

采用地统计学方法对水曲柳人工纯林表层根量的估计

孙志虎, 王庆成

(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水曲柳纯林表层根量的空间异质性特征, 利用地统计学的克里格内插法结合定积分, 对水曲柳纯林表层(0~10 cm)各类型根量进行了估测。结果表明: (1) 水曲柳细根(<2 mm)、粗根(≥ 2 mm)、活根和土壤总根变异函数曲线的理论模型符合球状模型, 其它植物活根符合指数模型, 水曲柳及其它植物死根符合线性模型。水曲柳及其它植物死根的空间变异主要是由随机性因素引起; 水曲柳细根、粗根、活根、其它植物活根和土壤总根的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(空间结构比在 25% 和 75% 之间)。水曲柳粗根的空间变异尺度为 13.2 m, 水曲柳细根、水曲柳活根、土壤总根和其它植物活根的空间变异尺度均大于 33.9 m。根据理论模型的拟合参数估计, 水曲柳细根、水曲柳活根和土壤总根的空间变异尺度为 61 m, 其它植物活根为 183 m。(2) 平均值成对二样本 t 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水曲柳样地各空间位置处各类型根量的估计。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), 估计出水曲柳纯林表层根量为 1.5926 t/hm^2 , 水曲柳细根为 0.6865 t/hm^2 , 水曲柳粗根为 0.1913 t/hm^2 , 水曲柳活根为 0.9105 t/hm^2 , 水曲柳及其它植物死根为 0.3303 t/hm^2 , 其它植物活根为 0.2127 t/hm^2 。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, 可以实现水曲柳人工林根系生物量的准确估计。

关键词: 水曲柳; 根生物量; 地统计学; 变异函数; 异质性; 估测

The estimate of root biomass in upper soil layer of *Fraxinus mandshurica* plantation by geostatistics method

SUN Zhi-Hu, WANG Qing-Cheng (Forestry College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 923~930.

Abstract: Semivariance analysis of Geostatistics was employed in the quantitative study of the spatial heterogeneity of root biomass in upper layer of soil under 14-year-old *Fraxinus mandshurica* plantation stand. The method used for the estimation of the root biomass was kriging interpolation of Geostatistics and definite integral. The results showed that (1) the semivariograms of fine root($<2\text{mm}$), coarse root ($\geq 2\text{mm}$) and living root of *Fraxinus mandshurica* and total root biomass were best described by spherical model, while that of living root of other plant species, and the dead root of *Fraxinus mandshurica* and other plant species, submitted exponential model and linear model, respectively. The spatial variability of dead root of *Fraxinus mandshurica* and other plant species was primarily the result from random factors, while that of fine root, coarse root and living root of *Fraxinus mandshurica*, living root of other plant species, and total root was mainly caused by structural factors. The spatial heterogeneity degree of those indices induced by structural factor was moderate (with spatial structural ratio between 25% and 75%). The scale of spatial heterogeneity in coarse root of *Fraxinus mandshurica* was 13.2 m. That of fine root and living root of *Fraxinus mandshurica*, total root and living root of other plant species was greater than 33.9 m. Estimation from the parameter of theoretical models indicated that the scale of spatial heterogeneity in fine root and

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(30130160)

收稿日期: 2004-05-31; **修订日期:** 2005-02-10

作者简介: 孙志虎(1977~), 男, 山东人, 博士生, 从事森林生态学研究。E-mail: szhihunefu@163.com

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

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30130160)

Received date: 2004-05-31; **Accepted date:** 2005-02-10

Biography: SUN Zhi-Hu, Ph. D. cadidate, mainly engaged in forest ecology. E-mail: szhihunefu@163.com

living root of *Fraxinus mandshurica*, as well as total root was 61m, and that of living root of other plant species was 183 m. (2) The t-test of pair samples showed that the kriging interpolation, based on the results of semivariance analysis, could be used to estimate the root biomass on every location in *Fraxinus mandshurica* plantation stand. The relationship between those estimated 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), the total root biomass of the stand was 1.5926 t/hm²; the fine root biomass, the coarse root biomass, and the living root of *Fraxinus mandshurica* was 0.6865, 0.1913, 0.9105 t/hm², respectively; the dead root of *Fraxinus mandshurica* and other plant species was 0.3303 t/hm², the living root of other plant species was 0.2127 t/hm². Using the kriging interpolation method of Geostatistics, combined with multiple regression and definite integral, provide a new optimal alternative for the estimation of root biomass in *Fraxinus mandshurica* plantation stand.

