

毛竹林空间结构与更替动态的关系

唐思嘉^{1,2}, 汤孟平^{1,2}, 沈钱勇^{1,2}, 杜秀芳^{1,2}, 庞春梅³

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江天目山国家级自然保护区 管理局, 浙江 杭州 311311)

摘要: 以浙江天目山国家级自然保护区内的毛竹 *Phyllostachys edulis* 林为研究对象, 根据 2010, 2012 和 2014 年各大年毛竹林标准地数据, 选择最近邻竹株数、角尺度、大小比和竞争指数等 4 个空间结构指数做主成分分析, 分析毛竹林空间结构与更替动态的关系。结果表明: 各空间结构因子对新竹生长影响重要性排序为最近邻竹株数 > 大小比数 > 竞争指数 > 角尺度, 对毛竹死亡影响重要性排序为最近邻竹株数 > 大小比数 > 竞争指数 > 角尺度; 新竹更容易在最近邻竹株数 < 4 株或最近邻竹株数 > 7 株的区域内发笋生长, 老竹更容易在最近邻竹株数 > 7 株的区域死亡; 毛竹活竹、新竹和死竹均呈现聚集分布, 三者角尺度上无显著差异 ($P > 0.05$); 毛竹林整体处于中庸状态, 新竹主要处于亚优势状态, 而死竹主要处于劣势状态, 三者大小比数上存在极显著差异 ($P < 0.01$); 就平均竞争指数而言, 死竹平均竞争指数最大, 新竹最小。说明竹子生长状况对毛竹更替有重要影响。图 2 表 7 参 30

关键词: 森林生态学; 毛竹; 空间结构; 更替动态; 主成分分析

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2018)01-0001-09

Relationship of spatial structure and regeneration dynamics in *Phyllostachys edulis*

TANG Sijia^{1,2}, TANG Mengping^{1,2}, SHEN Qianyong^{1,2}, DU Xiufang^{1,2}, PANG Chunmei³

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

3. Management Office, National Nature Reserve of Mount Tianmu, Hangzhou 311311, Zhejiang, China)

Abstract: To determine the relationship between spatial structure and regeneration dynamics of a *Phyllostachys edulis* stand, an experiment was conducted in Mount Tianmu National Nature Reserve of Zhejiang Province. Data was taken from *Ph. edulis* stand in 2010, 2012, 2014. Four spatial structural indices, namely, nearest bamboo number, uniform angle, neighborhood comparison, and competition index, were selected to describe spatial structural characteristics of the bamboo. A principal component analysis was used for analysis. Results indicated an order of importance for spatial structural indices affecting *Ph. edulis* growth as nearest bamboo number > neighborhood comparison > competition index > uniform angle, and an order concerning importance of spatial structural indices affecting *Ph. edulis* death as nearest bamboo number > competition index > neighborhood comparison > uniform angle. New bamboo was apt to grow in an area where the nearest bamboo number was < 4 or > 7; whereas, old bamboo was apt to die if the nearest bamboo number was > 7. Living bamboo, new bamboo, and dead bamboo all presented a clustered distribution pattern with no significant differences at the uniform angles ($P > 0.05$). Living bamboo had an intermediate status with new bamboo in a sub-

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-04-29

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201504303); 国家自然科学基金资助项目(31170595); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0503); 浙江省林学一级重中之重学科学生创新计划项目(201514)

作者简介: 唐思嘉, 从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: tsjlala@sina.com。通信作者: 汤孟平, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: tmpzafu@163.com

dominant state and dead bamboo in a relatively disadvantageous state. All showed highly significant differences in neighborhood comparison ($P < 0.01$). An intensity of average competition index as dead bamboo $>$ living bamboo $>$ new bamboo. This indicated that the growth condition had an important effect on bamboo regeneration. [Ch, 2 fig. 7 tab. 30 ref.]

Key words: forest ecology; *Phyllostachys edulis*; spatial structure; regeneration dynamics; principal component analysis

毛竹 *Phyllostachys edulis* 林是中国南方一种特殊的森林类型。中国是毛竹的主产地，毛竹林面积达 443 万 hm^2 ，占有竹林面积的 74%^[1]。毛竹生长快、周期短、产量高、用途广^[2]，同时具有较强的固碳能力，在应对气候变化上有不可低估的作用^[3-4]。森林空间结构是森林生长过程的驱动因子，对森林未来的发展具有决定性作用^[5-6]。毛竹林的结构在一定程度上决定了其稳定性、发展的可能性与经营空间的大小^[6]。近年来，对毛竹林经营管理的认识已从立竹度、年龄结构和树种组成等非空间结构向毛竹空间分布格局、年龄隔离和竞争(或大小空间排列)等空间结构^[7-8]逐渐深化。毛竹依赖多年生竹鞭发笋繁殖，出笋周期 2 a；竹笋出土 50 d 后高度生长和直径生长基本完成^[9]，生长速率大于乔木林。目前，对乔木林空间结构与其生长规律的研究较多^[10-12]，而关于毛竹林空间结构及林分更替动态关系的研究鲜见报道。本研究以浙江天目山国家级自然保护区内少受人为干扰的毛竹为研究对象，基于地理信息系统 (geographic information system, GIS) 的维诺 (Voronoi) 图空间分析功能确定空间结构单元^[13]，选用最近邻竹株数 (nearest bamboo number)，角尺度 (uniform angle index)，大小比数 (neighborhood comparison)，竞争指数 (competition index) 等 4 个空间结构指数，采用主成分分析方法，研究毛竹林空间结构与更替动态的关系，旨在为毛竹林经营提供科学依据。

