采用地统计学方法对落叶松人工纯林表层 细根生物量的估计

孙志虎 牟长城* 孙 龙

(东北林业大学林学院 哈尔滨 150040)

摘 要 采用地统计学的变异函数分析方法定量研究了落叶松 (*Larix olgensis*) 纯林表层 (0 ~ 10 cm) 细根的空间异质性特征, 利用地统计学的克里格内插法结合定积分, 对落叶松纯林表层细根 (< 2 mm) 的生物量进行了估测。结果表明: 1) 6 种林龄 (14 ~ 40 年) 的落叶松人工纯林表层细根的变异函数曲线理论模型均为球状模型, 空间变异主要是由结构性因素引起, 且空间自相关程度均属中等以上 (空间结构比 > 25%)。14、19、22、26、32、40 年生的落叶松纯林表层细根的空间变异尺度分别为 1.76、3.40、1.02、4.12、3.37 和 5.58 m。在所研究的林龄范围内, 随林龄的增长, 落叶松纯林表层细根的空间变异尺度近似呈直线增长 ($\alpha = 0.074$)。2) 非参数统计的成对样本符号检验结果表明, 变异函数分析结果基础上的克里格内插法适用于落叶松纯林表层细根生物量的估计。利用此估计值, 拟合其与位置坐标值之间的多元回归关系均为二元十次余弦级数多项式。利用此多项式, 通过定积分的方法 (积分区间为整块样地的大小), 估计出 14、19、22、26、32、40 年生的落叶松纯林表层细根生物量分别为 1.097 3、1.434 0、1.185 4、0.974 3、1.682 6、1.255 6 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。3) 在本次调查的林龄范围内 (14 ~ 40 年) 落叶松纯林表层细根的现存生物量近似相等 ($\alpha = 0.037$)。土壤表层单株细根生物量与林龄之间呈极显著的指数增长关系 ($\alpha = 0.002$)。4) 采用地统计学的克里格空间插值, 结合多元回归和定积分的方法, 可以实现落叶松人工林表层细根生物量的准确估计。

关键词 落叶松 细根生物量 地统计学 变异函数 异质性 估测

THE ESTIMATE OF FINE ROOT BIOMASS IN UPPER SOIL LAYER OF *LARIX OLGENSIS* PLANTATION BY GEOSTATISTICS METHOD

SUN Zhi-Hu MU Chang-Cheng* and SUN Long

(Forestry College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract Background and Aims Drilling soil core, simply averaging the surveying values and ignoring the information of sampling point locations are in common use in estimating the fine root biomass of forest. Owing to the significant heterogeneity of fine root distribution, using the method above may be not proper. The *Larix olgensis* stand was chosen for a case study. Answer to the following question was sought: is the fine root biomass estimated by combining the coordinates of sampling points.

Methods Semivariance analysis of Geostatistics was used to quantify the spatial heterogeneity of fine root (< 2 mm) biomass in upper layer of soil (0 ~ 10 cm) in *Larix olgensis* stand (14 ~ 40 year). Fine root biomass was estimated with kriging interpolation of Geostatistics and definite integral.

Key Results The semivariograms of fine roots in all six *Larix olgensis* stands were best described by spherical model. The spatial variability of fine root in all six *Larix olgensis* stands was mainly caused by structural factors with spatial structural ratio > 25%. The scales of spatial heterogeneity of fine roots (1.76 ~ 5.58 m) showed a positive linear correlation ($p = 0.074$) with stand age (14 ~ 40 year). The sign-test of nonparametric statistics of paired samples showed that the kriging interpolation, based on the results of semivariance analysis, could be used to estimate the fine root biomass in *Larix olgensis* stands. The relationship between the estimated fine root biomass and the values of its corresponding coordinates was best fitted by bivariate order 10 cosine series polynomial. Based on the result of definite integral to those polynomials (integral range was limited to plot size), total fine root biomass of the 14-year, 19-year, 22-year, 26-year, 32-year, 40-year-old stands was 1.097 3, 1.434 0, 1.185 4, 0.974 3, 1.682 6, 1.255 6 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. No differences ($\alpha = 0.037$) were found in the fine root biomass in upper soil layer of *Larix olgensis* stands with dif-

收稿日期: 2005-05-09 接受日期: 2005-11-17

基金项目: 国家“948”资助项目 (2003-4-10)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: mcnefu@yahoo.com

E-mail of the first author: szhiunefu@163.com

ference stand ages. The estimated of fine root mass of individual stems increased exponentially with stand age ($\alpha = 0.002$).

Conclusions Kriging interpolation method of Geostatistics , combined with multiple regression and definite integral , provide a new optimal alternative for the estimation of fine root biomass in *Larix olgensis* stands.

