

6个竹种的空间点格局分析

顾琪^{1,2}, 王平¹, 焦月潇¹, 曹俊杰¹, 王舒惊¹, 时培建¹, 王福升^{1*}, 秦鹏³

(1. 南京林业大学竹类研究所, 南京 210037; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042;

3. 丹阳市环境监测站, 丹阳 212300)

摘要: 选取翠竹、髯毛箬竹、菲白竹、铺地竹、毛竹和金佛山方竹6个竹种作为研究对象, 运用空间点格局分析方法和 Taylor 幂法则对6个竹种的空间分布格局进行研究, 分析不同距离尺度下6个竹种的空间分布格局类型, 为优化优良竹种的空间种植结构提供理论依据, 促进竹类资源在我国的开发利用。结果表明: (1) 空间点格局分析和 Taylor 幂法则两种研究方法对6个竹种的空间分布检验结果一致; (2) 翠竹、髯毛箬竹和铺地竹均呈现较强的聚集性分布特征; 在给定的距离尺度下, 菲白竹呈现较弱的聚集性; 毛竹和金佛山方竹都介于聚集性分布和随机分布之间, 但严格上应划为随机分布。

关键词: 距离尺度; K 函数; Monte-Carlo 检验; Taylor 幂法则

中图分类号: S795

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)03-0432-08

Spatial point pattern analysis of six species of bamboos

GU Qi^{1,2}, WANG Ping¹, JIAO Yuexiao¹, CAO Junjie¹, WANG Shucong¹, SHI Peijian¹, WANG Fusheng¹, QIN Peng³

(1. Bamboo Research Institute, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037;

2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042;

3. Environmental Monitoring Station of Danyang, Danyang 212300)

Abstract: Taken six species of bamboos: *Pleioblastus pygmaeus*, *Indocalamus barbatus*, *leioblastus fortunei*, *Pleioblastus argenteostriata*, *Phyllostachys edulis* and *Chimonobabusa utilis* as objectives, the spatial distribution patterns of these six bamboo species on different distance scales were analyzed using the spatial point pattern analysis method and Taylor's power law, to provide a theoretical basis for optimizing planting structure of some bamboo species with potential great economic and ecological values, and to enhance the exploitation level of bamboo resources in China. Results showed that: (1) the putative spatial distribution types of these six bamboo species by using Taylor's power law were consistent with using the spatial point pattern analysis method. (2) *P. pygmaeus*, *I. barbatus* and *P. argenteostriata* all exhibited a strong characteristic of aggregated distribution, whereas *P. fortunei* showed a weaker aggregated distribution on given distance scales; the spatial distribution patterns of *P. edulis* and *C. utilis* were between the aggregated distribution and random distribution on given distance scales, which should be strictly classified as a random distribution.

Key words: distance scale; K function; Monte-Carlo test; Taylor's power law

自 Greig-Smith 开创了第一个植物种群格局规模分析方法以来^[1], 自然植被空间格局的研究一直吸引着众多生态学者的关注^[2-3], 现已成为种群与群落生态学研究的重要方法^[4]。张金屯教授引入了空间点格局分析方法^[5], 推动了该研究领域在国内的

发展。空间点格局分析方法是在 Ripley 提出的 K 函数^[6]基础上发展而来的, 由其他研究人员对 Ripley's K 函数进行完善和扩展, 设计出了多种扩展 K 函数, 如异质性空间 K 函数、时空 K 函数及异质性时空 K 函数等^[7-8], 用于分析一定距离尺度下植物空间分布

收稿日期: 2018-07-27

基金项目: 江苏省林业三新工程项目 (LYSX[2016]20), 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX (16) 1005) 和江苏省林业三新工程 (LYSX[2016]50) 共同资助。

作者简介: 顾琪, 助理工程师。E-mail: Guccisuzhou@outlook.com

* 通信作者: 王福升, 副教授。E-mail: fswang@njfu.edu.cn

的格局。观测量（如密度）的空间变异已被视为一个生物量，可根据测量的尺度改变数值^[9]。Taylor 通过观测大量样本发现种群样本均值（即种群密度） M 与样本方差 V 间存在幂函数关系： $V = aM^b$ ，即 Taylor 幂法则^[10]，Taylor 等人假设这种关系是种群密度制约的平衡性产生的，种群密度制约的平衡性就是个体间的吸引和对抗行为，这种行为能够最大化地消耗资源^[11]。

我国是世界上竹类资源较为丰富的国家之一，对竹类植物的人工培育、竹类资源的利用有着悠久的历史，目前全国分布有 30 多个竹乡^[12]。本文选取 6 个具有代表性的竹种，分别为翠竹 (*Pleioblastus pygmaeus*)、髯毛箬竹 (*Indocalamus barbatus*)、菲白竹 (*Pleioblastus fortunei*)、铺地竹 (*Pleioblastus argenteostriata*)、毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 和金佛山方竹 (*Chimonobabusa utilis*)，其中翠竹、髯毛箬竹、菲白竹和铺地竹均为地被竹，观赏价值高，管理简单，被广泛应用于园林造景^[13]；毛竹为刚竹

