

# 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\*

石娟<sup>1</sup> 骆有庆<sup>1\*</sup> 宋冀莹<sup>1</sup> 严晓素<sup>2</sup> 蒋平<sup>2</sup> 王奕交<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; <sup>2</sup> 浙江省森林病虫害防治检疫站, 杭州 310002;

<sup>3</sup> 浙江省舟山市定海区森林生物防治与检疫检验站, 舟山 316000)

**【摘要】** 以松材线虫入侵马尾松林后经过不同伐倒干扰强度经营形成的不同群落类型作为研究对象, 对9个群落类型的物种多样性进行了研究. 结果表明, 乔木层物种多样性指数大小排列顺序为: 马尾松纯林受害皆伐后形成的阔叶林(富阳) > 轻度受害的马尾松-木荷混交林(富阳) > 对照 > 轻度受害的马尾松-纯林(富阳) > 马尾松-栓皮栎混交林受害择伐后形成的栓皮栎林(舟山) > 马尾松纯林受害皆伐后形成的马尾松幼龄林(富阳) > 马尾松纯林受害择伐后形成的枫香林(舟山) > 受害的黑松-马尾松混交林(舟山) > 受害的马尾松纯林(舟山). 灌木层舟山马尾松纯林的3种多样性指数均最低, 其余各地相差不大. 草本层马尾松幼龄纯林、栓皮栎林和枫香林的3个指数较高. 不同地理位置和不同受害程度的马尾松林植物多样性差异显著; 不同干扰程度、不同恢复方式下马尾松林内的植物多样性差异也显著. 建立了伐倒干扰强度指数, 发现物种多样性指数随伐倒干扰强度指数的变化规律符合“中间高度膨胀”理论. 协方差分析结果表明, 所建的指数能有效地反映松材线虫入侵及病木伐除后马尾松林植物多样性的变化.

**关键词** 松材线虫 伐倒干扰强度 植物多样性 干扰

文章编号 1001-9332(2006)07-1157-07 中图分类号 S145 文献标识码 A

**Effects of different removal disturbance intensity on plant diversity of *Bursaphelenchus xylophilus*-invaded Masson pine community.** SHI Juan<sup>1</sup>, LUO Youqing<sup>1</sup>, SONG Jiying<sup>1</sup>, YAN Xiaosu<sup>2</sup>, JIANG Ping<sup>2</sup>, WANG Yijiao<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Education Ministry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; <sup>2</sup>Forest Pest Control & Quarantine Station of Zhejiang Province, Hangzhou 310002, China; <sup>3</sup>Forest Pest Control & Quarantine Station of Dinghai District, Zhoushan 316000, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(7): 1157 ~ 1163.

The study on the plant diversity of *Bursaphelenchus xylophilus*-invaded Masson pine community under effects of different removal disturbance intensity showed that the species diversity indices (richness, Shannon-Wiener index and evenness) of arbor layer decreased in the sequence of broad-leaved stand after the removal of all infected pine trees in the pure pine stand in Fuyang > lightly infected Masson pine - *Schima superba* mixed stand in Fuyang > uninfected stand mixture of Masson pine and *Castanopsis fargessi* as the control > lightly infected pure Masson pine stand in Fuyang > *Quercus variables* stand formed after selective removal of infected pine trees from a mixed Masson pine and *Q. variables* stand in Zhoushan Islands > pure young Masson pine stand formed after the removal of all infected pine trees from a pure Masson pine stand > pure *Liquidambar formosana* stand after the removal of infected pine trees from a pure pine stand in Zhoushan Islands > mixed stand consisted of *Pinus thunbergii* and the Masson pine in Zhoushan Islands > moderately infected Masson pine stand in Zhoushan Islands. All the three indices of shrub layer did not show any significant differences among different communities, except for the pure pine stand in Zhoushan Island, which were the lowest. The three indices of herb layer were higher in pure young Masson pine, *Q. variables* stand, and *L. formosana* stand than in other stands. The Masson pine forest at different geographical situation and with different harm extent had distinct disparity, as well as that in different disturbance degree and restoring manner. The "Index of Disturbing Intensity of Stump and Fallen Woods" or IDISF was created to represent the disturbance degree of tree removal on plant diversity. It was found that for both less and more removal disturbing degree, the relationship between species diversity indices and IDISF followed the "Mid-altitude bulge" theory. Specifically, both excessive and insufficient removal of infected trees would cause the decline of plant species diversity in certain degree. Covariance analysis of IDISF indicated that different IDISF had no significant effects on the species diversity of arbor layer, but had different effects on that of shrub and herb layers, which could be used to assess the changes in species diversity of different Masson pine communities after the invasion of pine wood nematode.