Key words *Larix olgensis* , Fine root biomass , Geostatistics , Semivariance , Heterogeneity

森林生物量是全球碳循环的重要组成部分(方精云等,2002;Michael *et al.*,1997;Wang *et al.*,2002),也是森林生态系统碳通量估计的重要数据来源。因此,获得准确的森林生物量数据在今天的森林经营管理中就显得尤为必要(Catchpole & Wheeler,1992;方精云等,2002;Kurz & Apps,1999;Wang *et al.*,2002)。生物量是森林中单位面积上某个时间所测得的有机物质总重量(王战,1992),分为地上和地下两部分。对于地上部分生物量的测定,方法众多且已很精确(黄建辉等,1999;Michael *et al.*,1997),而地下部分生物量,由于其空间分布的复杂性,使得测定工作较为困难(Rose,2001;Sanford & Cuevas,1996),尚无快速、准确的测定方法(黄建辉等,1999;Michael *et al.*,1997;Person,1990;单建平和陶大立,1992;宇万太和于永强,2001;张小全等,2000)。地下部分生物量可分为根桩、粗根(≥ 2 mm)和细根(< 2 mm)部分。在地下生物量根桩和粗根部分的测定中,简单准确的方法是收获法(黄建辉等,1999)。在细根部分的测定中,由于收获法往往对细根收获不完全(廖兰玉等,1993),而使土钻法成为普遍使用的方法(黄建辉等,1999;张小全等,2000),此法应用时需要考虑取样数量的问题(黄建辉等,1999;宇万太和于永强,2001;张小全等,2000),这取决于细根分布的异质性(黄建辉等,1999;张小全等,2000)和所用根钻的直径(孙立安等,1994),经常采用的取样点数是30(杜晓军等,1998;李凌浩等,1998;廖利平等,1995;单建平等,1993;杨玉盛等,2002)。在野外具体应用钻土芯法

进行地下细根生物量的研究时,经常采用随机(凭经验)或S型曲线(凭直觉)的方法进行空间取样点的布设(杜晓军等,1998;李凌浩等,1998;单建平等,1993;杨玉盛等,2002),而没有详加考虑细根空间分布不均匀现象——空间异质性的存在,从而可能导致所得结果不能真实反映林地细根生物量问题。为此,本文应用以空间异质性现象为研究对象的地统计学方法,采用土钻取样方法,在考虑落叶松(*Larix olgensis*)细根可能存在空间分布异质性的情形下,研究落叶松纯林表层细根生物量的状况,以期能为准确定细根生物量的方法提供一些帮助。

1 研究地区与研究方法

1.1 样地概况

本研究在佳木斯市孟家岗林场(130°40' E, 46°21' N)进行。该林场属温带半湿润季风气候区,年均气温2.7℃,≥10℃的积温为2500℃,年均降水量500~600 mm,无霜期110~120 d。该地区土壤以发育在花岗岩上的暗棕壤为主,从1952年开始大面积营造落叶松人工林。落叶松人工林下植被稀少,主要为一些草本植物。2004年6月在6块不同林龄的落叶松人工林中各设置1块样地。除样地4面积为0.072 hm²(24 m×30 m)外,其它5块样地面积均为0.090 hm²(30 m×30 m)。研究林分的土壤均为白浆化暗棕壤。样地详细情况见表1。

1.2 样点布设

样点布设依据小支撑、多样点的取样设计原则进行(Bigwood & Inouye,1988)。首先将除样地4外

表 1 研究样地概况
Table 1 Plot characteristics

	林龄 Stand age (a)	平均胸径 DBH (cm)	林木密度 Density (stem · hm ⁻²)	土层厚度 Thickness of soil (cm)	最小株距 Minimum distance (m)
样地 1 Plot 1	14	7.30	3 033	57.7	0.22
样地 2 Plot 2	19	10.41	3 122	33.7	0.14
样地 3 Plot 3	22	9.50	1 989	57.7	0.36
样地 4 Plot 4	26	14.99	1 722	85.7	0.41
样地 5 Plot 5	32	13.91	1 100	38.4	1.03
样地 6 Plot 6	40	21.24	556	38.9	2.14

的 5 块 30 m × 30 m 的样地等距离间隔划分为 100 个 3 m × 3 m 的样方。然后,在样地中对角线上的两个 3 m × 3 m 样方中,按照 0.3 m × 0.3 m 的间隔距离,分别设立 100 个小样方。为在保证分析精度的前提下,减少内业工作量,在除样地 4 外的 5 块样地中,均选取 45 个样点进行取样。在两个样方(3 m × 3 m)中,依据 0.3 m 的间距和大样地中样点的空间分布格局,各选 37 个小样方进行取样(Bigwood & Inouye, 1988; Mou *et al.*, 1997)。样点总体布设见图 1。由于样地 4 所处的林分为带状造林,林分宽度小于 30 m,故在该林分中设置一个 24 m × 30 m 的样地,样点布设状况同图 1 类似,只是去掉图 1 中 X 坐标为 3 和 27 m 的两行取样点。这样,样地 4 中总的样点取样数比其余 5 块样地少 12 个,为 107 个(其中大样方中设置 33 个,2 个小样方中各设置 37 个)。