属，属单轴散生大径竹，是我国南方的一种重要竹类资源，也是目前我国种植面积最大的竹类植物^[12]；金佛山方竹为寒竹属，属复轴混生型小径竹，是我国西南地区特有竹种，金佛山方竹竹笋味道鲜美且营养价值高，现重庆、贵州等地均将发展金佛山方竹竹笋作为地方经济发展中支柱产业之一，并连续开展了广泛的人工种植^[14]。分析这 6 个竹种的空间分布格局类型，以期为这些优良竹种的空间种植结构提供理论依据，促进竹类资源在我国开发利用。

1 研究区概况

将 6 个竹种进行编号，以示区分。编号 A、B、C、D，分别指翠竹、髯毛箬竹、菲白竹和铺地竹，其研究地位于南京林业大学竹种园内；竹种编号 E 为毛竹，其研究地位于江苏省南京市玄武区紫金山风景区内；金佛山方竹为编号 F，其研究地位于贵州省遵义市正安县山上。样地概况详见表 1。

表 1 6 个竹种的样地概况
Table 1 Sample plots of 6 bamboo species

编号 No.	种名 Species	样地位置 Plot position	样地经纬度 Plots latitude and longitude	样方大小 Plots size(m×m)	调查时间(年-月-日) Investigation time (Year-month-date)
A	翠竹 (<i>P. pygmaeus</i>)	南京林业大学竹种园	118°48'39" E 32°05'06" N	1 × 1	2015-01-23
B	髯毛箬竹 (<i>I. barbatus</i>)	南京林业大学竹种园	118°48'53" E 32°04'54" N	1.5 × 2	2015-01-23
C	菲白竹 (<i>P. fortunei</i>)	南京林业大学竹种园	118°48'52" E 32°04'57" N	1.5 × 1.5	2015-01-24
D	铺地竹 (<i>P. argenteostriata</i>)	南京林业大学竹种园	118°48'37" E 32°04'44" N	1 × 1	2015-02-05
E	毛竹 (<i>P. edulis</i>)	江苏省南京市紫金山	118°49'01" E 32°04'13" N	30 × 30	2017-10-17
F	金佛山方竹 (<i>C. utilis</i>)	贵州省遵义市正安县	107°15'7" E 28°45'56" N	5 × 5	2016-10-26

2 研究方法

2.1 空间点格局分析方法

在空间点格局分析中，通常使用一阶属性（first-order properties）和二阶属性（second-order properties）来描述空间随机过程特征。其中一阶属性是用来表示在一个二维平面上点 x （也可称为事件或者点事件）周围单位面积（即区域面积为 1）上点的数量，用强度 $\lambda(x)$ 表示。定义公式如下：

$$\lambda_{(x)} = \lim_{|dx| \rightarrow 0} \left\{ \frac{E(\gamma(dx))}{|dx|} \right\} \quad (1)$$

二阶属性则用来表示在研究区域内成对子区域

点 (x_i, x_j) 数量关系的空间依赖性，用

$\lambda_2(x_i, x_j)$ 表示。定义公式如下：

$$\lambda_2(x_i, x_j) = \lim_{\substack{|dx_i| \rightarrow 0 \\ |dx_j| \rightarrow 0}} \left\{ \frac{E[(\gamma(dx_i))(\gamma(dx_j))]}{|dx_i||dx_j|} \right\} \quad (2)$$

如果一个点过程具有稳健性和等向性，则可以用 Ripley's K 函数^[6]特征化表述二阶属性，即量化二阶属性。定义公式如下：

$$\lambda_{K(s)} = E(N) \quad (3)$$

式中， λ ：单位面积上事件的数量； s ：给定的距离尺度； E ：期望值； N ：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 的点事件数量。

通常我们对植物空间点格局的考察是基于 CSR 零假设的,若 CSR 假设成立,则有:

$$K(s) = \pi s^2 \quad (4)$$

如果事件在空间上存在聚集性,则较小的距离 s 上实际估计的 $K(s)$ 应该高于 πs^2 ; 若其低于 πs^2 , 则表明事件更倾向于均匀分布。对于任何空间点过程, 都可以使用下述公式来估计 $K(s)$:

$$\hat{K}(s) = \left(\frac{|R|}{n^2} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{I(s_{ij})}{w_{ij}} \quad (5)$$

式中, $|R|$ 表示研究区域 R 的面积; n 表示研究区域上点(即事件)的数量; s_{ij} 表示第 j 点距离第 i 点的欧式距离; $I(s_{ij})$ 是指示器函数(当 $s_{ij} \leq s$, 其值为 1, 反之为 0); w_{ij} 表示边缘校正的权重, 用来消除边缘效应的影响, 以第 i 点为圆心, s_{ij} 为半径的圆落在研究区域内的弧长与此圆周长的比值。

