

林木空间分布格局研究方法综述

孔 雷¹, 杨 华¹, 亢新刚¹, 高 延², 冯启祥²

(1 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京, 100083; 2 吉林省汪清林业局, 吉林 汪清 133200)

[摘 要] 林木空间分布格局的研究包括空间自相关和空间异质性两大方面。文章重点阐述了林木空间分布格局的影响及其在林业上的主要统计方法, 且分析了不同方法在应用中的优势和存在的局限性, 指出当前的林木分布格局研究主要是针对林木分布格局的检验、描述和模拟, 而并未在森林经营活动中发挥作用。最后, 对林木空间分布格局研究方法的发展方向提出了看法。

[关键词] 空间分布格局; 空间自相关; 空间异质性; 局部分析

[中图分类号] S757.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)05-0119-07

Review on the methods of spatial distribution pattern in forest

KONG Lei¹, YANG Hua¹, KANG Xin-gang¹, GAO Yan², FENG Qi-xiang²

(1 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China;

2 Wangqing Forestry Bureau, Wangqing, Jilin 133200, China)

Abstract: In general, spatial effects have two aspects: spatial autocorrelation and spatial heterogeneity. Then, the paper discusses the spatial effects on forestry and statistics methods in forestry separately described. The advantages and disadvantages of the methods are especially discussed. The paper points out that many current studies mainly focus on diagnosis, description and simulation of spatial distribution pattern in forest, and few of them are applied in forest management activities. Finally, the paper proposes prospects of spatial distribution pattern in forest.

Key words: spatial distribution pattern; spatial autocorrelation; spatial heterogeneity; local analysis

林木空间分布格局是指林木个体在水平空间的分布状况, 其会随着时间发生变化。林木空间分布类型有 3 种: 随机分布、均匀分布和聚集分布。总体而言, 林木空间分布格局的研究总体分为 2 个方面: 空间自相关(如空间依赖性)和空间异质性(如空间不稳定性)^[1-2]。空间自相关可理解为点 i 与点 j 之间的某一随机变量的相关性, 其是由所研究点的相关空间信息决定的。空间自相关不仅仅是一种空间统计方法, 而且该理论还关系到地理分析的基本定律之一——Tobler 的地理学第一定律^[3], 该定律指出, 所有的地理事物都存在关系, 但距离较近的事物比距离较远的事物相关性更强。如果林木的分布存

在空间上的聚集性, 则认为该林木之间存在空间异质性。空间异质性被理解为生态学过程和格局在空间分布上的不均匀性及其复杂性^[2], 这与空间坐标、缺失变量、函数误设有关^[1, 4]。忽略空间异质性会导致参数有偏估计, 误导显著性检验, 从而得不到最优预测^[2]。

1 空间自相关的研究方法

空间自相关分析(Spatial autocorrelation analysis)可检验空间上某要素的观测值是否显著地与其相邻空间点的观测值相关联^[5]。空间自相关所统计的内容包括研究对象的空间信息和属性信息。如果

* [收稿日期] 2010-10-15

[基金项目] 林业公益行业项目“三北地区生态林可持续经营关键技术与示范”(200804027)

[作者简介] 孔 雷(1986—), 男, 山东曲阜人, 在读硕士, 主要从事森林生长与收获预估研究。

[通信作者] 杨 华(1964—), 女, 北京人, 副教授, 主要从事资源与环境信息系统和森林资源监测技术研究。

所反映的属性信息在空间上的分布不是随机的,则该属性就存在着空间自相关。因此,空间自相关是区域化变量的基本属性之一。空间自相关统计量可用于检测研究区域内变量的分布是否具有空间依赖性^[6]。目前,应用在林学上描述林木空间自相关的方法有 2 类^[7]:一类是以调查单元(分散或连续)小样方为基础的样方统计法,在统计小样方内个体数目的基础上,大量的扩散性指标和方法被提出,如方差均值比;另一类则是以空间点距离或角度为基础的格局分析法,如 Moran 指数法(Moran coefficient)、Getis 系数法(Getis coefficient)、Ripley's K (r) 函数法(Ripley's $K(r)$ function)、最邻近体分析法、角尺度法^[8]等。这些方法已经在分析和模拟空间自相关与林分直径分布、树高总量、更新的关系等方面得到了应用。

