

## 应用空间点格局分析方法研究阔叶树对毛竹生物量的影响

宋伙林<sup>1,2</sup>, 许愿巍<sup>2</sup>, 吴毅<sup>2</sup>, 董丽娜<sup>2</sup>, 时培建<sup>1\*</sup>

(1. 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学竹类研究所, 江苏南京 210037; 2. 中山陵园管理局, 江苏南京 210014)

**摘要** [目的] 检验阔叶树是否会对临近毛竹生物量的空间分布具有显著性影响。[方法] 调查江苏南京紫金山一块 30 m × 30 m 的毛竹林地, 根据毛竹胸径大小划分出案例组(胸径最大的前 1/4 部分)和对照组(余下部分), 使用空间点格局分析方法探索案例组的空间分布类型; 同时, 调查样地内胸径超过 5 cm 阔叶树的种类和数量, 将其视作点源, 使用点源模型分析它们对案例组的空间分布是否具有显著性影响, 并估算阔叶树的影响距离范围。[结果] 在给定的距离尺度内(0~8 m), 案例组毛竹呈现出泊松随机分布, 样地内阔叶树有朴树和榔榆 2 种, 每种各 2 棵, 发现榔榆对大胸径毛竹(即案例组)的空间分布具有显著性影响, 而距离样地中心较近的榔榆对案例组影响程度( $P < 0.01$ ) 强于靠近样地边缘的榔榆( $0.01 < P < 0.05$ ), 最强影响距离为 0~6.1 m, 然后快速递减, 影响的最大距离可达 15 m。[结论] 虽然有的阔叶树对毛竹胸径的空间分布具有显著性影响, 但并非所有阔叶树都有影响, 暗示在竹阔混交的经营模式中, 必须合理安排阔叶树的种类、数量和布局。

**关键词** 二项回归; 案例-对照; 极大似然估计; 点源模型; 风险增强函数

**中图分类号** S 795 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)01-0108-05

## Apply the Spatial Point Pattern Analysis Methods to Examine the Effect of Broad-leaved Trees on Moso Bamboo's Biomass

SONG Huo-lin<sup>1,2</sup>, XU Gu-wei<sup>2</sup>, WU Yi<sup>2</sup> et al (1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Bamboo Research Institute, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037; 2. Administrative Bureau of Dr. Sun Yat-sen's Mausoleum, Nanjing, Jiangsu 210014)

**Abstract** [Objective] To test whether there is a significant effect of broad-leaved trees on the spatial distribution of moso bamboo's biomass, [Method] A 30 m × 30 m quadrat of moso bamboo forest with sparse broad-leaved trees was investigated. The diameter of breast height (DBH) for every bamboo was measured and its spatial location was recorded in the two-dimensional Cartesian coordinate system. The DBHs of bamboo were sorted in a decreasing order into two groups: the first quartile of bamboo in this sequence were defined as cases, and the remaining bamboo were defined as controls. The point pattern analysis method was used to explore the spatial distribution pattern of cases on the background of controls, and the point-source modelling was used to examine of the effect of broad-leaved trees with DBH > 5 cm in the study region on the cases. [Result] At all given distance scales from 0 to 8 m, cases exhibit a Poisson random distribution. There were two species of broad-leaved trees (*Celtis sinensis* Pers. and *Ulmus parvifolia* Jacq) in the study region, each with two individuals. We found that *U. parvifolia* could significantly affect the spatial distributions of cases, whereas *C. sinensis* had no significant influence on them. The individual of *U. parvifolia* near to the center of the quadrat had stronger influence ( $P < 0.01$ ) than that near to the edge of the quadrat ( $0.01 < P < 0.05$ ). The strongest influence of *U. parvifolia* occurred in the distances 0 to 6.1 m from the point source, and the farthest influence distance slightly went far beyond 15 m. [Conclusion] Although broad-leaved tree(s) can significantly affect the spatial distribution of moso bamboo's biomass, not all tree species have such a significant effect. It indicates that in the future practical forest management for the mixture operation between broad-leaved trees and moso bamboo we need reasonably arrange species, quantity and pattern of broad-leaved trees in moso bamboo forests.