1 研究区概况

浙江天目山国家级自然保护区位于浙江省西北部杭州市临安区境内的西天目山 ($30^{\circ}18'30''\sim 30^{\circ}24'55''\text{N}$, $119^{\circ}23'47''\sim 119^{\circ}28'27''\text{E}$)，总面积为 1 050 hm^2 ，主峰海拔为 1 506 m。年平均气温为 8.8~14.8 $^{\circ}\text{C}$ ，年积温为 2 500~5 100 $^{\circ}\text{C}$ ，年降水量为 1 390~1 870 mm，相对湿度为 76%~81%。受海洋暖湿气候影响，该区森林植被丰茂，呈垂直带状分布：海拔 870 m 以下为常绿阔叶林，870~1 100 m 为常绿、落叶阔叶混交林，1 100~1 380 m 为落叶阔叶林，1 380~1 500 m 为落叶矮林。毛竹林镶嵌于其他森林类型之间，多分布在海拔 350~900 m，其林下植被稀少，主要树种有豹皮樟 *Litsea coreana* var. *sinensis*，连蕊茶 *Camellia fraterna*，细叶青冈 *Cyclobalanopsis myrsinaefolia*，微毛柃 *Eurya hebeclados* 和短尾柯 *Lithocarpus brevicaudatus* 等^[14]。该区多年来坚持“不动一草一木”的方针，区内毛竹林少有人为干扰，毛竹生长状况接近自然状态^[15]。

2 研究方法

2.1 研究数据

2.1.1 标准地调查 2009 年 7 月，在浙江天目山国家级自然保护区内，选择毛竹林典型地段，建立 1 块大小为 100 m \times 100 m 的固定标准地。中心海拔为 840 m，最高处海拔 886 m，最低处海拔 810 m；主坡向南偏东 30 $^{\circ}$ ，平均坡度为 37 $^{\circ}$ ；下部平缓，上部相对较急，水平方向相对一致(图 1)；土壤类型为黄壤，壤质，土层厚度中。利用南方全站仪 NTS355 设定标准地的坐轴，采用相邻网格法将整个标准地划分为 100 个 10 m \times 10 m 的样方；测定标准地内每株毛竹的基部三维坐标 (x , y , z)。用枝痕法、观杆法确定毛竹年龄，用号竹法在胸高位置标记毛竹年份和竹号。每木调查测定毛竹胸径、竹高、年龄、枝下高、冠幅、弯曲状态等因子。2010~2015 年，每年 4 月调查毛竹林固定标准地内的新笋地径，7 月复查。

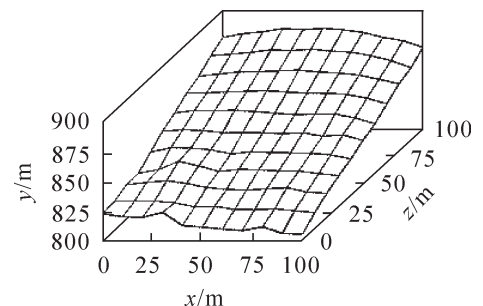


图 1 标准地三维地形

Figure 1 3D map of the sample plot

2.1.2 各大年毛竹数据统计 根据各年毛竹林标准地复查数据, 确定当年出笋长成的毛竹为新竹, 当年状态为存活而翌年死亡的毛竹为死竹。因毛竹生长周期存在大小年现象, 小年很少出笋或不出笋^[16]。本试验以毛竹林各大年(2010, 2012 和 2014 年)数据为依据, 对毛竹林更替状况与空间结构的关系进行研究。各大年活竹、新竹和死竹的统计数据见表 1。

2.2 空间结构单元及其边缘矫正

以标准地内任意 1 株毛竹为对象竹, 基于 Voronoi 图确定由对象竹与相邻竹组成的空间结构单元^[17]。每个 Voronoi 多边形内包含的 1 株毛竹即为对象竹, 与其相邻 Voronoi 多边形内的毛竹即为最近相邻竹。对标准地采用八邻域平移法作边缘校正; 计算空间结构指数时, 矫正标准地内的毛竹为对象竹。

