

文章编号: 1001-1498(2008)06-0751-06

# 山地阔叶混交林林木生长的空间异质性

赵安玖, 胡庭兴, 陈小红

(四川农业大学生态林业工程重点实验室, 四川 雅安 625014)

**摘要:**以川西南亚热带阔叶混交林为对象,采用传统的罗盘仪对树体的相对空间位置进行定位,运用地统计学对林木 20 a 的断面积生长量进行分析,结果表明:林木的胸径 (DBH)、断面积 (BA)的空间自相关范围狭窄,林木断面积生长量的不同时段 (1986—1991年, 1986—1996年, 1986—2001年, 1986—2006年)在 45°方向上空间变异较为明显。

**关键词:**空间异质性;断面积生长增量;山地阔叶混交林

中图分类号: S758.5<sup>+</sup>2

文献标识码: A

## Spatial Heterogeneities of Tree Growth in Subtropical Mountain Broad-leaved Mixed Forest

ZHAO An-jiu, HU Ting-xing, CHEN Xiao-hong

(Key Laboratory of Forest Ecological Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

**Abstract:** One permanent plot with 100 m × 100 m was established to study the structure and function of mountain broad-leaved mixed forest ecosystem in southwestern Sichuan (102°50' E, 30°02' N). The relative position of every tree was measured by compass. By analysis of geostatistics, diameter at breast height and basal area of forest stand showed spatial autocorrelations in strict ranges, further more, they represented spatial varieties only in orientations of 45 degree; basal area increment (BAI) of each tree species showed spatial varieties only in orientations of 45 degree during 1986—1991, 1986—1996, 1986—2001, 1986—2006. Researches on spatial heterogeneities of tree BAI could put afford meaningful references for studying ecological structures and functions of subtropical Mountain broad-leaved mixed forest.

**Key words:** spatial heterogeneities; basal area increment (BAI); mountain broad-leaved mixed forest

近几十年来,林木生长模型的研究取得了很大的进展<sup>[1-6]</sup>。由于林木竞争和生态系统环境变化,林分空间影响将导致复杂的环境斑块,林学家早已意识到树体位置的空间格局强烈地影响到邻近树木、胸径、断面积变化及其分布、竞争、生长和死亡等<sup>[6-9]</sup>。林木生长的时间和空间变化研究从上世纪的 60年代早已开始<sup>[4,10-11]</sup>,常用自回归模型 (AR)<sup>[4,12-13]</sup>和混合滑动自回归模型 (ARMA)<sup>[10]</sup>来分析。混合模型方法已大量地应用于林分和林木个体生长和收获模型<sup>[14-18]</sup>,同时林木生长空间异质性的空间模型已有

应用<sup>[17-24]</sup>,主要是用线性和非线性回归的方法来估计,近些年又出现了一些新的方法如地权回归法<sup>[25]</sup>,对林木生长进行了很好的诠释。林分内树木描述为空间点格局,林木生长量的空间分布可以考虑为连续变量,它们的空间格局能够用较好的方法来模拟,如谱分析<sup>[17]</sup>、小波分析<sup>[1,14]</sup>和地统计学方法<sup>[14]</sup>。

空间异质性决定着物种、能量和干扰在景观中的流动或运动,并始终同抗干扰能力、恢复能力、系统稳定性和生物多样性有着密切关系<sup>[26-27]</sup>。空间异质性对生物个体、种群和生态系统有重要的影响,

收稿日期: 2007-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 30471378); 国家“十五”攻关课题 (2004BA606A-6); 四川省教育厅应用基础项目 (2005A011)

作者简介: 赵安玖 (1975—),男,重庆城口人,博士,主要从事 GIS、RS和景观生态学教学与科研工作。E-mail: za9828@yahoo.com.cn

