

松材线虫病疫木卫生伐对马尾松纯林林分结构的影响

张华锋¹, 陈思宇^{2,3,4}, 刘刚⁵, 王懿祥^{2,3,4}

(1. 杭州市临安区农林技术推广中心, 浙江 杭州 311300; 2. 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; 3. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 4. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 5. 浙江省林业资金管理中心, 浙江 杭州 310020)

摘要: 【目的】探讨松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 病疫木采伐对马尾松人工纯林林分结构的影响, 对松材线虫入侵后的马尾松林分的经营管理有理论和实践价值。【方法】在浙江省杭州市临安区, 分别选择松材线虫病危害及周边未受害的马尾松 *Pinus massoniana* 人工纯林设置样地并进行调查。【结果】疫木卫生伐 12 a 后的结果表明: 与马尾松纯林相比较, 卫生伐之后马尾松重要值显著下降, 从 100.00% 降至 38.41%; 胸径结构由正态分布变为反 J 型曲线; 树高结构由单层林变为复层林; 林木大小个体差异显著增加, 两级分化显著加剧; 林木分布从均匀分布变为随机分布; 林木竞争压力增加, 6 cm 径阶林木竞争压力最大。【结论】卫生伐促使受害马尾松纯林向混交林演替的速度加快, 多个林分结构指标发生了重大变化, 单层马尾松同龄纯林演替为复层马尾松落叶阔叶树混交异龄林。图 2 表 4 参 18

关键词: 森林生态学; 马尾松人工纯林; 松材线虫病; 卫生伐; 林分结构

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)04-0745-07

Effects of sanitation cutting pine wilt diseased trees on the stand structure of pure *Pinus massoniana* plantation

ZHANG Huafeng¹, CHEN Siyu^{2,3,4}, LIU Gang⁵, WANG Yixiang^{2,3,4}

(1. Agroforestry Technology Extension Center in Lin'an District, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 4. College of Environment and Resource, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 5. Zhejiang Forestry Fund Management Center, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effects of sanitation cutting of the diseased pine trees infected by *Bursaphelenchus xylophilus* on the stand structure of pure *Pinus massoniana* plantation and provide a reference for the management of *P. massoniana* invaded by *B. xylophilus*. [Method] Field plots were selected of both a pure *P. massoniana* plantation infected by *B. xylophilus* and its neighbouring plantation uninfected to be investigated in Lin'an, Zhejiang, China. [Result] After 12 years of sanitation cutting, compared with the uninfected pure *P. massoniana* plantation, it is shown that the importance values of *P. massoniana* significantly decreased from 100.00% to 38.41%. The stand diameter distribution followed an inverse J-shaped curve. In terms of height structure, single storied stand changed into multi-storied stand. The individual size inequality significantly increased. The distribution pattern of trees changed from uniform distribution to random

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2020-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31770681); 浙江省自然科学基金资助项目 (LY17C160006)

作者简介: 张华锋, 从事森林生态学和森林培育学等研究。E-mail: zhf2402@qq.com。通信作者: 王懿祥, 教授, 博士生导师, 从事森林生态学和森林经理学等研究。E-mail: wangyixiang@zafu.edu.cn

distribution. The competitive index of trees significantly increased, and that of trees at 6 cm diameter class was the highest. [Conclusion] The sanitation cutting accelerated the succession speed of the infected pure *P. massoniana*, with significant changes in several stand structure indicators and the single-storied even-aged pure *P. massoniana* stand succeeded by the mixed multi-storied uneven-aged *P. massoniana* and broad-leaved trees stand. [Ch, 2 fig. 4 tab. 18 ref.]