Key words: *Fraxinus mandshurica*; root biomass; geostatistics; semivariance; heterogeneity; estimate

文章编号:1000-0933(2005)04-0923-08 中图分类号:T18.55 文献标识码:A

森林生物量是全球碳循环的重要组成部分^[1~3],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^[2~5]。生物量(Standing crop)是森林中单位面积上某个时间所测得的有机物质总重量^[6],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^[1,7],而地下部分生物量,由于其空间分布的复杂性,使得其测定工作较为困难^[8,9],尚未有一种快速、准确的测定方法^[1,7,10~13]。地下部分生物量可分为根桩、粗根($\geq 2\text{mm}$)和细根($< 2\text{mm}$)3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^[7]。在细根部分的测定中,由于收获法往往对细根收获不完全^[14],而使土钻法成为普遍使用的方法^[7,12],此法应用时需要考虑取样数量的问题^[7,12,13],这取决于细根分布的异质性^[7,12]和所用根钻的直径^[15],经常采用的取样点数是 30^[16~20]。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 型曲线的方法进行空间取样点的布设^[16,18~20],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,在考虑水曲柳细根可能存在空间分布异质性的情形下,研究水曲柳纯林表层细根生物量的状况,以期能为准确测定细根生物量的方法提供一些帮助。

1 研究方法

1.1 研究林分概况

采样在东北林业大学帽儿山实验林场 14 年生水曲柳人工纯林中进行。林分株行距为 1.5 m $\times$ 1.5 m,平均高 8.5 m,平均胸径 5.3 cm,郁闭度 0.8;土壤为典型暗棕壤,土层(A+B)厚度 30 cm,凋落物层厚度 2.0 cm;坡向西南,中坡位,坡度 $\leq 12^\circ$;坡面平整,起伏较小;林下植被稀少,主要为一些草本植物。采样时间 2002 年 7 月。

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^[21]。首先将 30 m $\times$ 30 m 的样地等距离间隔划分为 100 个 3 m $\times$ 3 m 的样方。然后,在样地中对角线上的两个 3 m $\times$ 3 m 样方中,按照 0.3 m $\times$ 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,在样地中,选取 45 个样点进行取样。在两个样方(3 m $\times$ 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(参照^[21,22])。样点总体布设见图 1。

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 10 cm。由于树木细根多集中于枯落物层和 10cm 以上矿质土壤表层^[23~27],取样深度设定在 0~10 cm。将取出的土壤装入封口塑料袋中,于采样当天,用土壤筛分离细根。分离细根时,按照颜色和构型及弹性等特征区分水曲柳活根、其它植物活根系、水曲柳和其它植物死根,然后将水曲柳活根系分作粗根($\geq 2\text{mm}$)和细根($< 2\text{mm}$)两个等级,分别将各类根系置于烘箱中,在 60 $^\circ\text{C}$ 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,严重时掩盖其固有的结构^[28]。因此,进行半方差图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 ArcGis 8.1 中的 3D 分析功能和 Table curve 3D 软件两种方法计算该样地表层各类型根系的干重。

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,采用半方差分析(Semivariance

analysis)的方法研究其空间异质性特征。半方差函数的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)}[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 (i = 1, 2, 3, 4, \dots, N(h))$$

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。 $\gamma(h)$ 为变异函数值(又称为半方差, Semivariance)。

以半方差 $\gamma(h)$ 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, C_0)、基台值(Sill, $C_0 + C$)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(C_0)。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^[28]。

1.6 空间未取样点根量的估计

在半方差图分析的基础上,采用克里格内插法(Kriging)对空间未取样点的各类型根生物量进行估计。具体内插方法见参考文献^[28]。

1.7 空间未取样点根量估计效果的检验

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)的各类根量,用于检验克里格内插法的效果。检验时采用平均值成对二样本 t 检验方法^[29]。

1.8 水曲柳纯林土壤表层根量的估计

采用 2 种方法估算水曲柳纯林表层根量。对于原始数据服从正态分布的根系类型,利用半方差分析所得出的半方差图理论模型的各项参数,结合 ArcMap 中的 3D Analyst 工具,首先求出样地各类型根量的空间克里格分布图,然后利用 3D Analyst 中的转换功能将该栅格形式的空间克里格分布图转化为不规则三角网格式(TIN)的分布图。最后利用 Surface analysis 中的求积功能,求出研究样地表层根系的生物量。对于原始数据转化后服从正态分布的根系类型,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根系生物量。然后采用 Table curve 3D 软件,建立各空间位置处各类型根生物量与其 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),求出研究样地的表层各类型根系的生物量。

2 结果与分析

2.1 水曲柳纯林表层根量的描述统计分析

由田间实测样本的经典统计学分析所得出的土壤表层根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,各类型根系均有较大的变动,存在异质性现象(表 1)。从各类型根系的变异系数看,其它植物活根和水曲柳粗根的变异系数最大(分别为 182.71%和 111.37%),水曲柳细根、水曲柳活根、水曲柳及其它植物死根、土壤总根的变异系数最小(分别为 39.97%、47.90%、48.90%和 32.34%)。从最大值与最小值之间的相差幅度看,其它植物活根的最大值与最小值之间相差幅度最大(为 532.23 g/m²),土壤总根、水曲柳活根次之(分别为 268.55 g/m² 和 250.06 g/m²),水曲柳粗根、水曲柳细根、水曲柳及其它植物死根最小(分别为 168.28 g/m²、123.44 g/m² 和 88.15 g/m²)。