图 1 空间取样设计(横纵坐标为样地边界)
Fig.1 Spatial sampling design (X and Y are plot boundaries)

1.3 取样方法

在图 1 所示的样点上用土壤钻取样,土钻内径 5.3 cm。由于树木细根多集中于枯落物层和 10 cm 以上矿质土壤表层(Burker & Raynal, 1994; Buttner & Leuschner, 1994; Hahn & Marschner, 1998; Liu & Tyree, 1997; Steele *et al.*, 1997),取样时去掉地表的枯落物,将取样深度设定在 0 ~ 10 cm(不包括枯落物层)。将取出的土壤装入封口塑料袋中,带回室内,根据根系外形、颜色、弹性等挑选落叶松活细根(< 2 mm),然后将挑选出的落叶松活细根置于烘箱中,在 60 °C 下烘干至恒重。

1.4 数据处理

由于原始数据的非正态分布会使半方差图产生畸变,严重时会掩盖其固有的结构(王政权, 1999)。因此,进行半方差分析之前首先对实验数据进行正

态性检验。检验后,将服从正态分布的原始变量或转换后变量作为区域化变量,利用 GS+ 软件进行半方差值计算。利用 GS+ 软件所提供的克里格内插法,估计样地内未取样点的区域化变量值。采用积分样地内各位置的估计值与其直角坐标之间的多元回归方程的方法计算 6 块样地表层细根的生物量。

1.5 半方差图分析

利用除样地左下角小样方(x 坐标为 9 ~ 12 m, y 坐标为 9 ~ 12 m)外的所有取样数据(包括坐标为 (9, 9)(12, 9)(9, 12)(12, 12) 的 4 个取样点),采用半方差分析的方法研究其空间异质性特征。半方差函数的计算公式为:

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

(i = 1, 2, 3, 4, ..., N(h))

式中:Z(x_i)和 Z(x_i + h)分别为区域化随机变量 Z 在空间位置 x_i 和 x_i + h 上的取值。N(h)是抽样间隔等于 h 时的点对数。γ(h)为变异函数值(又称为半方差, Semivariance)。

以半方差 γ(h)为 Y 轴,以抽样间隔 h 为 X 轴,绘制散点图。结合散点图进行理论模型曲线的确定,得到半方差函数图(Semivariogram),据此可得出 3 个重要的参数,即块金值(Nugget, C₀)、基台值(Sill, C₀ + C)和变程(Range)。基台值表示变量在研究系统中最大的变异程度,包括空间结构方差(C)和块金方差(C₀)。空间结构方差表示非随机的结构原因形成的变异,块金方差则反映的是由实验误差和小于最小取样尺度所引起的随机变异。变程表示研究变量在空间上自相关的范围(王政权, 1999)。

1.6 空间未取样点细根生物量的估计

在半方差图分析的基础上,采用克里格内插法(Kriging)对各样地内空间未取样点的细根生物量进行估计。具体内插方法见参考文献(王政权, 1999)。

1.7 空间未取样点细根生物量估计效果的检验

将半方差分析时,未被处理的位于样地对角线下方位置 3 m × 3 m 小样方内的 37 个样点(横坐标为 9 ~ 12 m, 纵坐标为 9 ~ 12 m)的实测细根生物量,用于检验克里格内插法的估计效果。检验时采用非参数统计的成对样本的符号检验方法。

1.8 落叶松纯林表层细根生物量的估计

对于原始数据或原始数据转化后服从正态分布的样地,利用 GS+ 软件所提供的克里格内插法,估计样地内未取样点的细根生物量,然后建立各空间位置处的细根生物量与其 x、y 坐标之间的多元回归

关系。利用此多元回归方程,采用定积分的方法(x 、 y 积分区间为样地大小),求出研究样地表层细根的生物量。

2 结果与分析

2.1 落叶松纯林表层细根生物量的描述统计分析

由田间实测样本的经典统计学分析所得出的土壤表层细根生物量的统计特征值可见,在不考虑空间位置及取样间距的情况下,6 块不同林龄的落叶松人工纯林表层细根生物量均有较大的变动,存在异质性现象(表 2)。从不同林分细根生物量的变异系数看,样地 4 和样地 6 细根的变异系数最大(分别为 97.55%和 96.68%),样地 2 和样地 3 次之(分别为 89.50%和 79.84%),样地 1 和样地 5 最小(分别为 68.41%和 63.03%)。从最大值与最小值之间的相差幅度看,样地 6 和样地 2 最大值与最小值之间相差幅度最大(分别为 757.37 和 671.20 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。样地 4 和样地 3 次之(分别为 648.53 和 494.33 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。样地 1 和样地 5 最小(分别为 448.98 和 412.70 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。