2.3 空间结构指数

2.3.1 角尺度 从对象竹出发, 测定任意 2 株相邻竹之间的 2 个夹角; 设小角为 α , 最近邻竹均匀分布时的夹角为标准角 α_0 。根据 GAD-OW 等^[18]和 POMMERENING 等^[19-20]研究, 角尺

度标准角随着最近邻株数 n 的变化而变化, 取值为 $360^\circ/(n+1)$ 。角尺度(W_i)被定义为 α 角小于标准角的个数占所考察的最近邻株数 n 的比例。计算公式为:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \quad (1)$$

式(1)中: W_i 为对象竹 i 的 Voronoi 角尺度, n 为最近邻竹株数, α_{ij} 为离散变量, 当第 j 个 α 角小于 α_0 时, $\alpha_{ij}=1$, 反之, $\alpha_{ij}=0$ 。

2.3.2 大小比数 大小比数是表达树种空间优势程度的良好指标, 是对大小分化度的改进。大小比数(U_i)被定义为大于对象竹的相邻竹株数占最近相邻竹总株数的比例^[21-22]。可选择胸径、树高和冠幅等作为比较指标^[23]。本研究中以胸径作为比较指标。大小比数计算公式为:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (2)$$

式(2)中: U_i 为对象竹 i 的大小比数, n 为最近邻竹株数, K_{ij} 为离散变量, 当相邻竹 j 胸径大于对象竹 i 时, $K_{ij}=1$, 反之, $K_{ij}=0$ 。

2.3.3 竞争指数 竞争指数被广泛应用并被证明能够很好地解释植物竞争的强度、作用和竞争结果^[23]。Hegyi 竞争指数在形式上反映了林木个体竞争与生存空间的关系, 方法简便易行^[24]。因此, 本研究采用 Hegyi 竞争指数计算毛竹林标准地内各对象竹的竞争指数。计算公式为:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i L_{ij}} \quad (3)$$

式(3)中: C_i 为对象竹 i 的竞争指数, n 为最近邻竹株数, d_i , d_j 分别为对象竹 i 和相邻竹 j 胸径, L_{ij} 为对象竹 i 和相邻竹 j 之间的距离。

2.4 方差分析

方差分析(analysis of variance, ANOVA)是用于 2 个及 2 个以上样本均数差别的显著性检验。对毛竹各空间结构指数中活竹、新竹和死竹的均值比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 且两两比较时选择最小显著性差异(least significant difference, LSD)法。

2.5 主成分分析

主成分分析(principal component analysis, PCA)是一种简化数据集的方法。通过对毛竹林空间结构指数作主成分分析可以确定影响毛竹林更替的主导因子。对毛竹林空间结构指数进行标准化; 然后计算空间结构指数的相关矩阵特征值、贡献率、累积贡献率以及其各主成分; 最后对各主成分进行解释, 并进

表 1 各大年毛竹统计数据

Table 1 Statistical data of *Phyllostachys edulis* in 2010, 2012 and 2014

年份	类别	数量/株	平均胸径/cm	平均株高/m
2010	活竹	6 154	11.0	14.67
	新竹	896	11.4	13.97
	死竹	584	10.0	13.58
2012	活竹	6 057	11.2	14.78
	新竹	763	11.3	14.53
	死竹	342	10.4	14.20
2014	活竹	6 095	11.2	14.60
	新竹	651	11.1	14.30
	死竹	308	10.3	13.47

行重要性排序^[25]。本研究采用 SPSS for Windows 软件计算各空间结构指数的相关矩阵特征值、贡献率、累积贡献率和载荷矩阵。

3 结果与分析

3.1 最近邻竹株数与毛竹更替的关系

对象竹的最近邻竹对其更替有最直接的影响^[25]。基于 GIS 的 Voronoi 图可以确定各对象竹的最近邻竹株数。结果表明(表 2): 在各大年, 活竹、新竹和死竹的最近邻竹株数频率分布中 5~7 株的频率最多; 各年新竹或死竹的平均最近邻竹株数与活竹平均最近邻竹株数接近, 均为 6 株左右。单因素方差分析发现, 各年活竹、新竹和死竹在最近邻竹株数上不存在显著差异($P>0.05$), 表明三者具有一致的分布特征, 即最近邻竹株数分布不影响竹林更替, 毛竹林分具有相对稳定性。

表 2 各大年毛竹活竹、新竹和死竹最近邻竹株数统计

年份	对象竹	最近邻竹株数频率分布							平均最近邻竹数/株
		3	4	5	6	7	8	>8 株	
2010	活竹	0.02	0.13	0.26	0.30	0.19	0.06	0.04	6.01 a
	新竹	0.03	0.14	0.24	0.28	0.20	0.07	0.04	6.06 a
	死竹	0.02	0.11	0.24	0.30	0.20	0.08	0.04	6.06 a
2012	活竹	0.01	0.09	0.26	0.31	0.21	0.07	0.05	6.00 a
	新竹	0.01	0.10	0.24	0.29	0.22	0.08	0.06	6.13 a
	死竹	0.01	0.08	0.24	0.30	0.21	0.09	0.06	6.03 a
2014	活竹	0.01	0.11	0.25	0.31	0.19	0.08	0.05	6.00 a
	新竹	0.02	0.12	0.23	0.29	0.20	0.09	0.05	6.07 a
	死竹	0.01	0.10	0.23	0.30	0.21	0.10	0.06	6.13 a