**Key words** *Bursaphelenchus xylophilus*, Disturbing intensity of stump and fallen woods, Plant diversity, Disturbance.

\* 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111404).

\* \* 通讯联系人. E-mail: yqluo@bjfu.edu.cn.

2005-05-30 收稿, 2006-05-17 接受.

## 1 引言

随着人类活动对自然生态系统影响的日益加剧,生物入侵已成为全球关注的问题.生物入侵改变了原有的生物地理分布和自然生态系统的结构与功能,对环境产生了很大的影响<sup>[4]</sup>.自从1982年在我国首次发现松材线虫病以来,其已成为我国最具毁灭性的入侵性森林灾害之一.寄主植物感染松材线虫病后40 d即可死亡,而从发病到整片松林毁灭只要3~5年.因此,它被称为“松树的癌症”<sup>[2]</sup>.

浙江省松林面积有 $2.57 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,占有林地面积的49.7%,占蓄积量的59.2%.松树不仅是主要用材树种,也是许多风景名胜区的景观资源<sup>[6]</sup>.浙江省于1991年逐渐在象山县首先发现了松材线虫病.近几年来其发生面积逐渐扩大,危害程度加重,现已达 $2.7 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,约占全国总危害面积的60%以上<sup>[2]</sup>.松材线虫病不仅造成经济损失,还破坏了生态环境.为此,浙江省森林病虫害防治检疫站采取了皆伐、择伐等干扰方式清除罹病木,以防止松材线虫的进一步扩散<sup>[12]</sup>.而人为伐除受害木措施对森林植被的结构变化产生了一定的干扰.当前干扰与植被关系的研究中,由于缺乏对不同干扰强度的有效度量,很难对干扰后植被的变化进行定量分析<sup>[16]</sup>.

2003年8月和10月两次林分踏查时,发现不同林型、不同树种组成、不同海拔、不同坡度和坡向的马尾松林受害程度不同,而且经过人为伐除受害木措施后,任其自然恢复更新,现已恢复的林型也不

相同.为此,本文以松材线虫入侵后采取不同伐除干扰措施的受害马尾松(*Pinus massoniana*)群落为研究对象,比较了处于不同受害后恢复阶段的马尾松群落的植物多样性变化规律,并通过建立伐倒干扰强度指数,进一步研究了不同干扰强度下,不同受害阶段马尾松群落的植物多样性变化规律.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

富阳市位于浙江省西北部(29°44'~30°12'N,119°25'~120°09'E),易受北方寒流侵入,是冬季气温较低的地域.该市属亚热带季风气候,日照充足,雨量充沛,丘陵山地年降水量多在1400 mm以上,气候温和,自然条件优越,土地肥沃.主要植被组成以马尾松、落叶栎(*Quercus* sp.)和苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)为主,伴生有木荷(*Schima superba*)、浙江樟(*Cinnamomum chekiangensis*)和冬青(*Ilex purpurea*)等.舟山市处于浙江省滨海岛屿地带(29°32'~31°04'N,121°30'~123°25'E).舟山群岛系丘陵地貌,属北亚热带南缘季风海洋型气候,常年气温较高,冬暖夏凉,热量较丰富,年降水量在1500 mm左右,年相对湿度>80%.森林植被与内陆有较大的差异,丘陵山地上有马尾松林、黑松(*Pinus thunbergii*)林,由于岛上风大,树木大都矮化<sup>[21]</sup>.

### 2.2 研究方法

**2.2.1 野外调查** 2003年8月和10月,根据立地环境因子基本一致的原则,分别在富阳市和舟山市设置了9块30 m×30 m的标准地.标准地内的马尾松树种起源均是20世纪60年代末、70年代初人工造林,而且除对照外,所有样地均是1996年受害后,1997年采取了伐除措施.其受害及管理情况详见表1.

