

DOI: 10.5846/stxb201212051753

崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 张健, 杨万勤. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性. 生态学报, 2014, 34(15): 4313-4323.

Cui N J, Chen X H, Liu Y, Zhang J, Yang W Q. Shrub and herb diversity at different ages of *Pinus massoniana* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4313-4323.

## 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性

崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 张健\*, 杨万勤

(四川农业大学生态林业研究所, 生态林业工程重点实验室, 成都 611130)

**摘要:** 采用典型抽样法, 选取了长江上游低山丘陵区不同林龄的马尾松(*Pinus massoniana*)人工林, 对林下植物物种组成和植物多样性进行调查研究。结果表明, 马尾松人工林林下植物物种组成、多样性指数、均匀度指数随林龄的增加呈现明显的波动性, 5a 时林下物种总数最小, 14a 时达到最大; 灌木层中梨叶悬钩子(*Rubus pirifolius*) 在各林龄林分下都占有较大优势, 中龄林(14a)林分下栲栳(*Quercus serrata*)、野桐(*Mallotus japonicus*)占绝对优势, 成熟林(37、39a)则以梨叶悬钩子和展毛野牡丹(*Melastoma normale*)为主。芒(*Miscanthus sinensis*)和芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为各林龄林分下草本层中的优势种。灌木和草本的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数随林龄增加均呈现早期波动, 中期下降, 后期增加并趋于稳定的变化趋势。随着林龄的增加, 马尾松人工林群落物种组成的相似性也出现波动, 幼龄林(3、5、8a)群落间共有种较少, 到了成熟林阶段(37、39a), 群落间共有种增多, 林下植物的群落相似系数较大, 达到 62.1%, 说明成熟林林下植物种类较为接近, 生态系统趋于稳定。

**关键词:** 马尾松人工林; 林龄; 植物多样性

### Shrub and herb diversity at different ages of *Pinus massoniana* plantation

CUI Ningjie, CHEN Xiaohong, LIU Yang, ZHANG Jian\*, YANG Wanqin

Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering in Sichuan Province, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

**Abstract:** Understory plant species composition and diversity were researched at different forest age of *Pinus massoniana* plantation in the hilly area of the upper reaches of the Yangtze River by typical sampling method. The results showed that plant species composition, diversity index and evenness index had an obvious volatility with increasing stand age, the total number of understory species was minimum at 5 years while maximum at 14 years; *Rubus pirifolius* in the shrub layer had a large advantage in different stage, *Quercus serrata* and *Mallotus japonicus* were dominant in middle-aged forest (14a), *Rubus pirifolius* and *Melastoma normale* were superior in mature forest (37a, 39a). *Miscanthus sinensis* and *Dicranopteris dichotoma* in the herbaceous layer were the dominant species at different stage of plantation. Both Simpson index and the Shannon-Wiener index of shrubs and herbaceous showed exactly the same trend that fluctuated at early stage, then declined at medium stage, at last increased and became stable at mature stage. There were less common species between the communities of early age (3a, 5a, 8a), however, there were more common species between the communities of mature stage (37a, 39a) which increased the similarity coefficient of understory plant community, the maximum similarity coefficient reached 62.1%, showing that level of similarity of understory plant species were closer and the ecosystem habitats were tend to be stable of the mature plantations.

**基金项目:** 国家科技支撑计划课题(2011BAC09B05); 四川省科技支撑计划项目(12ZC0017); 四川省科技厅应用基础项目(2012JY0047); 四川省教育厅科技创新团队资助计划项目(11TD006)资助

**收稿日期:** 2012-12-05; **网络出版日期:** 2014-03-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sicauzhangjian@163.com

**Key Words:** *Pinus massoniana* plantation; forest age; plant diversity

物种多样性是衡量群落结构与功能复杂性的一个重要指标,植被恢复过程物种多样性的变化反映了植被的恢复程度<sup>[1-2]</sup>,因此,对植物群落物种多样性的研究可以很好地认识植被恢复过程群落的组成、结构、功能、演替动态和稳定性<sup>[1-14]</sup>。林下植被作为森林生态系统的一个重要组成部分,它们在维护森林的多样性、生态功能稳定性和持续立地生产力方面具有独特的功能和作用<sup>[15]</sup>。