**Key words** Binary regression; Case-control; Maximum likelihood estimate; Point-source modelling; Risk elevation function

竹类植物是一种特殊的禾本科植物, 其外部形态和结构特殊, 在进化学上介于草本植物和木本植物过渡阶段, 有着重要的科学研究价值和经济价值<sup>[1]</sup>。毛竹是我国南方一种重要的竹类资源, 也是目前我国种植面积最大的竹类植物, 用途多样, 最主要的三大用途为笋用、材用和观赏用<sup>[2]</sup>。在很多风景区, 毛竹(*Phyllostachys edulis*) 作为重要的园林绿化植物, 已经得到了广泛种植, 例如江苏南京紫金山风景区、江苏宜兴竹海风景区、浙江莫干山风景区; 而在我国南部一些山区, 毛竹作为重要的笋用和材用植物, 也得到了大面积推广, 例如目前在浙江、福建、江西、湖南、广东西部、湖北东南部、安徽南部和江苏南部等区域均有大面积的毛竹纯林存在, 目前在这些区域有 30 个竹乡<sup>[3]</sup>。对于毛竹而言, 其经济价值和观赏价值与其个体生物量及其立竹度有密切关系, 往

往个体生物量较大、密度较高的毛竹林的价值越大, 但是根据“自疏法则”(self-thinning law), 个体生物量和空间密度往往呈现出自疏指数函数关系, 即随着密度的增加, 平均个体生物量趋于减少<sup>[4]</sup>。没有经过人工控制的毛竹林(不采笋、不疏伐老竹、不施肥、不控制病虫害), 任其自然更新, 往往导致过大的种群密度, 毛竹平均生物量趋于减少, 毛竹林极易发生病虫害, 长期下去竹林会呈现出衰败的景象。随着我国经济快速发展、城市化进程进一步加快, 农村青壮年人口向城市转移, 南方山区农村留下的多是老弱人口, 毛竹纯林经营面临劳动力成本上升的压力, 那么如何有效持续地经营毛竹林成为当前林业管理的重要问题。毛竹在生长发育过程中对水的需求较多, 根部水势压直接决定了竹类植物的高度<sup>[5]</sup>。阔叶树可以有效地进行水土保持, 为毛竹提供充足的水分和养料, 从而减少毛竹林管理过程中人工成本和肥料的投入, 竹阔混交的经营模式被提上日程<sup>[3]</sup>。竹阔混交大致分成 3 种类型: 条带间隔式, 从山顶向下, 竹阔纵向条带间隔式混交, 或者横向条带间隔式混交; 竹阔混生, 即在毛竹林中零星分布一些阔叶树; 上阔下竹的经营模式, 即山体上部为阔

**基金项目** 国家自然科学基金青年基金项目(31400348); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏省林业三省工程项目(LYSX[2016]04)。

**作者简介** 宋伙林(1975—), 男, 江苏南京人, 工程师, 从事林森资源管理与研究工作。\* 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事森林生态学、理论生态学的研究与教学工作。

**收稿日期** 2017-11-15

叶林,中下部为毛竹纯林。无论是何种经营模式,都需要验证阔叶树是否会对毛竹林分产量呈现出正的效果,即促进毛竹林的健康经营,有助于毛竹林平均个体生物量和密度的增加。虽然根据自疏法则,平均个体生物量和密度显现负指数关系,但是在一定立竹度范围内,毛竹的个体生物量会较大,如 8~12 cm 对应的立竹度均是可以接受的,虽然超过 12 cm 以上胸径的毛竹具有更好的观赏价值和材用价值,但立竹度和林分产量将大大降低<sup>[3]</sup>。有研究已对南方 6 个省份 80 余座山体上阔下竹的经营模式进行分析,发现上阔下竹的经营模式有助于提高毛竹林的平均生物量<sup>[6]</sup>,而最近陈霜霜等<sup>[7]</sup>对福建建瓯不同树种与毛竹林的景观交错带毛竹林平均生物量影响的研究表明,阔叶树可以直接提高毛竹林的平均生物量。然而,这些相关研究往往从宏观的层面考察不同经营模式对毛竹林平均生物量的影响,而较少考虑阔叶树对毛竹生物量空间分布的直接影响,阔叶树对毛竹生物量影响的直接证据其实长期处于阙如状态。这与未能找到合适的生态学研究方法和分析手段有很大的关系,往往在生态学研究方法本身的合理性程度能够决定试验设计的有效与否,决定一个试验结果的可信性程度,许多科学研究领域是否能够取得重要的进展,往往取决于研究方法的合理性和试验设计的巧妙性、创新性<sup>[8]</sup>。

