接近各向同性。另外, 在空间自相关范围内, 土壤各物理因子的空间异质性有重要的密切关系。

关键词: 土壤物理因子; 空间异质性; 变异函数; 阔叶红松林

The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests

WANG Zheng-Quan, WANG Qing-Cheng (Northeast Forestry University, Harbin, 150040)

Abstract: Spatial heterogeneity is one of important properties in soil. We use the principle and methods of geostatistics to study spatial heterogeneity of soil physical properties under old growth korean pine forests. The results of semivariogram analysis show that there are high degrees of spatial heterogeneity in soil moisture, bulk density, capillary moisture capacity and porosity. In 0~10 cm layer, the scale of spatial heterogeneity is 11~13 m, and that is 6~8 m in 11~20 cm layer. The degrees of spatial heterogeneity changes with this scales. The nugget variance to sill ratio shows that spatial heterogeneity of autocorrelation in total spatial heterogeneity are 52.9%~73.7% (0~10 cm layer) and 69.3%~93.6% (11~20 cm layer) respectively. Both soil moisture and porosity have a stronger anisotropic structure in E 0° and N 90° directions, bulk density and capillary moisture capacity in the same directions are close to isotropy. The semivariograms of these physical factors have a close relationships and effect on each others.

Key words: soil physical factors; spatial heterogeneity; semivariogram; korean pine forests

文章编号: 1000-0933(2000)06-0945-06 中图分类号: Q145 文献标识码: A

土壤的形成过程包括物理过程、化学过程和生物过程。由于不同地区在气候、母岩、地形、植被和动物等方面的不同, 形成了各种土壤类型, 导致土壤性质存在明显的差异。即使在同一土壤类型, 不同的时间和不同的空间上土壤的某些性质仍然不同。这表明土壤具有时间上和空间上变化的特点。在进行土壤调查时, 同一土壤类型上不同的空间位置取样所测定的土壤养分和水分等因子常常具有较大的差别, 除去取样和测定过程中的误差外, 还存在着土壤本身的变化^[1], 这种变化称为土壤空间异质性或空间变异性^[2,3]。土壤空间异质性是土壤重要的属性之一^[4]。在不同的尺度上研究土壤的空间异质性, 不但对了解土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义^[5], 而且对了解植物与土壤的关系, 如更新过程^[6]、养分和水分对根系的影响以及植物的空间格局等也具有重要的参考价值^[6,7]。因此, 自 90 年代以来, 土壤的空间异质性与植被的空间异质性的关系一直是生态学研究的重点问题^[5,8,9]。土壤的水分、容重、毛管持水量和孔隙度是重要的土壤物理因子。在森林土壤中, 这些因子的空间变化与养分一样, 影响着树木的根系, 进而影响林分

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39570586)

收稿日期: 1999-09-09 修回日期: 1999-12-01

作者简介: 王政权(1956~), 男, 黑龙江省哈尔滨市人。博士生导师。主要从事森林培育与森林生态学研究。

的生长。研究这些因子的空间异质性,对深入了解树木根系的结构,变异规律和生长具有十分重要意义。为此,本文采用地统计学的理论和方法^[10,11],定量研究了阔叶红松林土壤上层(0~20 cm)的水分,容重,毛管持水量和孔隙度的空间异质性,为深入研究土壤空间异质性与根系结构和生长的关系提供重要的参考。

1 研究方法

1.1 土壤取样和分析

研究地点设置在东北林业大学凉水自然保护区未受干扰的老龄阔叶红松林内,选择典型的椴树红松林土壤为研究对象。林分年龄为 250~300 a,主要树种为红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*),糠椴(*Tilia mallchurican*),并混有一定数量的云杉(*Picea koraiensis*)和冷杉(*Abies nephrolepis*)。1996 年 10 月 20 日对该林分的土壤进行调查。抽样面积为 40m×40m,按最小距离 1 m 的取样的间隔,最大取样间隔 60 m 左右,见图 1。随机抽取 117 个样点,在每一样点上挖一个临时剖面,记录土壤的各种形态指标,然后在 5 cm 和 15 cm 深处用环刀取样,准备分析土壤的物理性质,同时取 50 g 土样放入铝盒中,分析土壤水分含量,最后每层取 200 g 土样装入塑料袋中,供养分析用。其中 0~10 m 土层深取 75 个样品,11~20 cm 深取 42 个样品。根据张万儒等介绍的方法^[12],土壤水分含量采用“烘干法”,容重、毛管持水量和孔隙度采用“环刀法”。这种方法测定土壤物理性质的特点是简单、方便和比较准确的。