说明: 相同字母表示活竹、新竹和死竹在相同年份的最近邻竹株数间差异不显著($P>0.05$)。

对比新竹与活竹、死竹与活竹的最近邻竹株数频率分布(图 2)可以看出: 新竹在“3 株”“4 株”或“7 株以上”的最近邻竹株数频率要高于活竹; 而死竹在“7 株以上”的最近邻竹株数频率要高于活竹。说明新竹更容易在较低密度或较高密度区域内发笋生长, 而死竹主要出现于较高密度区域。因此, 为减少毛竹生长过程中的自然损耗, 在毛竹林经营过程中应对毛竹林高密度(最近邻竹株数>7 株)区域进行择伐。

3.2 角尺度与毛竹更替的关系

角尺度(W_i)可用于描述林木空间分布格局。根据 Voronoi 角尺度判别标准^[26], 林木空间分布格局有 3 种: $W_i \in [0.327, 0.357]$, 随机分布; $W_i < 0.327$, 均匀分布; $W_i > 0.357$, 聚集分布。对各大年活竹、新竹、死竹角尺度进行统计(表 3)发现, 新竹呈随机分布的频率高于活竹, 原因是毛竹受所处生境条件影响, 新竹呈现随机分布的可能性变大, 与王微等^[27]对重庆典型毛竹分株种群结构特征研究结果一致。

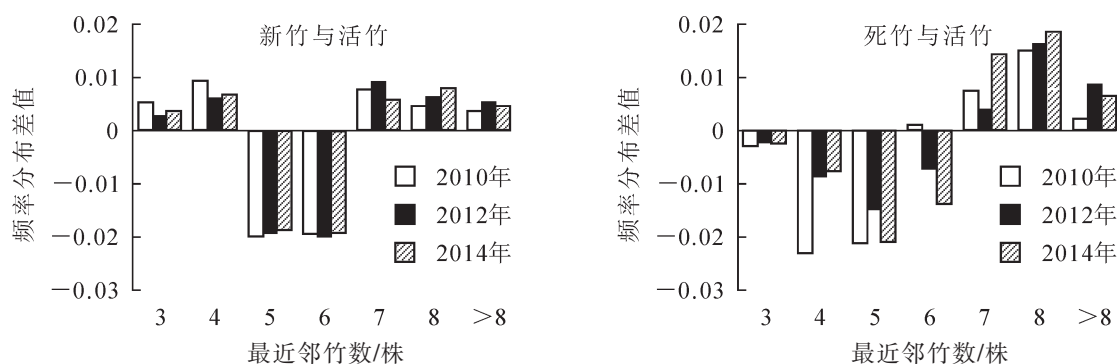


图 2 各大年新竹与活竹、死竹与活竹的最近邻竹株数分布差异

Figure 2 Distribution of the nearest bamboo number of live bamboo, new bamboo and dead bamboo

死竹呈聚集分布的频率高于活竹，原因是聚集程度较高的区域竞争也更激烈，毛竹更易死亡。整体来看，各大年毛竹活竹、新竹和死竹平均角尺度均大于 0.357，说明毛竹林整体上呈聚集分布，与黄丽霞等^[28]研究结果一致。平均角尺度的单方差分析结果则表明，三者不存在显著性差异($P>0.05$)；说明毛竹林整体的空间分布格局少受毛竹更替的影响，具有相对稳定性。

表 3 各大年毛竹活竹、新竹和死竹角尺度统计

Table 3 Statistics of uniform angle of live bamboo, new bamboo and dead bamboo in 2010, 2012 and 2014

年份	对象竹	角尺度频率分布			平均角尺度	分布格局
		均匀分布	随机分布	聚集分布		
2010	活竹	0.27	0.16	0.58	0.385 a	聚集分布
	新竹	0.26	0.20	0.53	0.378 a	聚集分布
	死竹	0.25	0.13	0.62	0.389 a	聚集分布
2012	活竹	0.25	0.17	0.59	0.390 a	聚集分布
	新竹	0.24	0.20	0.56	0.379 a	聚集分布
	死竹	0.23	0.14	0.62	0.391 a	聚集分布
2014	活竹	0.25	0.15	0.60	0.391 a	聚集分布
	新竹	0.24	0.21	0.55	0.373 a	聚集分布
	死竹	0.24	0.13	0.63	0.394 a	聚集分布