土壤中各类型根系的正态性检验结果表明(表 1 中的 $K-S$ 值),水曲柳细根以及活根、土壤总根符合正态分布,而其余类型的根系不符合正态分布。不符合正态分布的根系类型经过平方根转换或对数转换后符合正态分布(表 1 中的 $K-S$ 值)。

2.2 水曲柳纯林表层根量的半方差分析

采用相等间隔步长 2.7 m,最大间隔 27.2 m,进行水曲柳纯林表层根量的半方差分析。结果表明,水曲柳纯林表层各类型根量的半方差值,在最大间隔距离 27.2 m 的范围内,随着样点间隔距离的变化表现出不同的变化趋势(图 2)。水曲柳细根、水曲柳活根,其它植物活根以及土壤总根的半方差值,在最大间隔距离 27.2 m 的范围内,随着样点之间间隔距离的增加而增加;水曲柳粗根的半方差值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;水曲柳及其它植物死根的半方差值,在全部取样间隔范围内近似相等(图 2)。

对上述指标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 2),水曲柳纯林表层各类型根量的半方差值

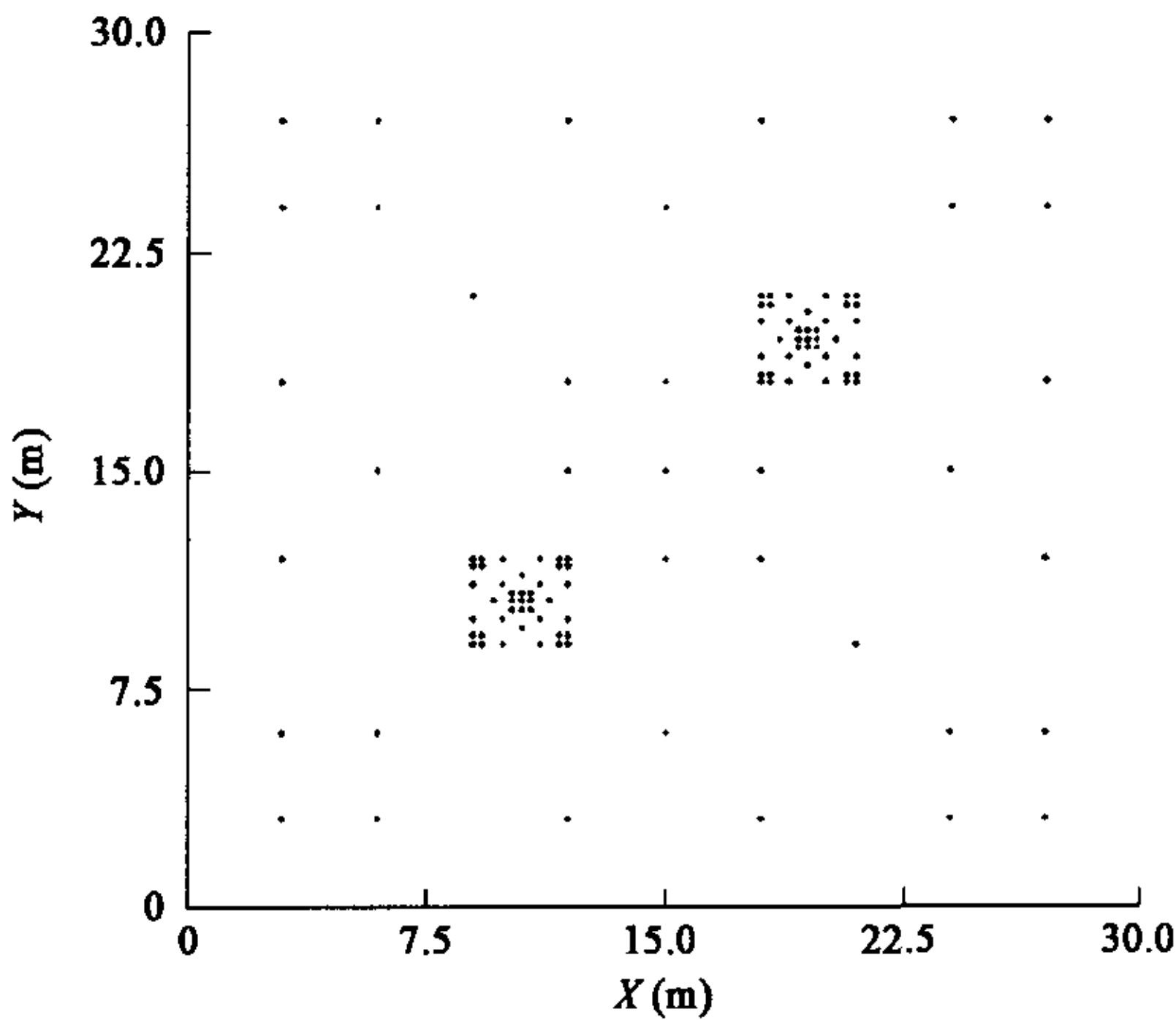


图 1 空间取样设计(横纵坐标为样地边界)