土壤表层细根的正态性检验结果表明(表 2 中的 K - S 值),除样地 6 外,其余所有样地表层细根的取样数据均符合正态分布。不符合正态分布的样地 6 取样数据经平方根转换后符合正态分布(表 2 中的 K - S 值)。在对样地 1 数据进行变异函数分析时发现,若利用平方根转化后的样地 1 数据,样地 1 的变异函数散点图则呈现明显的变化趋势,故本文利用样地 1 平方根转化后的数据进行分析。

2.2 落叶松纯林表层细根生物量的半方差分析

在最大间隔 5 m 的范围内,对样地 1 和样地 4 采用自定义步长(最小步长 0.1 m),样地 2 采用相

等间隔步长 0.3 m,样地 3 和样地 5 采用相等间隔步长 0.5 m,在最大间隔 10 m 的范围内对样地 6 采用相等间隔步长 1 m,分别进行样地表层细根生物量的半方差分析。结果表明,6 块不同林龄的落叶松纯林表层细根生物量的半方差值,在各自的最大间隔范围内,随着样点间隔距离的变化表现出相同的变化趋势(图 2)。在小间隔距离范围内,有较低的变异函数值,随着间隔距离的加大,变异函数值也增大,并逐渐趋于平稳。

对所有样地细根指标的半方差值随间隔距离的变化所进行的理论模型拟合结果表明(表 3),6 块样地表层细根生物量的半方差值随间隔距离的变化很好的符合球状理论模型的变化趋势,模型拟合的决定系数变化在 0.204 ~ 0.754 之间。 F 检验结果表明,虽然只有样地 6 半方差值的理论模型拟合效果达显著水平,但其余 5 块样地理论模型拟合效果的显著性水平均在 0.3 以下。由于符合球状模型的指标,其空间自相关范围是模型范围参数(a_0) (Goovaerts,1997)。因此,6 块样地土壤表层细根的空间自相关范围分别为 1.76、3.40、1.02、4.12、3.37 和 5.58 m。

从空间结构方差(C)与总变异方差($C_0 + C$)的比值的结构比来看,结构性因素在 6 块不同林龄的落叶松纯林表层细根的空间异质性形成中均占有较大比重(表 3)。样地 3 落叶松细根 99.7%的空间变异是由于结构性因素的原因造成的;其余 5 块样地细根的结构比由大到小依次为样地 5(72.4%)、样地 6(69.2%)和样地 1(50.0%)、样地 2(50.0%)、样地 4(50.0%)。

利用 6 块样地土壤表层细根的空间自相关范围,研究其与林龄的关系(图 3)。从图 3 可以看出,

表 2 落叶松纯林表层(0~10 cm)细根生物量的描述统计分析结果($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 2 Descriptive statistics of fine root mass in soil surface layer(0~10 cm) of larch($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

	平均 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	观测数 Number	标准差 SD	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	变异系数 CV(%)	K - S 值 K - S value
样地 1 Plot 1	126.49	0	448.98	82	86.528	2.079	0.972	68.41	0.086 4
样地 2 Plot 2	135.39	0	671.20	82	121.170	3.342	1.218	89.50	0.148 6
样地 3 Plot 3	124.55	0	494.33	82	99.442	3.216	1.312	79.84	0.109 4
样地 4 Plot 4	146.16	0	648.53	70	142.583	1.552	1.317	97.55	0.160 4
样地 5 Plot 5	161.00	0	412.70	82	101.472	-0.366	0.104	63.03	0.102 2
样地 6 Plot 6	176.04	0	757.37	82	170.204	1.345	1.185	96.68	0.150 5*
样地 1 Plot 1 ¹⁾	10.22	0	21.19	82	4.733	0.586	-0.731	46.33	0.148 6
样地 6 Plot 6 ¹⁾	10.97	0	27.52	82	7.508	-0.829	-0.098	68.44	0.148 2

表中数据是依据半方差分析处理的原始数据所得出的结果 The data in table was acquired by dealing with the original data of semivariance analysis

* : α = 0.05 水平上,非正态分布 Non-normal distribution at α = 0.05 level 1) 原数据进行平方根转换后的结果 The results of square-root transformation of original data