点源模型作为一种重要的空间点格局分析方法,过去其应用主要局限于空间流行病学领域,分析病例(亦可以称为案例)的位置和推断性的(putative)污染源之间是否具有显著性的关联,例如一个区域的喉癌病例发生的位置和工业焚烧焚烧炉位置的关系,一定区域乳腺癌病例的发生位置和核试验位置的关系,一定区域儿童哮喘病例发生的位置和焦化厂位置的关系<sup>[9]</sup>。点源模型最早是考虑一个区域单一点源,使用病例-对照(case-control)的分析方法<sup>[10]</sup>。之所以使用病例-对照分析方法,主要是因为病例发生往往与处于疾病风险中人群的密度有很大关系,而未必是由于推断的污染源引起的,而为了检验污染源是否为元凶,需要剔除人口数量的空间分布因素,为此需要从研究区域随机抽取一定数量的人群家庭位置作为对照,以消除该因素的影响。而后,点源模型从单一点源发展到多点源分析方法,甚至允许模型中考虑空间协变量(spatial covariate)的影响,如病例发生家庭的收入水平、饮食习惯、疾病家族史(有或者无,即 1-0 数据)等<sup>[9]</sup>。尽管点源模型分析方法日趋成熟,但是国内外文献鲜见应用于植物生态学研究。但其作为一种空间点格局分析方法,应用于植物生态学研究具有天然的合理性,因为其方法的适用对象和植物具有相同的空间特征,而空间点格局分析方法最早并非来自地理流行病学,而是源自于植物生态学,但由于许多空间统计学家更多关心该方法在医学应用,因而空间点格局分析方法在空间流行病学领域应用和发展较快<sup>[11]</sup>。对于毛竹林中零星存在的阔叶树,可将阔叶树作为点源,分析其对研究区域毛竹生物量的影响。该研究运用点源模型分析研究区域阔叶树位置与大于一定胸径的毛竹位置是否具有空间显著性关联,旨在为高效推动竹阔混交的

生态经营与管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据获取、分类和概率分布类型的统计检验

于 2017 年 10 月 17 日在江苏省南京市玄武区紫金山风景区选取 1 块 30 m × 30 m 的毛竹林样地(118°49'01" E, 32°04'13" N),记录样地内所有毛竹的平面坐标(笛卡尔平面坐标)和胸径(DBH),同时记录胸径超过 5 cm 的阔叶树种类、数量及其平面坐标。将毛竹按照其胸径由小到大排列成一个序列,将序列中前 3/4 部分对应的平面坐标作为对照组,将后 1/4 部分对应的平面坐标作为案例组。为了更直观地反映样地内毛竹生物量的分布情况,将胸径作为其代表性指标,使用正态(Normal)分布函数(含均值和标准差 2 个参数)和威布尔(Weibull)分布函数(含形状和尺度 2 个参数)分析调查毛竹胸径分布情况,采用 Kolmogorov-Smirnov 检验方法检验抽样数据是否符合给定的分布函数<sup>[12]</sup>。

### 1.2 异质性空间点格局分析方法与点源模型

#### 1.2.1 异质性空间点格局分析方法<sup>[11]</sup>

由于人为根据调查的毛竹胸径将毛竹位置划分为案例组和对照组,案例组呈现的空间分布格局(如出现空间聚集性分布)有可能是由于划分本身造成,而非反映其自然呈现出的分布格局,即不同的划分有可能导致案例组呈现不同的空间分布格局。期望的案例组空间分布格局不受划分的影响,如果案例组在对照组的背景下呈现为随机分布,则说明这次划分具有合理性。笔者使用案例-对照随机标定的方法来检验案例组的空间分布类型<sup>[13]</sup>。

在空间点格局分析中,空间随机过程特征通常使用是一阶和二阶属性(first-and second-order properties)来进行描述。一阶属性用强度  $\lambda(\mathbf{x})$  来表示,其中  $\mathbf{x}$  表示二维平面上点(亦被称为事件或者点事件)的位置,强度表示在点  $\mathbf{x}$  周围单位面积上(即区域面积等于 1)点的数量;二阶强度表示研究区域内成对子区域点数量关系的空间依赖性,可用  $\lambda_2(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  来表示。如果一个点过程是稳定和同向的,则二阶属性可以使用  $K$  函数来特征化:

$$\lambda K(s) = E(N) \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  表示单位面积上事件的数量;  $s$  表示给定的距离尺度;  $E$  表示期望值;  $N$  表示在研究区域内距离任意一个事件(即任意一点)的距离小于等于  $s$  点事件的数量。如果研究区域在环境条件是同质性的,如植物所在区域土壤元素分布均匀,光照条件类似,没有异常性斑块、廊道的存在,点事件的数量在任何给定面积上符合泊松随机分布,将其称为完全空间随机化(complete spatial randomness, CSR)。很多情况下,对植物空间点格局类型的考察是基于上述 CSR 零假设的。若 CSR 假设成立,则有:

$$K(s) = \pi s^2 \quad (2)$$

如果事件在空间存在聚集性,则实际估计的  $K(s)$  应该高于  $\pi s^2$ ; 若低于  $\pi s^2$ , 则表明事件更倾向于均匀分布。无论对于符合 CSR 还是不符合 CSR 的空间点过程而言,都可以使用下述公式来估计  $K(s)$ :

$$\hat{K}(s) = \frac{1}{\lambda^2 |\mathbf{R}|} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{I(s_{ij})}{w_{ij}} \quad (3)$$