Fig. 1 Spatial sampling design(X and Y are plot boumdaries)

表 1 土壤表层(0~10cm)根量的描述统计分析结果(g/m²)

Table 1 Descriptive statistics of root mass in soil surface layer(0~10cm)									
根类型	平均 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	观测数 N	标准差 Stand. dev.	峰度 Kurt.	偏度 Skew.	变异系数 Cv(%)	K-S 值 K-S value
水曲柳细根 FRA (<2mm)	72.56	7.39	130.83	81	29.00	-0.4298	-0.1723	39.97	0.0490
水曲柳粗根 CRA (≥2mm)	33.77	0	168.28	54	37.61	3.3177	1.8556	111.37	0.2168*
水曲柳活根 LRA	95.08	7.39	257.45	81	45.54	1.4217	0.766	47.90	0.1147
其它植物活根 LROP	35.57	0	532.23	81	64.99	43.3964	5.9415	182.71	0.2921**
水曲柳及其它植物死根 DRAOP	37.63	0	88.15	81	18.40	0.1331	0.5916	48.90	0.1541*
土壤总根 TRS	162.5	48.41	317.96	80	52.56	0.3288	0.2659	32.34	0.0687
水曲柳粗根 ^① CRA	2.89	0	5.13	54	1.38	0.3136	-0.8563	47.754	0.1425
其它植物活根 ^① LROP	2.83	0	6.28	81	1.32	0.1368	-0.3953	46.644	0.0696
水曲柳及其它植物死根 ^② DRAOP	5.90	0	9.39	81	1.68	2.5646	-0.8123	28.474	0.1003

*, ** 分别表示 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 水平上,非正态分布; ①原数据加 1 后进行自然对数转换的结果; ②平方根转换后的结果; FRA fine root of ash; CRA coarse root of ash; LRA living root of ash; LROP living root of other plants; DRAOP death root of ash and other plants; TRS total root in soil; * and ** are normal distribution at $\alpha=0.05$ and $\alpha=0.01$ levels, respectively; ① represents the result of napierian logarithm transformation of original data plus 1; ② represents the result of square-root transformation