说明：相同字母表示活竹、新竹和死竹在相同年份的角尺度间差异不显著($P>0.05$)。

3.3 大小比数与毛竹更替的关系

大小比数描述相邻毛竹之间的差异，反映立竹在毛竹林中的生长优势程度。对某一对象竹而言，大小比数取值为 0.00, (0.00, 0.25], (0.25, 0.50], (0.50, 0.75], (0.75, 1.00] 时，分别对应优势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势。对各大年活竹、新竹、死竹的大小比数进行统计(表 4)可以看出：新竹处于优势和亚优势的频率都大于活竹，说明新竹在林分生长中处于有利地位；而死竹处于劣势和绝对劣势的频率高于活竹，说明在受压环境下的毛竹更易死亡。总的来看，毛竹林整体处于中庸状态，大小比数的频率分布基本呈现均衡分布的特征；新竹主要处于亚优势状态，而死竹主要处于劣势状态。单因素方差分析结果表明：各大年毛竹活竹、新竹和死竹在大小比数上存在极显著差异($P<0.01$)，大小比数排序为死竹>活竹>新竹，反映了立竹的优势程度对毛竹更替有重要影响。因此，在毛竹林经营过程中，应提早采伐处于受压状态的毛竹，释放生长空间，为潜在新竹创造有利生长条件。

3.4 竞争强度与毛竹更替的关系

计算各大年活竹、新竹、死竹竞争指数，并根据毛竹竞争指数(C_i)的大小，将竞争强度划分成 3 个等级： $C_i \leq 4$ ，弱度竞争； $4 < C_i \leq 8$ ，中度竞争； $8 < C_i$ ，强度竞争。分析结果见表 5。从表 5 可知：新竹

表 4 各大年毛竹活竹、新竹和死竹大小比数统计

Table 4 Statistics of neighborhood comparison of live bamboo, new bamboo and dead bamboo in 2010, 2012 and 2014

年份	对象竹	大小比数频率分布					平均大小比数
		优势	亚优势	中庸	劣势	绝对劣势	
2010	活竹	0.19	0.17	0.24	0.19	0.21	0.49 a**
	新竹	0.26	0.20	0.21	0.13	0.19	0.38 b**
	死竹	0.06	0.09	0.18	0.24	0.43	0.65 c**
2012	活竹	0.20	0.17	0.24	0.19	0.20	0.49 a**
	新竹	0.26	0.19	0.24	0.12	0.19	0.38 b**
	死竹	0.06	0.11	0.23	0.19	0.42	0.63 c**
2014	活竹	0.20	0.18	0.24	0.19	0.20	0.49 a**
	新竹	0.27	0.20	0.21	0.10	0.22	0.40 b**
	死竹	0.09	0.13	0.20	0.19	0.40	0.60 c**

说明：**表示不同字母活竹、新竹和死竹在相同年份的大小比数间差异极显著($P<0.01$)。

处于弱度竞争的频率高于活竹，处于中度竞争和强度竞争的频率低于活竹，平均竞争指数小于活竹，说明新竹中有较多个体在弱竞争环境下生长。而死竹处于强度竞争的频率大于活竹，平均竞争指数也大于活竹，说明在强竞争环境下的毛竹更易死亡。对各大年毛竹活竹、新竹和死竹的竞争指数进行单因素方差分析，结果表明：活竹和新竹无显著差异($P>0.05$)，而活竹和死竹、新竹和死竹间存在显著差异($P<0.05$)。推测原因是新竹在笋期时已经历竞争，保留了较多优势新竹，因此，在整体呈聚集分布的毛竹林中处于有利竞争地位；同时受环境条件影响，部分新竹在弱竞争环境下生长，逐渐加剧这个区域的竞争强度，表现在竞争强度上为无显著差异；而死竹在强竞争环境下，多处于劣势和绝对劣势易被淘汰，表现在竞争指数上为存在显著差异，说明竞争是驱动毛竹更替的重要因素。

表5 各大年毛竹活竹、新竹和死竹竞争强度统计

Table 5 Statistics of competition intensity of livel bamboo, new bamboo and dead bamboo in 2010, 2012 and 2014

年份	对象竹	竞争强度频率分布			平均竞争指数
		弱度竞争	中度竞争	强度竞争	
2010	活竹	0.10	0.68	0.22	6.57 a
	新竹	0.13	0.65	0.21	6.54 a
	死竹	0.08	0.63	0.29	6.83 b*
2012	活竹	0.13	0.66	0.21	6.52 a
	新竹	0.17	0.63	0.20	6.46 a
	死竹	0.12	0.65	0.24	6.84 b*
2014	活竹	0.13	0.66	0.21	6.46 a
	新竹	0.15	0.63	0.21	6.41 a
	死竹	0.12	0.65	0.24	6.66 b*