许多研究表明异质性的环境条件有利于大多数生物的生存,生境资源的斑块化决定了资源的可利用程度,并控制位于其上的植物种对资源的利用方式,进而决定了植物种的斑块化分布格局,许多生态学过程(如干扰)最终都是通过改变异质生境中的资源可利用性来影响物种的小尺度空间分布的<sup>[27-29]</sup>。林木生长量的空间分布实际上是和林分许多生态过程密切地相联系的,如物种生活史、微环境变化、干扰、林木和种群的竞争、种子分布和森林更新<sup>[14,16]</sup>。虽然空间分布分析不能决定特定的生态过程,但能提供相应推理信息如潜在生态过程和估计生态系统稳定性、生产力和其它功能。林木生长在不同的时间内所受空间的影响,以及林木生长的空间变异程度如何,目前还少有研究<sup>[10]</sup>。鉴于此,通过近 20 a 来对不同时间段林木增长量的空间变异分析,主要探讨在小尺度下,林木生长量的空间变异,以期从林木生长这个基本特征认识不同树种种群的某些生态学性质或过程,为亚热带山地阔叶林的生态恢复与重建提供参考依据。

## 1 研究区概况

研究区位于川西南雅安市天全县白沙河林区内(102°50' E, 30°02' N),海拔 1 600 m 左右,其地质构造主要为龙门山褶皱带东北东向构造;地形多样,为中山高山地貌类型;成土母岩为花岗岩,土壤多为山地黄壤。本区属于四川盆地中亚热带湿润气候区,主要气候特点是气温日较差小,气候温和,降水充沛,四季分明,大陆性季风气候较显著。年平均气温 15.1℃,最热月(7月)平均气温 24.1℃,最冷月(1月)平均气温 5℃;年平均降水量一般为 1 680 mm 以上,最高达 2 163 mm,最低达 1 100 mm 以上,降水主要集中在 6—9 月,多夜雨,阴天多,日照较少;年相对湿度 83%。

调查区内林分群落垂直层次十分明显,阔叶林树种丰富,主要由壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、槭树科(Aceraceae)、杜鹃花科(Ericaceae)、山茶科(Theaceae)、连香树科(Cercidiphyllaceae)、胡桃科(Juglandaceae)、金缕梅科(Hamamelidaceae)、木兰科(Magnoliaceae)、冬青科(Aquifoliaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、山矾科(Symplocaceae)等科组成;青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.)、桢楠(*Phoebe zhennan* S. Lee et F. N. Wei)、天全槭(*Acer sutchuenense* Franch. subsp. *tienchuanense* (Fang et

Soong) Fang)、麻栎(*Quercus acutissima* Carr.)、连香树(*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. et Zucc.)、总状山矾(*Symplocos botryantha* Franch.)、大树杜鹃(*Rhododendron protistum* Balf. f. et Forrest)等种在阔叶林中占优势。林分郁闭度较大,林下草本灌木植物分布相对较少,主要是禾本科(Gramineae)草本植物、蕨类和悬钩子(*Rubus* sp.)。

## 2 研究方法

### 2.1 生长量测定

采用样地调查方法,在研究区选择代表性地段设立 1 个 100 m × 100 m 样地,将其划分为 25 个 20 m × 20 m 样方,分别用字母 A、B、C、...、Y 表示。胸径(DBH) ≥ 3 cm 的每株树采用传统的罗盘仪进行准确定位,记录每一株胸径、树高、冠幅,并识别树种的科、属、种。

在样地内对主要的优势树种采用生长锥进行取样,选取胸径大于 10 cm 的样木,以胸径 10 cm 为径级,对径级内的每树种都进行取样,取样位置在胸径 1.3 m 处,每样木在东西方向各取一样品(根据样地的位置和坡向确定),每树种至少 30 株以上,且尽可能地均匀地分布在样地内。树木的年龄和生长量采用 WinDENDRO 系统(Regent Instruments NC, German)进行分析和处理,用 WinDENDRO 测量树轮宽度及交叉定年需要 6 个主要的步骤,使用 COFECHA 或其他交叉定年辅助程序检验后,回到图像分析上对可能的测量或定年错误作更改。年轮宽度是通过如下公式转换为年胸径增长量:

$$D_{t-1} = \frac{[D_t - (B_s D_t)] - R_t}{1 - B_s}$$

$B_s$  是树种形数<sup>[19-21]</sup>,  $D_t$  是  $t$  年的胸径,  $D_{t-1}$  是  $t-1$  年的胸径,  $R_t$  是  $t$  年的年轮宽度,年胸径增长量

