

天目山毛竹竞争空间格局的动态分析

唐思嘉^{1,2}, 汤孟平^{1,2}, 赵赛赛^{1,2}, 杜秀芳^{1,2}, 沈钱勇^{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. 浙江省天目山国家级自然保护区管理局, 浙江 杭州 311311)

摘要: 毛竹 *Phyllostachys edulis* 具有速生和异龄纯林结构特征, 导致毛竹林内竞争十分激烈。现有研究较少关注毛竹林内个体竞争依赖距离尺度的空间异质性及其动态。以浙江天目山国家级自然保护区内毛竹为研究对象, 利用2009–2015年固定样地连续调查数据, 采用Hegyi竞争指数、半方差函数、Moran's *I*指数、经验贝叶斯克里金插值等分析方法, 研究毛竹竞争空间格局特征及其动态变化。结果表明: ①毛竹各年竞争指数空间分布均呈现全局一般正向自相关($P < 0.001$), 竞争强度相近的竹子相邻分布。②毛竹竞争指数由结构性因素产生强烈空间变异。③受微地形影响, 毛竹竞争指数空间格局变异存在各向异性, 而极端气候干扰会降低竞争的空间异质性, 竞争指数空间格局变异趋于各向同性。④毛竹竞争变程大年长而小年短, 平均变程4.306 m, 可作为毛竹竞争单元半径及调控毛竹个体竞争关系的距离尺度。⑤毛竹从小年到大年时竞争加剧, 从大年到小年时竞争缓和。图6表5参27

关键词: 森林生态学; 毛竹; 竞争指数; 空间异质性; 空间自相关

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)02-0199-10

Competitive spatial patterns for Moso bamboo on Mount Tianmu

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

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

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

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

Abstract: Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) stands, one of the most economic forest-types in China, possess many advantages over other types, such as rapid growth, wide distribution, and high production. Much research on competition of Moso bamboo, such as intraspecific and interspecific competition, the relationship between biomass and competition, and improvements of competition index, has been conducted, but this study focused on spatial variability and its dynamic analysis of bamboo competition in distance scale dependence, which has been neglected. Based on data collected from 2009–2015 in the Moso bamboo stand of Tianmu Mountain National Nature Reserve of Zhejiang Province, the Hegyi Competition Index (CI) was calculated based on Geographic Information System (GIS). Spatial semivariogram was used to analyze the auto-correlation range of CI and its anisotropy. Also Moran's *I* and Empirical Bayesian Kriging (EBK) were used to describe dynamic changes in the competitive spatial pattern. Results showed that spatial distribution of CI for Moso bamboo had a significant general global autocorrelation ($P < 0.001$). Bamboos of the same competitive intensity were distributed evenly. Also, Moso bamboo stands had strong spatial variation due to their structural features. The CI spatial pattern, influenced by micro topography, existing anisotropy, and an extreme climate, reduced spatial

收稿日期: 2017-03-04; 修回日期: 2017-03-30

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

heterogeneity and was inclined to be isotropic. The competition range appeared inverse to change in the on-year and off-year growth cycles with the average range being 4.306 m. This range could be used as the distance scale for the basis of determining competition unit radius and for control of the Moso bamboo competitive relationship. Even though Moso bamboo competition increased from off-years to on-years, its competition lessened from on-years to off-years. These research results could provide a reference for adjusting and controlling the competitive relationships in Moso bamboo stand management. [Ch, 6 fig. 5 tab. 27 ref]

Key words: forest ecology; Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*); competition index; spatial heterogeneity; spatial autocorrelation

空间异质性(spatial heterogeneity)普遍存在于景观的各个尺度上^[1]。由于森林生态系统中环境因素(地形、地貌、光照、水分和土壤养分等)分布的不均匀性,以及长期存在于种群间和个体间的竞争排斥作用,使得植被个体、种群和群落在不同尺度上呈现出空间异质性^[2]。地统计方法是分析空间异质性的有效方法。NICOTRA等^[3]采用地统计方法研究哥斯达黎加东北部热带雨林受空间自相关控制的有效光与森林更新之间的关系。ABBOTT等^[4]研究了土壤微生物的空间异质性与植被竞争之间的关系。曾春阳等^[2]为评价江西枫树山林场杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林的立地质量,利用地统计方法分析杉木立地指数的空间分布。杜华强等^[5]利用半方差函数模型分析了天目山常绿阔叶林土壤有机质、全氮、有效氮、有效磷和速效钾的空间异质性。在环境因素一定的条件下,竞争是产生植被个体属性差异的重要因素^[6],但是长期以来,植物竞争研究侧重于分析植物种内和种间竞争关系^[7-11],较少关注植物竞争的空间异质性。毛竹 *Phyllostachys edulis* 是中国数量最多,分布面积最大,用途最广泛,价值最高的经济竹种^[12]。毛竹具有速生的特点,导致毛竹林内个体的竞争十分激烈。毛竹林依赖多年生竹鞭发笋进行更新,形成异龄纯林结构特征,更加剧了毛竹林种内的竞争。近年来,对毛竹的竞争开展了大量研究,包括毛竹之间的竞争关系^[13]、毛竹与生物量的竞争关系^[14]、毛竹种群向常绿阔叶林的扩张^[15]以及改进竞争指数^[16]。但是,这些研究较少关注毛竹竞争依赖距离尺度的空间异质性及其动态特征。为此,本研究利用2009-2015年浙江天目山国家级自然保护区长期未受人为干预的毛竹林固定样地调查数据,以基于Voronoi图的Hegyí竞争指数、半方差函数拟合、各向异性与空间自相关分析、经验贝叶斯克里金插值等空间分析技术,定量地研究毛竹林竞争空间格局特征及其动态变化,确定毛竹竞争变程距离尺度,揭示毛竹竞争空间格局变异与地形因子的关系,为毛竹林经营中调控竞争关系提供理论依据。