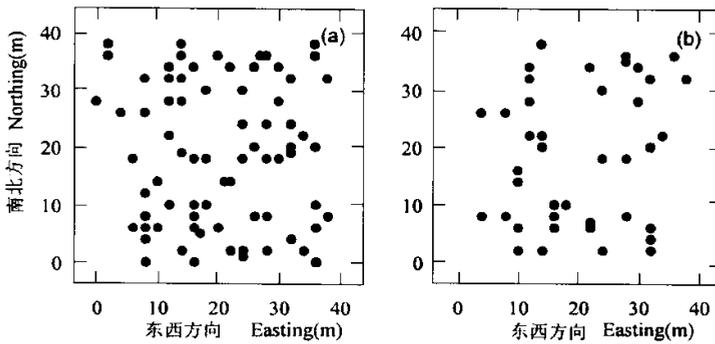


图 1 林地土壤取样位置 (a)0~10 cm 土层深度;(b)11~20 cm 土层深

Fig. 1 Sampling location of soil in field. (a)0~10 cm depth; (b)11~20 cm depth.

1.2 数据处理

不同空间位置上森林土壤的水分、容重、毛管持水量和孔隙度具有较大的差别,但是这些差别与样点的空间位置有关。根据 Webster^[13]和 Trangmar 等^[14]的研究,这些因子都是空间距离的函数,因此是一个区域化变量。这种变量主要考虑研究区域上所有分隔距离上任意两空间点上差异的大小,并用变异函数(Semivariogram)表示。由 117 个土壤样品的分析数据,分别 0~10 cm 和 11~20 cm 层次计算每一因子的变异函数,绘制变异函数曲线图,然后建立变异函数的理论模型。并通过块金值(Nugget variance)、基台值(Sill)、变程(Range)、分数维(Fractal dimension)、块金值与基台值之比,各向异性比(Anisotropic ratio)等参数定量地分析这些因子的空间变化规律。

2 结果和讨论

2.1 土壤物理性质的初步统计分析

在对森林土壤物理性质的调查数据进行空间变异分析时,首先用经典的统计方法进行分析。表 1 是阔叶红松林土壤的水分、容重、毛管持水量和孔隙度的基本统计特征。对统计平均数,标准差(*SD*)表示的是绝对变异,变异系数(*C_v*)反映的是相对变异。从表 1 中看出,上述 4 个物理因子中,0~10 cm 深度的土壤变异明显大于 11~20 cm 深度的变异。其中,毛管持水量和水分含量的变异最大。由于森林土壤物理性质的分布是空间连续的^[13,14],因此,表 1 所给出的土壤变异仅是从统计的角度描述这些因子的变化,并没有反

映这些因子在空间上是怎样变化的。土壤空间异质性的分析,不但需要从统计的角度知道变异的大小,更重要的是要了解这种变异在空间上的分布,它的空间构型及与尺度的关系,显然,经典的统计方法不能提供这方面的信息。

表 1 阔叶红松林土壤(0~20 cm)物理因子的统计特征

Table 1 Statistical parameters of soil physical factors(0~20 cm)in korean pine forests

因子 Factors	深度(cm) Soil depth	X	SD	Cv	Sk	Ku	n
水分 Soil moisture	0~10 11~20	52.51 35.75	16.60 10.25	0.316 0.286	-0.006 0.146	2.625 3.290	75 42
容重 Bulk density	0~10 11~20	0.630 0.850	0.16 0.11	0.253 0.129	-0.371 -0.032	2.618 4.345	75 42
毛管持水量 Capillary moisture capacity	0~10 11~20	90.140 58.480	37.38 10.50	0.414 0.179	2.533 0.146	10.860 4.171	75 42
孔隙度 Soil porosity	0~10 11~20	64.610 60.770	6.80 4.57	0.105 0.075	0.242 -0.335	4.793 3.536	75 42