可转为年断面积增长量(BAI):  $BAI = \left[ \frac{D_t}{2} \right]^2 - \left[ \frac{D_{t-1}}{2} \right]^2$

### 2.2 地统计分析

常用地统计学来研究植被的空间异质特性,即:

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

式中,  $r(h)$  为变异系数;  $h$  为样点空间间隔距离,即步长;  $N(h)$  为间隔距离为  $h$  的样点数;  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i + h)$  分别为区域化变量  $Z(x)$  在空间位置  $x_i$  和  $x_i + h$  上的实测值。

在模拟林木生长异质性的研究中,主要采用球状模型<sup>[14]</sup>:

$$r(h) = c_0 + c \cdot \left[ \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \dots h \quad a,$$

$$r(h) = c_0 + c \dots h > a$$

式中,  $c_0$  为块金值 0;  $c$  为结构变量  $c_0, a$  变程或称空间依赖范围。模型通过 Bonferroni 的 Moran's I 的空间自相关图检验。根据半方差的定义,当  $h=0$  时,  $r(h)=0$ 。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,它来源于远小于抽样尺度上存在的差异和误差。具有空间相关性分布的变量,其半方差先随  $h$  增加而增大,当  $h$  增加到一定程度时,半方差便维持在一定水平,不再有明显的增加,此时的  $r(h)$  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,在球状模型的研究中,有效变程  $a=A_0$ , 阈值与块金方差之差定义为结构方差 ( $c$ ), 最大变程用  $A_1$  表示。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,相距大于变程的点之间不具备自相关性,变程对生态学研究的取样策略具有重要指导意义。 $r(h)$  的计算是通过数据对和适合的间距在 GS + 7. 0 (Gamma Design Software, Plainwell, Michigan, USA) 软件下完成。

### 3 结果与分析

#### 3.1 林木生长量特征

林分内树种年龄变化从 27 a 到 100 a, 林分内各树种的平均年龄非常接近, 大约在 50 a 左右 (表 1)。林分生长趋势是反映林分动态的重要标志之一, 建立时间与断面积累积增长量的线性回归关系, 其相关关系非常密切 (大树杜鹃  $R^2 = 0.9976$ , 天全槭  $R^2 = 0.9783$ , 连香树  $R^2 = 0.9514$ , 青冈  $R^2 = 0.9715$ , 桢楠  $R^2 = 0.9835$ , 全林  $R^2 = 0.9807$ )。1986—2006 年林木未经标准化的各树种断面积平均年生长量如图 1, 连香生长速度较快, 且年生长量起伏较大, 其它树种生长较为平稳, 年生长量差异不大。

表 1 各树种的平均年龄及样本数 株

胸径分级	大树杜鹃	麻栎	连香	润楠	天全槭	青冈	桢楠
10~19.9 cm	12	13	15	14	17	15	17
20~29.9 cm	11	15	13	12	15	14	10
30~39.9 cm	3	10	11	13	13	12	11
40 cm 以上	1	11	15	13	12	14	8
(平均年龄 / a)	45	41	55	61	52	48	52