1 研究区概况与样地设置

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(119°23'47"~119°28'55"N),总面积为1 050 hm²,主峰海拔为1 506 m。年平均气温为8.8~14.8℃,年降水量为1 390.0~1 870.0 mm,相对湿度为76%~81%。该自然保护区受海洋暖湿气候影响,森林植被丰茂,植被分布呈垂直带状分布。毛竹林主要分布在海拔350~900 m的地区,区内的毛竹林很少有人为干扰,毛竹生长状况接近自然状态^[17]。

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,建立了1块大小为100 m×100 m的固定样地,样地中心海拔为840 m,主坡向南偏东30°,最高处海拔为886 m,最低处海拔为810 m,高差为76 m,平均坡度为37°(图1)。利用南方全站仪NTS355设定样地的坐标轴,采用相邻网格法将整个样地划分为100个10 m×10 m的样方。用全站仪测定样地内每株毛竹的基部三维坐标(x, y, z)。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月对毛竹林固定样地内新笋进行地径调查,7月对样地进行复查,记录各年毛竹更新情况。2009, 2011, 2013和2015年为小年,2010, 2012和2014年为大年。

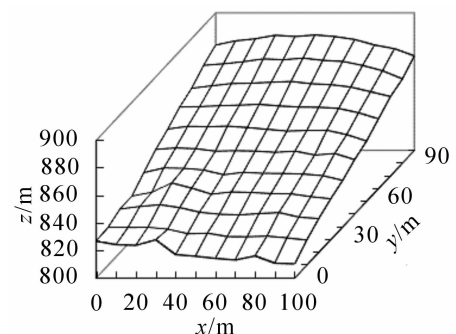


图1 1 hm²样地三维地形图
Figure 1 3D map of the 1 hm² plot

2 研究方法

2.1 边缘校正

为了避免样地界外毛竹可能是样地内毛竹的最近邻竹的情况，对样地进行边缘校正。采用八邻域平移式边缘校正，使样地内所有毛竹作为对象竹和竞争竹处理，进行竞争指数计算。

2.2 竞争单元确定与竞争指数计算

用 Voronoi 图确定由对象竹与竞争竹组成的竞争单元^[10]。根据 Voronoi 图特征，每个 Voronoi 多边形内仅包含 1 株毛竹。对象竹所在的 Voronoi 多边形的相邻 Voronoi 多边形内的毛竹就是竞争竹。可以看出，对象竹的竞争竹株数与相邻 Voronoi 多边形的个数相等(图 2)。

毛竹竞争关系分析选择常用的 Hegyi 竞争指数，计算公式详见参考文献[7]。

2.3 半方差函数和空间异质性

半方差函数(semivariogram)是研究区域化变量空间异质性的常用地统计学方法，其计算要求数据符合正态分布^[18]，若不符合正态分布则进行博克斯-考克斯(Box-Cox)转换，使其呈正态分布后进行半方差函数计算。半方差函数计算公式为：

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

式(1)中： $\gamma(\hat{h})$ 为半方差 $\gamma(h)$ 的估计值； h 为样本间距； $N(h)$ 是间距为 h 的样本对； $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 是区域化变量 $Z(x)$ 在点 x_i 和 x_i+h 上的值。

根据半方差函数理论模型的参数块金值 C_0 ，变程 A 和基台值 C_0+C ，可以推知空间格局的类型及评估变量的随机性和结构性所占的成分，测定空间依赖范围。空间结构比 $C/(C_0+C)$ 反映了空间变异程度，可划分为 3 个级别：微弱 (<25%)，中等 (25%~75%)，强烈 (>75%)^[2]。

微地形对毛竹个体分布有直接影响^[19]，所以毛竹在不同方向上的竞争空间格局可能存在各向异性。绘制各年毛竹竞争指数空间变异半方差图，若不同方向所得最大变程不同，则说明研究对象具有各向异性特征^[20]，选择拥有最大变程 A_0 方向作为半方差模型优势方向。