人工林生物多样性是影响人工林生态系统稳定性的重要因素,在一定程度上可以反映人工林可持续经营的水平,因此,倍受国内外学者们关注<sup>[3,5,9,14-18]</sup>。Verma 和庄雪影的研究均发现,人工林林下的植被多样性指数高于退化的天然林<sup>[16-17]</sup>,也有研究表明,人工林的物种多样性比同龄的天然林低<sup>[19-23]</sup>。人工林林下植被物种组成和多样性会随着林龄发生变化,幼龄林阶段物种丰富度逐渐增加,但随着林龄的增加,物种丰富度逐渐减少<sup>[24]</sup>;但也有相反的情况,苏永中等在科尔沁沙地对不同年龄的小叶锦鸡儿人工林进行了植物多样性的研究发现,随着林龄增加植物多样性明显增大<sup>[25]</sup>。李新荣的研究表明,干旱沙漠地区人工植被其多样性随群落演替的进行呈增加趋势<sup>[26]</sup>。另外,人工林类型、林分组成和林分密度等也对物种多样性的影响较为显著,其中林分密度的影响最显著<sup>[27]</sup>。

目前,长江上游低山丘陵区低效人工林的改造和生态恢复过程研究是当前恢复生态学研究的重要内容<sup>[3,28]</sup>。不同年龄阶段的人工林林下植物多样性标志着人工林演替的方向和进程,同时也预示着生态系统的恢复程度和稳定性<sup>[3]</sup>。马尾松是阳性树种,因耐干旱瘠薄,喜酸性、微酸性土壤(在 pH 4.5—6.5 条件下生长最佳),在砾石土、沙质土、粘土、山脊和阳坡的冲刷薄地上以及陡峭的石山岩缝里都能生长,是恢复退化土地的先锋树种<sup>[29]</sup>,也是我国长江下游低山丘陵区的重要绿化造林树种。由于四川低山丘陵区长期的人为干扰,导致了马尾松人工林林分生产力和生态效益降低、林地出现退化以及生物多样性单一的现象<sup>[29-31]</sup>,急需进行林分结构改造。鉴于此,研究以长江上游低山丘陵区马尾松人工纯

林为研究对象,采用时空互换法,以不同年龄的马尾松人工林替代其演替进程,对不同生长发育阶段的马尾松人工林林下植被进行调查,为深入了解长江上游低山丘陵区不同演替阶段人工林的林下植被恢复、群落演替及物种多样性的变化,以及马尾松人工林林分结构改造和可持续经营提供理论依据。

## 1 研究区概况

四川省宜宾市高县来复镇森林经营所林区,位于四川盆地南缘,高县北部,东经 104°21'—104°48',北纬 28°11'—28°47',地处川云公路中段,宜高路、来沙路在此交汇,气候类型属中亚热带湿润季风气候,多年平均温度 17.5 °C,年均降水量 1070.4 mm,气候温和,雨量充沛,立体气候明显。植被绝大部分为原始植被受破坏后的次生植被与人工植被,境内亚热带次生性常绿针叶林植被分布较广。

该研究样地选自于来复辖区内川云中路毛颠坳的人工马尾松林,海拔高度在 400—550 m 之间,土壤为铁铝土性质老冲积黄壤,选择地形地貌、海拔、母岩、土壤类型等相同或相近的不同林龄马尾松人工林为研究样地,马尾松人工林林分结构简单,乔木以马尾松为主。乔木层林冠以下的灌木、草本以及蕨类植物较稠密,林下层树种主要以芒、芒萁、梨叶悬钩子和野桐等为主。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选取及调查方法

采用空间代替时间的方法,在宜宾市来复森林经营所毛颠坳林区选定立地条件相近,林龄分别为 3、5、8、14、37 年生和 39 年生的马尾松人工林,分别代表幼龄林阶段(3、5、8a)、中龄林阶段(14a)和成熟林阶段(37、39a)。每个年龄林分面积大约为 3—8hm<sup>2</sup> 不等,在每块不同林龄的人工林内分别选取 3 个 20 m×20 m 的样地,在每个样地内根据对角线方法选取 3 个 5 m×5 m 的样方调查灌木层,同时选取 3 个 1 m×1 m 的小样方调查草本层,记录每种植物的种名,株数/丛数,高度,盖度,冠幅<sup>[32-36]</sup>,同时记录样地的地理位置,如海拔,坡度,坡向等<sup>[35-36]</sup>。