使用 Monte-Carlo 方法来检验植物空间分布类型, 在给定的研究区域内, 随机产生和观测植株数量相同的点, 计算在给定距离 s 上 $K(s)$ 的估计值, 记做 $\hat{K}_1(s)$, 类推模拟 n 次, 则在给定距离尺度 s 上有 $\hat{K}_n(s)$ 。在 $\hat{K}_q(s)$ ($q = 1, 2, 3, \dots, n$) 中找出最大值和最小值, 记做 $\hat{K}_{\max}(s)$ 和 $\hat{K}_{\min}(s)$ 。当距离尺度 s 取不同值时, 可以得到最大值和最小值对应的两条曲线, 作为上下包迹线。根据 Monte-Carlo 模拟得到的上下包迹线, 可以直观地判断点事件是否存在空间集聚性, 当根据观测点过程计算的 $\hat{K}(s)$ 大于 $\hat{K}_{\max}(s)$ 时, 认为在此距离尺度下, 观测数据呈现聚集分布; 当 $\hat{K}(s)$ 小于 $\hat{K}_{\min}(s)$, 认为在此距离尺度下, 观测数据呈现均匀分布; 当 $\hat{K}(s)$ 介于两值之间时, 认为在此距离尺度下, 观测数据呈现随机分布。本文中 Monte-Carlo 模拟次数均为 999。

最大距离尺度一般不能超过样方最短边长的 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。本文为了获取更多的样本点空间分布格局类型信息, 同时为了保证结论的可靠性, 将 6 个竹种的研究区域内样本点的最大距离尺度取约为样方边长的 1/4。其中翠竹的最大距离尺度定义为 25 cm, 占样方边长的 25%; 髯毛箬竹的最大距离尺度定义为 35 cm, 占样方边长的 23%; 菲白竹的最大距离尺度定义为 35 cm, 占样方最短边长的 23%; 铺地竹的最大距离尺度定义为 25 cm, 占样方边长的 25%; 毛竹的最大距离尺度定义为 8 m, 占样方边长的 27%; 金佛山方竹的最大距离尺度定义为 1.2 m, 占样方边长的 24%。前 4 个竹种的距离尺度间

隔均为 0.1 cm, 毛竹和金佛山方竹的距离尺度间隔都为 0.1 m。考察在给定的距离尺度上样本点的空间格局的分布类型。

2.2 Taylor 幂法则

Taylor 于 1961 年提出如下公式:

$$V = a M^b \quad (6)$$

式中, V , M 分别为样本方差和样本平均数; a , b 两参数非负。 a 是与抽样等因素有关的参数, b 是反映物种聚集特征的参数, 又称 Taylor 幂指数, 由物种的生物学行为与环境因素之间的相互作用决定。参数 b 可以用来测定种群空间格局: 若 $b > 1$, 种群空间格局为聚集型; $b = 1$ 为随机型; $b < 1$ 为均匀型^[10]。

Taylor 幂法则拟合要求参数 a 、 b 使函数所描述的曲线与每个抽样所得到的方差的残差的平方和最小。方差的残差的平方和 (RSS) 公示如下:

$$RSS = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i; a, b)]^2 \quad (7)$$

由于 $V = f(M; a, b) = aM^b$ 是非线性的, 对 Taylor 幂法则公式两端同时取自然对数, 可得:

$$\ln V = \ln a + b \ln M \quad (8)$$

令 $y = \ln V$, $x = \ln M$, $\ln a = c$, 这样非线性拟合问题就转化为线性拟合问题, 求 \hat{c} 、 \hat{b} , 使 $\hat{y} = \hat{c} + \hat{b}x$ 与观测数据 $y = \ln V$ 的残差平方和最小(即普通最小二乘法)。

将任一样地划分成 $2^2, 3^2, 4^2, \dots, 11^2$ 个相同面积的子区域, 分别计算这些子区域植物数量的均值和方差, 这样在均值和方差的平面坐标系上就有 10 个数据点, 用以估计 Taylor 幂指数。

2.3 数据分析

所有分析和作图均使用统计软件 R^[15] (version 3.4.3) 实现, 其中空间点格局分析使用了 splancs 软件包。

3 结果与分析

3.1 样地调查结果

根据调查, 在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方内共有翠竹 434 株(图 1A); 在 $1.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的矩形区域内共有髯毛箬竹 188 株(图 1B); 在 $1.5 \times 1.5 \text{ m}$ 的样方内共有菲白竹 426 株(图 1C); 在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方内共有铺地竹 337 株(图 1D); 在 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的样方内共有毛竹 417 株(图 1E); 在 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的样方内共有金佛山方竹 182 株(图 1F)。