其中,  $|\mathbf{R}|$  表示研究区域的面积;  $\lambda$  表示未知的强度, 可用  $n/|\mathbf{R}|$  来近似;  $n$  表示研究区域  $\mathbf{R}$  上点 (即事件) 的数量;  $I(s_{ij})$  是指示器函数:

$$I(s_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{当 } s_{ij} \leq s \\ 0, & \text{当 } s_{ij} > s \end{cases} \quad (4)$$

$w_{ij}$  表示边缘校正的权重, 主要是校正落在研究区域边界附近的计算, 如果以边界附近任意一点为圆心, 半径为  $s$ , 圆落在区域内的弧长除以整个圆的周长得到的商即为边缘校正的权重。

在考察观测流行病学中病例位置的空间点格局类型时, 为了消除环境异质性的影响, 在研究区域内可以根据处于“风险”中人群的家庭住址, 随机选择一部分作为对照组, 如果案例组呈现出随机分布, 则案例组和对照组的  $K$  函数, 在理论上:

$$K_{11}(s) = K_{22}(s) \quad (5)$$

其中,  $K_{11}$  表示案例组的  $K$  函数;  $K_{22}$  表示对照组的  $K$  函数。它们估计值的差值可以用来作为判定案例组空间点格局分布类型的一个指标:

$$\hat{D}(s) = \hat{K}_{11}(s) - \hat{K}_{22}(s) \quad (6)$$

当案例组符合泊松随机分布时,  $\hat{D}(s)$  等于 0, 但是考虑到点事件都是点过程的随机实现 (realization), 因为存在较大的随机性,  $\hat{D}(s)$  即便不严格等于 0 而在 0 附近, 案例组仍有可能符合泊松随机分布。为了解决这个问题, 对案例-对照实行随机标定, 即打乱原研究区域案例组和控制组的标签 (位置不动), 随机设定与原案例组数量相同的点事件作为案例组, 而将余下的作为对照组, 重新计算  $\hat{D}(s)$ , 类似进行随机标定  $r$  次, 则有  $r$  个  $\hat{D}(s)$  值, 然后将这些值由小到大进行排列, 从而在给定的距离尺度  $s$  上, 将随机标定得到的每个距离尺度对应的最小的  $\hat{D}(s)$  值作为下线, 而最大的  $\hat{D}(s)$  值作为上限, 形成了上下包迹线。如果根据实际数据计算的  $\hat{D}(s)$  值落在上下包迹线内部, 则认为案例组符合泊松随机分布; 超过上包迹线, 则认为案例组呈现出空间聚集性分布; 低于下包迹线, 则认为案例组更倾向于均匀分布。笔者将胸径较粗的 1/4 部分毛竹的平面坐标作为案例组, 而将余下的 3/4 部分毛竹的平面坐标作为对照组, 研究案例组的空间分布格局。

最大距离尺度一般选取样方最短边长的 1/2, 为了保证结论的稳健性, 往往选取样方最短边长的 1/4。该研究为了获取更多的案例组空间分布格局类型信息, 同时为了保证结论的可靠性, 将最大距离尺度定义为 8 m 范围约占样方边长的 27%, 0~8 m 范围距离尺度间隔为 0.01 m, 考察在这些距离尺度上案例组在对照组为背景下的空间格局的分布类型。

**1.2.2 点源模型<sup>[9]</sup>**。英国兰卡斯特大学的 Diggle 教授于 1990 年提出了单点源影响的模型用于分析是否推定的污染源会对人们关心的事件 (即案例组) 的空间分布格局具有显著性影响<sup>[10]</sup>:

$$\lambda(\mathbf{x}) = \rho \lambda_0(\mathbf{x}) f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta}) \quad (7)$$

其中,  $\lambda(\mathbf{x})$  表示案例在  $\mathbf{x}$  处的强度;  $\rho$  是待拟合常数;  $\lambda_0(\mathbf{x})$  表示对照在  $\mathbf{x}$  处的强度,  $f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta})$  表示表示距离点源  $\mathbf{x}_0$  的风险增强函数, 该函数与距离点源  $\mathbf{x}_0$  距离有密切关系, 距离点源越近, 值越大, 距离点源越远, 值越小, 随着距离的进一步增大, 其值趋于 1:

$$f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta}) = 1 + \theta_1 \exp(-\theta_2 \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|^2) \quad (8)$$