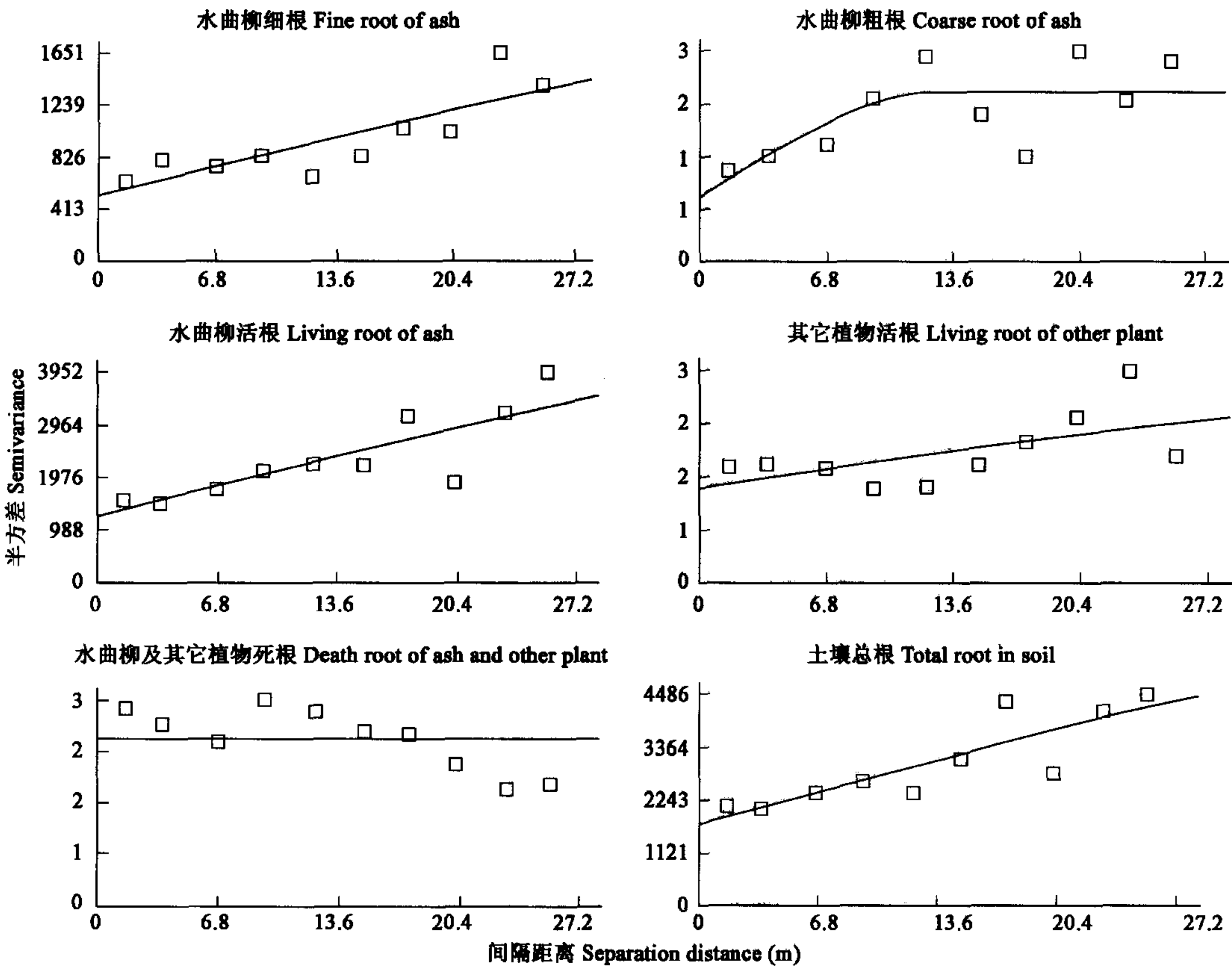


图 2 水曲柳纯林表层(0~10cm)根量半方差图

Fig. 2 The semivariogram of root mass in soil surface layer(0~10cm)of pure ash stand

随间隔距离的变化很好的符合理论模型的变化趋势,模型拟合的决定系数变化在 0.35~0.74 之间。 F 检验结果表明,除其它植物活根指标外,剩余所有指标半方差值的理论模型拟合效果均达显著水平。水曲柳细根、水曲柳粗根、水曲柳活根、土壤总根等指标的半方差图符合球状模型的变化趋势,水曲柳及其它植物死根符合线性模型的变化趋势,其它植物活根符合指数模型的变化趋势。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 ;而符合指数模型变化趋势的指标,其空间自相关范围是模型范围参数 a_0 的 3 倍^[30]。由此,水曲柳细根、水曲柳活根、土壤总根的空间自相关范围均为 61.0 m,水曲柳粗根为 13.2 m,其它

植物活根为 183 m。由于本次样点间的最大间隔距离为 33.9 m,说明所有根系指标中除了水曲柳粗根外,剩余所有指标的空间自相关范围至少是大于 33.9 m。

从空间结构方差(C)与总变异方差(C₀+C)的比值-结构比来看,结构性因素在水曲柳细根、水曲柳粗根、水曲柳活根、其它植物活根、土壤总根的空间异质性形成中均占有较大比重(表 2)。水曲柳活根 74.2%的空间变异是由于结构性因素的原因造成的;水曲柳细根、土壤总根、其它植物活根、水曲柳粗根等指标的结构比由大到小依次为 73.6%、71.3%、67.2%、63.0%。

从水曲柳及其它植物死根指标半方差图理论模型的拟合结果看,该指标的块金值与基台值相等,结构比为 0,半方差图表现为纯块金方差图,说明水曲柳及其它植物死根的生物量在最小取样尺度 0.3 m 的条件下,在该样地中呈随机分布。

表 2 水曲柳纯林表层(0~10 cm)根量半方差分析结果

Table 2 The result of semivariance analysis for root mass in soil surface layer(0~10cm)

根类型 Root type	模型 Model	块金值 Nugget C ₀	基台值 Sill C ₀ +C	范围参数 Range parameter a ₀	结构比 Proportion C/(C ₀ +C)	决定系数 R ² coefficient of determination	F 值 * F value
水曲柳细根 FRA (<2mm)	球状	511	1934	61.0	0.736	0.68	17.16
水曲柳粗根 CRA (≥2mm)	球状	0.87	2.36	13.2	0.630	0.48	7.47
水曲柳活根 LRA	球状	1220	4736	61.0	0.742	0.70	18.23
其它植物活根 LROP	指数	1.345	4.098	61.0	0.672	0.35	4.25
水曲柳及其它植物死根 DRAOP	线性	2.64	2.64	25.5	0	0.64	13.98
土壤总根 TRS	球状	1700	5916	61.0	0.713	0.74	22.53

* F_{0.05}(1,8)=5.32, F_{0.01}(1,8)=11.26; FRA fine root of ash; CRA coarse root of ash; LRA living root of ash; LROP living root of other plant; DRAOP death root of ash and other plant; TRS total root in soil

表 3 水曲柳纯林表层(0~10cm)根量实测值与克里格估测值之间的比较(n=37)

Table 3 The comparison of original data and estimate for root mass in soil surface layer(0~10cm)