1.1 Moran 指数法

通过对生物现象的空间分析,Moran^[9-10]将一维空间概念的相关系数推广到了二维空间,提出了 Moran 指数;Geary^[11]根据回归分析的 Durbin Watson 统计量定义了 Geary 系数,从此形成了空间自相关分析理论。此后,空间自相关逐渐发展成为地理空间分析的重要理论之一^[4]。Moran 指数法具有数学意义中变换的不变性,从而使该模型具有更广泛的适用性,特别是 Moran 散点图分析方法,使空间自相关分析有了很大发展。

1.1.1 全局 Moran 指数法 全局 Moran 指数法用于全局空间自相关统计量的估计及区域空间内误差的空间关联和空间差异程度分析。其计算公式为:

$$I = \frac{n}{s_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, (i \neq j).$$

式中: I 为 Moran 指数; n 为研究对象数目; s_0 是标准差; W_{ij} 为空间关系矩阵,反映格网点 i 与 j 的空间关系; X_i 、 X_j 为观测值; $\bar{X}$ 为 X_i 的平均值, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 。全局自相关是整个区域数据对应误差与相邻点数据误差的空间自相关性质及水平的综合反映,是对数据误差在整个区域的空间特征的描述^[12]。这有利于从整体角度上把握林木的空间自相关。常新华等^[13]利用 Moran 指数和双相关函数 $g(r)$ 分析了长白山针阔混交林 7 个主要树种的空间分布格局,检验了环境因子与树种空间分布之间的关系;王苏颖等^[14]以新疆天山西部云杉林为研究对

象,采用 Moran 指数进行量化分析,将林相图与 DEM 叠加后,对所得的量化结果进行了分析,很好地从地形因子角度分析了云杉林的空间分布规律。

1.1.2 局部 Moran 指数法 局部 Moran 指数法是根据距离阈值划分,对每个区域的取值进行分析,得出每个区域在整个研究空间上的分布状态,然后根据每点的取值判断出空间上的热点区域。

$$I = \frac{(X_i - \bar{X})}{S^2} \sum_{j=1}^m W_{ij} (X_j - \bar{X}).$$

式中: S 是标准差; $\bar{X}$ 为 X_i 的平均值, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$; W_{ij} 表示区域 i 与 j 的邻近关系,其可以根据邻接标准或距离标准来度量。通过局部 Moran 指数法分析,可以更加明确地得到林分中林木的空间相关程度。Kenkel 等^[15]基于局部 Moran 指数法,检验存活单株林木胸径的空间关系,对纯林异龄林分的 1 375 株林木的空间格局进行了描绘,结果发现,这些单株林木的胸径与其生存面积呈正相关;体积较大的林木易有大的邻近木,而体积小的林木易有小的邻近木,如果体积较小的林木周围有多个体积较大的林木,则其容易枯死。

1.2 Getis 系数法

尽管 Moran 指数能够反映空间邻接或邻近区域单元属性值的相似程度,但其不能判断空间数据是高值聚集还是低值聚集,于是 Ord 等^[16]提出了全局 Getis 系数($G(d)$)。Getis 系数一般采用距离权,要求空间单元的属性值为正,其计算公式如下:

$$G(d) = [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_i X_j] / [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j].$$

式中: d 为距离, $W_{ij}(d)$ 是 i 、 j 点之间的距离权, X_i 、 X_j 是调查项。多层尺度分布的 Getis 系数能够提高反映参量分布的空间信息。颜锋华等^[17]采用多层尺度分布的 Getis 统计量研究了遥感特征参量的空间分布,结果证明多层尺度分布的 Getis 能够比较全面地反映地表特征参量分布的空间信息。然而 Getis 方法也有其局限性,由于需要预先设定空间尺度,该法不能准确地评估观测区域中实际存在的不同空间尺度的自相关性;同时,Getis 统计虽然能够评估高值和低值的聚类分布,但是缺乏对中值点聚类的敏感性。

1.3 Ripley's $K(r)$ 函数

简单来说,Ripley's $K(r)$ 函数就是样地内以某点为圆心、以长度 r 为半径的圆内林木个体数目的函数。Ripley's $K(r)$ 函数既考虑了最近邻体,还考虑了种群中每个个体与其他个体之间的距离^[18]。