Key words: forest ecology; pure *Pinus massoniana* plantation; pine wilt disease; sanitation thinning; stand structure

马尾松 *Pinus massoniana* 曾经是南方集体林区的主要造林树种, 在荒山绿化、生态服务和发展经济中起过不可替代的重要作用。但长期大面积纯林营造, 林地出现地力衰退、生产力降低、生态服务功能下降等不良现象, 特别是马尾松林经营长期遭受松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 病的困扰。据国家林业和草原局统计, 近 30 a 来, 全国因松材线虫病损失的松树累计达数十亿株, 造成的直接经济损失和生态服务价值损失高达上千亿元, 松材线虫病已成为全球森林生态系统中最具危险性、毁灭性的病害之一^[1]。对于松材线虫病发生的疫区疫点, 相关办法都要求“加强疫情科学除治, 全面实施以清理病死、枯死、濒死松树为核心措施”。各地据此采取了皆伐、择伐等干扰方式清除疫木, 以防止松材线虫的进一步扩散。大多相关研究集中在松材线虫病入侵后皆伐形成的除治迹地上马尾松林群落演替、林分结构、植物多样性和种群生态位的评价上^[1-4]。但采伐疫木对受害马尾松林综合林分结构长期影响的相关研究较少。林分结构不但包括树种、胸径、树高、年龄、林木个体大小差异等非空间结构, 也包括林木分布格局、单木竞争指数等空间结构, 是林分未来生长变化的决定性因素之一^[5-6]。在生产实践中, 采伐疫木后的马尾松群落结构将会发生哪些变化, 有必要对受害马尾松林的健康经营开展研究。本研究在浙江省杭州市临安区选择松材线虫病入侵过的马尾松人工纯林, 以未受松材线虫病危害的林分为对照, 探讨疫木卫生伐后的天然更新对马尾松人工纯林林分结构的影响, 比较 2 种类型的林分在树种组成、胸径结构、树高结构、林木个体大小差异、聚集指数和竞争指数等方面的差异, 以期对松材线虫病入侵后的马尾松林分的经营管理提供参考。

1 研究区概况

研究样地位于浙江省杭州市临安区 (29°56′~30°23′N, 118°51′~119°52′E)。该地属中亚热带季风气候, 温暖湿润, 四季分明, 具有春多雨, 夏湿热, 秋气爽, 冬干燥的气候特征, 全年平均气温 16.4 °C, 年均降水量 1 628.6 mm, 无霜期年平均为 237 d^[7]。该地先锋群落为马尾松林, 地带性植被为亚热带常绿阔叶林, 优势种主要有青冈 *Cyclobalanopsis glauca*、苦槠 *Castanopsis sclerophylla* 等。研究区气候条件适宜马尾松的生长, 但长期遭受松材线虫病危害。

2 研究方法

2.1 样地调查

在杭州市临安区河桥镇选择 1994 年同一批造林的马尾松纯林作为研究对象。21 世纪初该马尾松人工纯林有部分遭受松材线虫病, 为防止病害蔓延, 2005 年开始每年进行卫生伐, 其他马尾松林木均予以保留, 保护天然更新的非松科 Pinaceae 植株, 持续 7 a, 共采伐约 1 500 株·hm⁻²。疫木伐除后, 任其自然恢复更新。2017 年 8 月, 按照立地环境基本因子一致的原则, 从中分别选择未入侵过的小块马尾松林 (对照) 和卫生伐过的马尾松林作为调查对象, 2 种类型的林分分别设置了 5 块 30 m×30 m 的标准样地。样地土壤为黄壤, 土层厚度为 0.8 m, 坡向为西北坡, 坡度 35°~40°, 立地条件差, pH 6.2。样地边界和林木坐标用全站仪测定, 对样地进行了每木检尺, 起测胸径为 5 cm, 调查因子包括树种、胸径、坐标、树高等。样地基本情况见表 1。

2.2 非空间结构指数及计算方法

2.2.1 植物多样性指数 物种丰富度是指样地内出现的物种数目。树种重要值是研究某个种在群落中的

表 1 卫生伐后的马尾松林分基本特征

Table 1 Characteristics of *P. massoniana* stands after sanitation thinning diseased trees