其中,  $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2)$  表示待拟合参数。当  $f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta}) = 1$  时, 式(7)变为

$$\lambda(\mathbf{x}) = \rho \lambda_0(\mathbf{x}) \quad (9)$$

说明案例组的强度与对照组的强度成比例, 而与点源没有关系, 则式(9)被作为原假设。当研究区域不止有一个点源, 假设有  $q$  个点源, 考虑这些点源的综合影响, 一个解决的手段是假设这些点源的影响形式为乘积模式<sup>[9]</sup>, 即

$$f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta}) = \prod_{k=1}^q g(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0k}; \boldsymbol{\theta}_k) \quad (10)$$

每个  $g(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0k}; \boldsymbol{\theta}_k)$  的函数形式等同于式(8), 其中  $\boldsymbol{\theta}_k = (\theta_{k1}, \theta_{k2})$ 。

现在将一个研究区域内的案例组 (假设有  $n$  个) 和对照组 (假设有  $m$  个) 看作是相互独立的伯努利试验, 在位置  $\mathbf{x}$  处事件为案例的概率应该是:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{\lambda(\mathbf{x})}{\lambda_0(\mathbf{x}) + \lambda(\mathbf{x})} = \frac{\rho f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta})}{1 + \rho f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta})} \quad (11)$$

那么事件在  $\mathbf{x}_i$  位置上的概率密度为 (在任一位置试验次数为 1, 案例和对照发生的概率互补, 再根据二项分布的概率密度函数计算):

$$h(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} p(\mathbf{x}_i), & \text{当 } \mathbf{x}_i \text{ 为案例时} \\ 1 - p(\mathbf{x}_i), & \text{当 } \mathbf{x}_i \text{ 为对照时} \end{cases} \quad (12)$$

概率密度知道后, 可使用极大似然法估计模型参数  $\rho$  和  $\boldsymbol{\theta}$ :

$$\begin{aligned} L(\rho, \boldsymbol{\theta}) &= \ln \left\{ \prod_{i=1}^{n+m} h(\mathbf{x}_i) \right\} = \sum_{i=1}^n \ln \{ p(\mathbf{x}_i) \} + \sum_{i=n+1}^{n+m} \ln \{ 1 - p(\mathbf{x}_i) \} \\ &= n \ln(\rho) + \sum_{i=1}^n \ln \{ f(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta}) \} - \sum_{i=1}^{n+m} \ln \{ 1 + \rho f(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta}) \} \end{aligned} \quad (13)$$

上式可以使用最优方法求解参数值。当零假设成立 [即  $f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0; \boldsymbol{\theta}) = 1$ ] 时, 则有:

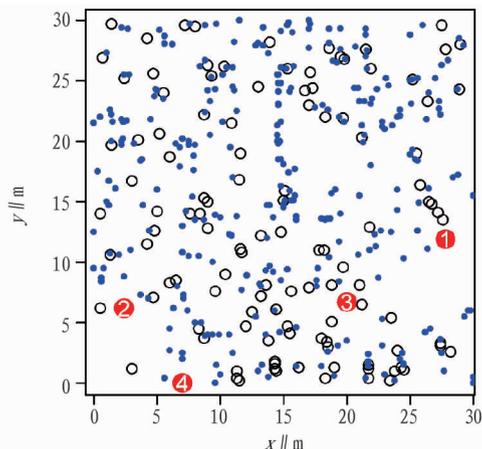
$$L_0(\rho) = n \ln(\rho) - (n+m) \ln(1 + \rho) \quad (14)$$

为使得式(14)最大化, 可令  $dL_0(\rho)/d\rho = 0$ , 计算得到  $\hat{\rho}_0 = n/m$ 。假设  $\boldsymbol{\theta}$  有  $r$  个元素, 则统计量  $S = 2 \{ L(\hat{\rho}, \hat{\boldsymbol{\theta}}) - L_0(\hat{\rho}) \}$  符合自由度为  $r$  的卡方 ( $\chi^2$ ) 分布, 那么就可以对点源影响的显著性进行正式的统计检验 ( $P$  值)。将调查区域的胸径超过 5 cm 的阔叶树作为点源, 分别考虑单一点源的影响、不同点源组合的影响, 根据计算的  $S$  值和  $P$  值, 确定案例组 (胸径大小排在最大 1/4 部分毛竹的位置) 具有显著性影响的点源。