表 3 落叶松纯林土壤表层(0~10 cm)细根生物量半方差分析结果

	模型	块金值	基台值	范围参数	结构比	决定系数	显著性水平
	Model	Nugget(C_0)	Sill($C_0 + C$)	Range parameter(a_0)	Proportion ($C/(C_0 + C)$)	Coefficient of determination(R^2)	Significant level (α)
样地 1 Plot 1	球状 Spherical	11.37	22.75	1.76	0.500	0.401	0.077 1
样地 2 Plot 2	球状 Spherical	9 390.00	18 790.00	3.40	0.500	0.204	0.254 4
样地 3 Plot 3	球状 Spherical	30.00	9 830.00	1.02	0.997	0.395	0.172 2
样地 4 Plot 4	球状 Spherical	15 230.00	30 470.00	4.12	0.500	0.377	0.150 6
样地 5 Plot 5	球状 Spherical	2 780.00	10 070.00	3.37	0.724	0.561	0.056 1
样地 6 Plot 6	球状 Spherical	19.10	61.99	5.58	0.692	0.754	0.007 4

图 2 落叶松纯林表层(0~10 cm)细根生物量的半方差图
Fig.2 The semivariogram of fine root mass in soil surface layer(0-10 cm) of larch

落叶松纯林表层细根的空间变异尺度与林龄呈较明显的线性增长关系($\alpha = 0.074\ 4$)。随林龄的增大, 细根的空间变异尺度近似呈线性增加。

2.3 落叶松纯林表层细根生物量克里格插值结果的检验

利用 6 块样地各自对角线下方 $3\ \text{m} \times 3\ \text{m}$ 小样方内 37 个样点的细根生物量实测数值(横坐标为 $9 \sim 12\ \text{m}$, 纵坐标为 $9 \sim 12\ \text{m}$), 验证半方差分析基础上所进行的克里格插值方法对该区域细根生物量的估计效果。非参数统计的成对样本的符号检验结果表明, 6 块样地各自对角线下方 $3\ \text{m} \times 3\ \text{m}$ 小样方内 37 个样点的细根生物量的估测值与实测数值之间差异均不显著(表 4), 表明克里格插值方法能够用于对落叶松纯林表层细根生物量的估计。

2.4 落叶松纯林表层细根生物量的克里格估计

由表 5 可以看出, 对于样地 1、样地 2 和样地 5, 分别依据样地内所有取样点($n = 119$)和半方差分析所选用的取样点($n = 82$)的细根生物量的平均值所换算出的每公顷林地表层细根生物量之间存在较小的差异(最大为 $0.068\ 6\ \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 而样地 3、样地 4 和样地 6 在此方面却存在较大的差异(最小为 $0.141\ 8\ \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)(表 5), 说明随着取样点数量的不同, 林地表层细根生物量的估计值之间也存在一定的误差。

6 块不同林龄的落叶松纯林, 在整块样地范围内各空间位置处的估测值与其相应坐标之间的关系, 采用二元十次余弦级数多项式(Cosine series bivariate order 10 polynomial)能很好的拟合(决定系数均在 0.75 以上), 说明二元十次余弦级数多项式能很好的反映细根生物量估测值与其空间位置之间的关系。

落叶松纯林表层细根生物量的克里格插值方法估测结果表明(表 5), 样地 2、样地 3 和样地 5 的细根生物量估测值分别为 $1.434\ 0$ 、 $1.185\ 4$ 、 $1.682\ 6\ \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与全部样点平均值所推算出的细根生物量 $1.378\ 3$ 、 $1.103\ 7$ 、 $1.624\ 8\ \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相近似, 说明对于样地 2、样地 3 和样地 5, 119 个取样点的数据已能较为准确的反映土壤表层的细根生物量。样地 1、样地 4 和样地 6 克里格插值方法估测结果(分别为 $1.097\ 3$ 、 $0.974\ 3$ 和 $1.255\ 6\ \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)与全部样点平均值所推算出的结果(分别为 $1.333\ 5$ 、 $1.285\ 5$ 和 $1.995\ 5\ \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)相差较大(相差 $0.236\ 2$ 、 $0.311\ 2$ 和 $0.739\ 9\ \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 说明 119 个取样点的数据可能未能正确反映土壤表层的细根生物量, 需要继续

增大取样点的数目。

利用克里格插值方法所估计出的土壤表层细根生物量, 结合林分密度, 研究土壤表层细根生物量和单株细根生物量与林龄的关系(图 4, 图 5)。从图 4 和图 5 可以看出, 在本次调查的林龄范围内, 虽然林龄对落叶松纯林表层细根生物量估计值的影响不显著($R^2 = 0.088\ 7$, $\alpha = 0.566\ 5$), 即在本次调查的林龄范围内($14 \sim 40$ 年), 落叶松纯林表层细根生物量的估计值随林龄的变化呈现一条与 X 轴近似平行的直线(常数项为 $1.066\ 0$, $\alpha = 0.037\ 3$), 但从换算后的土壤表层单株细根生物量来看, 单株细根生物量与林龄之间呈极显著的指数增长关系($R^2 = 0.935$, $\alpha = 0.002$)。