表 1 样地设置及林分状况

Table 1 Sample plot and forest conditions

| 林龄<br>Forest<br>age/a | 海拔<br>Elevation<br>/m | 经度<br>Longitude | 纬度<br>Latitude | 坡度<br>Slope<br>/(°) | 坡向<br>Aspect | 郁闭度<br>Conopy<br>density | 树高<br>Tree<br>height/m | 胸径<br>DBH/cm | 株行距<br>Row<br>space | 土壤 pH | 土壤容重<br>Soil bulk<br>density<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 有机质<br>Soil<br>organic<br>/(g/kg) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|----------------|---------------------|--------------|--------------------------|------------------------|--------------|---------------------|-------|---|-----------------------------------|
| 3                     | 417                   | 104°33'43"      | 28°35'49"      | 18                  | NW           | 未成造                      | 1.3                    | 2.4          | 2m×2m               | 4.17  | 1.39  | 25.02                             |
| 5                     | 511                   | 104°33'58"      | 28°36'10"      | 22                  | NW           | 0.2                      | 4.2                    | 5.0          | 2m×2m               | 4.11  | 1.51  | 34.64                             |
| 8                     | 515                   | 104°34'02"      | 28°36'06"      | 22                  | NW           | 0.6                      | 4.6                    | 5.8          | 2m×2m               | 4.16  | 1.42  | 20.96                             |
| 14                    | 522                   | 104°33'92"      | 28°36'02"      | 18                  | NW           | 0.8                      | 9.3                    | 10.9         | 2m×2m               | 4.02  | 1.34  | 40.69                             |
| 37                    | 458                   | 104°33'43"      | 28°35'49"      | 25                  | NW           | 0.5                      | 15.2                   | 16.5         | 2m×2m               | 4.14  | 1.55  | 20.75                             |
| 39                    | 430                   | 104°33'41"      | 28°35'47"      | 20                  | NE           | 0.6                      | 16.0                   | 17.4         | 2m×2m               | 4.13  | 1.46  | 60.60                             |

## 2.2 数据处理与分析

通过野外调查数据,分别计算灌木层和草本层植物的重要值,再进行多样性指数的计算,物种多样性测定指标一般为丰富度指数  $R_o$ 、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Alatalo 均匀度指数和群落相似系数 Sorensen 指数等。

(1) 灌木层和草本层的重要值<sup>[37-38]</sup>:

$$IV = (\text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 2$$

(2) 丰富度指数<sup>[37-40]</sup>:

$$R_o = S$$

(3) Simpson 指数<sup>[33,35]</sup>:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

(4) Shannon-Wiener 指数<sup>[33,35]</sup>:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

(5) Pielou 均匀度指数<sup>[33,35]</sup>:

$$Jsw = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

(6) Alatalo 均匀度指数<sup>[33,35]</sup>:

$$AL = [1 / \sum (P_i)^2 - 1] / [\exp(- \sum P_i \ln P_i) - 1]$$

(7) 群落相似系数 Sorensen 指数<sup>[41-43]</sup>:

$$IS = [2c / (a+b)] \times 100\%$$

式中,  $P_i$  为相对重要值,  $S$  为样方出现的物种数目<sup>[33-34,37-40]</sup>,  $a$  为其中一个样地的物种数,  $b$  为另一个

样地的物种数,  $c$  为这两个样地的共有物种数<sup>[41-43]</sup>。

采用 EXCEL2003 作图, SPSS19.0 进行数据统计, 对不同林龄马尾松林下的物种多样性采用单因素方差分析 (Oneway ANOVA)。

## 3 结果与分析

### 3.1 马尾松人工林林下物种组成及重要值

重要值是确定群落中植物相对重要性的一个综合指标, 可以比较全面的反应植被不同发育时期种群在群落中的功能地位和种群在群落中的分布格局<sup>[44]</sup>。在所有样方中, 马尾松人工林下出现的植物种类为 43 科 60 属 67 种, 其中木本植物 23 科 33 属 38 种; 草本植物 20 科 27 属 29 种。对马尾松人工林群落内林下灌木层和草本层的物种重要值进行统计 (表 2 和表 3), 结果表明, 灌木层中野桐、梨叶悬钩子在各林龄林分下都占有较大优势。中龄林林分下枹栎、野桐占有绝对优势, 重要值都在 23% 以上, 其他种重要值大小分布较均衡, 彼此差异不大。成熟林则以梨叶悬钩子、展毛野牡丹为主。草本层中芒和芒萁在各林龄林分下都占有绝对优势, 为草本层的优势种。幼龄林芒的重要值均在 25% 以上, 3a 马尾松人工林未郁闭时, 芒萁相对较少, 5a 后林分基本郁闭, 林下芒萁数量逐渐增加, 待到中龄林和成熟林, 芒萁绝对优势凸显, 重要值达到 40% 左右。