本研究的半方差函数理论模型数据处理采用 GS+ 软件完成。

2.4 竞争指数空间自相关和经验贝叶斯克里金插值

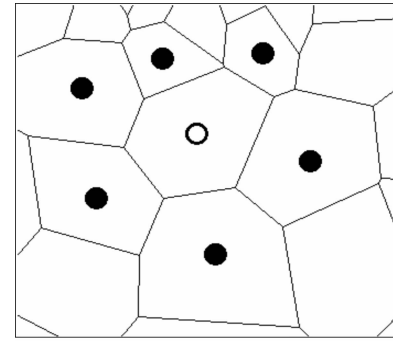
通过空间自相关分析可确定变量是否在空间上相关及相关程度如何。Moran's I 指数是用于全局衡量位置接近性和属性相似的数量指标，能够很好地表现总体空间趋势，对空间自相关进行全局评估。其详细计算公式参见文献[21]。Moran's I 指数的取值在 -1 和 1 之间：小于 0 表示负相关，等于 0 表示不相关，大于 0 表示正相关。

为直观了解各年毛竹竞争空间格局动态特征，采用经验贝叶斯克里金插值法绘制竞争指数空间分布格局图。本研究按子集大小 500，重叠系数 1 以及 1 000 次模拟参数设定在 Arc GIS 10.2 软件进行经验贝叶斯克里金插值，对生成的竞争指数空间分布格局图进行栅格化处理，并用栅格计算器将当年竞争指数插值栅格图减上年竞争指数插值栅格图得到年度毛竹竞争指数增量栅格数据，增量为正加剧竞争，增量为负缓和竞争，再进行竞争格局变化统计分析，获得竞争加剧面积与竞争缓和面积，判断各年度竞争变化趋势。

3 结果与分析

3.1 竞争指数统计分析

从表 1 可以看出：2009-2015 年，天目山毛竹林竞争指数为 1.203~18.442，平均值为 6.415。各年竞争指数变异系数为 35.62%~40.80%，平均变异系数为 38.69%。表明毛竹竞争指数具有中等程度的空间



○ 对象竹 ● 竞争竹

图 2 基于 Voronoi 图的竞争单元

Figure 2 Competition unit based on Voronoi diagram

离散。

经过数据正态性检验,各年竞争指数分布均正偏,不符合正态分布要求。为此,对竞争指数进行统一 λ 参数的正态转换,经检验各年竞争指数符合正态分布要求。

表1 各年毛竹竞争指数统计特征

Table 1 Statistical summary of competition index in each year

年份	株数/株	竞争指数				偏度	P值	P*值
		平均值	最小值	最大值	变异系数/%			
2009	5 406	6.579	1.203	14.599	35.62	1.071	0.000	0.564
2010	6 238	6.569	1.203	17.582	38.09	1.305	0.000	0.682
2011	5 906	6.279	1.488	17.479	37.13	1.350	0.000	0.441
2012	5 964	6.355	1.522	17.737	39.40	1.406	0.000	0.488
2013	5 690	6.212	1.587	17.701	39.02	1.411	0.000	0.161
2014	6 032	6.432	1.618	18.442	40.80	1.453	0.000	0.100
2015	5 942	6.477	1.333	18.426	40.69	1.404	0.000	0.127
平均		6.415	1.422	17.440	38.69			

说明: P是转换前竞争指数的正态检验概率值, P*是经正态转换后竞争指数的正态检验概率值

3.2 竞争指数空间自相关分析

根据各年毛竹点坐标和竞争指数,进行竞争指数空间自相关 Moran's I 指数计算并作显著性检验(表2)。从表2可见:各年毛竹竞争指数空间分布均呈现全局一般正向自相关($P < 0.001$)。Moran's I 值为0.197 5~0.251 7,说明毛竹竞争指数呈现竞争聚集分布,即竞争强度相近的竹子相邻分布。

表2 各年毛竹竞争指数空间自相关表

Table 2 Spatial autocorrelation of competition index of bamboo in each year

年份	I值	P值	年份	I值	P值
2009	0.218 0	<0.001	2013	0.226 5	<0.001
2010	0.197 5	<0.001	2014	0.220 7	<0.001
2011	0.251 7	<0.001	2015	0.214 0	<0.001
2012	0.220 7	<0.001			

为了直观分析毛竹竞争指数呈现空间聚集分布特征,对经正态转化的竞争指数通过经验贝叶斯克里金插值法,绘制出各年毛竹林竞争指数插值图(图3)。由图3可见:样地内毛竹竞争格局总体上呈现上部竞争强度大、下部竞争强度小的特征。根据样地的海拔高度(810~886 m),划分为3个海拔范围:下部(810~835 m),中部(835~860 m),上部(860~886 m),对不同海拔范围的毛竹胸径进行分区统计分析(表3)。结合图3和表3可见:随着坡位海拔上升,毛竹平均胸径减小而变异系数增大。毛竹竞争强度随海拔上升逐渐增强且竞争强度相近的毛竹从点状分布格局逐渐形成以水平带状、垂直复杂斑块状分布格局,符合毛竹竞争指数空间异质性与竞争聚集分布特征。样地下部毛竹株数少,对象竹与竞争竹的竞争距离大,平均胸径大且变异系数小,缓和了竞争,呈现弱竞争聚集格局;样地上部毛竹株数多,对象竹与竞争竹的竞争距离小,胸径随海拔上升而平均胸径变小,但变异系数增大,加剧了竞争压力,呈现强竞争聚集格局。