Ripley's $K(r)$ 函数不仅能够显示出不同空间格局所发生的尺度,而且能够描述森林林分的动态变化^[19]。但是 Ripley's $K(r)$ 函数也有其缺点,即其将所有个体当成空间里的点,因此对群体内部或群体间的差异缺乏关注^[20]。Ripley's $K(r)$ 函数的计算公式为:

$$K(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{W_{ij}} I_r(U_{ij}), (i \neq j).$$

式中: r 是距离尺度,即设定的尺度距离长度; A 是样方的面积; n 是样方内生物的数量; i, j 是样方内任意距离的两个具有相同特征的生物个体,当 $U_{ij} \leq r$ 时, $I_r(U_{ij}) = 1$ (U_{ij} 是生物个体 i 到生物个体 j 之间的距离),反之 $I_r(U_{ij}) = 0$; W_{ij} 是边缘校正的权重,等于以生物个体 i 为圆心、以 U_{ij} 为半径的圆落在样方内的弧长和整个圆弧长的比值。由于 Ripley's $K(r)$ 函数能够较好地反映森林林分的动态变化及其相互影响,国内外很多学者应用其来研究种群空间格局和种群发育。张金屯等^[19] 利用 Ripley's $K(r)$ 函数分析了各种尺度下的种群格局和种间关系;岳永杰等^[21] 采用 Ripley's $K(r)$ 函数,对北京雾灵山保护区蒙椴林的树种组成、优势种群及不同发育阶段种群的空间分布格局及其相互关系进行了研究;王丽君等^[22] 采用 Ripley's $K(r)$ 函数分析了桂林岩溶石山桂林白蜡种群的空间结构现状,并有效地描述了其空间属性。Ripley's $K(r)$ 函数的优点是可以同时分析不同尺度下的格局^[23],但该函数计算复杂,还存在边缘矫正的理论问题^[24],所以该方法目前多用于学术研究^[25]。

1.4 最近邻体分析法

最近邻体分析法(Nearest neighbor analysis)由 Clark 等^[26] 首先提出,其目的是根据个体偏离随机性的方向和程度来说明动植物的分布格局,计算公式为:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i / \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{N}} \right].$$

式中: R 为聚集指数, N 为样地内树木株数, r_i 为第 i 株树木到其最近邻木的距离, F 为样地面积。最近邻体分析法通过测量随机选取的个体与其距离最近的个体之间的距离,来描述该林分的空间分布型。均匀分布的林分,其最邻近的平均距离比较大,而集群分布的林分距离较小,随机分布林分最邻近的平均距离介于上述 2 种分布型之间^[27]。刘军和等^[28] 使用坐标调查法对美国杏李果园 5 种主要害虫的空间分布格局进行了调查,并对点分布图法、分散度指

数法和最近邻体分析法获得的结果进行了比较,结果发现这 3 种方法所获得的结论是相同的。Melinda^[29] 利用 Ripley's $K(r)$ 方程和最近邻体分析法研究了林木的空间格局,结果表明林木竞争使林木空间格局从簇状演变为规则的均匀分布。

2 林木空间异质性的研究方法

空间异质性(Spatial heterogeneity, SH)是 20 世纪 90 年代生态学研究的一个非常重要的理论问题^[30]。由于空间异质对林木生长有很大的影响,所以其最近也成为林学工作者极为关注的一个理论问题^[31-32]。空间异质性的相关定义有很多,主要是指生态学变量在空间上的不均匀性和复杂性^[33]。物理环境、自然干扰、人为干扰、树种特性、树种对干扰的反应等因素对森林的影响及森林对这些因素的影响,使得森林具有高度空间异质性。影响森林的宏观环境因素有气候、生物、地形、竞争植被等,其使得森林的空间异质性非常复杂^[34-35]。而林分中林木的属性,如树高、竞争、位置等均属于微观环境因素,它们也会影响林分空间异质结构的形成。目前,有很多空间模型和方法被用来描述空间异质性的影响,如 Kriging 内插法^[36]、变异函数法^[37]、多层次模型、随机系数模型、空间回归模型、空间扩展模型^[38]、空间适应性滤波模型^[38]等,下面介绍几个应用在林学上的方法。