图 3 落叶松纯林土壤表层细根的空间变异尺度与林龄的相关关系
Fig.3 The relation between the spatial heterogeneity range of fine root mass and forest age

图 4 落叶松纯林表层细根生物量的估计值与林龄的关系
Fig.4 The relation between the estimate of fine root mass and forest age of larch

表4 落叶松纯林表层(0~10 cm)细根生物量实测值与克里格估值值之间的比较($n=37$)($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 4 The comparison of original and estimated data for fine root mass in soil surface layer(0-10 cm) of larch($n=37$)($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

	实测值 Real data				估值值 Estimate		显著性水平 α
	平均 Mean	标准差 SD	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	平均 Mean	标准差 SD	
样地 1 Plot 1	148.56	93.58	-0.121 2	0.365 2	114.76	93.58	0.188 4
样地 2 Plot 2	143.22	217.29	11.802 3	3.170 7	167.76	22.13	0.066 5
样地 3 Plot 3	78.94	69.82	1.263 6	0.878 8	96.80	10.70	0.188 4
样地 4 Plot 4	95.24	82.96	-0.397 2	0.603 2	60.67	4.16	0.089 0
样地 5 Plot 5	165.77	86.78	0.818 7	0.917 1	224.51	45.49	0.063 3
样地 6 Plot 6	251.64	158.69	-0.656 2	0.123 8	229.31	10.83	0.510 8

表5 落叶松纯林表层(0~10 cm)细根生物量的估计结果

Table 5 The estimated data of fine root mass in soil surface layer(0-10 cm) of larch

	原始数据 Original data			模型估计 Estimated data		
	平均值 Mean ¹⁾	平均值 Mean ²⁾	差值 Difference	细根生物量 ³⁾	决定系数 ³⁾	F 值 ³⁾
	($n=82$) ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	($n=119$) ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		Fine root mass ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Determination coefficient (R^2)	F value
样地 1 Plot 1	1.264 9	1.333 5	0.068 6	1.097 3	0.833 2	499.1
样地 2 Plot 2	1.353 9	1.378 3	0.024 4	1.434 0	0.867 9	656.7
样地 3 Plot 3	1.245 5	1.103 7	-0.141 8	1.185 4	0.763 2	322.1
样地 4 Plot 4	1.461 6	1.285 5	-0.176 1	0.974 3	0.946 2	1 318.0
样地 5 Plot 5	1.610 0	1.624 8	0.014 8	1.682 6	0.845 0	544.7
样地 6 Plot 6	1.760 4	1.995 5	0.235 1	1.255 6	0.952 1	1 986.1

1)用于半方差分析的原始数据($n=82$)平均值换算为 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的结果 According to the mean of original data(which were used to calculate the semivariance , $n=82$), those results were given by transforming the mean to $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 2)所有取样点($n=119$)平均值换算为 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的结果 According to the mean of total original data($n=119$), those results were given by transforming the mean to $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 3)依据 G_s^+ 的估值值,通过建立地理坐标与细根生物量的多元回归方程后,对该多元回归方程进行积分后所得结果 Those results were given by integral of the multiple regression equation estimated by G_s^+ , its coordinates and fine root mass

图5 落叶松土壤表层单株细根生物量与林龄的关系

Fig.5 The relation between the estimated data of fine root mass of individual and forest age of larch

3 讨论

异质性(Heterogeneity)是指系统属性在空间上的变异性(Variability)(Li & Reynolds ,1995)。一个具有异质性的系统属性其在空间上的表现形式为斑块

状态(Patchiness),而非均匀(Uniform)或随机(Random)分布(Christien & Ettema ,2002)。众多研究结果表明,不论在大尺度上还是在小尺度上,地下根系生物量均表现为高度的空间异质性现象,即斑块性(廖利平等,2001)。本次试验结果也证实了落叶松纯林表层细根存在空间异质性的现象(表2,表3)。

地下根系空间分布的异质性,降低了地下根系分布状态的可预知性,增加了地下生物量研究时取样点设置的难度。在进行细根生物量研究时,经常采用的方式是增加取样点的数目,但此时面临的两个突出问题是如何量化取样点的数目以及如何进行空间取样点的布设。针对上述问题,野外调查时经常采取的方法是取30个样点(杜晓军等,1998;李凌浩等,1998;廖利平等,1995;单建平等,1993;杨玉盛等,2002)以及采用随机或S形曲线的空间采样点布设方法(杜晓军等,1998;李凌浩等,1998;单建平等,1993;杨玉盛等,2002)。在内业计算时往往也是简单的采取求平均值的方式,而没有考虑与根系异质性关系密切的取样点位置的信息,从而导致所得结果可能不能真实反映林地细根生物量的现状。