3.3 竞争指数空间异质性分析

采用半方差函数对天目山毛竹各年竞争指数进行拟合,分析竞争指数的空间异质性。根据决定系数 R^2 确定最优理论模型(表4)。结果表明:各年毛竹竞争指数可用指数模型进行描述,各模型决定系数 R^2 为0.971~0.979。结构比为81.78%~89.79%,均在75%以上,表明毛竹竞争指数空间变异强烈,引起空间变异的主要因素是结构性因素。各年毛竹竞争指数各向异性优势方位角为 88° ,即东西方向是维持毛竹稳定竞争关系的方向。各年毛竹竞争指数半方差模型变程存在与大小年相反的长短交替现象,最大值为4.581 m(2011年),最小值为4.059 m(2014年),平均为4.306 m。根据毛竹竞争空间变异特征,以4.306 m作为毛竹的竞争单元半径及调控毛竹竞争关系的距离尺度比较合适。

表 3 各海拔范围毛竹胸径统计特征

Table 3 Statistical summary of diameter at breast height of bamboo in altitude

海拔范围	胸径均值/cm	最小值/cm	最大值/cm	变异系数/%	株数/株
上部	10.40	3.3	19.3	18.29	2 932
中部	10.87	1.2	17.0	15.21	3 979
下部	11.34	3.1	22.0	14.22	2 521

说明：株数包含各年死亡毛竹

表 4 各年毛竹竞争指数半方差模型相关参数

Table 4 Parameters of semivariogram model of competition index of bamboo in each year

年份	模型	块金值	基台值	结构比/%	变程/m	各向异性/(°)	决定系数
2009	指数模型	0.007 2	0.055 8	88.71	4.467	90	0.971
2010	指数模型	0.012 7	0.057 0	81.78	4.068	86	0.977
2011	指数模型	0.007 0	0.054 5	88.62	4.581	90	0.976
2012	指数模型	0.010 8	0.060 0	84.75	4.170	86	0.976
2013	指数模型	0.006 7	0.058 9	89.79	4.474	91	0.979
2014	指数模型	0.010 2	0.062 9	86.05	4.059	89	0.977
2015	指数模型	0.010 9	0.064 9	85.62	4.322	86	0.974
平均					4.306	88	

绘制各年毛竹竞争指数空间异质性与海拔高度变化各向异性半方差图，可进一步分析毛竹竞争指数与地形的关系(图 4)。从图 4 可见：竞争指数与海拔高度的各向异性主方向一致，呈现出各年毛竹竞争指数在东西方向上半方差变异较小，而在南北方向上随海拔高度变异较大的带状分布特征。毛竹竞争指数空间变异受以海拔为主导因子的微地形影响而存在各向异性。

由图 4 看出：2013 年毛竹竞争有趋于匀质的特征。为分析其原因，采用自然断裂法把竞争指数 I_c 划分为低($I_c < 1.290 1$)，中($1.290 1 \leq I_c < 1.596 9$)，高($I_c \geq 1.596 9$)3 个竞争强度等级，对不同竞争强度等级下各年毛竹死亡株数进行方差分析(图 5 和图 6)。方差分析表明：高竞争强度毛竹死亡比例与其他竞争强度的毛竹死亡比例存在显著差异($P < 0.05$)，而低竞争强度与中竞争强度毛竹死亡比例差异不显著(图 5)；2012–2013 和 2013–2014 年度，高竞争强度下毛竹死亡比例明显大于其他竞争强度的死亡比例，竞争指数空间变异趋于各向同性，而其他年度不同竞争强度等级毛竹死亡比例呈阶梯状排列，竞争指数空间变异保持各向异性(图 6)。

3.4 竞争指数空间格局动态变化特征

分析毛竹竞争空间格局的动态变化，可以掌握毛竹竞争关系的发展趋势。对图 3 各年毛竹竞争指数插值分布图进行栅格化处理，再用栅格计算器获取年度毛竹竞争指数增量栅格数据，并进行竞争格局变化统计分析(表 5)。从表 5 可见：从小年到大年时，毛竹竞争加剧；大年到小年时，毛竹竞争缓和。特别地，2009–2010 年毛竹林竞争加剧面积及 2010–2011 年竞争缓和面积明显大于其余各年，这是因为 2008 年末和 2011 年初 2 次大雪使得毛竹林密度有较大减少，且 2009 年和 2011 年是毛竹林小年，林内少有新竹生长，所以从小年到年大的 2009–2010 年竞争加剧面积和大年到小年的 2010–2011 年竞争缓和面积明显大于其余各年。此外，毛竹平均竞争指数增量为正，且平均竞争加剧面积大于竞争缓和面积，毛竹竞争强度总体趋向加剧。

4 结论与讨论

本研究以浙江天目山毛竹为研究对象，采用半方差函数拟合、空间自相关与各向异性分析、经验贝叶斯克里金插值等空间分析技术，分析了天目山毛竹竞争指数空间格局及其动态变化特征，为提高毛竹经营管理水平提供科学依据。