表 2 灌木层主要物种组成及其重要值/%

Table 2 The main species composition and important values of the shrub layer

| 种名 Species                    | 林龄 Forest age |    |       |      |      |     |
|-------------------------------|---------------|----|-------|------|------|-----|
|                               | 3a            | 5a | 8a    | 14a  | 37a  | 39a |
| 巴豆 <i>Croton tiglium</i>      | —             | —  | —     | 6.03 | —    | —   |
| 茶 <i>Camelia sinensis</i>     | —             | —  | 14.61 | 1.69 | 5.13 | —   |
| 斑鸠菊 <i>Vernonia seculenta</i> | —             | —  | —     | —    | 1.97 | —   |

续表

| 种名 Species                            | 林龄 Forest age |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                       | 3a            | 5a    | 8a    | 14a   | 37a   | 39a   |
| 茶茱萸 <i>Viburnum setigerum</i>         | —             | —     | 1.67  | —     | 5.93  | 5.55  |
| 楸木 <i>Aralia chinensis</i>            | —             | —     | 3.35  | 0.26  | 10.53 | 2.54  |
| 地果 <i>Ficus tikoua</i>                | 0.40          | —     | —     | —     | —     | 0.64  |
| 枹栎 <i>Quercus serrata</i>             | —             | 35.26 | 8.49  | 24.33 | —     | 7.15  |
| 岗柃 <i>Eurya groffii</i>               | —             | 7.88  | —     | —     | —     | —     |
| 葛藤 <i>Pueraria lobata</i>             | 6.23          | —     | 0.83  | 6.34  | —     | —     |
| 构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>     | —             | —     | —     | 1.24  | 5.31  | —     |
| 光叶海桐 <i>Pittosporum glabratum</i>     | —             | —     | —     | 0.26  | —     | —     |
| 合欢 <i>Albizia julibrissin</i>         | —             | —     | 2.69  | 1.04  | —     | —     |
| 黄荆 <i>Vitex negundo</i>               | —             | —     | —     | —     | —     | 5.16  |
| 黄牛奶 <i>Symplocos laurina</i>          | —             | 0.82  | 4.47  | 0.55  | —     | 5.87  |
| 鸡仔木 <i>Sinoadina racemosa</i>         | —             | —     | —     | 1.81  | —     | —     |
| 尖叶榕 <i>Ficus henryi</i>               | —             | —     | —     | —     | —     | 2.77  |
| 金银花 <i>Lonicera japonica</i>          | —             | —     | —     | —     | —     | —     |
| 巨桉 <i>Eucalyptus grandis</i>          | 26.96         | —     | —     | —     | 3.56  | —     |
| 梨叶悬钩子 <i>Rubus pirifolius</i>         | 15.41         | 12.75 | 5.03  | —     | 15.69 | 7.72  |
| 裂叶榕 <i>Ficus laceratifolia</i>        | 1.10          | 0.84  | 4.26  | 1.78  | 4.06  | 2.97  |
| 柃木 <i>Eurya japonica</i>              | —             | —     | 0.58  | 1.31  | —     | 3.93  |
| 木姜子 <i>Litsea cubeba</i>              | —             | 15.35 | 6.50  | —     | —     | —     |
| 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>     | —             | —     | —     | 8.60  | —     | 12.20 |
| 水竹 <i>Phyllostachys heteroclada</i>   | —             | —     | —     | 1.10  | —     | —     |
| 算盘子 <i>Glochidion puberum</i>         | 1.73          | —     | —     | —     | —     | 1.54  |
| 铁仔 <i>Myrsine africana</i>            | 1.14          | 9.58  | 1.49  | 2.30  | 0.81  | 4.85  |
| 乌柏 <i>Sapium sebiferum</i>            | 3.85          | —     | 7.73  | 0.65  | —     | —     |
| 乌泡 <i>Rubus multibracteatus</i>       | 4.37          | 7.46  | 3.80  | 1.57  | 6.42  | 7.93  |
| 香花崖豆藤 <i>Millettia dielsiana</i>      | —             | 0.47  | —     | 2.45  | —     | —     |
| 香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>         | 3.32          | —     | —     | 6.03  | 7.16  | —     |
| 肖梵天花 <i>Urena lobata</i>              | —             | —     | 3.48  | 0.12  | 1.19  | 1.05  |
| 盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>             | 14.57         | —     | —     | —     | 8.19  | 1.90  |
| 野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>   | —             | 7.01  | —     | —     | —     | —     |
| 野桐 <i>Mallotus japonicus</i>          | 8.28          | 2.58  | 26.57 | 28.21 | 4.57  | 7.50  |
| 油樟 <i>Cinnamomum longepaniculatum</i> | 5.64          | —     | —     | —     | 3.15  | 2.65  |
| 展毛野牡丹 <i>Melastoma normale</i>        | 7.00          | —     | 3.48  | —     | 16.33 | 12.80 |
| 梔子 <i>Gardenia jasminoides</i>        | —             | —     | 0.97  | 1.29  | —     | 3.28  |
| 竹叶椒 <i>Zanthoxylum planispinum</i>    | —             | —     | —     | 1.04  | —     | —     |