说明：*表示不同字母活竹、新竹和死竹在相同年份的竞争强度间差异显著($P<0.05$)。

3.5 影响毛竹林更替的重要空间结构因子分析

为确定影响毛竹林更替的主要空间结构因子，对各大年毛竹林新竹和死竹的空间结构指数进行主成分分析。由表6可知：新竹空间结构指数的第1主成分中最近邻竹株数的因子载荷最大，表明毛竹新竹受最近邻竹的影响最大；最近邻竹株数和角尺度为正载荷，大小比数和竞争指数为负载荷，表明前两者和后两者对毛竹新竹的影响不同，前两者反映毛竹的分布特征，后两者反映毛竹之间的竞争关系。第2主成分中，竞争指数的载荷最大，反映立竹在林分中的竞争强度对毛竹新竹存在重要影响。第3主成分中主要反映了立竹在林分中的生长优势程度对新竹的影响。主成分分析表明：影响新竹生长的空间结构指数重要性排序依次为最近邻竹株数>大小比数>竞争指数>角尺度。

分析表7发现：第1主成分中最近邻竹株数的因子载荷最大，表明毛竹死亡受最近邻竹的影响最大；最近邻竹株数和角尺度为正载荷，大小比数和竞争指数为负载荷，表明前两者和后两者对毛竹死亡的影响不同。第2主成分中，大小比数的载荷最大，反映立竹在林分中的生长优势程度对毛竹死亡存在重要影响。第3主成分中主要反映了竞争强度对毛竹死亡的影响。主成分分析结果表明：影响毛竹死亡的空间结构指数重要性排序依次为最近邻竹株数>大小比数>竞争指数>角尺度。

4 结论与讨论

本研究以浙江天目山国家级自然保护区毛竹林为研究对象，利用最近邻竹株数、角尺度、大小比数和竞争指数等4个空间结构指数，研究了空间结构与毛竹林更替的关系，为提高毛竹林经营管理水平提供了参考依据。研究表明：各大年活竹、新竹和死竹的最近邻竹株数均为6株，三者角尺度上无显著性差异，均具有相对稳定的聚集分布特征。说明虽然毛竹属散生竹，但其繁殖方式是以母竹为中心向周边发笋长出新竹，新竹分布受竹鞭延伸限制，所以呈现聚集分布；但聚集分布会造成毛竹种内竞争和自然死亡，且这种死亡并不改变其聚集分布特征。显然，毛竹林分布格局与其更替存在密切相关。

在毛竹林经营管理中，应当充分考虑毛竹林更替与空间结构关系，通过砍竹和留笋等措施优化调控毛竹林的空间结构^[25,29]，为毛竹林丰产营造最佳密度、胸径和年龄结构^[30]。本研究结果提示：为减少毛

表 6 各大年毛竹新竹空间结构指数主成分分析

Table 6 Principal component analysis on spatial structure indices of new bamboo in 2010, 2012 and 2014

年份	分量	空间结构指数					贡献率/%	累积贡献率/%
		最近邻竹株数	角尺度	大小比数	竞争指数	特征值		
2010	F_1	0.810	0.748	-0.321	-0.366	1.453	36.32	36.32
	F_2	0.235	0.396	0.701	0.713	1.212	30.30	66.62
	F_3	0.241	-0.261	0.616	-0.540	0.798	19.94	86.57
	F_4	0.481	-0.463	-0.160	0.257	0.537	13.44	100.00
2012	F_1	0.830	0.820	-0.204	-0.020	1.403	35.08	35.08
	F_2	-0.191	0.015	0.638	0.808	1.096	27.40	62.48
	F_3	0.115	-0.286	0.735	-0.547	0.934	23.35	85.83
	F_4	0.512	-0.496	-0.111	0.217	0.567	14.18	100.00
2014	F_1	0.827	0.814	-0.122	-0.252	1.425	35.62	35.62
	F_2	0.167	0.200	0.797	0.826	1.385	34.64	70.26
	F_3	-0.291	0.366	0.450	-0.464	0.636	15.89	86.15
	F_4	0.450	-0.405	0.315	-0.297	0.554	13.85	100.00

表 7 各大年毛竹死竹空间结构指数主成分分析

Table 7 Principal component analysis on spatial structure indices of dead bamboo in 2010, 2012 and 2014

年份	分量	空间结构指数					贡献率/%	累积贡献率/%
		最近邻竹株数	角尺度	大小比数	竞争指数	特征值		
2010	F_1	0.857	0.822	-0.129	-0.291	1.510	37.75	37.75
	F_2	0.139	0.253	0.806	0.769	1.325	33.12	70.87
	F_3	-0.129	0.236	-0.565	0.538	0.680	17.01	87.88
	F_4	0.480	-0.453	-0.120	0.188	0.485	12.12	100.00
2012	F_1	0.846	0.795	-0.230	-0.306	1.494	37.35	37.35
	F_2	0.105	0.348	0.739	0.640	1.088	27.19	64.54
	F_3	0.084	0.001	-0.622	0.704	0.889	22.22	86.75
	F_4	0.516	-0.497	0.121	0.046	0.530	13.25	100.00
2014	F_1	0.844	0.831	0.160	-0.080	1.435	35.87	35.87
	F_2	0.011	-0.087	0.794	0.786	1.255	31.37	67.24
	F_3	-0.035	0.206	-0.582	0.598	0.740	18.50	85.74
	F_4	-0.535	0.510	0.138	-0.073	0.570	14.26	100.00