本研究依据样地内119个样点的平均值所换算

出的单位面积林地表层细根生物量,与半方差分析所选用的取样点($n = 82$)的平均值所换算出的值之间,对于部分样地来说,仍存在差异(表5),说明采用82个样点平均值估计的林地表层细根生物量与实际值之间仍存在误差,119个样点所获得的平均值是否能够准确地反映出样地真实值也不得而知。该结果也进一步证实了上述问题。

若要真实的反映林地细根生物量的现状,理想的方法是无限次的增加取样点数目直至把研究系统的全部细根悉数挖出,此法的操作性很差,但这给我们一提示,能否采用一种类似于空间上无限取样的方法?能否利用有限的取样点数据,结合取样点位置的信息较合理的对细根生物量进行估测?地统计学中的克里格内插法结合定积分的方法可能为解决此类问题提供帮助。克里格内插法是一种类似于空间上无限增加取样点数目的方法。它是以区域化变量理论(细根生物量可作为区域化变量)为基础,利用变异函数分析结果提供的空间结构信息,依据待估样点周围已抽样测定的数据,充分考虑待估点与邻近样点的空间位置关系,对空间上未取样点的数据进行线性无偏最优估计的方法(王政权,1999)。本文针对克里格内插法的估测值所进行的检验结果表明(表4),该方法能够用于进行落叶松纯林整块样地范围内未取样点位置处的表层细根生物量的估计。为了得到整块样地的细根生物量,利用克里格插值方法所估计出的各个空间位置处的细根生物量(均为离散变量),通过建立空间位置坐标与细根生物量之间的多元回归方程,发现对二者之间关系拟合程度最高的方程均为二元十次余弦级数多项式,利用该多项式,采用定积分的方法(积分区间为整块样地的大小)从而求出不同林龄的落叶松纯林表层细根的生物量(表5)。

值得一提的是,用克里格方法估计的根量虽然与实测值接近,但克里格方法本身是基于大量的测定数据,从这个意义上讲,采用克里格方法对于提高细根生物量估计的效率,或降低野外工作量的意义可能不大。然而,在测定的样本数相同的条件下,采用地统计学的方法设置采样点,利用采样点之间的相关性,采用克里格空间插值方法进行估计,有效地克服了传统调查方法无法解决的样本不独立问题,使得调查结果更加接近总体真值。从这一点上说,地统计学的采样设计和克里格空间插值估计方法的应用为我们提供了一个测定系统中存在空间异质性现象的可靠方法。

4 结 论

4.1 落叶松纯林表层细根生物量具有明显的空间异质性现象

6块不同林龄的落叶松纯林表层细根变异函数曲线的理论模型均符合球状模型,空间变异主要是由结构性因素引起,且自相关程度均属中等以上(空间结构比 $> 25\%$)。14、19、22、26、32和40年生的落叶松纯林表层细根的空间变异尺度分别为1.76、3.40、1.02、4.12、3.37和5.58 m。在所研究的林龄范围内,随林龄的增长,落叶松纯林表层细根的空间变异尺度近似呈直线增长($\alpha = 0.0744$)。

4.2 克里格内插法能够用于落叶松纯林表层细根生物量的估计

14、19、22、26、32和40年生的落叶松纯林表层细根的克里格插值方法估测结果分别为1.0973、1.4340、1.1854、0.9743、1.6826和1.2556 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在本次调查的林龄范围内(14~40年),落叶松纯林表层细根的现存量近似相等($\alpha = 0.0373$),土壤表层单株细根生物量与林龄之间呈极显著的指数增长关系($\alpha = 0.002$)。

参 考 文 献

- Bigwood DW, Inouye DW (1988). Spatial pattern analysis of seed banks: an improved method and optimized sampling. *Ecology*, 69, 497–507.
- Burker MK, Raynal DJ (1994). Fine root growth, phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil*, 162, 135–146.
- Buttner V, Leuschner C (1994). Spatial and temporal patterns of fine root abundance in a mixed oak-beech forest. *Forest Ecology and Management*, 70, 11–21.
- Catchpole WR, Wheeler CJ (1992). Estimating plant biomass: a review of techniques. *Australian Journal of Ecology*, 17, 121–131.
- Christien HE, Ettema DA (2002). Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 17, 177–183.
- Du XJ (杜晓军), Liu CF (刘常富), Jin G (金罡), Shi XN (石小宁) (1998). Root biomass of main forest ecosystem in Changbai Mountain. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 29, 229–232. (in Chinese with English abstract)
- Fang JY (方精云), Chen AP (陈安平), Zhao SQ (赵淑清), Ci LJ (慈龙骏) (2002). Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in *Science* (291, 2320–2322) by Fang *et al.* *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 26, 243–249. (in Chinese with English abstract)
- Goovaerts P (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*.