表1 样地概况

Table 1 General condition of standard sites

样地号 Sample plot No.	群落类型 Community type	地点 Place	马尾松受害及管理 Situation of damage and management on <i>P. massoniana</i>	海拔 Altitude (m)	坡度 Gradient (°)	坡向 Slope direction	郁闭度 Crown density
1	马尾松纯林 <i>P. massoniana</i> pure forest	富阳 Fuyang	轻度受害 Slight damage	98	22	SW	0.9
2	白栎林 <i>Quercus fabric</i> forest	富阳 Fuyang	马尾松纯林→1997年皆伐→ 阔叶林 <sup>1)</sup>	107	17	NW	1.0
3	马尾松幼树纯林 Young <i>P. massoniana</i> pure forest	富阳 Fuyang	马尾松纯林→1997年皆伐→ 马尾松幼树林 <sup>2)</sup>	86	16	NE	0.3
4	马尾松-木荷混交林 <i>P. massoniana</i> & <i>S. superba</i> mixed forest	富阳 Fuyang	轻度受害 Slight damage	117	30	S	0.8
5	栓皮栎林 <i>Q. variables</i> forest	舟山 Zhoushan	马尾松阔叶树混交林→1997年 择伐→阔叶林 <sup>3)</sup>	59	27	NW	0.81
6	枫香林 <i>Liquidambar formosana</i> forest	舟山 Zhoushan	马尾松纯林→1997年择伐→ 阔叶林 <sup>4)</sup>	90	7	SW	0.3
7	马尾松纯林 <i>P. massoniana</i> pure forest	舟山 Zhoushan	中度受害 Medium damage	36	17	NE	0.4
8	黑松-马尾松混交林 Mixed <i>P. thunbergii</i> and <i>P. massoniana</i> forest	舟山 Zhoushan	1997年受害择伐被害木 Selected cutting the damaged trees in 1997	24	23	SW	0.3
对照 CK	马尾松-栲树混交林 <i>P. massoniana</i> & <i>Castanopsis fargesii</i> mixed forest	富阳 Fuyang	未受害 No damage	131	28	SE	0.75

1) *P. massoniana* pure forest→clear cutting in 1997→broad-leaved forest; 2) *P. massoniana* pure forest→clear cutting in 1997→Young *P. massoniana* pure forest; 3) *P. massoniana* & broadleaf tree mixed forest→selected cutting in 1997→broad-leaved forest; 4) *P. massoniana* pure forest→selected cutting in 1997→broad-leaved forest.

采用固定标准地法和相邻格子法分别调查了样地内的乔木、灌木和草本。按 5 m × 5 m 样方依次测量树木的胸径、树高和冠幅, 记载树种名称。每块标准地内, 调查 2 m × 2 m 灌木样方和草本样方各 25 个, 记录每种植物的种类、株数、盖度、平均高度、生长状况等指标。并记录了各标准地的地理位置、海拔高度、坡度和坡向等生态环境因子<sup>[1,6]</sup>。

### 2.2.2 物种多样性指数计算<sup>[17]</sup>

丰富度指数:

$$R_0 = S \quad (1)$$

物种多样性指数 (Shannon-Wiener 指数):

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \ln \left( \frac{N_i}{N} \right) \quad (2)$$

均匀度指数:

$$E = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

式中,  $S$  为每一标准地样方中的物种总数,  $N$  为  $S$  个种的全部重要值之和,  $N_i$  为第  $i$  个种的重要值。用以上各式及  $S$  度量物种的多样性。

**2.2.3 伐倒干扰强度指数的建立** 由于样地 1 ~ 样地 8 的马尾松群落均是 1996 年、1997 年先后受松材线虫危害形成的, 考虑到当年伐除留下的伐桩和马尾松受害后自然死亡形成的倒木, 认为 1996 年至今群落内所受的干扰主要包括伐除人为干扰和倒木自然干扰两种。另外, 在实际生产中的人工抚育间伐时, 常以每次采伐木的株数占原林分总株数的百分率表示采伐强度<sup>[5,11]</sup>。以此为依据, 建立一个伐倒干扰强度指数, 将其定义为群落内伐桩和倒木的株数和占原林分总株数的百分率, 来表示群落受“受害木伐除”和“枯立木倒地”两种方式的干扰程度。其计算公式为:

$$\text{IDISF} = \frac{n_i + n_f}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中, IDISF 表示伐倒干扰强度指数,  $n_i$  为群落内的伐桩数,  $n_f$  为群落内的倒木数,  $N$  为原林分总株数。

**2.2.4 伐倒干扰强度指数 (IDISF) 效果检验** 以 IDISF 为控制变量, 以郁闭度为协变量, 分别对乔灌木 3 层的丰富度、物种多样性和均匀度指数进行协方差分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同样地植物群落的外貌及垂直结构

标准地 1: 乔木层几乎全为马尾松; 灌木层优势种有篾竹 (*Phyllostachys nidularia*)、欏木 (*Loropetalum chinensies*)、微毛柃 (*Eurya hebeclados*) 等; 草本层主要是芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*); 伴生藤本有菝葜 (*Smilax china*)、香花崖豆藤 (*Millettia dielsiana*)。

标准地 2: 林分原为马尾松纯林, 现在是阔叶林 (马尾松已受害皆伐)。乔木层优势种为白栎 (*Q. fabric*)、苦槠栲 (*Castanopsis sclerophylla*); 灌木层优