处理	密度/(株·hm ⁻²)		胸径/cm		树高/m		郁闭度
	马尾松	阔叶树	马尾松	阔叶树	马尾松	阔叶树	
对照	1 800		13.0±2.4		12.5±1.7		0.9
卫生伐	300	1 000	17.6±2.8	7.1±1.8	12.5±2.2	5.6±1.1	0.6

地位和作用的综合数量指标，物种丰富度和树种重要值反映了植物多样性。重要值计算采用的公式为：重要值 = (相对多度 + 相对频度 + 相对显著度) / 3。其中：相对多度 = (某个种的多度 / 所有物种的多度之和) × 100%；相对频度 = (某个种的频度 / 所有物种的频度之和) × 100%；相对显著度 = (某个种的胸高断面积之和 / 所有物种的胸高断面积之和) × 100%。

2.2.2 林木个体大小差异指数 林木个体大小差异在植物种群中普遍存在，相邻林木个体的大小会影响目标个体的胸径、高度的生长，在群落发展和维持群落物种多样性方面也具有深远意义，反映植物个体大小差异的指数采用库兹涅茨系数 (K_C)、基尼系数 (G_C) 和洛伦茨不对称系数 (L_{AC})^[8]。

用二元材积公式^[9]计算马尾松和阔叶树的单株林木材积，计算公式为^[4]：

$$V_{\text{马尾松}} = 0.000\ 062\ 341\ 803D^{1.855\ 149\ 7}H^{0.956\ 824\ 92}; \quad (1)$$

$$V_{\text{阔叶树}} = 0.000\ 068\ 563\ 4D^{1.933\ 221}H^{0.867\ 885}。 \quad (2)$$

式(1)~(2)中： V 为单株材积(m³)； D 为胸径(cm)； H 为树高(m)。

库兹涅茨系数 (K_C) 是指单株材积为林分前 20% 的林木个体的材积之和在林分蓄积量中所占的比例，这个指数的数值越大，表示林木分化越严重，个体差异越大。基尼系数 (G_C) 可用于研究林分内各林木之间差异性的大小^[4, 8]，计算公式为：

$$G_C = \frac{\sum_{i=1}^n (2i - n - 1)x_i}{n^2u}。 \quad (3)$$

式(3)中： n 为林分内林木的株数； x_i 为林木个体按材积大小升序排列时对应的第 i 株林木的材积； u 为林分平均材积。洛伦茨不对称系数 (L_{AC}) 用于反映林木个体大小等级对不一致性程度的贡献，当 $L_{AC} > 1$ 时，表示不一致性的产生主要在少数较大的林木个体中；当 $L_{AC} < 1$ 时，表示不一致性的产生主要在大多数较小的林木个体中^[4, 8]。将林分 n 株林木按单株材积从小到大排序 (x_1, x_2, \dots, x_n)， L_{AC} 的计算公式为：

$$L_{AC} = \frac{m + \theta}{n} + \frac{L_m + \theta X_{m+1}}{L_n}; \quad (4)$$

$$\theta = \frac{u - X_m}{X_{m+1} - X_m}。 \quad (5)$$

式(4)~(5)中： m 为恰好小于林木平均材积 μ 的林木序号； L_m 为前 m 株林木个体材积之和； L_n 为 n 株林木个体材积之和； θ 为参数； X_m 为排序第 m 株林木的材积； X_{m+1} 为排序第 $m+1$ 株林木的材积。

2.3 空间结构指数及计算方法

为避免边缘效应，采用矩形缓冲区方法进行边缘校正^[10-11]。

2.3.1 聚集指数 聚集指数是由 CLARK 等^[12]提出的，用于检验种群空间分布格局的常用指数，是最早采用的与距离有关的空间格局指数^[13]。采用最近邻单株距离的平均值与随机分布下的期望平均距离之比来表示：

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{N}}}。 \quad (6)$$

式(6)中： R 为聚集指数； r_i 为第 i 株树木到其最近邻木的距离； N 为样地内林木株数； S 为样地面积。

若 $R > 1$, 林木呈均匀分布; 若 $R < 1$, 则林木趋于聚集分布; 若 $R = 1$, 林木则表现为随机分布。

2.3.2 竞争指数 竞争指数采用 HEGYI^[14] 的计算公式:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i L_{ij}} \quad (7)$$