3.2 6 个竹种的空间点格局分析

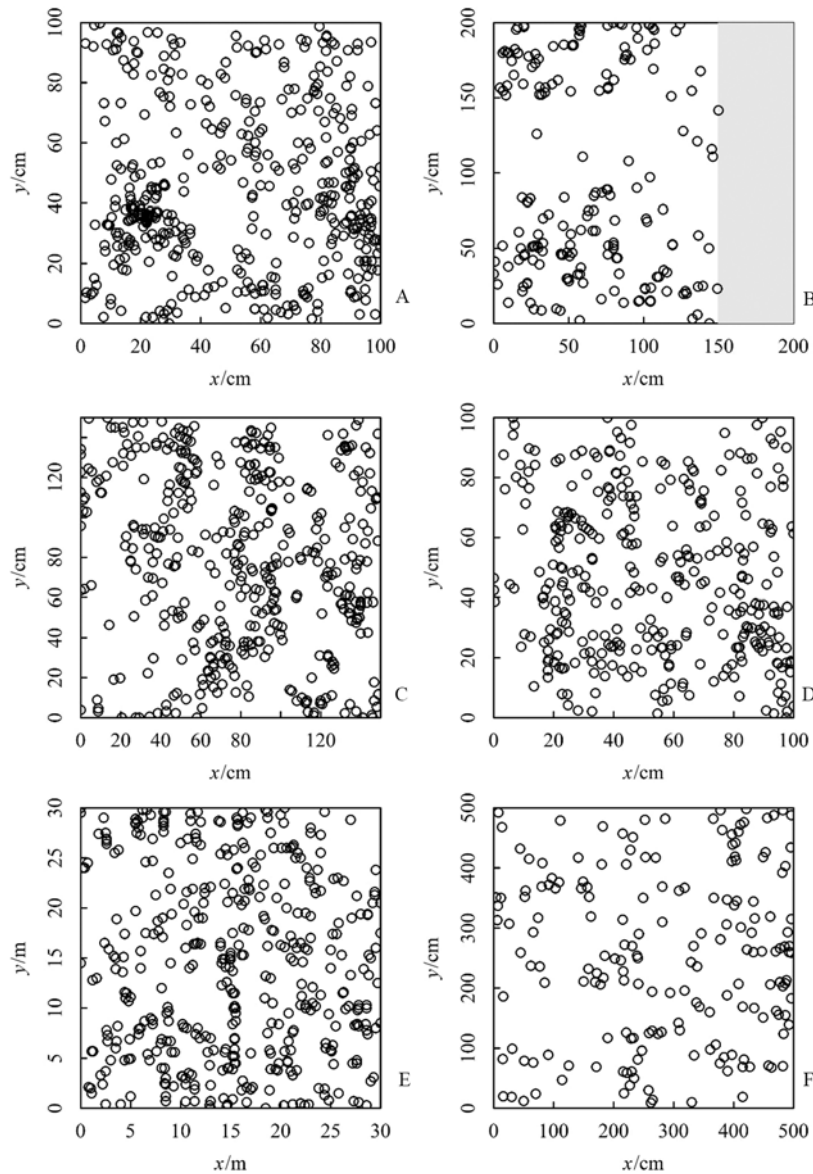
3.2.1 翠竹的空间分布 从图 2A 中得出, 在给定

距离尺度下 (≤ 25 cm), $\hat{K}(s)$ 曲线位于上包迹线的上方, 表明其分布呈现出聚集性。

3.2.2 髯毛箬竹的空间分布 从图 2B 中得出, 在给定距离尺度下 (≤ 35 cm), $\hat{K}(s)$ 曲线位于上包迹线的上方, 其空间分布也为聚集性分布。

3.2.3 菲白竹的空间分布 从图 2C 中看出, 在 $s <$

25 cm 距离尺度内, $\hat{K}(s)$ 曲线位于上包迹线的上方, 这表明在此距离尺度内, 菲白竹呈现聚集分布; 当距离尺度 $s \geq 25$ cm 时, $\hat{K}(s)$ 曲线介于上下两条包迹线之间, 在此距离尺度下, 菲白竹呈现出随机分布的特征。



A: 翠竹; B: 髯毛箬竹; C: 菲白竹; D: 铺地竹; E: 毛竹; F: 金佛山方竹。第二幅子图阴影表示非研究子区域。下同
A. *P. pygmaea*; B. *I. barbatus*; C. *P. fortunei*; D. *P. argenteostriata*; E. *P. edulis*; F. *C. utilis*. The shade area in panel B represents the subregion that was not investigated. The same below

图 1 6 个竹种的空间分布

Figure 1 Spatial distribution of 6 bamboo species

3.2.4 铺地竹的空间分布 从图 2D 中得出, 在给定距离尺度下 (≤ 25 cm), 铺地竹空间分布与翠竹、髯毛箬竹的分布类型相似, $\hat{K}(s)$ 曲线位于上包迹线的上方, 分布模式属于聚集性分布。