势种有苦竹 (*Pleioblastus amarus*)、白栎和苦槠栲等; 草本层主要是芒萁; 伴生藤本有菝葜和香花崖豆藤。

标准地 3: 林分原为马尾松纯林, 受害皆伐后自然更新, 乔木层几乎全为更新的马尾松幼树; 灌木层优势种有短柄枹栎 (*Q. glandulifera* var. *brevipetiolata*)、梔子 (*Gardenia jasminoides*) 和欏木等; 草本层主要是芒萁、苔草 (*Carex doniana*)、拂子茅 (*Calamagrostis epigejos*) 和淡竹叶 (*Lophatherum gracile*); 伴生藤本有菝葜和金樱子 (*Rosa laevigata*)。

标准地 4: 乔木层优势种有马尾松和木荷; 灌木层优势种有木荷、苦槠、短柄枹栎等; 草本层主要是芒萁; 伴生藤本有菝葜、脉缘菝葜 (*Smilax nervo-marginata*) 和香花崖豆藤。

标准地 5: 林分原为马尾松-栓皮栎 (*Q. variables*) 混交林, 受害皆伐后自然更新, 现在为栓皮栎阔叶林, 马尾松为倒木与伐桩。样地内乔木层优势种有栓皮栎和冬青; 灌木层优势种有杜虹花 (*Callicarpa pedunculata*)、格药柃 (*Eurya muricata*) 和冬青等; 草本层主要有狗脊蕨 (*Dryopteris atrata*)、芒萁、大吴风草 (*Farfugium japonicum*) 和白茅草 (*Imperata cylindrical* var. *major*); 伴生藤本有菝葜、昆明鸡血藤 (*Millettia reticulata*) 和蓬莱葛 (*Gardneria multiflora*)。

标准地 6: 林分原为马尾松纯林, 受害皆伐后自然更新, 现在是疏林, 多为马尾松伐桩、倒木、枯立木。样地内乔木层更新种有枫香 (*Liquidambar formosana*); 灌木层优势种有白栎、油茶 (*Camellia oleifera*) 和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 等; 草本层主要是芒萁、白茅草和狗脊蕨 (*Woodwardia japonica*); 伴生藤本有菝葜。

标准地 7: 乔木层几乎全为马尾松; 灌木层优势种有白栎、欏木和马尾松幼树等; 草本层主要是白茅; 伴生藤本有菝葜。

标准地 8: 乔木层优势种有黑松与马尾松; 灌木层优势种有冬青、柃木 (*Eurya japonica*) 和欏木等; 草本层主要是芒萁; 伴生藤本有菝葜。

标准地 9 (对照): 乔木层优势种有马尾松与栲树。灌木优势种有黄连木 (*Pistacia chinensis*) 和欏木等; 草本层主要是白茅草。

### 3.2 不同受害及恢复阶段马尾松群落的物种多样性

**3.2.1 乔木层** 由图 1 可以看出, 乔木层丰富度指数和物种多样性指数的变化趋势基本一致, 而均匀度指数则不同。9 个马尾松林地按物种多样性指数

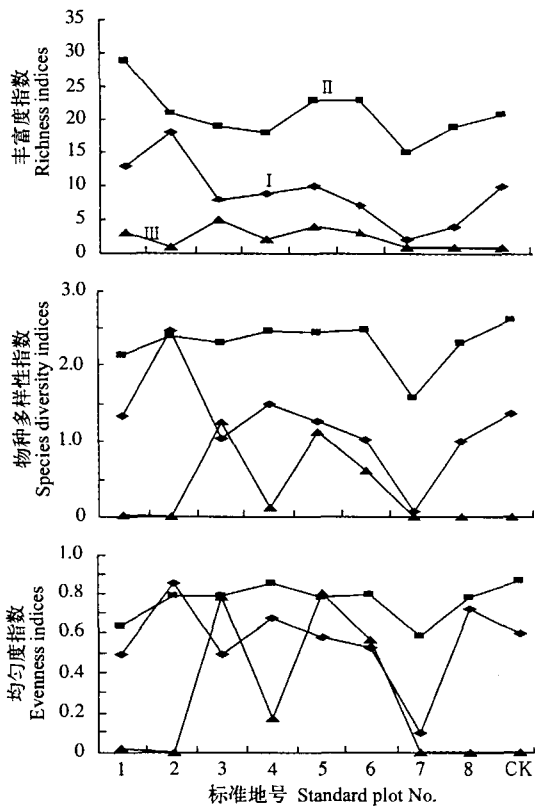


图1 不同群落类型乔(I)、灌(II)、草(III)各层丰富度、物种多样性和均匀度指数变化

Fig. 1 Change of richness, species diversity and evenness indices of the arbor (I), shrub (II) and herb (III) layers of different plant communities.