该研究所有分析和作图均使用统计软件 R 来实现<sup>[14]</sup>, 使用了 R 特种软件包 `splancs` 来执行案例-对照随机标定, 以检验案例组的空间分布类型。尽管 `splancs` 中含 `tribble` 函数可以用于分析多点源对案例组的影响, 但是其参数拟合对一些数据集存在问题, 因此采用 R 中 `optim` 函数来进行最优计算, 以估计风险增强函数中的参数值。

## 2 结果与分析

**2.1 样地调查结果** 研究区域胸径超过 5 cm 的阔叶树共有 2 种: 朴树 (*Celtis sinensis* Pers.) 2 棵, 榔榆 (*Ulmus parvifolia* Jacq) 2 棵, 分别定义点源 1 到点源 4 为: 朴树 1 (DBH = 35.2 cm)、朴树 2 (DBH = 42.5 cm)、榔榆 3 (DBH = 38.0 cm)、榔榆 4 (DBH = 33.5 cm), 样地内毛竹和阔叶树的空间分布见图 1。共调查到毛竹 417 株, 其胸径为 4.7 ~ 14.9 cm, 其中值为 9.1 cm, 其分布可以被正态分布函数和威布尔分布函数很好地描述, 但威布尔函数能更为清晰地反映毛竹胸径分布的有偏性 (图 2)。其中正态分布的 2 个参数 (即均值和标准差) 估计值分别为 9.10 和 1.64 cm; 而威布尔分布的 2 个参数 (即形状参数和尺度参数) 的估计值分别为 6.11 (无单位参数) 和 9.78 cm。



注: 将毛竹根据其胸径大小划分为案例组 (用小圆圈表示) 和对照组 (用小黑点表示); 红底白字代表 4 棵阔叶树, 作为点源

Note: Moso bamboo are sorted into two types of points: cases (represented by small open circles) and controls (represented by small dark points); the red open circles with white numbers represent the broad-leaved trees that are actually thought of as point sources

图 1 毛竹与阔叶树的空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of moso bamboo and broad-leaved trees

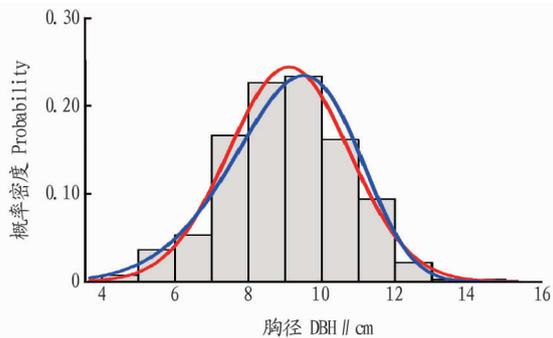


图 2 研究区域毛竹胸径的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of the DBHs of moso bamboo in the study region

**2.2 案例组的空间点格局分析结果** 在给定的所有距离尺度内, 胸径大小排在前 1/4 部分毛竹呈现出典型的随机分

布, 所有根据实际观测数据计算的  $D(s)$  值均在上下包迹线内 (图 3)。

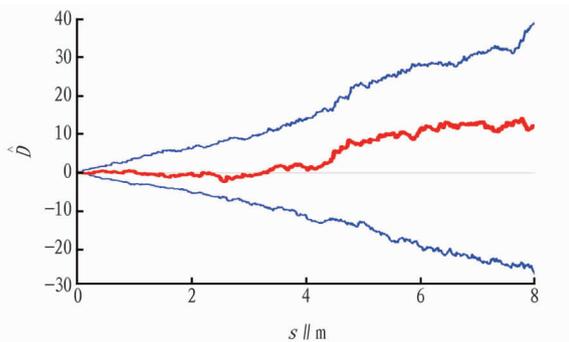


图 3 估计的  $D$  值 (红色的粗线) 和模拟的包迹线 (蓝色的细线) (基于 1999 次模拟)

Fig. 3 Estimated  $D$  values (red bold line) at different distance scales and simulation envelope (blue lighter lines) (based on 1999 simulations)

**2.3 点源模型的分析结果** 表 1 列出了考虑单一点源、多个点源影响的显著性。S 值表示根据实际观测事件计算的对数似然值和根据点源无显著性影响的零假设计算的对数似然值差值的 2 倍,  $P$  值表示  $S$  符合卡方分布而计算的衡量统计显著性的指标。当逐一考虑各个点源影响时, 点源 3 极显著 ( $P < 0.01$ ), 点源 4 显著 ( $P < 0.05$ )。当考虑多点源组合影响, 凡是包含点源 3 的组合, 统计结果都显著, 但包含点源 4 但不包含点源 3 的组合都不显著。显然点源 3 对被研究案例组空间分布具有显著性影响, 点源 4 的影响虽难以被排除, 但是其影响效果要弱于点源 3。而点源 1 和点源 2 的影响确定为不显著。也就是说, 朴树对样方内生物量大的毛竹空间分布无显著性影响, 榔榆对样方内生物量大的毛竹空间分布具有显著性影响, 其中靠近样方中心的榔榆 (点源 3) 较位于样方边缘的榔榆 (点源 4) 影响效果更为强烈 (图 1)。