根类型	实测值 Real data(g/m ²)			估测值 Estimate(g/m ²)			显著性水平 α
	平均 Mean	标准差 Std. dev.	峰度 Kurt.	偏度 Skew.	平均 Mean	标准差 Std. dev.	
水曲柳细根 FRA(<2mm)	30.47	46.44	11.37	2.99	17.32	7.7	0.1090
水曲柳粗根 CRA(≥2mm)	58.03	29.70	16.03	3.39	72.64	2.82	0.0560
水曲柳活根 LRA	88.49	58.67	7.10	2.37	102.92	6.85	0.1520
其它植物活根 LROP	29.95	60.22	16.93	3.87	19.00	1.32	0.2761
水曲柳及其它植物死根 DRAOP	32.79	19.42	6.83	1.97	28.58	0.50	0.1981
土壤总根 TRS	151.2	77.11	3.71	1.78	158.49	6.94	0.5828

FRA fine root of ash; CRA coarse root of ash; LRA living root of ash; LROP living root of other plant; DRAOP death root of ash and other plant; TRS total root in soil

2.3 水曲柳纯林表层根量克里格插值结果的检验

利用样地对角线下方 3 m×3 m 小样方内 37 个样点的各类根量(横坐标为 9~12 m,纵坐标为 9~12 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各类型根量的估计效果。平均值成对二样本 t 检验结果表明,所有类型根量的估测值与真实值之间差异均不显著(表 3),表明克里格插值方法能够用于对水曲柳纯林表层根量的估计。

2.4 水曲柳纯林表层根量的克里格估计

依据样地内所有取样点(n=117)各类根量的平均值换算出的每公顷林地表层根量与半方差分析所选用的取样点(n=81)获得的相应值之间存在一定差异(表 4),说明样点数量的不同,对林地表层根量的估计存在一定的误差。

各类根量在空间上未取样点位置处的估测值与其相应空间坐标之间的关系,采用二元十次余弦级数多项式(Bivariate order 10 cosine series polynomial)能很好的拟合(决定系数均在 0.95 以上),说明二元十次余弦级数多项式能很好的反映根量估测值与空间位置之间的关系。利用此回归关系所求算出的林地表层水曲柳细根、水曲柳活根和土壤总根量与 ArcGis 软件所估测出的相应指标的结果近似,说明此回归方法能够代替 ArcGis 软件计算体积的方法。

水曲柳纯林表层根量克里格插值方法估测结果表明(表 4),所有类型根量的估计值均小于半方差分析所选取样点(n=81)

平均值所推算出的各类型根量。在水曲柳细根、水曲柳活根、水曲柳及其它植物死根、土壤总根等方面,克里格插值方法估测结果分别为 0.6865、0.9105、0.3303 和 1.5926 t/hm²,与全部样点平均值所推算出的各类型根量值 0.6806、0.9161、0.3566 和 1.5896 t/hm² 相近似。在水曲柳粗根和其它植物活根方面,克里格插值方法估测结果(分别为 0.1913 和 0.2127 t/hm²)与全部样点平均值所推算出的相应结果(分别为 0.3243 和 0.3368 t/hm²)相差较大(相差 0.1330 和 0.1241 t/hm²)。

表 4 水曲柳纯林表层(0~10cm)根量估计结果
Table 4 The estimate of root mass in soil surface layer (0~10cm) of ash

根类型 Root type	原始数据 Original data		模型估计 Estimate by model			
	平均值 ^① Mean (n=81)(t/hm ²)	平均值 ^② Mean (n=117)(t/hm ²)	根量 ^③ Root mass (t/hm ²)	决定系数 ^③ Coef. det.	F 值 ^③	根量 ^④ Root mass(t/hm ²)
水曲柳细根 FRA(<2mm)	0.7256(0.5256)	0.6806(0.3000)	0.6865	0.9781	2510.7	0.6886
水曲柳粗根 CRA(≥2mm)	0.3377(0.6499)	0.3243(0.4122)	0.1913	0.9814	2958.9	—
水曲柳活根 LRA	0.9508(0.4554)	0.9161(0.4768)	0.9105	0.9572	1256.3	0.9148
其它植物活根 LROP	0.3557(0.1840)	0.3368(0.6358)	0.2127	0.985	3681.7	—
水曲柳及其它植物死根 DRAOP	0.3763(0.2900)	0.3566(0.1822)	0.3303	0.965	1549.5	—
土壤总根 TRS	1.6254(0.3761)	1.5896(0.6127)	1.5926	0.9609	1382.5	1.6052

①用于半方差分析的原始数据(n=81)平均值换算为 t/hm² 的结果;②所有取样点(n=117)平均值换算为 t/hm² 的结果;③依据 Gs⁺ 的估测值,利用 Table curve 3D 软件,建立地理坐标与根量的多元回归方程后,积分所得结果;④半方差图分析所得参数的基础上,利用 ArcGis 得出的结果;— 该项未计算;括号中数据为标准偏差① according to the mean of original data (which were used to calculate the semivariance, n=81), those results were given by transforming the mean to t/hm²; ② according to the mean of total original data (n=117), those results were given by transforming the mean to t/hm²; ③ according to the estimate by Gs⁺, those results were given by integral of the multiple regression equation with Table curve 3D soft; ④ according to the parameters by analysing the semivariogram, those results were givern with ArcGis soft;— not calculated; data in bracker represent standard deviation; the estiamte was computed; FRA fine root of ash; CRA coarse root of ash; LRA living root of ash; LROP living root of other plant; DRAOP death root of ash and other plant; TRS total root in soil