从大到小排序,依次为:标2 > 标4 > 对照 > 标1 > 标5 > 标3 > 标6 > 标8 > 标7;按群落类型,即马尾松纯林受害皆伐后形成的阔叶林(富阳) > 轻度受害的马尾松木荷混交林(富阳) > 对照 > 轻度受害的马尾松纯林(富阳) > 马尾松栓皮栎混交林受害皆伐后形成的栓皮栎林(舟山) > 马尾松纯林受害皆伐后形成的马尾松幼龄林(富阳) > 马尾松纯林受害皆伐后形成的枫香林(舟山) > 受害的黑松马尾松混交林(舟山) > 受害的马尾松纯林(舟山)。

与对照相比,标准地1和标准地4是受松材线虫危害最轻(近乎无)的马尾松林地,受松材线虫危害干扰和人为采伐干扰都较小,群落的丰富度指数和物种多样性指数皆较高。而标准地4是马尾松-木荷混交林,多样性高于标准地1马尾松纯林。

标准地2是马尾松纯林受害皆伐后形成的白栎阔叶林;标准地5是马尾松栓皮栎林1997年择伐3/5的受害木后形成的栓皮栎林。有学者认为,马尾松单优先锋群落不稳定,最终向稳定的马尾松阔叶树混交或阔叶树群落演替<sup>[24,25]</sup>。实际调查结果表明,标准地2和标准地5均处于较高的演替阶段,而

且群落的丰富度指数和物种多样性指数也较高。标准地2种类组成非常丰富,由于分布于土壤和水分条件均较好的阴坡,因而多样性指数在此形成峰值。可见受害后恢复形成阔叶林的群落植物多样性升高。

标准地7是现阶段受害最重的马尾松林地,受松材线虫危害干扰大,加之地处舟山海岛,马尾松生长不良,多为“小老树”,因此群落的丰富度指数和物种多样性指数最低。标准地群落1~4地处浙江省富阳市,属于内陆地区;而标准地5~8地处浙江省舟山市,属于海岛。海岛由于其地域的特殊性,其种质资源和植被种类均少于同等类型的内陆地区。因此群落5~8的丰富度指数和物种多样性指数总体较群落1~4低。

标准地2与标准地3同处内陆地区,都来源于皆伐后的马尾松纯林,然而标准地2水肥条件好,现已演替为白栎阔叶林,马尾松的生态位已被阔叶树和优势灌木短穗竹占据。而标准地3土壤瘠薄、干旱,且地处山梁上,先锋树种马尾松往往形成纯林,经过8年的恢复,第2代马尾松幼树现已形成单优种群。此时,因林分还未完全郁闭,耐荫性阔叶树并未在此定植,因此标准地3的多样性指数较低。可见受害后恢复成第2代马尾松的群落植物多样性降低。

综上所述,将9块标准地划分为不同地理位置(内陆和海岛)、不同林型(马尾松纯林和混交林)及不同恢复林型(受害后恢复成第2代马尾松和阔叶林)3种方式,分别对乔木层的物种多样性指数进行单因素方差分析。结果发现,内陆和海岛的马尾松林  $F = 5.602^*$ ,  $F_{0.05}(1,7) = 5.59$ ;马尾松纯林和混交林  $F = 6.046^*$ ,  $F_{0.05}(1,6) = 5.99$ ;受害后恢复成第2代马尾松和阔叶林的林分  $F = 7.765^*$ ,  $F_{0.05}(1,4) = 7.71$ 。以上结果表明,不同地理位置、不同林型及受害后不同恢复林型的马尾松林内的植物多样性差异显著。

**3.2.2 灌木层** 由图1可以看出,3个多样性指数表现出基本一致的变化趋势。标准地7的3种指数均最低,其余各地相差不大,但均小于对照,表明无论松材线虫危害程度的轻重,入侵后马尾松群落内灌木层的多样性指数均有所降低。而标准地7出现最低谷的原因在于马尾松群落土壤瘠薄且向阳,只有先锋树种马尾松才能生长,所以灌木和草本层种类均最少。

**3.2.3 草本层** 由图1可以看出,标准地3和标准

地 6 的草本层 3 个指数均较高,与其郁闭度小有关.标准地 3 是 1997 年对受害马尾松林皆伐后形成的第 2 代马尾松林,属于马尾松幼龄林,许多幼树树高不足 3 m;而标准地 6 是对受害马尾松纯林择伐后形成的阔叶林,现存马尾松多为枯立木、伐桩,在林分中已失去主导地位,而伴生的阔叶树种枫香等是在择伐后才从灌木层或亚乔木层中生长起来的,现林分还未郁闭.因此标准地 3 和标准地 6 均为疏林,林内光线充足,导致群落内草本层的丰富度指数和物种多样性指数均较高.而标准地 5 的 3 个指数也较高,是由于其土壤呈碱性,且水肥条件好,林内芒萁、大吴风草等指示植物长势良好.