2.1 多层次模型

多层次模型以往在空间上的应用是尝试分离人为因素和地理因素的影响^[39-40]。但很容易产生 2 种谬论,如果是根据群体的特性来推断个体特性,即是犯了生态谬论(以群体所做的分析,关联较高);反之,若依据个体特性来推断群体的特性,则犯了原子论式的谬论(不符合组内一致,组间有差异的统计检验)。多层次模型通过整合代表非聚合特征(Disaggregate behavior)的微观层次与代表相关联变量(Contextual variations)的宏观层次,则可以避免上述问题。其表达式为:

$$\text{第 1 层: } y_{ij} = \alpha_j + \beta_j X_{ij} + \epsilon_{ij};$$

$$\text{第 2 层: } \alpha_j = \alpha + \mu_j^\alpha, \beta_j = \beta + \mu_j^\beta.$$

式中:第 1 层有 i 个单元($i=1, \dots, n_j$)嵌套于第 2 层的 j 个单元($j=1, \dots, J$)中; α_j 和 β_j 是随机变量,不是普通线性回归中的常数; X_{ij} 是第 1 层回归方程的预测变量,代表第 i 个观测对象在第 j 个观测时间中自变量 X 的取值; ϵ_{ij} 是第 1 层回归方程的随机效应,代表残差,其含义是第 i 个观测对象在第 j 个

观测时间中的测量值 y_{ij} 不能被自变量 X_{ij} 所能解释的部分; α 和 β 是第 2 层回归方程的预测变量; μ_j^α 和 μ_j^β 是第 2 层回归方程的随机效应。目前,已有专业软件来处理多层次模型,如 HLM^[41]、MLN^[42] 和 MlwiN^[43]。在国外,多层次分析已经用于描述林分中林木空间异质性的影响,而且还对其进行了相应的改进,但国内还没有相关文献。Saksa 等^[44]利用多层次混合线性模型,分析林木在不同层次(年、林分、簇、样地、单株)的生长规律,以及气候和空间位置对树高生长的影响。多层次分析还可与其他模型相结合,以提高拟合精度。Calama 等^[45]利用多层次线性混合模型研究了意大利五针松的树干直径生长规律,得到的树干直径模型用最优线性无偏估计法(BLUP)来调整。Ian 等^[46]利用经典的回归方法和多层次模型来评价森林游憩效益,经比较发现,使用经典的回归方法拟合分析数据得到的模型有很大残差,因此 Ian 对多层次模型进行了改进,放弃了研究区域每层数据是独立的假设,并直接结合分析数据的异质性进行建模,得到的模型拟合效果较好。

2.2 随机系数模型

在随机系数模型中,模型参数在研究范围内是不稳定的,呈现随机分布。该模型表达式如下:

$$y_i = \sum_{j=1}^m \mathbf{X}_{ij} \beta_{ij} + \epsilon_i, \beta_{ij} \sim N(\beta_j, \sigma_j^2)$$

式中: y_i 是相关变量的矢量值, $\mathbf{X}_{ij}$ 代表预测变量的一个矩阵, β_{ij} 是服从期望为 β_j 、方差为 σ_j^2 的正态分布的回归系数, ϵ_i 是服从 $N(0, \sigma_i^2)$ 分布的随机误差组。随机系数模型是针对重复测量资料的一种重要建模方法,该模型可以描述观测值随时间变化的算术关系,常用于观测值随时间变化呈线性关系的情况^[47]。Zhou 等^[48]研究了 1982—1999 年植被绿度与气候之间的关系,并考虑了空间异质性的影响,应用随机系数方法拟合了该模型,其中因变量为归一化植被指数 NDVI,自变量为气候、气温、降雨量、太阳高度角和气溶胶光学厚度。但是随机系数模型需要充足的重复数据来拟合模型方程,这严重限制了其应用范围。

2.3 空间回归模型

经典的非空间回归模型(如最小二乘法)认为,空间数据相互是独立的回归模型,其得到的统计推论结果不能应用于空间数据。而空间回归模型则将空间依赖性考虑进来,尽管该模型的结果仍然由整体参数估计组成,但是通过误差组的协方差结构,局部关系还是被整合到模型框架中来,从而实现了