研究表明：更新和自然干扰是毛竹竞争强度变化的主要因素。毛竹生长从小年到大年，竞争加剧，从大年到小年，竞争缓和，其竞争变程存在与大小年相反的长短交替现象；毛竹林生境的异质性对其竞争指数空间变异存在影响，而极端气候等的自然干扰促使毛竹竞争空间变异趋于各向同性。受毛竹

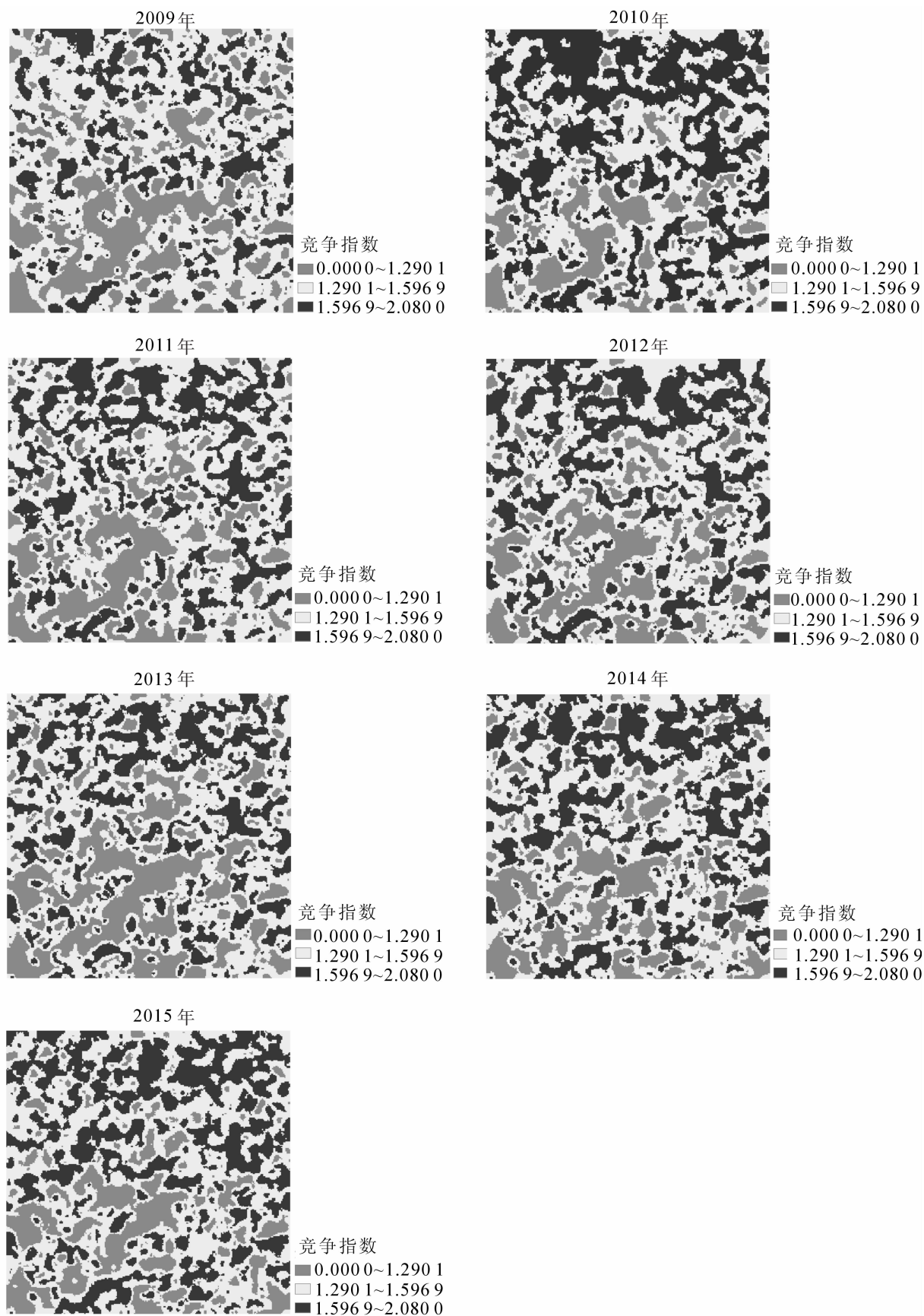


图3 经验贝叶斯克里金插值预测的各年毛竹竞争指数空间分布图
Figure 3 Spatial distribution pattern of competition index by Empirical Bayesian Kriging