表 1 点源模型的分析结果

Table 1 Analytical results of point-source modelling

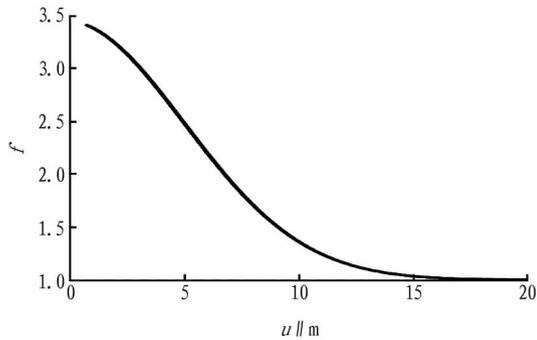
点源 <sup>*</sup> Point source(s)	计算的 S 值 Calculated S value	P 值 P value
1	0.53	0.767 8
2	2.60	0.272 3
3	10.89	0.004 3
4	9.20	0.010 1
1,2	4.16	0.385 2
1,3	11.70	0.019 7
1,4	0.54	0.969 8
2,3	11.24	0.024 0
2,4	2.91	0.573 6
3,4	10.89	0.027 8
1,2,3	12.40	0.053 7
1,2,4	0.54	0.997 4
1,3,4	14.83	0.021 6
2,3,4	13.74	0.032 7
1,2,3,4	12.02	0.150 4

注: \*. 1 和 2 代表 2 棵朴树, 3 和 4 代表 2 棵榔榆

Note: \*. 1 and 2 represent two different individuals of *C. sinensis*; 3 and 4 represent two different individuals of *U. parvifolia*

计算得到的点源 3 的风险增强函数的参数估计值为  $\hat{\theta} = (2.448 9, 0.018 5)$ , 图 4 直观地给出了此函数的图像, 可以发现毛竹距离榔榆 6.1 m 处, 风险增强值达到 1 和最大风险

值的平均值,在15 m以外,其生物量将很少受到其影响。因为样地为30 m × 30 m,因此,即便是第2棵榔榆距离边缘较近,仍在一定程度上可以影响样地内毛竹林的生物量。



注:  $u$  表示距离点源3的距离

Note:  $u$  represents the distance from the point source 3

图4 点源3(榔榆)的风险增强函数

Fig. 4 Risk elevation function of the point source 3 (namely *U. parvifolia*)

### 3 结论与讨论

胸径大小排在前1/4部分的毛竹,以余下对照组为环境背景,呈现出泊松随机分布,这种划分基本上不会破坏毛竹空间分布的自然特征。而随机性分布的结论与以往有关毛竹的分布类型研究一致,如时培建等<sup>[15]</sup>调查了江西农业大学校园内一块毛竹林地,将2009年新出竹笋位置作为对照组,而将之前的成年毛竹位置作为案例组,使用案例-对照分析得出案例组也是呈现出泊松随机分布的结论。秦鹏等<sup>[16]</sup>研究了南京林业大学校园内4种地被竹的空间分布,按照竹子高度从小到大排列,将最高的1/3部分作为案例组,将余下的2/3部分作为对照组,分析发现每种地被竹中案例组也呈现出泊松随机分布。竹子的胸径、地径或高度均可以作为生物量的代表性指标,高度( $H$ )和植物的重量( $W$ )在密度均匀或者基本均匀的条件下呈现出 $H \propto W^{1/3}$ 的关系式,而胸径作为一维量度也类似,前期研究已经证明了胸径和毛竹的重量呈现出对数线性关系<sup>[6]</sup>。因而,笔者使用毛竹胸径的大小来反映其生物量的大小具有合理性。该研究发现紫金山毛竹胸径的中值为9.1 cm,低于Cheng等<sup>[6]</sup>报道的大于10 cm的研究结果,这与被研究区域的气候条件和立地条件有很大关系,因为Cheng等<sup>[6]</sup>的研究区域更偏向于亚热带气候中心区域,属于特别适合毛竹生长的区域,而该研究的地点虽然也能适合毛竹的生长与繁殖,但是南京靠近亚热带的北缘,气候和降水条件较湖南、江西、浙江和福建等省份有一定差异,这些最终导致了毛竹林中个体生物量的差异。