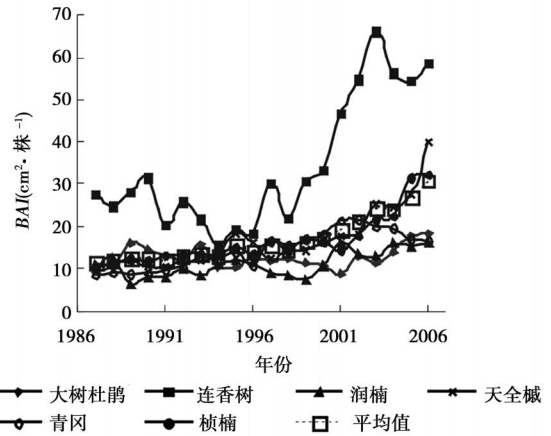


图 1 不同树种断面积年平均增长量

#### 3.2 胸径 (DBH) 与断面积 (BA) 分布的空间异质性

由于土壤、水分、光环境和林木自身特征 (林木生长和林分竞争等) 等的影响, 林分结构在空间的分布表现出强的异质性, 林木 DBH 和 BA 半方差函数能揭示林分不同空间结构。DBH 和 BA 的各向同性分析表明 DBH 和 BA 的各向同性不显著 ( $DBH$  的  $R^2 = 0.243$ ,  $BA$  的  $R^2 = 0.452$ ), 这表明 BA 和 DBH 在空间各方向上表现出不同的特性。各向异性的分析看出, DBH 在各个方向上 ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ) 都呈现出异质性 (图 2), 但在  $45^\circ$  方向上表现最大, 在延迟距离 (lag distances) 从 0 ~ 10 m 内球状模型提供了较好的模拟 ( $c_0 = 0.1$ ,  $c_0 + c = 117.07$ ,  $A_0 = 1$ ,  $A_1 = 9.5$ ,  $R^2 = 0.652$ ,  $RSS = 23.199$ ), 其  $R^2$  值为 0.652, Bonferroni 的 Moran's I 的空间自相关检验是显著的。在这个尺度, 结构变量比例分别为 99.9%, 块金值都极低, 为 0.1。在其它尺度, 模型的适用性较差。林分断面积与胸径呈现相似的特征 (图 2), 在  $45^\circ$  方向也表现出较大的异质性 ( $c_0 = 0.00003$ ,  $c_0 + c = 0.00187$ ,  $A_0 = 32.260$ ,  $A_1 = 62.27$ ,  $R^2 = 0.763$ ,  $RSS = 0.0000342$ )。

#### 3.3 不同时段林木断面积增长量 (BAI) 的空间异质性

3.3.1 不同时段 BAI 的各向同性 对不同延迟距离分析知, 在 68.2 m 步长变化域内, 林木断面积增长量各阶段半方差函数的变化相对平稳, 步长变化域大于 68.2 m 时, 半方差函数变化不稳定, 其散点图先下降后分散, 这是增长量空间变异的各向异性导致的。因为随距离的增加, 导致林木断面积增长量空间变异的各因素在不同方向上的差异会越来越明显。在 10 m 步长变化域内, 对不同步长间距下

半方差函数模型进行拟合,可以得到较好的半方差函数理论模型。由表 2 知,小尺度下在 1986—1991 年,1986—1996 年,1986—2001 年,1986—2006 年不同时段,林木断面积增长量半方差函数的最佳模型为球状模型。 $c_0 / (c_0 + c)$  值为 0.0%,表明林木断面

积增长量在该尺度范围内具有强烈的空间相关性,结构性因子是影响其空间变异的主要因素,而随机性因子的影响则不大。因此,坡面不同位置对林木断面积增长量变化的影响较大。随机因素不构成林木断面积增长量空间变异的主要因素。