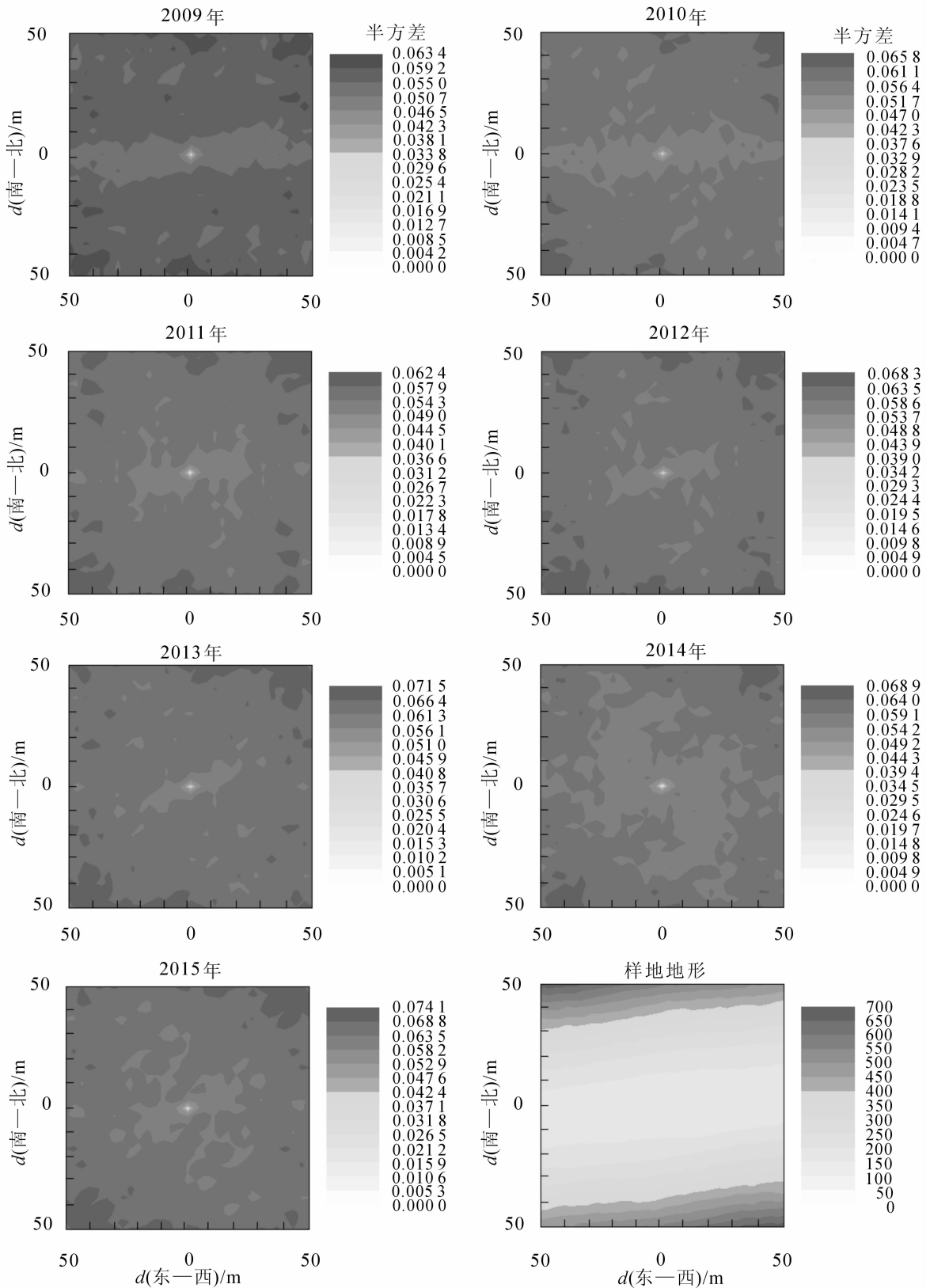


图 4 毛竹竞争指数与样地地形变化半方差图

Figure 4 Variogram maps of competition index of bamboo and plot topography

繁殖方式的影响，毛竹各年竞争指数空间分布存在一般正相关且呈聚集分布，竞争强度相近的竹子相邻分布。以往研究认为：干扰通过对林内光照、水分、土壤和微地形产生影响，改变了干扰生境的异质性，从而影响植被竞争关系^[22-23]。本研究中，2011年研究区遭受的雪灾在短时间内造成了大量毛竹死亡，降低了林分整体的竞争强度，但并未改变毛竹林内部不同竞争强度的关系，因此维持了毛竹竞争指

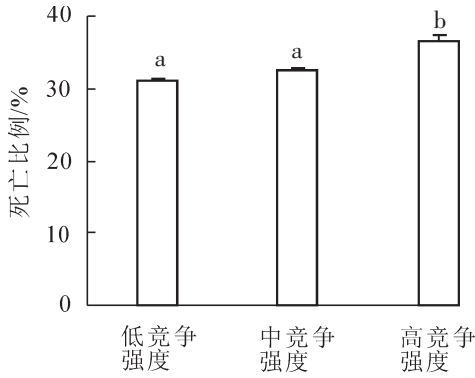


图5 不同竞争强度等级毛竹死亡比例差异

Figure 5 Difference of proportion of death under different competitive intensities