式(7)中: C_i 为对象木 i 的竞争指数; L_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 之间的距离; d_i 为对象木 i 的胸径; d_j 为竞争木 j 的胸径; n 为对象木 i 的竞争木株数, 本研究采用 4 邻近树法, $n=4$ 。

2.4 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据处理与图表制作, SPSS 20.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), LSD 方法进行显著性检验 ($\alpha=0.05$)。利用 ArcGIS 和 ForStat 软件对 2 种林分进行空间分析。数据为平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 疫木卫生伐对树种组成的影响

由表 2 可知: 马尾松人工纯林的重要值仍然为 100.00%。在受害马尾松纯林疫木卫生伐后的林分中, 马尾松的重要值下降至 38.41%, 仍然为群落的第 1 优势种; 出现了大量天然更新的阔叶树种, 短柄枹 *Quercus glandulifera* 的重要值为 35.59%, 是群落的第 2 优势种; 欐木 *Loropetalum chinense* 的重要值为 10.91%, 是群落下层林分中主要的伴生树种; 白栎 *Quercus fabri* 的重要值为 10.54%, 是继短柄枹之后的又一主要乔木树种; 另外还有少量的无患子 *Sapindus mukorossi*、枫香 *Liquidambar formosana*、薄叶山矾 *Symplocos anomala* 和合欢 *Albizia julibrissin* 等乔木树种分布。可见, 松材线虫入侵后的马尾松人工纯林在疫木卫生伐后经过长期恢复已演替为马尾松落叶阔叶混交林。而且该混交林分没有发现马尾松的小树和幼树, 预示着未来该林分的阔叶树重要值将超过马尾松, 形成阔叶树马尾松混交林。

3.2 疫木卫生伐对胸径和树高结构的影响

由图 1 可知: 马尾松人工纯林的林分平均胸径为 13.0 cm, 其中, 10、12 和 14 cm 径阶的林木株数最多, 分别为 22.8%、29.6% 和 21.8%, 呈单峰状左偏正态分布, 小径阶和大径阶林木各占一小部分。疫木卫生伐后形成的马尾松阔叶混交林林分平均胸径为 9.1 cm, 林木大多数分布在 6 和 8 cm 径阶, 株数分别占 49.2% 和 23.4%, 而且随着胸径的增大呈下降趋势, 呈现反 J 型曲线, 较大径阶 22 和 24 cm 的株树比例比马尾松人工纯林高。未遭受松材线虫入侵的马尾松林依然保持单层林; 疫木卫生伐后经过长期恢复由单层纯林演变为由马尾松占据的主林层与阔叶树组成的次林层的复层混交林分(表 1)。

3.3 疫木卫生伐对林木个体大小差异的影响

由表 3 可知: 马尾松人工纯林疫木卫生伐后, 库兹涅茨系数 (K_C) 增加, 说明较大个体林木和较小个体林木分化更严重; 基尼系数 (G_C) 增加, 说明林木个体大小不一致性增大; 洛伦茨不对称系数 (L_{AC}) 由略小于 1 增加为略大于 1, 说明林木个体差异的产生主要在于大多数较小的林木个体变为少数较大的林木个体。

3.4 疫木卫生伐对聚集指数和竞争指数的影响

由表 4 可知: 马尾松人工纯林聚集指数 (R) >

表 2 疫木卫生伐后马尾松林分的树种组成

Table 2 Tree species composition of *P. massoniana* stands after sanitation thinning infected trees

处理	树种	重要值/%
对照	马尾松	100.00
卫生伐	马尾松	38.41
	短柄枹	35.59
	欐木	10.91
	白栎	10.54
	无患子	2.24
	枫香	1.25
	薄叶山矾	0.55
	合欢	0.52