空间异质性的考虑。与那些完全局部思想相比,这些模型算是“半局部”模型。20 世纪推出了许多主要应用于区域数据的空间回归模型,下面介绍 2 种应用在林学上的回归模型。

2.3.1 空间自回归模型 针对截面数据的空间自回归模型的一般形式为:

$$\begin{aligned} y &= \rho w_1 y + X\beta + u, \\ u &= \lambda w_2 u + \epsilon, \\ \epsilon &\sim N(0, \sigma^2 I_n). \end{aligned}$$

式中: y 是研究区域的因变量, X 是自变量, w_1 、 w_2 为相邻区域的解释变量, u 是空间模型的残差, ρ 、 β 、 λ 是常数项, ϵ 为误差项。当区域数据存在空间相关时,应用普通回归模型研究变量之间的关系,不能满足 Gauss-Markov 条件,若想更准确地拟合区域数据,则需要利用空间自回归模型^[49]。Kembel 等^[50]在研究热带雨林的遗传结构时,利用空间自回归模型检验了每个空间尺度的净种间亲缘关系指数(NRI)和净最近种间亲缘关系指数(NTI),通过该方法将临近点的空间影响考虑进来,计算得到模型系数的标准差和期望。空间自回归模型也有其局限性,由于自变量的内生性,最小二乘法(OLS)估计是有偏的和不一致的^[51]。必须有足够样本量才能使估计及推断获得较可靠的结果。

2.3.2 地理权重回归模型(GWR 模型) GWR 模型可以表示为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^p X_{ij} \beta_j(u_i, v_i) + \epsilon_i。$$

式中: $\{\beta_0(u_i, v_i), \beta_1(u_i, v_i), \dots, \beta_p(u_i, v_i)\}$ 是 $p+1$ 个带坐标 (u_i, v_i) 的连续变量, X_{ij} 表示坐标为 (u_i, v_i) 的调查项, ϵ_i 是一个符合正态分布的随机误差。GWR 模型的优势在于其变量参数可以反映出调查因子在林分内的空间分布规律及其稳定性,其空间关系图可以进一步揭示林木之间复杂的关系。Kembel 等^[52]利用 GWR 模型拟合了林分胸径与树高的关系,并考虑了空间异质性对林分的影响,取得了良好的拟合效果。Kong 等^[53]利用 GWR 模型拟合了林分胸径与冠幅的关系,并将空间因素考虑进来,明显提高了数据的拟合精度。由于 GWR 模型仅考虑了距离因子,故 Shi 等^[54]对其进行了改进,使之能够考虑林木属性信息,并用其讨论了林木的生长模型,拟合精度比改进前更高。GWR 模型允许回归参数随着地理空间的改变而变化,但在有些情况下,并不是所有参数都随地理空间的改变而变化,有些参数在空间上是不变的,或者变化非常小。

因此,回归模型中的部分参数随空间位置的改变而变化,其余参数为常数,这种新的回归模型称为混合地理加权回归模型(Mixed GWR model, MG-WR)^[55],其适用范围更广。

3 讨 论

实际调查得到的林分数据在空间上是不稳定的,林分中存在的空间异质性说明了这一点。拟合得到的模型方程在很大程度上受数据地域性的影响,随着空间位置的变化而改变。正是由于数据空间上的变化,传统整体估计得到的模型方程无法很好地解释局部某一关系,甚至有时是谬论。因此,弄清数据局部间的差异及规律,是解决问题的关键。局部统计方法以其自身算法的特点,很好地发现并且描述了这种空间不稳定性。在建立模型方程时,局部分析作为检验工具,用以检验整体估计模型,其能够补全整体估计方程中遗漏的部分,从而可以优化整体估计模型,提高其准确度,排除数据的空间不稳定性。