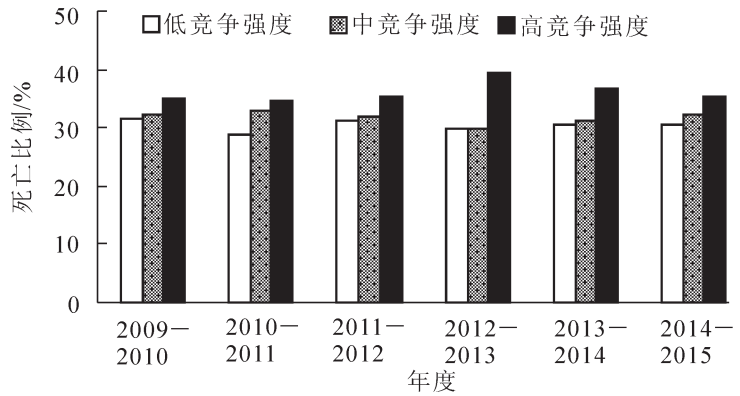


图6 不同竞争强度等级毛竹死亡比例的各年统计

Figure 6 Statistical summary of proportion of death under different competitive intensities

表5 逐年竞争空间格局动态栅格统计表

Table 5 Statistical summary of changed pixel of raster data through the years

年度	平均竞争指数 变化量	竞争加剧面积/ m ²	竞争缓和面积/ m ²	年度	平均竞争指数 变化量	竞争加剧面积/ m ²	竞争缓和面积/ m ²
2009-2010	0.072 0	8 415.26	1 584.74	2013-2014	0.025 5	6 191.17	3 808.83
2010-2011	-0.035 4	2 712.97	7 287.03	2014-2015	-0.004 5	4 685.20	5 314.80
2011-2012	0.012 4	5 424.52	4 575.48	平均趋势	0.007 8	5 148.60	4 851.40
2012-2013	-0.022 9	3 462.48	6 537.52				

说明：总体竞争均值是经正态转换之后的竞争指数

数空间变异的异质性。而2013年，研究区遭遇的极端干旱气候对毛竹林内水分等条件产生了影响，加剧毛竹个体间对水分的竞争，高竞争强度下的毛竹更易死亡^[24-25]，而该年是毛竹更新小年，使得原本主要受地形影响呈现各向异性的竞争指数空间变异趋于各向同性，降低了毛竹林竞争关系的异质性。当林内恢复正常水分等条件时，毛竹竞争指数的空间变异再次呈现各向异性。表明，不同的自然干扰对毛竹竞争关系的影响是不同的。

地理信息系统(GIS)有强大的空间分析功能^[26]，利用空间插值方法可以直观展示毛竹林竞争指数空间分布状况。在经营管理中，对竞争强度大的地方进行砍竹，对竞争强度弱的地方留笋养竹，优化调控毛竹林空间结构^[27]，达到提高毛竹林产量的目的。

周隽等^[6]发现天然次生林中林木竞争指数变程为12.400 m，远大于树木的间距。本研究的毛竹竞争指数变程为4.306 m，小于乔木的竞争指数变程。这是因为毛竹以地下竹鞭发笋繁殖，地上散生的竹子通过地下庞大而复杂的鞭根系统相连，其竞争关系不仅存在于地上部分，地下部分对毛竹竞争也有影响。

本研究在100 m × 100 m的范围内对毛竹竞争空间格局的异质性进行了分析。采用地统计学方法分析时，研究尺度的变化对研究结果存在影响。因此，在不同的尺度上对毛竹的竞争异质性特征有待进一步研究。

5 参考文献

[1] WU Jianguo, JELINSKI D E, LUCK M, et al. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics [J]. *Geogr Inf Sci*, 2000, 6(1): 6 - 19.

[2] 曾春阳, 唐代生, 唐嘉锴. 森林立地指数的地统计学空间分析[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3465 - 3471. ZENG Chunyang, TANG Daisheng, TANG Jiakai. Spatial pattern analysis of forest ecosystem site index using geostatistical technology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(13): 3465 - 3471.

[3] NICOTRA A B, CHAZDON R L, IRIARTE S V B. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests [J]. *Ecology*, 1999, 80(6):1908 - 1926.