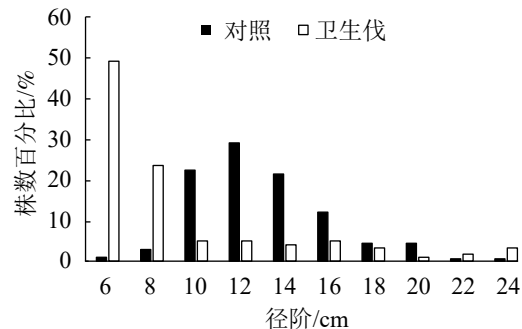


图 1 疫木卫生伐后马尾松林分的胸径结构

Figure 1 DBH structure of *P. massoniana* stands after sanitation thinning infected trees

表 3 卫生伐后马尾松林的林木个体大小差异

Table 3 Individual size inequality of *P. massoniana* stands after thinning diseased trees

处理	K_C	G_C	L_{AC}
对照	0.35±0.08 a	0.26±0.05 a	0.97±0.15 a
卫生伐	0.74±0.13 b	0.66±0.09 b	1.04±0.23 a

说明：同列不同字母表示同一指标不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

1, 表现为均匀分布, 疫木卫生伐后形成的马尾松阔叶林的 $R=0.95<1$, 呈现聚集分布。马尾松人工纯林的平均竞争指数 (C_i) 为 8.16, 疫木卫生伐后形成的马尾松阔叶林的平均竞争指数增加至 10.12。

由图 2 可知：马尾松人工纯林各径阶处受到的竞争压力基本一致, 未发生很大的变化。疫木卫生伐后形成的马尾松阔叶林于 6 cm 径阶处林木受到的竞争压力最大, 其次是 8 cm 径阶林木, 各径阶处受到的竞争压力差异较大。

4 讨论

本研究对入侵过的马尾松林连续几年开展疫木卫生伐, 腾出林分生长空间, 促进阔叶树种的天然更新。疫木采伐十几年后, 受害马尾松林未再发现疫木, 但是松木损失严重, 只剩 $300 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 马尾松。说明林业部门规定的及时卫生伐的处理措施在实践中有一定效果, 能在一定程度上抵御林分尺度的松材线虫病的自然扩散。

中国营造的人工林大多为纯林, 马尾松林也不例外。马尾松人工纯林的林分结构极其简单, 树种单一, 乔冠草各层次的植物多样性低^[15-16], 这为松材线虫病的入侵扩散提供了便利条件。松材线虫入侵马尾松林后, 如果不加以人为干预, 松林必然全部死亡^[17]。本研究采取的疫木卫生伐对原马尾松纯林的林分结构产生了重要影响, 经过十几年的恢复, 使得马尾松人工纯林显著具有天然林的特点, 具体表现在: 树种组成由马尾松单一树种变为马尾松和落叶阔叶树种短柄枹为主的马尾松落叶阔叶混交林, 进入了马尾松纯林的下一个演替阶段; 胸径结构由正态分布变为反 J 型曲线, 异龄林特征明显; 垂直结构由单层林变为复层林; 林木分布从均匀分布变为随机分布; 林木大小个体差异变大, 两级分化加剧。上述变化是松材线虫入侵松林后人为间伐干扰的结果; 也与马尾松林是亚热带的先锋群落, 群落本身并不稳定紧密相关^[1]。

疫木卫生伐后形成的林窗会加快群落天然更新速度, 短柄枹、白栎等演替早期的落叶乔木阔叶树种迅速占领了松木采伐移除后的生态位(表 2), 促使受害马尾松纯林向混交林演替的速度加快。这与王懿祥等^[8]的研究结果相同, 疫木卫生伐提高了林分林木个体大小的不一致性(表 3)。这是由于疫木卫生伐后出现了大量天然更新的阔叶树, 这部分林木个体较小; 另外一方面, 疫木卫生伐促进了保留木(马尾松)的生长, 特别是加快了原优势木的生长, 使其成长为较大的林木个体。因而也使得林木个体大小不一致性变为由少数较大的林木个体产生 ($L_{AC}<1$); 林分的胸径结构变为反 J 型曲线(图 1)。疫木卫生伐后形成的混交林竞争指数显著增加, 林木之间的竞争压力变动加大(表 4), 这是由于大量天然更新的幼树其竞争指数较大的缘故, 径阶-竞争指数关系图(图 2)也反映了林木所受的竞争压力随着径阶的增大而减小, 林木个体大小不一致性的增加也使得林木之间的竞争指数变动增加。在经营中应选出阔叶目标树, 间伐邻近竞争木, 减小竞争压力, 促使阔叶目标树生长^[18]。