2.2 土壤物理性质的变异函数

变异函数 $\gamma(h)$ 是地统计学所特有的,是区域化变量在分隔距离上各样本变异的量度,因此可作为空间分析的工具。图 2 和图 3 分别是 0~10 cm 和 11~20 cm 土层中各向同性条件下的变异函数曲线图,它表示 4 个土壤物理因子空间自相关特点。表 2 是变异函数的理论模型及有关参数。结果表明,阔叶红松林土壤水分、容重、毛管持水量和孔隙度在研究区域上存在高度的空间异质性。4 个土壤物理因子的空间变异随着空间距离的增加而增大,从较小的块金值(C_0)增加到一个相对稳定且较大的基台值(C_0+C)。基台值是测定因子的最大变异,当变异函数达到基台值时的空间距离称为变程(a)。变程是测定因子最大变异的距离,在变程之内,空间自相关存在,在变程之外,空间自相关消失。因此,变程的大小表示空间异质性的尺度。上述 4 个土壤物理因子均可用球状模型描述,在 0~10 cm 土层中,变程为 11~13 m 左右,在 11~20 cm 土层中,变程为 6~8 m 左右。上层的变异尺度明显大于下层。通过变异函数与尺度的关系,可以清楚地看出土壤物理因子的变异在空间上的分布与格局情况。

表 2 阔叶红松林土壤(0~20 cm)物理因子的变异函数理论模型及有关参数

Table 2 Smivariogram model and parameters of soil physical factors on korean pine forests

因子 Factors	深度(cm) Soil depth(cm)	模型 Model	模型参数					R^2
			C_0	C_0+C	C_0/C_0+C	a	D	
水分 Soil moisture	0~10 11~20	sph sph	180 14	640 85	0.281 0.164	11.5 6.5	1.976 1.704	0.365 0.312
容重 Bulk density	0~10 11~20	sph sph	0.030 0.002	0.091 0.012	0.329 0.166	13.5 6.8	1.999 1.586	0.384 0.298
毛管持水量 Capillary moisture capacity	0~10 11~20	sph sph	0.040 0.004	0.152 0.013	0.263 0.307	13.6 7.8	1.94 1.941	0.365 0.313
孔隙度 Soil porosity	0~10 11~20	sph sph	21.60 5.80	45.80 20.60	0.417 0.281	12.6 8.6	1.924 1.845	0.366 0.217

Sph=球状模型

2.3 土壤物理性质空间异质性组成

Li 等认为,空间异质性主要由两部分组成:即随机部分和自相关部分^[8]。块金值表示随机部分的空间异质性,拱高($C=C_0+C-C_0$)则表示自相关部分的空间异质性。块金值与基台值之比(C_0/C_0+C)反映随机部分的空间异质性占总空间异质性的程度,拱高与基台值之比(C/C_0+C)反映自相关部分的空间异质性占总空间异质性的程度。从表 2 可以看出,随机部分的空间异质性在 0~10 cm 土层中最小为 26.3%(毛

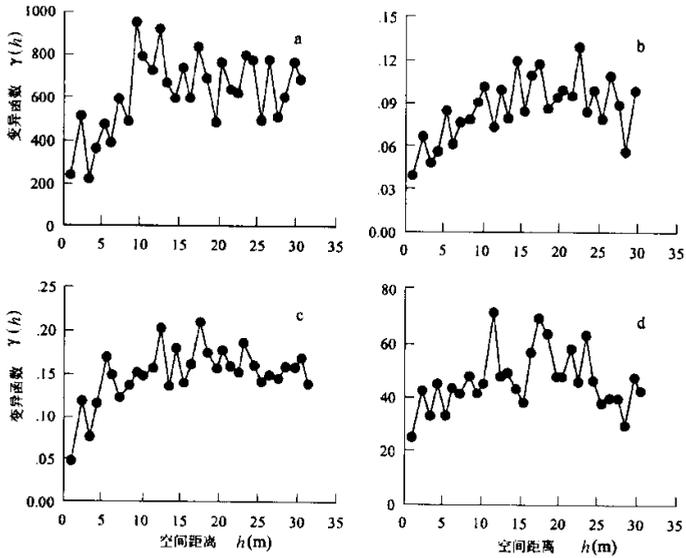


图 2 变异函数在 0~10 cm 土层中的曲线图

Fig. 2 Semivariograms of soil physical properties in 0~10 cm depth

(a)土壤水分 Soil moisture; (b)容重 Bulk density; (c)毛管持水量 capillary moisture capacity; (d)孔隙度 Soil porosity