3 讨论

异质性(Heterogeneity)是指系统属性在空间上的变异性(Variability)^[31]。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^[32]。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^[33]。本次试验结果也证实了水曲柳纯林表层根生物量存在空间异质性的现象(表 1,表 2)。根系生物量的空间异质性产生的原因可能主要是立地条件的空间异质性。从根系生物量的变程来看,即使最小的粗根也超过 13m(表 2),而水曲柳株行距仅为 1.5m。说明在野外进行林分根系生物量调查时应把根系看作一个完全独立于株行距以外的一个总体,调查时样点的布设不应受到株行距的局限。

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 2 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^[16~20]以及采用随机或 S 形曲线(凭直觉)的空间采样点布设方法^[16,18~20]。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 117 个样点各类根量的平均值所换算出的单位面积林地表层根量,与半方差分析所选用的取样点(n=81)的平均值所换算出的相应值之间存在差异(表 4),说明采用 81 个样点平均值估计的林地表层根量与实际值之间仍存在误差,117 个样点所获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,理想的方法是无限制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,但这给人们一个提示,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^[28]。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 3),该法能够用于进行水曲柳纯林整块样地范围内未取样点位置处的表层根量估计。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各类型根量(各类型根量均为离散变量),通过建立空间位置坐标与各类型根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)从而求出该样地各类型细根的生物量(表 4)。

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,有效的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给人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

(1)水曲柳纯林表层细根生物量具有明显的空间异质性现象

水曲柳细根,水曲柳粗根,水曲柳活根和土壤总根变异函数曲线的理论模型符合球状模型,其它植物活根符合指数模型,水曲柳及其它植物死根符合线性模型。水曲柳及其它植物死根的空间变异主要是由随机性因素引起;水曲柳细根、水曲柳粗根、水曲柳活根、其它植物活根和土壤总根的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于中等的空间自相关。水曲柳粗根的空间变异尺度为 13.2 m,水曲柳细根、水曲柳活根,土壤总根和其他起植物活根的空间变异尺度均大于 33.9 m,根据模型的拟合参数,初步估计水曲柳细根、水曲柳活根和土壤总根的空间变异尺度为 61 m,其它植物活根为 183 m。

(2)克里格内插法能够用于水曲柳纯林表层根量的估计 水曲柳纯林表层的根量为 1.5926 t/hm²,水曲柳细根为 0.6865 t/hm²,水曲柳粗根为 0.1913 t/hm²,水曲柳活根为 0.9105 t/hm²,水曲柳及其它植物死根为 0.3303 t/hm²,其它植物活根为 0.2127 t/hm²。

References:

- [1] Michael A C, Sandra B, Eileen H H, et al. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 1997, **111**: 1~11.
- [2] Fang J Y, Chen A P, Zhao S Q, et al. Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in Science (291: 2320~2322) by Fang et al. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(2): 243~249.
- [3] Wang J R, Zhong A L, Kimmins J P. Biomass estimation errors associated with the use of published regression equations of paper birch and trembling aspen. *Northern journal of applied forestry*, 2002, **19**(3): 128~136.
- [4] Catchpole W R, Wheeler C J. Estimating plant biomass: A review of techniques. *Australian Journal of Ecology*, 1992, **17**: 121 ~ 131.
- [5] Kurz W A, Apps M J. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecol. Applic.*, 1999, **9**: 526~547.
- [6] Wang Z. *Larch Forest of China*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1992.
- [7] Huang J H, Han X G and Chen L Z. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2): 270~277.
- [8] Sanford R L J and Cuevas E. Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests. In: Mulkey S S, Chazdon R L and Smith A P eds. *Tropical forest plant ecophysiology*. New York: Chapman and Hall, 1996. 268~300.
- [9] Rose M R. Biomass production and allocation, including fine-root turnover, and annual N uptake in lysimeter-grown basket willows. *Forest Ecology and Management*, 2001, (140): 177~192.
- [10] Person H. Methods of studying root dynamics in relation to nutrient cycling. In: Harrison A F, Ineson P, Heal O W eds. *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems: field methods, application and interpretation*. London and New York: Elsevier applied science, 1990.
- [11] Shan J P, Tao D L. Overseas researches on tree fine root. *Chinese Journal of Ecology*, 1992, **11**(4): 46~49.
- [12] Zhang X Q, Wu K H and Dieter M. A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 875~883.
- [13] Yu W T and Yu Y Q. Advances in the research of underground biomass. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(6): 927~932.
- [14] Liao L Y, Ding M M, Zhang Z P, et al. Root biomass and its nitrogen dynamic of some communities in Dinghushan. *Acta Phytocological and Geobotanica Sinica*, 1993, **17**(1): 56~60.
- [15] Sun L A, Liu G B and Liang Y M. Studies on determining methods of underground biomass with different diameter coring. *Grassland of China*, 1994, (2): 32~35.
- [16] Shan J P, Tao D L, Wang M, et al. Fine roots turnover in a broad-leaved Korean pine forest of Changbai mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 4(3): 241~245.
- [17] Liao L P, Chen C Y, Zhang J W, et al. Turnover of fine roots in pure and mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* forests. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, **6**(1): 7~10.
- [18] Du X J, Liu C F, Jin G, et al. Root biomass of main forest ecosystem in Changbai Mountain. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1998, **29**(3): 229~232.