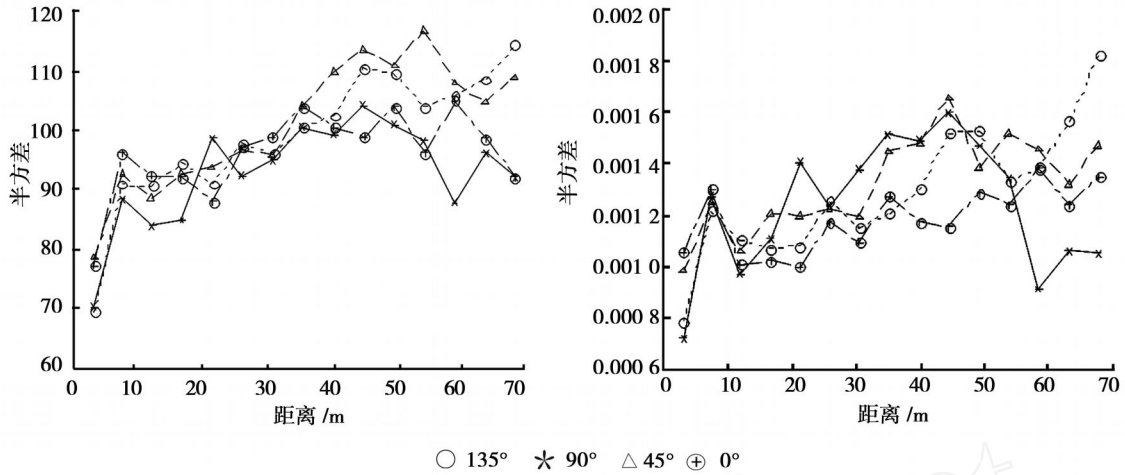


图 2 DBH(左)和 BA(右)在各方向上(0、45、90、135°)的实验半方差图

表 2 小尺度下不同时段林木断面积增长量各向同性半方差函数理论模型及有关参数

时段	模型	块金值 /cm <sup>2</sup>	基台值 /cm <sup>2</sup>	变程 /m	决定系数	残差
1986—1991	球状	0	0.000 01	5.1	0.595	3.30E-11
1986—1996	球状	0	0.000 06	3.1	0.588	7.89E-10
1986—2001	球状	0	0.000 15	6.7	0.764	3.57E-09
1986—2006	球状	0	0.000 33	3	0.516	4.55E-08

3.3.2 不同时段 BA 的各向异性 区域化变量不仅与步长 (h) 有关,而且与方向有关,由表 3 看出,在 45 方向变异最为明显,1986—1991 年变程比为 1.675 24,1986—1996 年变程比为 1.179 29,1986—2001 年变程比为 1.558 07,1986—2006 年变程比为

1.500 72,表明在 45 方向上空间变异较为明显;而其它方向变程大都接近于 1,说明在这些方向上空间变异不明显。从上面分析结果,说明林木断面积增长量受坡向影响较大,因为 45 方向正是与太阳入射方向和地形走向一致。

表 3 不同时期林木断面积增长量各向异性半方差函数理论模型及有关参数

主轴方向	时段	模型	块金值 /cm <sup>2</sup>	基台值 /cm <sup>2</sup>	变程 /m	最大变程 /m	决定系数	残差
0°	1986—1991	球状	0.000 01	0.000 04	267.7	267.7	0.113	2.45E-09
	1986—1996	球状	0.000 06	0.000 17	263.1	263.1	0.119	2.55E-08
	1986—2001	球状	0.000 11	0.000 42	100.6	100	0.08	2.15E-07
	1986—2006	球状	0.000 25	0.000 96	109.7	109.6	0.045	1.29E-06
45°	1986—1991	球状	1.11E-05	0.000 05	217.7	364.7	0.623	2.11E-09
	1986—1996	球状	0.000 042	0.000 18	223.1	263.1	0.651	1.87E-08
	1986—2001	球状	0.000 13	0.000 39	70.6	110	0.78	2.12E-07
	1986—2006	球状	0.000 205	0.000 92	69.7	104.6	0.665	1.14E-06
90°	1986—1991	球状	0.000 017	0.000 042	257.7	265.7	0.223	2.42E-09
	1986—1996	球状	0.000 056	0.000 165	262.1	263.1	0.129	2.15E-08
	1986—2001	球状	0.000 15	0.000 412	100.6	100	0.09	2.15E-07
	1986—2006	球状	0.000 245	0.000 948	101.7	101.6	0.145	1.34E-06
135°	1986—1991	球状	0.000 011	4.08E-05	257.7	257.7	0.113	2.35E-09
	1986—1996	球状	0.000 063	0.000 155	253.1	263.1	0.136	2.67E-08
	1986—2001	球状	0.000 1	0.000 452	90.6	90	0.07	2.05E-07
	1986—2006	球状	0.000 211	0.000 916	102.7	104.6	0.142	1.39E-06

## 4 小结与讨论

### 4.1 林木生长量测定

对于包括离散时间段变化生长周期的林木生长过程,目前广泛地用林木生长模型来模拟。不同形式的生长方程一般相对简单,但能描述比较复杂的生长过程。本研究通过生长锥取样的年轮髓心,使用时间序列分析很好地模拟了天然阔叶林不同树种断面积年生长过程。由于阔叶树种自身生物学特性及生长过程中受气候、地形、土壤和人为干扰等多方面影响,年轮和年胸径生长量的判断相对针叶树种困难,所以本研究年轮的判定误差在 2~3 a,年胸径生长量的精度为 0.001 mm。可实用有效地估计林木生长,它与林木生长不是简单的线性下降趋势,虽然林木生长的局部竞争的影响仍是一直存在的<sup>[7,30]</sup>;另外,BAI比年轮宽度描述林木生长更准确<sup>[31]</sup>。