目前,关于林分空间自相关和空间异质性的拟合研究已取得重大进展,许多林学家也应用新理论和方法对原有的经典模型作了一些参数改进或提出了新的模拟方法。今后的模型和方法将向综合性、混合模型方向发展,以使其适用范围更加广泛。因此,模型和拟合方法的研究仍需继续。在森林经营中,应该采取合理经营措施调控空间分布格局,使之趋于理想结构状态。惠刚盈等^[56]在森林可持续经营原则的指导下,提出了基于林分空间结构优化的森林经营方法——结构化森林经营。结构化森林经营的顶级目标是培养健康稳定的森林。今后,林木空间分布格局的研究将会围绕创建最佳的森林空间结构来展开,从而充分发挥森林的多种功能,加之ArcGIS、CAD等软件的运用,实现了林业信息的可视化,从而使这种最佳的森林空间结构越来越形象,不再仅仅局限于对整体数据是聚集分布、均匀分布或是随机分布的简单描述上。

[参考文献]

- [1] Anselin L. Spatial econometrics: methods and models [M]. Dordrecht the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [2] Anselin L, Griffith D A. Do spatial effects really matter in regression analysis [J]. Papers of the Regional Science Association, 1988, 65: 11-34.
- [3] Odland J. Spatial autocorrelation [M]. London: Sage Publications, 1988.
- [4] Fotheringham A S. Trends in quantitative methods I: stressing the local [J]. Progress in Human Geography, 1997, 21: 88-96.
- [5] Martin D. An assessment of surface and zonal models of population [J]. International Journal of Geographic Information Systems, 1996, 10(8): 973-989.
- [6] 马晓冬, 马荣华, 徐建刚. 基于 ESDA-GIS 的城镇群体空间结构 [J]. 地理学报, 2004, 59(6): 1048-1057.
Ma X D, Ma R H, Xu J G. Spatial structure of cities and towns with ESDA-GIS framework [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 1048-1057. (in Chinese)
- [7] 张春雨, 赵秀海. 随机区块法在空间点格局分析中的应用 [J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3108-3115.
Zhang C Y, Zhao X H. Spatial points pattern analysis using random square quadrats method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3108-3115. (in Chinese)
- [8] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 德国现代森林经营技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 119-134.
Hui G Y, Klaus V G. German modern forest management techniques [M]. Beijing: A publisher of Science and Technology of China, 2001: 119-134. (in Chinese)
- [9] Moran P. The interpretation of statistical maps [J]. Journal of the Royal Statistical Society B, 1948, 37: 243-251.
- [10] Moran P. Notes on continuous stochastic phenomena [J]. Biometrika, 1950, 37: 17-33.
- [11] Geary R C. The contiguity ratio and statistical mapping [J]. The Incorporated Statistician, 1954(5): 115-145.
- [12] Arthur G, Keith O J. The analysis of spatial association by the use of distance statistics [J]. Geographical Analysis, 1992, 24(24): 189-206.
- [13] 常新华, 赵秀海, 曾凡勇, 等. 长白山针阔混交林主要树种空间分布及其环境解释 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 7-12.
Chang X H, Zhao X H, Zeng F Y, et al. Spatial distribution of main tree species and their environmental interpretations in conifer and broadleaved mixed forests of Changbai mountains, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(1): 7-12. (in Chinese)
- [14] 王苏颖, 叶李灶, 陈冬花, 等. 新疆西天山巩留林场云杉林空间分布格局研究 [J]. 林业资源管理, 2009(6): 59-63.
Wang S Y, Ye L Z, Chen D H, et al. Application of GIS to spatial differentiation of *Picea schrenkiana* study in the west of tianshan Mt in Xinjiang [J]. Forest Resources Management, 2009(6): 59-63. (in Chinese)
- [15] Kenkel N C, Hoskins J A, Hoskins W D. Local competition in a naturally established jack pine stands [J]. Canadian Journal of Botany, 1989, 67(9): 2630-2635.
- [16] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(4): 286-306.
- [17] 颜锋华, 金亚秋. 尺度分布的 Getis 统计对遥感图像特征参量空间自相关性的研究 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(6):