- [4] ABBOTT K C, KARST J, BIEDERMAN L A, *et al.* Spatial heterogeneity in soil microbes alters outcomes of plant competition [J]. *PLoS One*, 2014, **10**(5): e0125788. doi: 10.1371/journal.pone.0125788.
- [5] 杜华强, 汤孟平, 崔瑞蕊. 天目山常绿阔叶林土壤养分的空间异质性[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(4): 562 – 568.
DU Huaqiang, TANG Mengping, CUI Ruirui. Spatial heterogeneity of soil nutrients in an evergreen broadleaved forest of Mount Tianmu, Zhejiang [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(4): 562 – 568.
- [6] 周隽, 国庆喜. 林木竞争指数空间格局的地统计学分析[J]. 东北林业大学学报, 2007, **35**(9): 42 – 44.
ZHOU Jun, GUO Qingxi. Geostatistical analysis on spatial pattern of competition index [J]. *J Northeast For Univ*, 2007, **35**(9): 42 – 44.
- [7] 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.
- [8] 邹春静, 韩士杰, 张军辉. 阔叶红松林树种间竞争关系及其营林意义[J]. 生态学报, 2001, **20**(4): 35 – 38.
ZOU Chunjing, HAN Shijie, ZHANG Junhui. Competition relationship among tree species in broad-leaved Korean pine mixed forest and its significance for managing the forest [J]. *Chin J Ecol*, **20**(4): 35 – 38.
- [9] 桑卫国. 用动态模型研究森林群落中物种间的竞争[J]. 生态学报, 2001, **21**(11): 1802 – 1807.
SANG Weiguo. Simulation competition between trees of two species by using forest dynamics model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21**(11): 1802 – 1807.
- [10] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于 Voronoi 图的群落优势树种内种间竞争[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.
- [11] 项小燕, 吴甘霖, 段仁燕, 等. 大别山五针松种内和种间竞争强度[J]. 生态学报, 2015, **35**(2): 389 – 395.
XIANG Xiaoyan, WU Ganlin, DUAN Renyan, *et al.* Intraspecific and interspecific competition of *Pinus dabeshanensis* [J]. *Acta Ecol Sin*, **35**(2): 389 – 395.
- [12] 李雪涛, 金爱武, 李国栋, 等. 毛竹低产低效林的经营策略研究[J]. 竹子研究汇刊, 2012, **31**(2): 47 – 51.
LI Xuetao, JIN Aiwu, LI Guodong, *et al.* Management strategies to transform the low-yield or low-efficiency moso bamboo forests [J]. *J Bamboo Res*, 2012, **31**(2): 47 – 51.
- [13] 邓英英, 汤孟平, 徐文兵, 等. 天目山近自然毛竹纯林的竹秆空间结构特征[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(2): 173 – 179.
DENG Yingying, TANG Mengping, XU Wenbing, *et al.* Spatial structure of bamboo culm of an almost natural, pure *Phyllostachys pubescens* forest in Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(2): 173 – 179.
- [14] 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.
- [15] 刘骏, 杨清培, 宋庆妮, 等. 毛竹种群向常绿阔叶林扩张的细根策略[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(3): 230 – 238.
LIU Jun, YANG Qingpei, SONG Qingni, *et al.* Strategy of fine root expansion of *Phyllostachys pubescens* population into evergreen broad-leaved forest [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, **37**(3): 230 – 238.
- [16] 仇建习, 汤孟平, 娄明华, 等. 基于 Hegyi 改进模型的毛竹林空间结构和竞争分析[J]. 生态学报, 2016, **36**(4): 1058 – 1065.
QIU Jianxi, TANG Mengping, LOU Minghua, *et al.* Analysis of the spatial structure and competition with a *Phyllostachys edulis* stand based on an improved Hegyi model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(4): 1058 – 1065.
- [17] 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.
- [18] 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 Yiming, TANG Shouzheng, LI Zengyuan. Application of spatial statistic analysis in forestry [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(3): 149 – 155.

- [19] 罗君, 周维, 覃超发, 等. 元谋干热河谷冲沟区植被对微地形的响应[J]. 山地学报, 2012, **30**(5): 535 – 542.
LUO Jun, ZHOU Wei, QIN Chaofa, *et al.* Response of vegetation to micro-topography in the gullied area of Yuanmou dry-hot valley [J]. *J Mt Sci*, 2012, **30**(5): 535 – 542.
- [20] EBDON D. *Statistics in Geography* [M]. Blackwell: Oxford, 1985.
- [21] FU Weijun, JIANG Peikun, ZHOU Guomo, *et al.* Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China [J]. *Biogeosciences*, 2014, **11**(8): 2401 – 2409.
- [22] 赵维俊, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山青海云杉林群落结构的空間异质性[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(9): 2591 – 2599.
ZHAO Weijun, LIU Xiande, JING Wenmao, *et al.* Spatial heterogeneity of community structure of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(9): 2591 – 2599.
- [23] 喻泓, 杨晓晖. 地表火干扰时间序列上樟子松林竞争强度的变化[J]. 生态学报, 2010, **30**(1): 79 – 85.
YU Hong, YANG Xiaohui. Variation of competition intensity across a chronosequence in surface fire-mediated Mongolian pine forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(1): 79 – 85.
- [24] 尹新华, 翁益明, 董云富, 等. 毛竹受雨雪冰冻危害的受损特点[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25**(6): 823 – 827.
YIN Xinhua, WENG Yiming, DONG Yunfu, *et al.* Damage characteristics of *Phyllostachys pubescens* forests in freezing rain and snow hazards [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25**(6): 823 – 827.
- [25] 吕玉龙. 高温干旱对毛竹林的危害及抗旱经营措施建议[J]. 林业实用技术, 2014(8): 53 – 55.
LÜ Yulong. The harm of high temperature and drought to moso bamboo stand and how to deal with it [J]. *Pract For Technol*, 2014(8): 53 – 55.
- [26] 陆元昌, 洪玲霞, 雷相东. 基于森林资源二类调查数据的森林景观分类研究[J]. 林业科学, 2005, **41**(2): 21 – 29.
LU Yuanchang, HONG Lingxia, LEI Xiangdong. Study on classification of forest landscape components based on forest resource inventory data for management [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(2): 21 – 29.
- [27] 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.