### 4.2 树体大小结构异质性

空间异质性的变化不具有空间上的规则性,而陡然变化出现在不同的距离上。其变程表示空间自相关范围的大小,变程之内的变量具有空间自相关特性,反之不存在。林木的 DBH、BA 的空间自相关范围狭窄 (DBH:  $A_0 = 2.7$  m, BA:  $A_0 = 3.4$  m),这说明在较大的尺度上存在着较大的变异。若某一方向的主轴变程和亚轴变程之间的差距越大,即各向异性比越大,则区域化变量在该方向的变异越明显,由 DBH ( $A_0 = 1$  m,  $A_1 = 9.5$  m) 和 BA ( $A_0 = 32.26$  m,  $A_1 = 62.27$  m) 表明在 45 方向上空间变异性是十分明显的,在方向上与地形的走势一致,即与海拔和坡向的方向相同,结果表明了地形在一定范围内控制着林分 DBH 和 BA 的异质性变化。

### 4.3 林木 BAI 空间异质性

很多学者<sup>[10,16-19]</sup>曾用时间序列分析模拟了林木生长过程,并从不同的尺度和林木竞争进行了探讨,但都没有考虑到林分空间特性; Zhang 和 Shi<sup>[25]</sup>利用地权回归方程考虑了空间位置对林木生长的影响,并模拟了断面积生长与胸径的关系,取得了十分好的效果,但对林木生长空间变异没有涉及。所以经典统计分析只能描述林木生长量的总体状况,不能准确反映其变化的局部特征,以及随机性、结构性、独立性和相关性的具体情况。因此,要详细了解林木生长量的空间变异性,必须采用地统计学方法进一步分析。林分特性空间变异结构分析的关键是

拟合出精度较高的半方差函数模型。选择最优模型时,首先要考虑决定系数 ( $R^2$ ) 和残差 (RSS), 其次综合考虑块金值和变程的大小。生长量的空间相关性可根据块金值与基台值之比  $c_0 / (c_0 + c)$  划分。林分生长空间变异是多种因素影响的综合结果, 比如树种生物学特性、林木竞争、微环境、气候和土壤等; 本文用地统计学详尽地分析了 20 a 来林分内林木断面积生长的空间变异 (表 3), 1986—1991 年, 1986—1996 年, 1986—2001 年, 1986—2006 年, 在 45 方向上空间变异较为明显。这与样地的坡向和海拔是一致的, 说明在不同阶段林分林木生长变异在一定程度上受地形的影响, 另外, 林木竞争、太阳辐射和土壤空间变异也是重要的因素<sup>[6,15]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Baidwin V C, Peterson K D, Burkilart H E, *et al* Equation for estimating loblolly pine branch and foliage weight and surface area distributions [J]. *Can J For Res*, 1997, 27: 918 - 927
- [2] 唐守正, 李希菲, 孟昭和. 林分生长模型研究的进展 [J]. *林业科学研究*, 1993, 6(6): 672 - 679
- [3] Bailey R L. A compatible volume-tape model based on the schumacher and hall generalized constant form factor volume equation [J]. *For Sci*, 1994, 40: 303 - 313
- [4] Yang X, Witcosky J J, Miller J J. Vertical overstory canopy architecture of temperate deciduous hardwood forests in the Eastern United States [J]. *For Sci*, 1999, 45(3): 349 - 358
- [5] Zhang Yujia, Bruce E B, Rodney E W, *et al* A model for foliage and branch biomass prediction for intensively managed fast growing loblolly pine [J]. *For Sci*, 2004, 50(1): 65 - 81
- [6] Wichmann L. Modelling the effects of competition between individual trees in forest stands [D]. Copenhagen: Royal Veterinary and Agricultural University, 2002: 112
- [7] Melisa L H, David L P. Spatial and temporal variability in forest growth in the Olympic Mountains, Washington: sensitivity to climatic variability [J]. *Can J For Res*, 2006, 36(1): 92 - 105
- [8] Koistinen E, Valkonen S. Models for height development of Norway spruce and Scots pine advance growth after release in southern Finland [J]. *Sil Fen*, 1993, 27: 179 - 194
- [9] Kuuluvain T, Pukkala T. Effect of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade [J]. *Agric For Meteorol*, 1987, 40: 215 - 231
- [10] Gregoire T G, Schabenberger O. A non-linear mixed-effects model to predict cumulative bole volume of standing trees [J]. *J Appl Sta*, 1996, 23: 257 - 271
- [11] Kenkel N C, Hoskina J A, Hoskins W D. Local competition in a naturally established jack pine stand [J]. *Can J Bot*, 1989, 67: 2630 - 2635
- [12] Moeur M. Characterizing spatial patterns of trees using stem mapped data [J]. *For Sci*, 1993, 39: 756 - 775