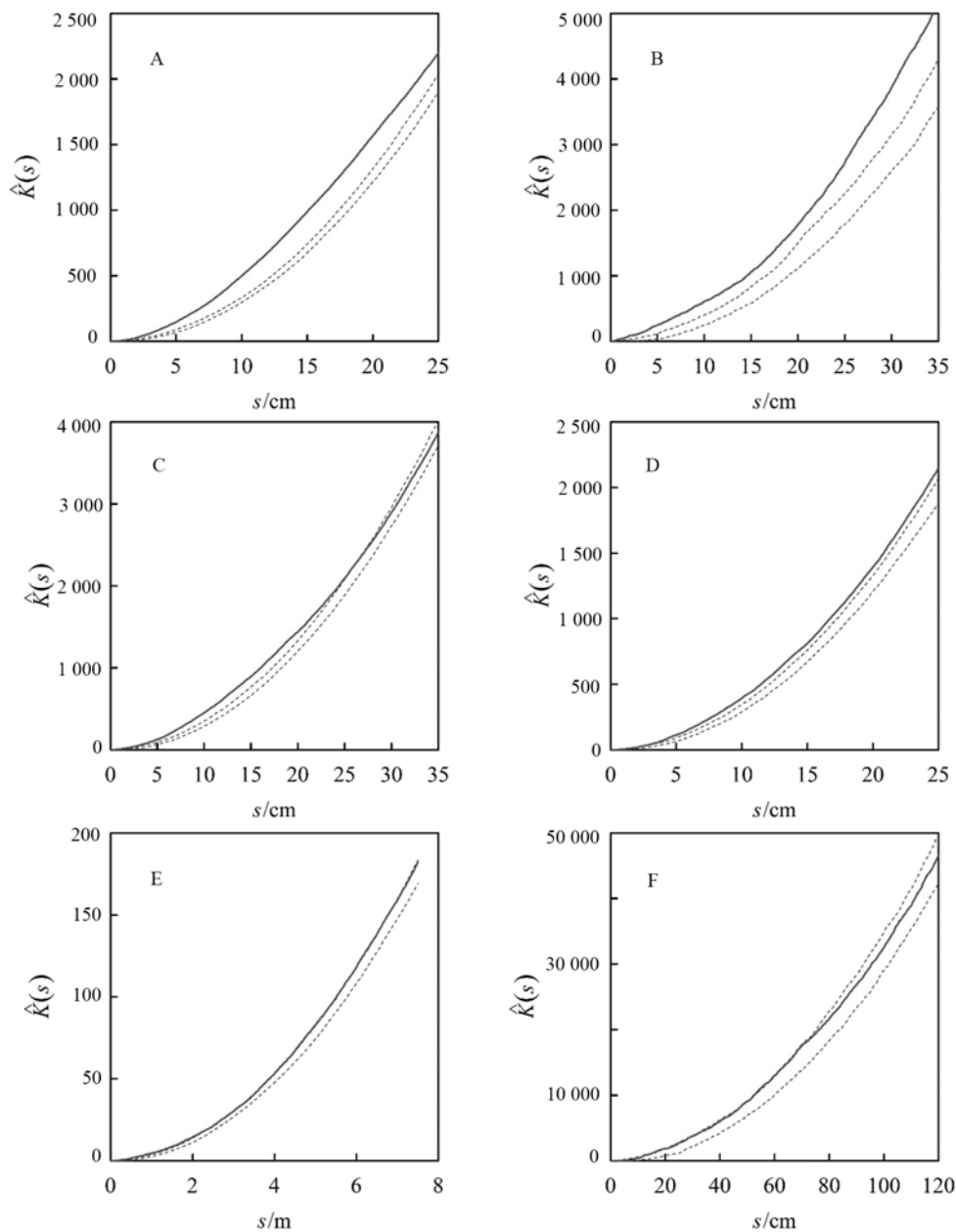
3.2.5 毛竹的空间分布 从图 2E 中得出, 在给定

距离尺度下 (≤ 8 m), $\hat{K}(s)$ 曲线与上包迹线基本重合, 表明毛竹的空间分布模式是介于随机分布和聚集性分布的过渡类型, 但既然没有超出上包迹线, 则其分布类型应划为随机分布。

3.2.6 金佛山方竹的空间分布 从图 2F 中得出,

在小范围距离尺度内 ($s < 70$ cm), 金佛山方竹空间分布与毛竹的分布类型相似, $\hat{K}(s)$ 曲线与上包迹线重合, 表明在此距离尺度内, 金佛山方竹的空间分布模式是介于随机分布与聚集性分布的过渡类型,

但应划为随机分布; 当 $s \geq 70$ cm 时, $\hat{K}(s)$ 曲线介于上下两条包迹线之间, 其分布不呈现出聚集性, 金佛山方竹个体竹株在样地中出现是随机的, 符合泊松分布及随机分布的特征。



图中实线曲线表示 $K(s)$ 的估计值, 两条虚线曲线代表上下包迹线。Monte-Carlo 模拟次数均为 999 次

The solid line represents the estimates of $K(s)$, and the two dotted line curves represent the upper and lower envelopes, respectively. Here, the times of Monte-Carlo simulation is 999

图 2 6 个竹种的 $K(s)$ 的估计值

Figure 2 Estimated $K(s)$ of 6 bamboo species

3.3 Taylor 幂法则检验

6 个竹种研究区内不同小区划分下样本的数量均值对数和方差对数的线性回归的结果见图 3 和表 2。

6 个线性方程拟合的决定系数 R^2 值均超过

0.95, 表明线性回归直线对研究区内样本观测值的拟和效果较好, Taylor 幂法则成立。前 4 种竹类植物的 Taylor 幂指数的估计值都显著大于 1, 表明翠竹、髯毛箬竹、菲白竹和铺地竹呈现明显的聚集性分布。而后 2 种竹类植物的 Taylor 幂指数的估计值