- 191-196.
- Yan F H, Jin Y Q. Spatial auto-correlation of characteristic parameters in remotely sensing image using optimal Multi-Scale Getis statistic [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(6): 191-196. (in Chinese)
- [18] 尤海舟, 贾成, 樊华, 等. 格局分析的最新方法——点格局分析 [J]. 四川林业科技, 2009, 30(6): 106-110.
- Yu H Z, Jia C, Fan H, et al. The latest method of pattern analysis-spatial point pattern analysis [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2009, 30(6): 106-110. (in Chinese)
- [19] 张金屯, 孟东平. 卢芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析 [J]. 生态学报, 2004, 24(1): 35-40.
- Zhang J T, Meng D P. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Larix principis-rupprechtii* in Luya mountain reserve, Shanxi, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 35-40. (in Chinese)
- [20] Ripley B D. Modelling spatial patterns [J]. Journal of the Royal Statistical Society (Series B), 1977, 39: 172-212.
- [21] 岳永杰, 余新晓, 秦富仓, 等. 北京雾灵山保护区蒙椴林空间点格局分析 [J]. 林业资源管理, 2009(2): 49-54.
- Yue Y J, Yu X X, Qin F C, et al. Spatial-point-pattern analysis of *Mongolian linden* in Beijing wulingshan nature reserve [J]. Forest Resources Management, 2009(2): 49-54. (in Chinese)
- [22] 王丽君, 梁士楚, 李峰, 等. 桂林岩溶石山桂林白蜡种群点格局分析 [J]. 广西植物, 2008, 28(5): 633-635.
- Wang L J, Liang S C, Li F, et al. Point pattern analysis of *Fraxinus guilinensis* population in Karst mountains of Guilin [J]. Guihaia, 2008, 28(5): 633-635. (in Chinese)
- [23] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344-349.
- Zhang J T. Analysis of spatial point pattern for plant sprcies [J]. Acta Phyto Ecologica Sinica, 1998, 22(4): 344-349. (in Chinese)
- [24] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. Ripley's $K(d)$ 函数分析种群空间分布格局的边缘校正 [J]. 植物生态学报, 2003, 23(8): 1533-1538.
- Tang M P, Tang S Z, Lei X D, et al. Edge correction of Ripley's $K(d)$ function on population spatial pattern analysis [J]. Acta Phyto Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1533-1538. (in Chinese)
- [25] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势 [J]. 林业科学, 2010, 46(1): 117-122.
- Tang M P. Advances in study of forest spatial structure [J]. Forest Science, 2010, 46(1): 117-122. (in Chinese)
- [26] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationship s in populations [J]. Ecology, 1954, 35: 445-453.
- [27] 孙志虎, 张彦东. 长白落叶松人工林天然更新幼苗分布格局及其研究方法的比较 [J]. 生物数学学报, 2009, 24(3): 556-566.
- Sun Z H, Zhang Y D. Spatial distribution pattern of *Larix olgensis* natural regeneration seedling in *Larix olgensis* plantation and data-mining of seedling spatial mapped points [J]. Journal of Biomathematics, 2009, 24(3): 556-566. (in Chinese)
- [28] 刘军和, 禹明甫. 基于 Clark-Evans 最近邻体分析对果树主要害虫空间分布格局分析 [J]. 广东农业科学, 2008, 30(4): 291-295.
- Liu J H, Yu M F. An analysis on the spatial distribution pattern of the main pests in U. S aprum garden—zon the base of the nearest neighbor analysis [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2008, 30(4): 291-295. (in Chinese)
- [29] Melinda M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data [J]. Forest Science, 39(4): 756-775.
- [30] Kareiva P. Space: the final frontier for ecological theory [J]. Ecology, 1994, 75(1): 1-5.
- [31] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 35-142.
- Wang Z Q. Geo-statistics and its application in ecology [M]. Beijing: Science Press, 1998: 35-142. (in Chinese)
- [32] Pickett S T A, Cananasso M L. Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological system [J]. Science (Washington), 1995, 269(5222): 331-334.
- [33] 郭建国. 景观生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Wu J G. Landscape ecology [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [34] Moeur M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data [J]. Forest Science, 1993, 39(4): 756-775.
- [35] Rouvinen S, Kuuluvainen T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1997, 27(6): 890-902.
- [36] 冯益明, 唐守正, 李增元. 空间统计分析在林业中的应用 [J]. 林业科学, 2004, 40(3): 149-155.
- Feng Y M, Tang S Z, Li Z Y. Application of spatial statistic analysis in forestry [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(3): 149-155. (in Chinese)
- [37] 程勣, 杨毅恒, 丁建华, 等. 变异函数在异常空间插值中的应用 [J]. 世界地质, 2007, 26(3): 298-303.
- Cheng M, Yang Y H, Ding J H, et al. Application of variogram in interplation of abnormal space [J]. Global Geology, 2007, 26(3): 298-303. (in Chinese)
- [38] Fotheringham A S, Brusdon C, Charlton M. Geographically weighted regression the analysis spatial varying relationship [M]. England: John Wiley & Sons Ltd Press, 2002: 17-19.
- [39] Goldstein H. Multilevel models in educational and social research [M]. London: Oxford University Press, 1987.
- [40] Duncan C, Jones K. Using multilevel models to model heterogeneity: potential and pitfalls [J]. Geographical Analysis, 2000, 32: 279-305.
- [41] Bryk A, Raudenbush S, Seltzer M, et al. An introduction to HLM: computer program and user's guide [M]. Chicago: Department of Education, University of Chicago, 1986.