- [13] Monserud R A. Time-series analysis of tree-ring chronologies[J]. For Sci, 1986, 32: 349 - 372
- [14] Jiquan Chen, Bo Song, Mark Rudnicki, *et al* Spatial relationship of biomass and species distribution in an old-growth *Pseudotsuga-Tsuga* forest[J]. For Sci, 2004, 50(3): 364 - 376
- [15] Bradshaw G A, Spies T A. Characterizing canopy gap structure in forests using the wavelet transform [J]. J Ecol, 1992, 80: 205 - 215
- [16] Chen J, Bradshaw G A. Forest structure in space: a case study of an old growth spruce fir forest in Changbaishan Natural Reserve, P R China [J]. For Ecol Manage, 1999, 120: 205 - 215
- [17] Cressii N A. Statistics for Spatial Data[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993
- [18] Anselin L. Spatial Econometrics: Methods and Models[M]. The Netherlands: Dordresht, Kluwer Academic Publishers, 1988
- [19] Anselin L. What is special about special data? Alternative perspectives on spatial data analysis[M]// Griffith D. Spatial Statistics: Past, Present, and Future Inst of Math Geog, Ann Arbor, MI, 1990: 63 - 77
- [20] Anselin L, Griffith D A. Do spatial effects really matter in regression analysis[J]. Pap Reg Sci Assoc, 1988, 65: 11 - 34
- [21] Dovciak M, Frelich L E, Reich P B. Discordance in spatial patterns of white pine size-classes in a patchy near-boreal forest[J]. J Ecol, 2001, 89: 280 - 291
- [22] Gregoire T G, Schabenberger O, Barrett J P. Linear modelling of irregular spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent plot measurements[J]. Can J For Res, 1995, 25: 137 - 156
- [23] Gregoire T G, Schabenberger O. A non-linear mixed-effects model to predict cumulative bole volume of standing trees[J]. J Appl Sta, 1996, 23: 257 - 271
- [24] Lappi J. Calibration of height and volume equations with random parameters[J]. For Sci, 1991, 37: 781 - 801
- [25] Haijin Shi, Lianjun Zhang, Jianguo Liu. A new spatial-attribute weighting function for geographically weighted regression [J]. Can J For Res, 2006, 36(4): 996 - 1006
- [26] Krummel J P, Gardner R H, Sugihara G, *et al* Landscape patterns in a disturbed environment[J]. Oikos, 1987, 48: 321 - 324
- [27] Robertson G P, Huston M A, Evans F C, *et al* Spatial patterns in a successional plant community: patterns of nitrogen availability [J]. Ecology, 1988, 69: 1517 - 1524
- [28] Legendre P, Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis [J]. Vegetatio, 1989, 80: 107 - 138
- [29] de Bois S, Domon G, Bouchard A. Landscape issues in plant ecology[J]. Ecography, 2002, 25: 244 - 256
- [30] Jill M N, David L P. Spatial variability in forest growth-climate relationships in the Olympic Mountains, Washington [J]. Can J For Res, 2006, 36(1): 77 - 92
- [31] Visser H. Note on the relation between ring widths and basal area increments[J]. For Sci, 1995, 41: 297 - 304