### 3.3 伐除干扰对物种多样性的影响

#### 3.3.1 不同受害阶段马尾松群落类型的确立

按照马尾松受松材线虫危害或受害程度的不同,将马尾松分为健康木、衰弱木、枯立木、倒木和伐桩 5 个类型.分别计算 8 块标准地内 5 种类型马尾松的绝对数量,用其中占优势的类型代表此标准地中马尾松所处的受害阶段.用此方法,可以将 8 块标准地分为健康木、枯立木、伐桩、倒木和第 2 代马尾松健康木 5 种阶段.

#### 3.3.2 不同伐倒干扰强度下的物种多样性

将 8 个群落所处的 5 个受害阶段,按照不同的受害阶段类型,计算和绘成群落中乔木层的丰富度指数、物种多样性指数和均匀度指数随伐倒干扰强度指数变化的曲线图(图 2).

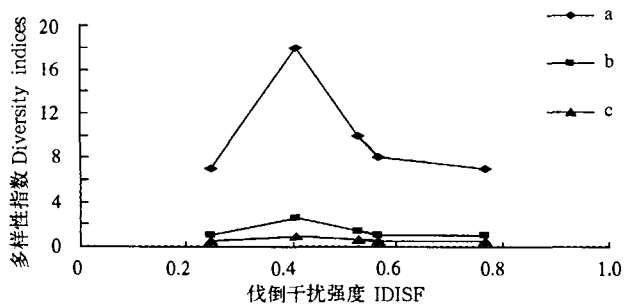


图 2 不同受害阶段群落乔木层多样性随伐倒干扰强度指数的变化  
 Fig.2 Change of diversity indices according to the IDISF index of arbor layers of different communities in different damage phase.  
 a) 丰富度指数 Richness index; b) 物种多样性指数 Species diversity index; c) 均匀度指数 Evenness index.

综合分析图 2,以乔木层的多样性指数为例可以看出,物种的多样性指数随着伐倒干扰强度指数的增大呈先升高、后下降的趋势.换言之,在较小和较大伐倒干扰强度时,群落多样性指数较低;中等伐倒干扰强度时,群落多样性指数较高.这个规律符合 Gentry 等<sup>[8]</sup>提出的“中间高度膨胀 (mid-altitude

bulge)”理论.即在适度干扰下,生态系统具有较高的物种多样性,在较低和较高频率的干扰作用下,生态系统中的物种多样性均趋于下降.这是因为在适度干扰作用下,生境受到不断的干扰,一些新的物种或外来物种尚未完成发育就又受到干扰,这样在群落中新的优势种始终不能形成,从而保持了较高的物种多样性.在频率较低的干扰条件下,由于生态系统的长期稳定发展,某些优势种会逐渐形成,从而导致一些劣势种逐渐淘汰,造成物种多样性下降<sup>[3,19]</sup>. Kleyer<sup>[13]</sup>的研究也表明,具有类似生物学特性的植物组群(功能类型)的多样性在“中度干扰”强度时达到最大.

#### 3.3.3 伐倒干扰强度指数效果检验

协方差分析结果表明,对群落采取不同的伐除干扰措施,除了对草本层的均匀度即草本种在群落中各个点分布的频度产生极其显著的影响外,还对草本层的物种多样性指数(此结果略)和灌木层的均匀度产生显著影响(表 2).

表 2 伐倒干扰强度 (IDISF) 和郁闭度对不同层次均匀度 (E) 的协方差分析  
 Table 2 Covariance analysis of evenness indices of different layers and the disturbing intensity of stump and fallen woods using the crown density as the covariate

层次 Layer	误差来源 Error source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
草本 Herb	模型 Model	0.870	3	0.290	25.184	0.005 **
	郁闭度 Crown density	0.00749	1	0.00749	0.650	0.465
	伐倒干扰强度 IDISF	0.809	2	0.405	35.139	0.003 **
	误差 Error	0.0461	4	0.0115		
灌木 Shrub	模型 Model	0.0576	3	0.0192	6.878	0.047 *
	郁闭度 Crown density	0.0189	1	0.0189	6.774	0.060
	伐倒干扰强度 IDISF	0.0506	2	0.0253	9.062	0.033 *
	误差 Error	0.0112	4	0.00279		

不同的郁闭度对乔木层的物种多样性指数产生了显著影响(表 3),是由于乔木层的物种多样性指数 H' 反映了乔木层包含的物种数目和个体在种间的分布特征,而郁闭度大小主要是由乔木层树冠的覆盖程度决定的<sup>[7]</sup>.