马尾松人工纯林树种单一, 结构简单, 生态系统极其不稳定, 对松材线虫的抵抗能力极差, 应避免营造马尾松纯林^[4]。松材线虫作为一个外来的选择因子, 虽然会毁掉松林, 但也能促使整个生态系统朝

表 4 卫生伐后马尾松林的聚集指数和竞争指数

Table 4 Aggregation index and competition index of *P. massoniana* stands after sanitation thinning infected trees

处理	聚集指数(R)	竞争指数(C_i)
对照	1.27±0.21 a	8.16±3.52 a
卫生伐	0.95±0.14 b	10.12±5.60 b

说明：同列不同字母表示同一指标不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

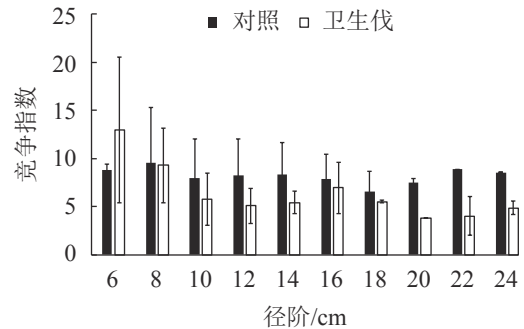


图 2 卫生伐后马尾松林的径阶-竞争指数分布
Figure 2 Distribution of DBH-competition index of *P. massoniana* stands after sanitation thinning infected trees

向更为稳定的方向发展。对于疫木卫生伐后形成的马尾松与以短柄枹和白栎为主的混交林而言,也正处于演替早期阶段,本身并不稳定。在森林经营条件许可的情况下,可以在林分内选择目标阔叶树,间伐邻近林木以减少竞争压力促使目标树生长;同时参考当地地带性植被常绿阔叶林的树种组成,及早补植地带性植被的建群种和优势种以及伴生种,如青冈、苦槠、木荷 *Schima superba* 等,加快群落演替速度,提高抗病害能力。