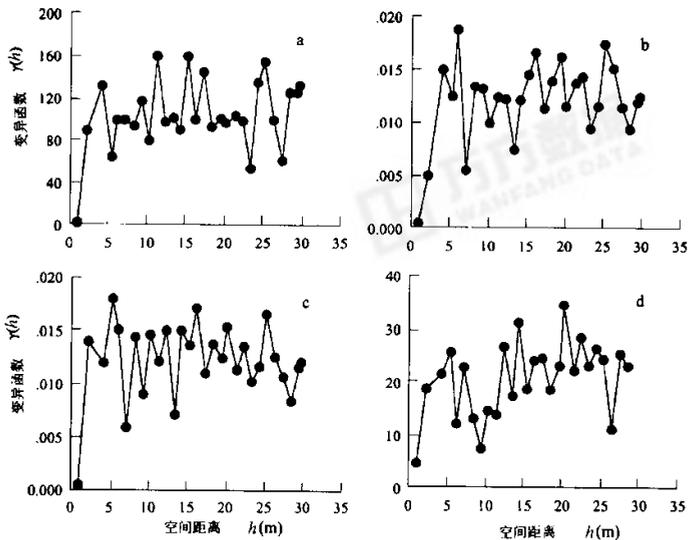


图 3 变异函数在 11~20 cm 土层中的曲线图

Fig. 3 Semivariograms of soil physical properties in 11~20 cm depth

(a)土壤水分 Soil moisture; (b)容重 Bulk density; (c)毛管持水量 capillary moisture capacity; (d)孔隙度 Soil porosity

管持水量), 最大为 28.1% (孔隙度)。在 11~20 cm 土层中, 最小为 16.4% (水分含量) 最大为 28.1% 孔隙度)。并且主要存在于 1 m 以下的小尺度中, 由因子本身和测定误差决定。当随机部分的空间异质性占的比

例较大(如大于 50%)时,表示小尺度上的土壤过程不可忽视。自相关部分的空间异质性在 0~10 cm 土层中为 52.9%~73.7%之间,在 11~20 cm 土层中为 69.3%~83.6%之间。主要存在于 1~14 m 的中尺度范围,由因子的空间结构特点决定。随着土壤深度的增加,自相关部分的空间异质性增强,不论是在 0~10 cm 还是在 11~20 cm 土层中,自相关部分的空间异质性在土壤物理性质的空间异质性中占主要部分,这一点也可从分数维(D)的大小得到验证。因此,土壤水分含量、容重、毛管持水量和孔隙度具有重要的空间结构,变程的大小代表它的尺度。

2.4 土壤物理性质的各向异性

土壤性质的空间变异通常是有方向性的^[5]。也就是说,在不同的方向上,由于微地形、植物密度等因子的作用会影响这些物理因子,导致不同的方向上呈现不同的变异规律^[3]。如果变异函数在两个方向上的变化相似,变异函数的各向异性比值在 1 附近波动。由于土壤表层的变异最明显,图 4 仅给出 4 个土壤物理因子在 0~10 cm 深的 E0°和 N90°两个方向上的变异函数的比值。从图 4 可看出,土壤水分含量和孔隙度具有明显的各向异性特点。水分含量在 10 m 范围之内,N90°方向上的变异明显小于 E0°方向上的变异,在 10~35 m 之间 N90°方向上的变异大于 E0°方向上的变异。孔隙度的各向异性比在整个尺度上虽存在波动,但总体上,N90°方向上变异大于 E0°方向。对容重和毛管持水量,可认为是接近各向同性的。

2.5 土壤物理性质的变异函数之间的相关关系

土壤物理性质的空间变异与许多因子有关^[9]。在空间自相关范围之内,分析各变异函数之间的关系,有助于了解各因子之间的相互作用。表 3 是 4 个土壤物理因子在空间自相关范围内变异函数之间的相关系数。表 3 说明,土壤水分的空间变异与容重、毛管持水量和孔隙度的空间变异有密切关系,容重、毛管持水量和孔隙度的空间变异增加,土壤水分含量的空间变异也增加。这种相互作用在土壤上层(0~10 cm)更为突出。毛管持水量的空间变异与容重的空间变异有关,虽然孔隙度对容重空间变异的影响没有达到显著水平,但其作用不可忽视,尤其在下层(11~20 cm)。需要指出的是土壤物理因子的空间变异除受土壤物理因子相互影响外,还受土壤的结构、团聚体状况和植物的根系作用。