其 95% 的置信区域包含 1, 并不显著大于 1, 表明毛竹和金佛山方竹的分布类型更偏向于随机分布。

各方程 P 值均小于 0.01, 估计的斜率项 (即 Taylor 幂指数) 在统计学上具有极强的显著性。

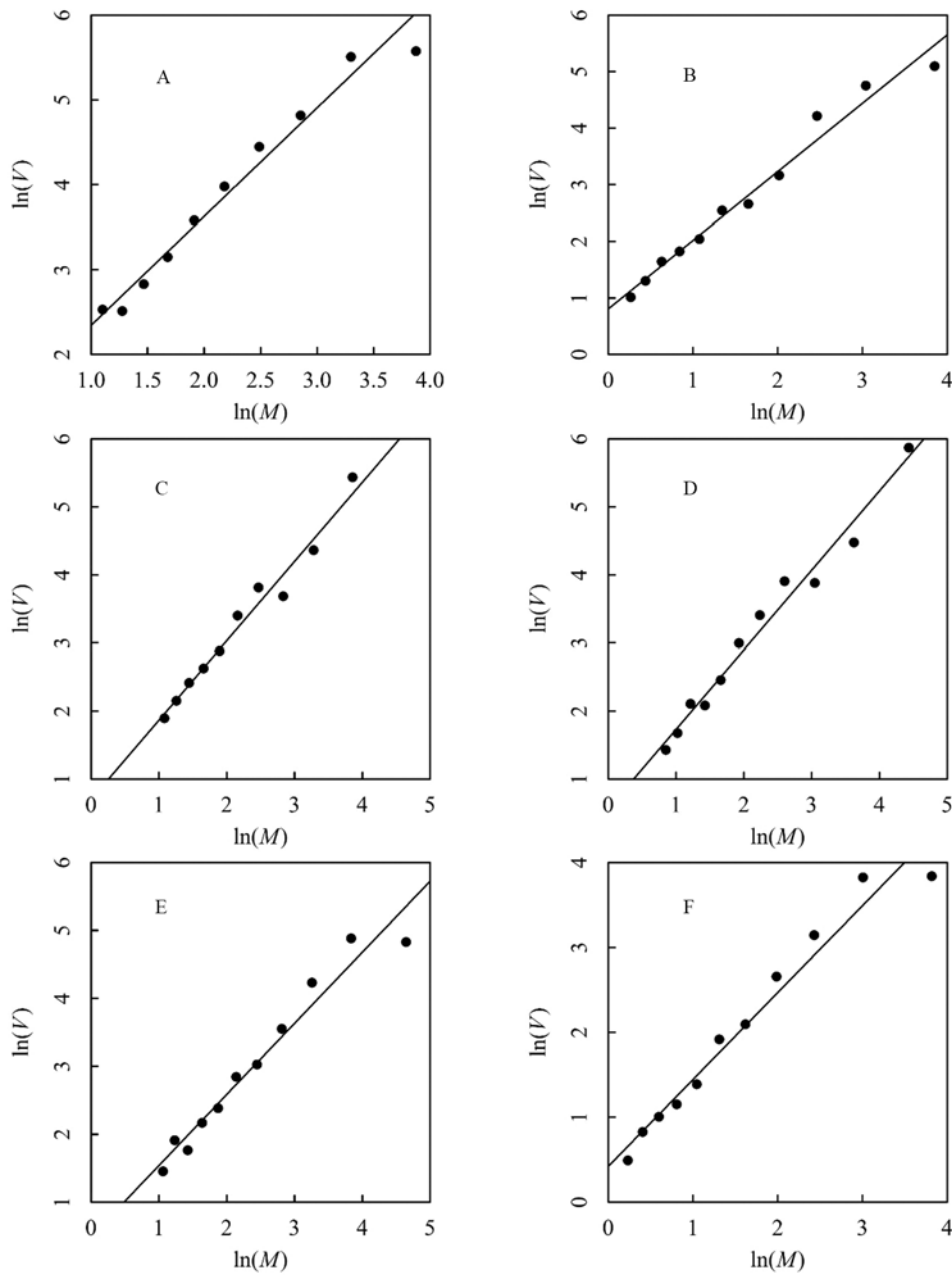


图 3 6 个竹种数量均值和方差均取自然对数后的线性回归

Figure 3 Linear regression between the logarithm of the mean and the logarithm of variance of 6 bamboo species

表 2 线性回归结果

Table 2 Fitted results of the linear regression

编号 No.	$\hat{c} \pm SD$	$\hat{b} \pm SD$ (95% CI)	R^2	P 值 P value
A	1.264 1 \pm 0.121 6	1.280 3 \pm 0.056 8 (1.152, 1.409)	0.982 6	< 0.01
B	0.809 8 \pm 0.120 3	1.210 3 \pm 0.062 1 (1.070, 1.351)	0.976 9	< 0.01
C	0.702 6 \pm 0.130 5	1.164 5 \pm 0.049 2 (1.053, 1.276)	0.984 2	< 0.01
D	0.565 2 \pm 0.145 4	1.167 2 \pm 0.059 6 (1.032, 1.302)	0.977 1	< 0.01
E	0.493 4 \pm 0.195 1	1.046 0 \pm 0.074 1 (0.878, 1.213)	0.956 8	< 0.01
F	0.423 2 \pm 0.126 6	1.023 4 \pm 0.066 3 (0.873, 1.173)	0.963 6	< 0.01

4 讨论

任何植物的分布都可以在大尺度或局部尺度范围内进行检验^[16],但因空间分布格局依赖于尺度,在小尺度下可能呈聚集分布,而在大尺度下则可能为随机分布或均匀分布^[5],所以本文采用空间点格局分析法,在分析过程中最大限度地利用空间坐标信息,直观地分析各种尺度下的种群格局^[5],具有较强的实用性。Taylor 冪法则作为一个重要的生态学法则,在种群生态学研究占有重要的地位^[17],主要用于测定种群空间格局及种群时空稳定性。判定种群的空间分布类型不仅能够反映植物利用环境资源的状况和种群在群落中的作用与地位,还可以揭示植物个体之间相互依存和相互制约的复杂关系^[18]。