表 3 伐倒干扰强度 (IDISF) 和郁闭度对乔木层物种多样性指数 H' 的协方差分析  
 Table 3 Covariance analysis of species diversity indices of arbor layers and the disturbing intensity of stump and fallen woods using the crown density as the covariate

误差来源 Error source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
模型 Model	2.596	3	0.865	6.726	0.048 *
郁闭度 Crown density	1.798	1	1.798	13.978	0.020 *
伐倒干扰强度 IDISF	1.020	2	0.510	3.965	0.112
误差 Error	0.515	4	0.129		

综上所述,不同的干扰程度对灌、草层的多样性指数影响显著,但对乔木层的多样性指数影响不显著。而不同的郁闭度只对乔木层的多样性指数产生显著影响。因此,采用所建立的伐倒干扰强度指数来反映群落内灌草多样性指数的变化,效果显著。

## 4 讨 论

**4.1** 松材线虫入侵马尾松林后,恢复形成的群落如果向混交林或阔叶林方向发展,则林内的物种多样性升高;如果恢复为第2代马尾松林,则林内的物种多样性下降。王震洪等<sup>[23]</sup>对滇中几种典型人工林生态系统恢复效应的研究表明,植物多样性的恢复使生态系统功能处于“先驱者”的位置。植物多样性的增大在多数情况下也能导致某些害虫种群数量的下降<sup>[10]</sup>。研究还表明,混交林在防虫、防病,提高林地生产力和林木产量,改善土壤环境,提高土壤肥力方面有着纯林不可比拟的效果<sup>[15]</sup>。为了防止人工林地力衰退,可通过间伐,增大林内透光度,降低林分郁闭度。这样不仅可以增加林下草本和灌木的种类,也可相应地提高每种林分的高度、盖度,增加出现的株数,并能提高土壤肥力<sup>[22]</sup>。

因此,建议对于未受害且过密及刚受害的马尾松林分,可进行适度间伐,使其恢复成的林型保持较高的物种多样性,从而增加松林对松材线虫的抵抗力;对于受害严重的松林,也可采取适当伐除受害木和补栽一定数量阔叶树的措施,促使其更新成混交林,既能保持群落结构和功能的稳定,又能增加松林系统的抵抗力。

**4.2** 抵抗性是系统直接抵抗外界干扰的能力,而恢复性是指某一干扰后,系统恢复到初始状态的能力<sup>[9,18]</sup>。这两个概念描述了生态系统应付外界干扰的能力。针对松材线虫的入侵,有些松林生态系统直接表现出了抵御能力;而有些松林生态系统虽然未能直接抵抗住病原,但在随后的自身调节及人为干扰措施的引导下,若能恢复到保持一定松树数量的适宜林型,则也体现了松林生态系统对松材线虫入侵的抵御能力。

**4.3** 松材线虫入侵松林后,采取人为伐除受害木的干扰措施,如果过强或过弱都会造成林内植物多样性一定程度的下降。适度的人为干扰对稀疏马尾松林的自然更新及林下植物种类多样性具有一定的维持或促进作用。群落物种多样性增加是生态系统对外界干扰的一种良性反应,可能是对环境变化的一种策略。当然,如果外界干扰超过系统自身的调节能

力,那么群落就会发生逆行演替而难以恢复<sup>[14,20]</sup>。因此,只有采取适当的干扰措施,才能保持马尾松林较高的物种多样性和群落结构与功能的稳定。

## 5 结 论

**5.1** 研究表明,不同地理位置、不同林型及受害后不同恢复林型的马尾松林内的植物多样性差异显著。马尾松阔叶树混交林比马尾松纯林多样性高;内陆马尾松林比海岛马尾松林多样性高;伐除马尾松受害木后形成阔叶林的比更新成马尾松二代林的多样性高。

**5.2** 建立了伐倒干扰强度指数 IDISF。对于特定马尾松受害林分,群落的多样性指数随着 IDISF 的变化表现为:在较小和较大伐倒干扰强度时,群落多样性指数较低;中等伐倒干扰强度时,群落多样性指数较高。这个规律符合“中间高度膨胀”理论。同时表明这一指数能有效地反映松材线虫入侵危害后马尾松林植物多样性的变化。协方差分析可知,它对群落内灌草多样性指数的变化反应更敏感。