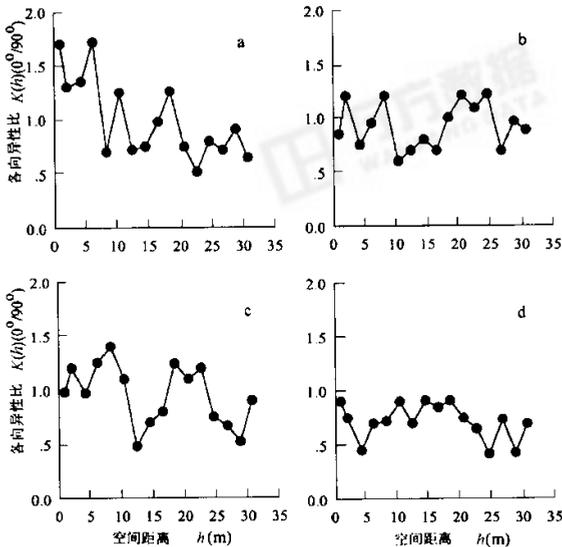


图 4 变异函数在 E0°和 N90°方向上的各向异性比 a 土壤水分;b 容重;c 毛管持水量;d 孔隙度

Fig. 4 Anisotropic ratio of semivariograms in E0° and N90° directions

万方数据 soil moisture;b Bulk density;C Capillary moisture capacity;d Soil porosity

3 初步结论

3.1 阔叶红松林土壤物理性质具有高度的空间异质性。变异函数分析结果表明,在一定的空间范围内土壤水分、容重、毛管持水量和孔隙度具有明显的空间自相关现象。这些因子的空间异质性尺度在 0~10 cm 土层中为 11~13 m 左右,在 11~20 cm 土层中为 6~8 m 左右。上层的土壤空间异质性大于下层。

3.2 阔叶红松林土壤物理性质的空间异质性以空间自相关部分为主,占总空间异质性的 52.9%~73.7% (0~10 cm)和 69.3%~93.6% (11~20 cm),主要存在于 1~14 m 的中尺度范围内。而随机部分的空间异质性相对较小,存在于 1 m 以下的小尺度中。这表明土壤水分、容重、毛管持水量和孔隙度在空间分布上具有明显的结构特征。

3.3 变异函数的各向异性表明,土壤水分含量和孔隙度在上层具有明显的各向异性,而土壤容重和毛管持水量接近各向同性。

3.4 土壤各物理因子的空间异质性与许多因子有关。在自相关范围之内,水分的空间变异与容重、毛管持水量和孔隙度的空间变异有密切关系。此外,毛管持水量的空间变异与容重的空间变异有关,尤其在 11~20 cm 土层中。总之,土壤物理因子的空间异质性是一种复杂的特征,通过地统计方法,定量地研究土壤物理因子的空间异质性问题,可以深入地了解这种空间异质性在研究区域上的结构特点。

表 3 阔叶红松林土壤物理性质在空间自相关范围内各变异函数之间的相关系数

Table 3 Relations among semivariograms of soil physical factors within range in Korean pine forests

因子 Factors	水分 Soil moisture	容重 Bulk density	毛管持水量 Capillary moisture capacity	孔隙度 Soil porosity
水分 Soil moisture	1			
容重 Bulk density	0.732**	1		
毛管持水量 Capillary moisture capacity	0.553**	0.599**	1	
孔隙度 Soil porosity	0.468*	0.238	0.344	1
	0.063	0.505*	0.367	

* :差异显著, $\alpha(0.05)=0.444$; ** :差异及显著, $\alpha(0.01)=0.561$

注:每一因子中上面的数字和下面的数字分别为 0~10 cm 和 11~20 cm 上层中的变异函数之间的相关系数。

参考文献

- [1] Bresler E, & Lagan G. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, **48**: 1~11.
- [2] Trangmar B B, Yost R S & Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advanced Agronomy*, 1985, **38**: 44~94.
- [3] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in field. *Advance in Soil Science*, 1985, **3**: 1~70.
- [4] Burgess T M, & Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I: The semivariogram and punctual kriging. *J Soil Sci.*, 1980, **31**: 315~331.
- [5] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*. 1991, **62**: 277~314.
- [6] Legendre P & Fortin M-J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*. 1989, **80**: 107~138.
- [7] Fortin M-J, Draperal P & Legendre P. Spatial autocorrelation and sampling design in plant ecology. *Vegetatio*. 1989, **83**: 209~222.
- [8] Li H, & Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*. 1995, **73**: 280~284.
- [9] Robertson G P, Crum J R & Ellis B G. The spatial variability of soil resources following longterm disturbance. *Oecologia*. 1993, **96**: 451~456.
- [10] Issaks E H, & Srivastava R M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 40~66.
- [11] Journel A & Huijbregis Ch. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 26~147.
- [12] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京: 中国林业出版社, 1986. 17~55.
- [13] Cressie N A C. *Statistics for spatial data*. New York: John Wiley & Son, 15~73.
- [14] Robertson G P. Geostatistics in ecology: interpolating with known variance. *Ecology*, 1987, **68**: 744~748.