- [19] Li L H, Lin P and Xing X R. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**(4): 337~340.
- [20] Yang Y S, Chen G S, He Z M, *et al.* Distribution of fine roots in a mixed *Cunninghamia lanceolata*-*Tsoongiodendron odoratum* plantation. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, **10**(2): 111~117.
- [21] Bigwood D W and Inouye D W. Spatial pattern analysis of seed banks: an improved method and optimized sampling. *Ecology*, 1988, **69**: 497~507.
- [22] Mou P, Michell R J and Jones R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. *J. of Applied Ecology*, 1997, **34**: 645~656.
- [23] Buttner V and Leuschner C. Spatial and temporal patterns of fine root abundance in a mixed oak-beech forest. *For. Ecol. Manage.*, 1994, **70**: 11~21.
- [24] Burkner M K and Raynal D J. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil*, 1994, **162**: 135~146.
- [25] Hahn G and Marschner H. Cation concentrations of short roots of Norway spruce as affected by acid irrigation and liming. *Plant and Soil*, 1998, **199**: 23~27.
- [26] Liu X and Tyree M T. Root carbohydrate reserves, mineral nutrient concentrations and biomass in a healthy and a declining sugar maple (*Acer saccharum*) stand. *Tree physiology*, 1997, **17**: 179~185.
- [27] Steele S J, Gower S T, Vogel J G, *et al.* Root mass, net primary production and turnover in Aspen, Jack pine and Black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree physiology*, 1997, **17**: 577~587.
- [28] Wang Z Q. *Geostatistics and its application in ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [29] Lu Y. Probe into the density effect of the stand biomass of *Pinus massoniana*. *Journal of Central-South Forestry University*, 1996, **16**(2): 34~38, 46.
- [30] Goovaerts P. *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press, 1997.
- [31] Li H and Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 1995, **73**(2): 280~284.
- [32] Christien H E and Ettema D A. Spatial soil ecology. *Trends in ecology & evolution*, 2002, **17**(4): 177~183.
- [33] Liao L P, Deng S J, Yu X J, *et al.* Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 569~573.

参考文献:

- [2] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文 (Science, 2001, 291: 2320~2322) 的若干说明. *植物生态学报*, 2002, **26**(2): 243~249.
- [6] 王战. 中国落叶松林. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [7] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. *生态学报*, 1999, **19**(2): 270~277.
- [11] 单建平, 陶大立. 国外对树木细根的研究动态. *生态学杂志*, 1992, **11**(4): 46~49.
- [12] 张小全, 吴可红, Dieter M. 树木细根生产与周转研究方法评述. *生态学报*, 2000, **20**(5): 875~883.
- [13] 宇万太, 于永强. 植物地下生物量研究进展. *应用生态学报*, 2001, **12**(6): 927~932.
- [14] 廖兰玉, 丁明懋, 张祝平, 等. 鼎湖山某些植物群落根系生物量及其氮素动态. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, **17**(1): 56~60.
- [15] 孙力安, 刘国彬, 梁一民. 不同直径土钻测定草地地下生物量方法探讨. *中国草地*, 1994, (2): 32~35.
- [16] 单建平, 陶大立, 王森, 等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究. *应用生态学报*, 1993, **4**(3): 241~245.
- [17] 廖利平, 陈楚莹, 张家武, 等. 杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究. *应用生态学报*, 1995, **6**(1): 7~10.
- [18] 杜晓军, 刘常富, 金罡, 等. 长白山主要森林生态系统根系生物量研究. *沈阳农业大学学报*, 1998, **29**(3): 229~232.
- [19] 李凌浩, 林鹏, 邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究. *应用生态学报*, 1998, **9**(4): 337~340.
- [20] 杨玉盛, 陈光水, 何宗明, 等. 杉木观光木混交林细根的分布. *热带亚热带植物学报*, 2002, **10**(2): 111~117.
- [28] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [29] 吕勇. 马尾松林分生物量的密度效应探讨. *中南林学院学报*, 1996, **16**(2): 34~38, 46.
- [33] 廖利平, 邓仕坚, 于小军, 等. 不同连栽代数杉木人工林细根生长、分布与营养物质分泌特征. *生态学报*, 2001, **21**(4): 569~573.