致谢 浙江省舟山市林业科学研究所王国明高级工程师和浙江林学院金水虎副教授给予指导,黄三祥硕士予以帮助。

## 参考文献

- 1 Academy of Forest Inventory and Planning of Forestry Ministry (林业部调查规划院). 1984. Forest Inventorial Manual. Beijing: China Forestry Press. 40~43 (in Chinese)
- 2 Chai X-M (柴希民), Jiang P (蒋平). 2003. The Breakout and Control of Pine Wilt Disease. Beijing: China Agricultural Press. 3~7 (in Chinese)
- 3 Chen R (陈睿), Hong W (洪伟), Wu C-Z (吴承祯). 2004. Analysis of the evergreen broad-leaf forest through the change of elevation gradient in the north of Fujian. *J Fujian For Coll* (福建林学院学报), 24(1): 12~16 (in Chinese)
- 4 Curmutt J.L. 2000. Host-area specific climatic-matching: Similarity breeds exotics. *Biol Conserv*, 94: 341~351
- 5 Deng S-J (邓仕坚), Zhang J-W (张家武), Chen C-Y (陈楚莹), et al. 1995. Effect of thinning intensity on the growth of *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia maclurei* mixed forests. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 6(3): 231~236 (in Chinese)
- 6 Department of Forestry, Anhui Agricultural College (安徽农学院林学系). 1980. Masson Pine. Beijing: China Forestry Press. 1~20 (in Chinese)
- 7 Ge F (戈峰). 2002. Modern Ecology. Beijing: Science Press. 244 (in Chinese)
- 8 Gentry A.H. 1988. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Ann Missouri Bot Gard*, 75: 1~34
- 9 Holling C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annu Rev Ecol Syst*, 4: 1~24
- 10 Hou M-L (侯茂林), Sheng C-F (盛承发). 1999. Effect of plant diversity in agroecosystems on insect pest populations. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 10(2): 245~250 (in Chinese)
- 11 Hu J-W (胡建伟). 1998. The confirming of tending thinning intensity. *For Eng* (森林工程), 14(1): 4~6 (in Chinese)
- 12 Jiang P (蒋平), Zhao J-N (赵锦年), Chai X-M (柴希民).

2001. Integrated control techniques of *Bursaphelenchus xylophilus*. *J Zhejiang For Sci Technol* (浙江林业科技), **21**(4): 1~6 (in Chinese)
- 13 Kleyer M. 1999. Distribution of plant functional types along gradients of disturbance intensity and resource supply in an agricultural landscape. *J Veg Sci*, **10**: 697~708
- 14 Kong G-H (孔国辉), Mo J-M (莫江明). 2002. Population dynamics of a human-impacted Masson pine plantation in Dinghushan. *J Trop Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报), **10**(3): 193~200 (in Chinese)
- 15 Li J-Y (李金英), Zeng X-H (曾祥划), Wu G (吴刚), et al. 2004. The regeneration and reconstruction of pure Masson pine forest. *Trop For* (热带林业), **32**(3): 39~40 (in Chinese)
- 16 Liu Z-M (刘志民), Zhao X-Y (赵晓英), Liu X-M (刘新民). 2002. Relationship between disturbance and vegetation. *Acta Pratac Sin* (草业学报), **11**(4): 1~9 (in Chinese)
- 17 Ma K-P (马克平). 1994. The measuring method of biotic community diversity. In: Qian Y-Q (钱迎倩), Ma K-P (马克平), eds. *The Research Theory and Method of Biological Diversity*. Beijing: China Science & Technology Press. 141~165 (in Chinese)
- 18 Ma S-J (马世骏). 1990. *The Perspective of Modern Ecology*. Beijing: Science Press. 54 (in Chinese)
- 19 Miao L-Y (苗莉云), Wang X-A (王孝安), Wang Z-G (王志高). 2004. Relationships between species diversity indices of *Larix chinensis* communities and environmental factors. *Acta Bot Boreali-Occident Sin* (西北植物学报), **24**(10): 1888~1894 (in Chinese)
- 20 Odum EP. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*, **164**: 262~270
- 21 Regionalization Office of Forestry Department in Zhejiang Province (浙江省林业厅区划办公室). 1991. *Zhejiang Forestry Regionalization*. Beijing: China Forestry Press. (in Chinese)
- 22 Sheng W-T (盛炜彤), Yang C-D (杨承栋). 1997. Research on effect of ameliorating soil properties by undergrowth vegetation of Chinese fir. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **17**(4): 377~385 (in Chinese)
- 23 Wang Z-H (王震洪), Duan C-Q (段昌群). 2003. Ecological restoration effects of typical manmade ecosystems and relationships between restoration variables in middle Yunnan area. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(9): 1439~1445 (in Chinese)
- 24 Yang Q-P (杨清培), Li M-G (李鸣光), Wang B-S (王伯荪). 2003. Dynamics of biomass and net primary productivity in succession of south subtropical forests in southwest Guangdong. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(12): 2136~2140 (in Chinese)
- 25 Zan Q-J (咎启杰), Li M-G (李鸣光), Wang B-S (王伯荪). 2000. Dynamics of community structure in successional process of needle and broad-leaved mixed forest in Heishiding of Guangdong. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **11**(1): 1~4 (in Chinese)

---

作者简介 石娟,女,1979年生,博士,讲师.主要从事林业外来有害生物研究,已发表论文6篇. Tel: 010-62338127-601; E-mail: shi\_juan@263.net

责任编辑 李凤琴

---