- Oxford University Press, New York.
- Hahn G, Marschner H (1998). Cation concentrations of short roots of Norway spruce as affected by acid irrigation and liming. *Plant and Soil*, 199, 23 – 27.
- Huang JH (黄建辉), Han XG (韩兴国), Chen LZ (陈灵芝) (1999). Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 19, 270 – 277. (in Chinese with English abstract)
- Kurz WA, Apps MJ (1999). A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecological Applications*, 9, 526 – 547.
- Li H, Reynolds JF (1995). On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 73, 280 – 284.
- Li LH (李凌浩), Lin P (林鹏), Xing XR (邢雪荣) (1998). Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 9, 337 – 340. (in Chinese with English abstract)
- Liao LP (廖利平), Chen CY (陈楚莹), Zhang JW (张家武), Gao H (高洪) (1995). Turnover of fine roots in pure and mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* forests. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 6, 7 – 10. (in Chinese with English abstract)
- Liao LP (廖利平), Deng SJ (邓仕坚), Yu XJ (于小军), Han SJ (韩士杰) (2001). Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 21, 569 – 573. (in Chinese with English abstract)
- Liao LY (廖兰玉), Ding MM (丁明懋), Zhang ZP (张祝平), Yi WM (蚁伟民), Guo GZ (郭贵仲), Huang ZL (黄忠良) (1993). Root biomass and its nitrogen dynamic of some communities in Dinghushan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), 17, 56 – 60. (in Chinese with English abstract)
- Liu X, Tyree MT (1997). Root carbohydrate reserves, mineral nutrient concentrations and biomass in a healthy and a declining sugar maple (*Acer saccharum*) stand. *Tree Physiology*, 17, 179 – 185.
- Michael AC, Sandra B, Eileen HH (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1 – 11.
- Mou P, Michell RJ, Jones RH (1997). Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. *Journal of Applied Ecology*, 34, 645 – 656.
- Person H (1990). Methods of studying root dynamics in relation to nutrient cycling. In: Harrison AF, Ineson P, Heal OW eds. *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems: Field Methods, Application and Interpretation*. Elsevier Applied Science, London, New York.
- Rose MR (2001). Biomass production and allocation, including fine-root turnover, and annual N uptake in lysimeter-grown basket willows. *Forest Ecology and Management*, 140, 177 – 192.
- Sanford RLJ, Cuevas E (1996). Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests. In: Mulkey SS, Chazdon RL, Smith AP eds. *Tropical Forest Plant Ecophysiology*. Chapman and Hall, New York, 268 – 300.
- Shan JP (单建平), Tao DL (陶大立), Wang M (王淼), Zhao SD (赵士洞) (1993). Fine roots turnover in a broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 4, 241 – 245. (in Chinese with English abstract)
- Shan JP (单建平), Tao DL (陶大立) (1992). Overseas researches on tree fine root. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 11(4), 46 – 49. (in Chinese with English abstract)
- Steele SJ, Gower ST, Vogel JG (1997). Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiology*, 17, 577 – 587.
- Sun LA (孙力安), Liu GB (刘国彬), Liang YM (梁一民) (1994). Studies on determining methods of underground biomass with different diameter coring. *Grassland of China* (中国草地), (2), 32 – 35. (in Chinese with English abstract)
- Wang JR, Zhong AL, Kimmins JP (2002). Biomass estimation errors associated with the use of published regression equations of paper birch and trembling aspen. *Northern Journal of Applied Forestry*, 19, 128 – 136.
- Wang ZQ (王政权) (1999). *Geostatistics and Its Application in Ecology* (地统计学及在生态学中的应用). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Wang Z (王战) (1992). *Larch Forest of China* (中国落叶松林). China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Yang YS (杨玉盛), Chen GS (陈光水), He ZM (何宗明), Chen YX (陈银秀), Huang RZ (黄荣珍) (2002). Distribution of fine roots in a mixed *Cunninghamia lanceolata*-*Tsoongiodendron odoratum* plantation. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 10, 111 – 117. (in Chinese with English abstract)
- Yu WT (宇万太), Yu YQ (于永强) (2001). Advances in the research of underground biomass. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 12, 927 – 932. (in Chinese with English abstract)
- Zhang XQ (张小全), Wu KH (吴可红), Dieter M (2000). A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 20, 875 – 883. (in Chinese with English abstract)