竹生长过程中的自然损耗, 为毛竹生长创造有利条件, 应对毛竹林高密度区域进行疏伐(最近邻竹株数 > 7 株); 对处于受压状态的毛竹, 还应提早采伐; 维持毛竹林适当的竞争强度, 可避免因种内竞争激烈而导致毛竹减产。毛竹林在生长过程中受多因素的影响, 实际上, 环境因子如地形因子、土壤因子、植被因子等都影响毛竹林的更替, 因此, 结合立地条件分析毛竹林空间与更替的关系有待进一步研究。

5 参考文献

- [1] 刘珉. 多角度解读第 8 次全国森林资源清查结果[J]. 林业经济, 2014(5): 3 - 15.
LIU Min. Study on the 8th national forest inventory from multiple perspective [J]. *For Econ*, 2014(5): 3 - 15.
- [2] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J]. 林业科学, 2004, 40(6): 20 - 24.
ZHOU Guomo, JIANG Peikun. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, 40(6): 20 - 24.
- [3] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹、杉木人工林生态系统碳平衡估算[J]. 林业科学, 2010, 46(11): 59 - 65.
XIAO Fuming, FAN Shaohui, WANG Silong, et al. Estimation of the carbon balance in Moso bamboo and Chinese fir

- plantation ecosystem [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46**(11): 59 – 65.
- [4] 漆良华, 刘广路, 范少辉, 等. 不同抚育措施对闽西毛竹林碳密度、碳贮量与碳格局的影响[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(8): 1482 – 1488.
QI Lianghua, LIU Guanglu, FAN Shaohui, *et al.* Effects of different tending measures on carbon density, storage, and allocation pattern of *Phyllostachy edulis* forests in western Fujian Province [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28**(8): 1482 – 1488.
- [5] PRETZSCH H. Analysis and modeling of spatial stand structures: methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony [J]. *For Ecol Manage*, 1997, **97**(3): 237 – 253.
- [6] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. 林分择伐空间结构优化模型研究[J]. 林业科学, 2004, **40**(5): 25 – 31.
TANG Mengping, TANG Shouzheng, LEI Xiangdong, *et al.* Study on spatial structure optimizing model of stand selection cutting [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(5): 25 – 31.
- [7] AGUIRRE O, HUI Gangying, GADOW K, *et al.* An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables [J]. *For Ecol Manage*, 2003, **183**(1/3): 137 – 145.
- [8] 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 Mengping. Advances in study of forest spatial structure [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46**(1): 117 – 122.
- [9] 郑进短, 董文渊, 陈冲, 等. 海子坪天然毛竹种群生长规律研究[J]. 竹子研究汇刊, 2008, **27**(2): 32 – 37.
ZHENG Jinxuan, DONG Wenyuan, CHEN Chong, *et al.* Studies on the growth and rhythm of natural moso bamboo population in Haiziping [J]. *J Bamboo Res*, 2008, **27**(2): 32 – 37.
- [10] 贾秀红, 郑小贤. 长白山过伐林区云冷杉针阔混交林空间结构分析[J]. 华中农业大学学报, 2006, **25**(4): 436 – 440.
JIA Xiuhong, ZHENG Xiaoxian. Analysis on the spatial structure of the spruce-fir mixed stands of coniferous and broad-leaved trees in the over-logged forest [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2006, **25**(4): 436 – 440.
- [11] 毛磊, 王冬梅, 杨晓晖, 等. 樟子松幼树在不同林分结构中的空间分布及其更新分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30**(6): 71 – 77.
MAO Lei, WANG Dongmei, YANG Xiaohui, *et al.* Spatial patterns of young *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings and their regeneration analysis in different stands of Inner Mongolia, northern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30**(6): 71 – 77.
- [12] 席青虎, 铁牛, 淑梅, 等. 寒温带兴安落叶松林天然更新研究[J]. 林业资源管理, 2009(1): 44 – 48.
XI Qinghu, TIE Niu, SHU Mei, *et al.* Study on natural regeneration of *Larix gmelinii* in cold-temperate zone [J]. *For Resour Manage*, 2009(1): 44 – 48.
- [13] 汤孟平, 周国模, 陈永刚, 等. 基于 Voronoi 图的天目山常绿阔叶林混交度[J]. 林业科学, 2009, **45**(6): 1 – 5.
TANG Mengping, ZHOU Guomo, CHEN Yonggang, *et al.* Mingling of evergreen broad-leaved forests in Tianmu Mountain based on Voronoi diagram [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(6): 1 – 5.
- [14] 仇建习, 汤孟平, 沈利芬, 等. 天目山近自然毛竹林空间结构与胸径的关系[J]. 生态学报, 2015, **35**(12): 4081 – 4088.
QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, *et al.* The relationship between spatial structure and DBH of close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands in Tianmu Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(12): 4081 – 4088.
- [15] 丁丽霞, 王祖良, 周国模, 等. 天目山国家级自然保护区毛竹林扩张遥感监测[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23**(3): 297 – 300.
DING Lixia, WANG Zuliang, ZHOU Guomo, *et al.* Monitoring *Phyllostachys pubescens* stands expansion in National Nature Reserve of Mount Tianmu by remote sensing [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23**(3): 297 – 300.
- [16] 陈新安. 毛竹林大小年生长规律探讨[J]. 中南林业调查规划, 2010, **29**(1): 21 – 23.
CHEN Xin'an. Discussion on the growth regulation of on-year and off-year moso bamboo [J]. *Cent South For Inv Plan*, 2010, **29**(1): 21 – 23.
- [17] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争[J]. 生态学报, 2007, **27**(11): 4707 – 4716.
TANG Mengping, CHEN Yonggang, SHI Yongjun, *et al.* Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(11): 4707 – 4716.