榔榆对毛竹生物量的空间分布具有显著性影响,而朴树则对毛竹生物量的空间分布无显著性影响。距离样地边缘较近的榔榆较之于距离样地中心更近的榔榆影响较弱。尽管榔榆和朴树同属于榆科但分列在不同的属,其形态特征有较大区别,枝叶的茂密程度不同,榔榆叶片较小、小枝下垂,且枝下高较高,因而林下透光性相对较好,能满足毛竹高生长期的正常光强度需求(透光性对竹类植物生物量的积累具

有显著性的影响<sup>[17]</sup>),同时榔榆作为阔叶树可以为毛竹林积蓄水分;而朴树林下透光性较差,更倾向于和毛竹争夺光线、水分。尽管2棵朴树都靠近样地边缘,但有一棵榔榆同样靠近样地边缘,后者较前者对毛竹生物量分布呈显著性影响,因此,即便朴树如果位于样地中心,至少榔榆较朴树对毛竹生物量的影响更强。然而,根据该研究对点源3的风险增强函数参数值的估计,阔叶树的作用范围应该较大,距离榔榆6.1 m处,影响介于无影响(即点源1)和最大影响的1/2处,而影响的最远距离可达到15 m。因此,即便是在边缘,考虑到设置样方的面积相对风险增强函数的影响范围而言较小,朴树若有影响应该能够得到统计计算上的显著性验证,既然在统计学上无显著性影响,则说明其对毛竹林生物量分布没有影响或者影响程度可以忽略。以往的相关研究往往不区分阔叶树的种类,而笼统地将阔叶树群落作为一个整体,分析其对毛竹林生产力的影响,虽然发现具有正的效果,但是忽视了阔叶树种类、数量和构成比例的差异会对毛竹林生产力产生不同的影响<sup>[18-19]</sup>。该研究暗示在今后的研究中,需要区分不同阔叶树种以及不同种植密度、间隔、组合对毛竹林生产力的影响。

### 参考文献

- [1] LIESE W, KÖHL M. Bamboo: The plant and its uses [M]. Heidelberg, Germany: Springer, 2015.
- [2] 周芳纯. 竹林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [3] 程小飞. 上阔下竹复合生态系统类型划分的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- [4] LIU G H, SHI P J, XU Q, et al. Does the size-density relationship developed for bamboo species conform to the self-thinning rule? [J]. Forest ecology and management, 2016, 361: 339-345.
- [5] CAO K F, YANG S J, ZHANG Y J, et al. The maximum height of grasses is determined by roots [J]. Ecology letters, 2012, 15(7): 666-672.
- [6] CHENG X F, SHI P J, HUI C, et al. An optimal proportion of mixing broad-leaved forest for enhancing the effective productivity of moso bamboo [J]. Ecology and evolution, 2015, 5(8): 1576-1584.
- [7] 陈霜霜, 秦鹏, 顾琪, 等. 景观交错对毛竹林生物量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 95-100.
- [8] FORD E D. Scientific method for ecological research [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [9] DIGGLE P J, ROWLINGSON B S. A conditional approach to point process modelling of elevated risk [J]. Journal of Royal Statistical Society: Series A, 1994, 157(3): 433-440.
- [10] DIGGLE P J. A point process modelling approach to raised incidence of a rare phenomenon in the vicinity of a pre-specified point [J]. Journal of Royal Statistical Society: Series A, 1990, 153(3): 349-362.
- [11] GATRELL A C, BAILEY T C, DIGGLE P J, et al. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology [J]. Transactions of the Institute of British Geographers, 1996, 21(1): 256-274.
- [12] 薛毅, 陈立萍. 统计建模与R软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [13] Diggle P J, Chetwynd A G. Second-order analysis of spatial clustering for inhomogeneous populations [J]. Biometrics, 1991, 47(3): 1155-1163.
- [14] The R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing [M]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2015.
- [15] 时培建, 郭世权, 杨清培, 等. 毛竹的异质性空间点格局分析[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4401-4407.
- [16] 秦鹏, 顾琪, 王舒棕, 等. 四种地被竹中大个体空间分布的点格局分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 接收稿.
- [17] 王舒棕. 不同光照强度对翠竹生长的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [18] 程小飞, 刘国华, 黄伟量, 等. 上阔下竹复合经营模式对毛竹林生产力的影响[J]. 安徽林业科技, 2015, 41(6): 38-42.
- [19] 顾琪, 程小飞, 黄伟量, 等. 上阔下竹混交经营对毛竹生产力的影响[J]. 竹子研究汇刊, 2015, 34(3): 30-34.