- [42] Rasbash J, Woodhouse G. MLN command reference version 1.0 [M]. London: Institute of Education, University of London, 1995.
- [43] Goldstein H, Rasbash J, Plewis I, et al. A user's guide to MLwiN [M]. London: Institute of Education, University of London, 1998.
- [44] Saksa T, Heiskanen J, Miina J, et al. Multilevel modelling of height growth in young norway spruce plantations in southern finland [J]. *Silva Fennica*, 2005, 39(1): 143-153.
- [45] Calama R, Montero G. Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in Stone Pine (*Pinus pinea*): a calibrating approach [J]. *Silva Fennica*, 2005, 39(1): 37-54.
- [46] Ian B, Andrew J. Contrasting conventional with Multi-Level modeling approaches to meta-analysis: expectation consistency in UK woodland recreation values [J]. *Land Economics*, 2003, 79(2): 235-258.
- [47] 施红英, 沈 毅. 基于随机系数模型的重复测量资料分析方法 [J]. *中国卫生统计*, 2008, 25(3): 247-252.
- Shi H Y, Shen Y. Using random coefficients model to analyze repeated measures data [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2008, 25(3): 247-252. (in Chinese)
- [48] Zhou L, Kaufmann R K, Tian Y, et al. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: 4004.
- [49] 李序颖, 陈宏民. 居民收入与城市经济水平的空间自回归模型 [J]. *系统工程理论方法应用*, 2005, 14(5): 395-399.
- Li X Y, Chen H M. Spatial autoregression model on the income of residents and city economy [J]. *Systems Engineering-Theory Methodology Application*, 2005, 14(5): 395-399. (in Chinese)
- [50] Kembel S W, Hubbell S P. The phylogenetic structure of a neotropical forest tree community [J]. *Ecology*, 2006, 87(7): 86-99.
- [51] 王立平, 任志安. 空间计量经济学研究综述 [J]. *湖南财经高等专科学校学报*, 2007, 23(110): 25-28.
- Wang L P, Ren Z A. Review of spatial econometrics [J]. *Journal of Hunan Financial and Economic College*, 2007, 23(110): 25-28. (in Chinese)
- [52] Kembel S W, Hubbell S P. Modeling spatial variation in tree diameter-height relationships [J]. *Ecology*, 2006, 87(7): 86-99.
- [53] Kong L, Yang H, Kang X G, et al. Correlation analysis between crown width and DBH using Geographically Weighted Regression [C]//Li M Z, Liang Q L, Wang L P, et al. Seventh international conference on Fuzzy Systems and knowledge discovery. Yantai, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010(4): 1689-1693.
- [54] Shi H J, Zhang L J, Liu J G. A new spatial attribute weighting function for geographically weighted regression [J]. *Canada Journal of Forest Science*, 2006, 36: 996-1005.
- [55] 覃文忠, 王建梅, 刘妙龙. 混合地理加权回归模型算法研究 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(2): 115-119.
- Tan W Z, Wang J M, Liu M L. Algorithm for mixed geographically weighted regression model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(2): 115-119. (in Chinese)
- [56] 惠刚盈, Klaus von Gadow, 胡艳波, 等. 结构化森林经营 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 26-42.
- Hui G Y, Klaus von Gadow, Hu Y B, et al. Structure-based forest management [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 26-42. (in Chinese)