通过空间点格局和 Taylor 冪法则两种分析方法对 6 个竹种进行格局分析,空间分布检验结果一致:翠竹、髯毛箬竹、菲白竹和铺地竹种群中个体竹株的空间分布符合聚集分布;毛竹和金佛山方竹虽有聚集性的倾向但仍为随机分布。种群的空间分布类型与选择的样方大小和形状有关,样方大小和形状不仅会影响点格局分析性能^[19],还会影响 Taylor 冪法则的 a 参数以及某些聚集指标^[20]。因此,在分析种群的空间分布类型时,除考虑距离尺度外,还需考虑样方大小及形状等因素。

种群分布格局是植物种群生物学特性对环境条件长期适应和选择的结果^[21]。由于植物与环境之间相互作用、相互影响,植物种群的分布格局总是随着群落环境的变化而发生变化^[22],翠竹、髯毛箬竹、菲白竹和铺地竹的空间分布类型均为聚集分布。这 4 个地被竹种作为南京林业大学校园内景观竹种虽然初期属于人工栽种,但经过多年自发生长扩散,现有的 4 个地被竹种空间分布基本反映了其自然分布特征及对于土壤条件的依赖^[23]。地被竹是一种以萌生繁殖为主的特殊草本植物,而萌生繁殖的草本植物如豚草^[24]等多呈现出聚集分布的特点。

毛竹是人工经营的主要竹种,本文中毛竹位于江苏省南京市紫金山风景区内,因受到景区管理部门的严格保护,人为干扰较少,毛竹空间分布呈现随机分布,这与朱强根等^[25]得出的不同经营模式会影响毛竹种群的空间分布,如在经营管理强度较低的经营模式下,毛竹呈现随机分布的结论一致,也与时培建等^[26]采用空间点格局分析方法研究毛竹纯林的空间分布得出毛竹呈随机分布的结论一致。但王微等^[27]研究重庆地区 3 种典型群落中的毛竹空

间分布以及洪伟等^[28]分析杉木毛竹人工混交林的空间格局,均得出毛竹种群呈现聚集性,原因可能与他们选择的毛竹林样方为非纯林有关,样方的斑块异质性非常明显,从而导致了毛竹种群趋向聚集分布。本文中毛竹样方内虽有 4 棵胸径均超过 30 cm 的阔叶树,但是,在调查时选取的样方较大,而 4 棵阔叶树在该样方内较为分散,因此不会破坏毛竹空间分布的自然特征。

金佛山方竹作为贵州省遵义市正安县大力发展的地方特色产业,正面临着竹林经济效益和生态效益低下等问题^[29],目前国内对金佛山方竹的研究多见于竹林出笋成竹规律^[30]、密度调控^[31]等方面,对其空间分布类型研究较少,而施肥等因素导致的环境异质性对金佛山方竹分布有着重要影响^[32],通过间隙扰动调解的物种共存对生物量生产有一定影响^[33]。由于金佛山方竹是调查样地的单优建群种,因此有理由认为金佛山方竹植株之间的间隙干扰主要取决于种内关系。金佛山方竹的空间类型为泊松随机分布,表面呈现的聚集性主要因为环境异质性造成的,根据其分布格局特点,笔者认为在山体种植金佛山方竹时应选择环境差异较小、土肥条件较好的山体及考虑相应的坡位和坡向。由于空间分析具有一定的预测功能^[26],可在预测的新竹分布空间内,加强施肥、灌溉等人为经营措施,促使萌发的新竹强壮生长。

在分析种群结构时,种群的年龄是一个不可忽略的因子。种群发育过程中,分布格局随着时间的推移而发生动态变化^[34]。郑泽睿等^[35]对 2009—2013 年毛竹林空间分布格局类型分析发现新竹的分布格局受到母竹栽植方式的影响,范辉华^[36]也得出新竹分布格局与母竹有关。而本文在选取样地的过程中并没有考虑到 6 个竹种种群的种年龄结构,因此需要设计试验进一步探究由年龄结构差异导致的竹种种群空间分布的变化情况。

种群密度依赖的过程对构建植物群落很重要,植物对邻近环境做出反应并影响附近的资源^[37]。竹类植物能够通过相互接连的地下茎进行彼此间能量物质交换,从而最大限度地利用环境,提高生存竞争力,例如金佛山方竹在扩散 5 年左右即可达到近于郁闭的纯林^[14]。同时竹类植物作为一个富有特色的植物类群,可以用于观赏、竹材竹笋加工等多方面,具有极大的发展前景。本文分析竹子的空间分布格局,了解竹子的分布类型,对增加物种多样性、竹类景观丰富性以及推进南竹北移工程等都具有重要意义。

参考文献:

- [1] GREIG-SMITH P. The use of random and contiguous quadrats in the study of the structure of plant communities[J]. *Annals of Botany*, 1952, 16(2): 293-316.
- [2] VER HOEF J M, CRESSIE N A C, GLENN-LEWIN D C. Spatial models for spatial statistics: some unification[J]. *J of Veg Sci*, 1993, 4(4): 441-452.
- [3] PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology[J]. *Bioscience*, 1969, 24(2): 7-12.
- [4] DALE M. Spatial patterns analysis in plant ecology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] 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.
- [6] RIPLEY B D. Modelling spatial patterns[J]. *J Ro Stat Soc: Series B (Methodological)*, 1977, 39(2): 172-192.
- [7] DIGGLE P J. Statistical analysis of spatial and spatio-temporal point patterns (Third Edition) [M]. New York: CRC Press, 2014.
- [8] BADDELEY A, RUBAK E, TURNER R. Spatial point patterns-methodology and applications with R[M]. London: CRC Press, 2016.
- [9] HORNE J K, SCHNEIDER D C. Spatial variance in ecology[J]. *Oikos*, 1995, 74(1): 18-26.
- [10] TAYLOR L R. Aggregation, variance and the mean[J]. *Nature*, 1961, 189(4766): 732-735.
- [11] TAYLOR L R, TAYLOR R A J. Aggregation, migration and population mechanics[J]. *Nature*, 1977, 265(5593): 415-421.
- [12] 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]. *Ecol Evol*, 2015, 5(8): 1576-1584.
- [13] 史军义, 易同培, 马丽莎, 等. 园林地被竹及其开发利用[J]. *四川林业科技*, 2006, 27(6): 95-100.
- [14] 易思荣, 黄娅, 肖波, 等. 金佛山方竹自然扩散生态效应初步分析[J]. *生态科学*, 2012, 31(1): 22-25.
- [15] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing[EB/OL]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2017.
- [16] ABBOTT I. Comparisons of spatial pattern, structure, and tree composition between virgin and cut-over jarrah forest in western Australia[J]. *Forest Ecol Manag*, 1984, 9(2): 101-126.
- [17] 张连翔, 刘兴利, 赵博, 等. Taylor 幂法则在昆虫种群抽样设计方面的应用[J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(6): 54-57, 69.
- [18] CONDIT R, ASHTON P S, BAKER P, et al. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species[J]. *Science*, 2000, 288(5470): 1414-1418.
- [19] 陈永刚, 汤孟平, 施拥军, 等. 样方形状对空间点格局的性能影响分析—以天目山阔叶林为例[J]. *地理研究*, 2012, 31(4): 665-671.
- [20] 沈佐锐. 关于 Taylor 幂法则的统计学讨论[J]. *生态学杂志*, 1990, 9(6): 64-67.
- [21] ROHRBACH J M. Canonical analysis; a review with applications in ecology[J]. *Acta Biotheoretica*, 1986, 35(1/2): 135-136.
- [22] 王彦阁, 杨晓晖, 慈龙骏, 等. 西鄂尔多斯高原干旱荒漠灌木群落空间分布格局及其竞争关系分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2010, 19(2): 8-14.
- [23] 秦鹏, 顾琪, 王舒惊, 等. 4 种地被竹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)*, 2018, 42(4): 39-45.
- [24] 时培建, 戈峰, 杨清培, 等. 点格局分析中边缘校正的一种新算法及其应用[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 804-809.
- [25] 朱强根, 金爱武, 娄艳华, 等. 毛竹种群空间格局及分株间关联性—重复空间点格局分析[J]. *世界竹藤通讯*, 2014, 12(5): 1-8.
- [26] 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.
- [27] 王微, 胡凯, 吴冬琴, 等. 重庆地区毛竹分株种群结构特征研究[J]. *竹子研究汇刊*, 2008, 27(2): 16-20.
- [28] 洪伟, 郑康宏, 龚其锦. 毛竹在杉木与毛竹混交林中的空间分布型的研究[J]. *竹子研究汇刊*, 1990, 9(2): 56-64.
- [29] 刘成敏. 正安县金佛山方竹产业发展现状与对策[J]. *中国林业产业*, 2016 (6): 214-215.
- [30] 郑艳, 董文渊, 付建生, 等. 金佛山方竹无性系种群生长规律的研究[J]. *世界竹藤通讯*, 2007, 5(1): 27-30.
- [31] 张喜, 龙志永, 许才万, 等. 密度调控对金佛山方竹低产人工林结构的影响[J]. *竹子研究汇刊*, 2014, 33(3): 54-59.
- [32] 丁波, 李曙明, 杜凌, 等. 金佛山方竹氮磷钾正交优化施肥试验初报[J]. *林业实用技术*, 2009(8): 26-27.
- [33] KUBOTA Y. Spatial pattern and regeneration dynamics in a temperate Abies: Tsuga forest in southwestern Japan[J]. *J of Forest Res*, 2006, 11(3): 191-201.
- [34] 操国兴, 钟章成, 刘芸, 等. 缙云山川鄂连蕊茶种群空间分布格局研究[J]. *生物学杂志*, 2003, 20(1): 10-12.
- [35] 郑泽睿, 施拥军, 周国模, 等. 毛竹碳汇林栽植方式在成林初期对空间分布格局变化特征的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(3): 395-405.
- [36] 范辉华. 新造毛竹林竹鞭生长规律的研究[J]. *福建林学院学报*, 1999, 19(1): 30-32.
- [37] GRATZER G, RAI P B. Density-dependent mortality versus spatial segregation in early life stages of *Abies densa* and *Rhododendron hodgsonii* in central Bhutan[J]. *Forest Ecol Manag*, 2004, 192(2/3): 143-159.