- [18] GADOOW K V, HUI Gangying, ALBERT M. Das Winkelmaß-ein strukturparameter zur beschreibung der individualverteilung in Waldbeständen [J]. *Centr Ges For*, 1998, **115**(1): 1 – 9.
- [19] POMMERENING A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **224**(3): 266 – 277.
- [20] POMMERENING A, STOYAN D. Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure [J]. *Can J For Res*, 2006, **36**(7): 1723 – 1739.
- [21] 惠刚盈, von GADOW K, ALBERT M. 一个新的林分空间结构参数: 大小比数[J]. 林业科学研究, 1999, **12**(1): 1 – 6.
HUI Gangying, von GADOW K, ALBERT M. A new parameter for stand spatial structure: neighborhood comparison [J]. *For Res*, 1999, **12**(1): 1 – 6.
- [22] 赵中华, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 基于大小比数的林分空间优势度表达方法及其应用[J]. 北京林业大学学报, 2014, **36**(1): 78 – 82.
ZHAO Zhonghua, HUI Gangying, HU Yanbo, *et al.* Method and application of stand spatial advantage degree based on the neighborhood comparison [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, **36**(1): 78 – 82.
- [23] 辛营营, 韦新良. 青山湖针阔混交林优势树种竞争的数量研究[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(4): 601 – 606.
XIN Yingying, WEI Xinliang. Dominance in a mixed conifer and broadleaved forest of Qingshan Lake, Zhejiang [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(4): 601 – 606.
- [24] HEGYI F. A simulation model for managing Jack-pine stands [G]//FRIES J. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974: 74 – 90.
- [25] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 等. 天目山近自然毛竹林空间结构与生物量的关系[J]. 林业科学, 2011, **47**(8): 1 – 6.
TANG Mengping, XU Wenbing, CHEN Yonggang, *et al.* Relationship between spatial structure and biomass of a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stand in Tianmu Mountain [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(8): 1 – 6.
- [26] 李际平, 封尧, 赵春燕, 等. 基于 Voronoi 图的角尺度分析方法探讨: 以湖南省平江县福寿林场为例[J]. 林业资源管理, 2015(4): 33 – 38.
LI Jiping, FENG Yao, ZHAO Chunyan, *et al.* Discussion on the analysis method of uniform angle index based on Voronoi diagram: take Fushou Forest Farm as an example [J]. *For Resour Manage*, 2015(4): 33 – 38.
- [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.
WANG Wei, HU Kai, WU Dongqin, *et al.* Studies on the ramet population structure of the clonal moso bamboo in Chongqing [J]. *J Bamboo Res*, 2008, **27**(2): 16 – 20.
- [28] 黄丽霞, 袁位高, 黄建花, 等. 不同经营方式下毛竹林的林分空间结构比较研究[J]. 浙江林业科技, 2008, **28**(3): 48 – 51.
HUANG Lixia, YUAN Weigao, HUANG Jianhua, *et al.* Comparative study on spatial structure of *Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens* stand with different management [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2008, **28**(3): 48 – 51.
- [29] 曹流清, 李晓凤. 毛竹大径材培育技术研究[J]. 竹子研究汇刊, 2003, **22**(4): 34 – 41.
CAO Liuqing, LI Xiaofeng. Research on cultivation technology of big-diameter bamboo [J]. *J Bamboo Res*, 2003, **22**(4): 34 – 41.
- [30] 郑郁善, 洪伟. 毛竹林丰产年龄结构模型与应用研究[J]. 林业科学, 1998, **34**(3): 32 – 39.
ZHENG Yushan, HONG Wei. A study on age structure model of bamboo stand and its application [J]. *Sci Silv Sin*, 1998, **34**(3): 32 – 39.