5 参考文献

- [1] 吴敏娟, 尤誉杰, 张晓红, 等. 不同干扰模式对受害马尾松人工纯林林分结构的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(1): 58 - 66.
WU Minjuan, YOU Yujie, ZHANG Xiaohong, *et al.* Effects of different interference modes on the stand structure of artificial pure forest of *Pinus massoniana* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30**(1): 58 - 66.
- [2] 吕文艳, 王柏泉, 曾德山, 等. 松材线虫病疫木不同伐除方式对森林植物群落演替的影响[J]. 湖北林业科技, 2008, **37**(3): 4 - 8.
LÜ Wenyan, WANG Baiquan, ZENG Deshan, *et al.* Effects of different cutting methods of pine wood nematode disease on forest plant community succession [J]. *Hubei For Sci Technol*, 2008, **37**(3): 4 - 8.
- [3] 王国明, 赵颖, 陈斌, 等. 松材线虫病除治迹地自然恢复过程中物种多样性的动态变化[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(2): 170 - 177.
WANG Guoming, ZHAO Ying, CHEN Bin, *et al.* Dynamic changes of species diversity during the natural restoration process of pine wood nematode disease [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(2): 170 - 177.
- [4] 石娟, 骆有庆, 宋冀莹, 等. 松材线虫入侵后不同伐倒干扰强度对马尾松林植物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(7): 1157 - 1163.
SHI Juan, LUO Youqing, SONG Jiying, *et al.* Effects of different cutting intensity on the plant diversity of *Pinus massoniana* forest after invasion of pine wood nematode [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17**(7): 1157 - 1163.
- [5] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [6] 吴建强, 王懿祥, 杨一, 等. 干扰树间伐对杉木人工林林分生长和林分结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(2): 340 - 348.
WU Jianqiang, WANG Yixiang, YANG Yi, *et al.* Effects of interfering tree thinning on the growth and stand structure of Chinese fir plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(2): 340 - 348.
- [7] 朱婷婷, 王懿祥, 朱旭丹, 等. 遮光对木荷和枫香光合特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(1): 28 - 35.
ZHU Tingting, WANG Yixiang, ZHU Xudan, *et al.* Effect of shading on photosynthetic characteristics of *Schima superba* and *Liquidambar formosana* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(1): 28 - 35.
- [8] 王懿祥, 张守攻, 陆元昌, 等. 林木个体大小不一致性指标对人工林间伐方式的即时性响应[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(6): 1645 - 1651.
WANG Yixiang, ZHANG Shougong, LU Yuanchang, *et al.* The immediate response of individual size inconsistency indexes to the mode of artificial forest thinning [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(6): 1645 - 1651.
- [9] 王懿祥, 张守攻, 陆元昌, 等. 干扰树间伐对马尾松人工林目标树生长的初期效应[J]. 林业科学, 2014, **50**(10): 67 - 73.
WANG Yixiang, ZHANG Shougong, LU Yuanchang, *et al.* The initial effect of interfering tree thinning on the growth of target trees in *Pinus massoniana* plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(10): 67 - 73.
- [10] 周红敏, 惠刚盈, 赵中华, 等. 林分空间结构分析中样地边界木的处理方法[J]. 林业科学, 2009, **45**(2): 1 - 5.
ZHOU Hongmin, HUI Gangying, ZHAO Zhonghua, *et al.* The treatment method of boundary wood in the spatial structure analysis of stands [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(2): 1 - 5.
- [11] 仇建习, 汤孟平, 沈利芬, 等. 近自然毛竹林空间结构动态变化[J]. 生态学报, 2014, **34**(6): 1444 - 1450.
QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, *et al.* Dynamic changes of spatial structure of near-natural bamboo forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(6): 1444 - 1450.
- [12] CLARK P J, EVANS F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations [J]. *Ecology*, 1954, **35**(4): 445 - 453.
- [13] 安慧君, 张韬. 聚集指数边界效应的校正方法与应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, **29**(3): 57 - 60.

- AN Huijun, ZHANG Tao. Correction method and application of boundary effect of clustering index [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2005, **29**(3): 57 – 60.
- [14] HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands [J]. *Growth Models Tree Stand Simu*, 1974, **30**: 74 – 90.
- [15] 王懿祥. 人工马尾松和杉木林目标树经营理论与实践[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- WANG Yixiang. *Theory and Practice of Target Tree Management in Pinus massoniana and Cunninghamia lanceolata Plantation* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.
- [16] 姜俊, 谢阳生, 陆元昌, 等. 不同林龄阶段马尾松人工林群落结构特征及经营策略[J]. *西北林学院学报*, 2015, **30**(6): 1 – 7.
- JIANG Jun, XIE Yangsheng, LU Yuanchang, *et al.* Community structure and management strategy of *Pinus massoniana* plantation in different ages [J]. *J Northwest For Univ*, 2015, **30**(6): 1 – 7.
- [17] 柴希民, 蒋平. 松材线虫的发生和防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [18] 张慧, 周国模, 白尚斌, 等. 目标树抚育对亚热带天然次生灌丛群落结构和多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(5): 1414 – 1420.
- ZHANG Hui, ZHOU Guomo, BAI Shangbin, *et al.* Effects of target tree rearing on the structure and diversity of subtropical natural secondary shrub communities [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(5): 1414 – 1420.