表 3 草本层主要物种组成及其重要值/%

Table 3 The main species composition and important values of the Herbage layer

| 种名 Species                         | 林龄 Forest age |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|
|                                    | 3a            | 5a   | 8a   | 14a  | 37a  | 39a  |
| 牛筋草 <i>Eleusine indica</i>         | —             | —    | —    | —    | 2.95 | —    |
| 淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>     | —             | 1.32 | 0.74 | —    | 0.31 | 5.40 |
| 杠板归 <i>Polygonum perfoliatum</i>   | 0.69          | —    | —    | —    | —    | —    |
| 狗脊蕨 <i>Woodwardia japonica</i>     | —             | —    | —    | 4.69 | —    | —    |
| 海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>      | 3.86          | —    | 0.58 | —    | 1.79 | 1.22 |
| 华中瘤足蕨 <i>Plagiogyria euphlebia</i> | —             | 1.33 | 0.33 | —    | —    | —    |

续表

| 种名 Species                              | 林龄 Forest age |       |       |       |       |       |
|---|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 3a            | 5a    | 8a    | 14a   | 37a   | 39a   |
| 黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>         | 4.63          | —     | —     | —     | —     | —     |
| 积雪草 <i>Centella asiatica</i>            | 1.70          | —     | —     | —     | —     | —     |
| 建兰 <i>Cymbidium ensifolium</i>          | 0.81          | —     | 1.23  | 0.99  | 1.98  | 0.67  |
| 金星蕨 <i>Parathelypteris glanduligera</i> | —             | 21.77 | 9.62  | —     | —     | 6.52  |
| 荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>            | 6.58          | —     | —     | —     | —     | —     |
| 荆芥 <i>Schizonepeta tenuifolia</i>       | —             | —     | —     | 2.07  | —     | 1.32  |
| 蕨 <i>Miscanthus sinensis</i>            | —             | 18.78 | —     | 13.24 | 10.43 | 3.74  |
| 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>         | —             | —     | 6.14  | —     | —     | 5.97  |
| 姬蕨 <i>Hypolepis punctata</i>            | —             | —     | —     | —     | 2.25  | —     |
| 里白 <i>Diplazium glaucum</i>             | —             | —     | —     | —     | 1.98  | —     |
| 芒 <i>Miscanthus sinensis</i>            | 52.02         | 27.49 | 39.42 | 15.96 | 22.47 | 13.86 |
| 芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>       | 7.00          | 29.31 | 23.78 | 47.42 | 49.51 | 38.46 |
| 美洲商陆 <i>Phytolacca americana</i>        | 8.34          | —     | 14.14 | —     | —     | —     |
| 雀稗 <i>Paspalum thunbergii</i>           | 10.53         | —     | —     | —     | —     | —     |
| 铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i>    | 2.07          | —     | —     | —     | —     | —     |
| 乌蕨 <i>Stenoloma chusanum</i>            | —             | —     | —     | 2.37  | —     | 9.58  |
| 乌藨莓 <i>Cayratia japonica</i>            | —             | —     | —     | 0.59  | —     | —     |
| 细柄草 <i>Capillipedium parviflorum</i>    | —             | —     | —     | 4.18  | —     | —     |
| 仙茅 <i>Curculigo orchoides</i>           | —             | —     | —     | 2.86  | —     | —     |
| 香附子 <i>Cyperus rotundus</i>             | —             | —     | —     | 2.96  | 0.72  | —     |
| 小婆婆纳 <i>Veronica serpyllifolia</i>      | 1.77          | —     | —     | —     | —     | —     |
| 斜方复叶耳蕨<br><i>Arachniodes rhomboidea</i> | —             | —     | 1.27  | —     | —     | —     |
| 皱叶狗尾草 <i>Setaria plicata</i>            | —             | —     | 2.75  | 2.67  | 5.61  | 13.26 |

### 3.2 不同林龄马尾松林下物种丰富度指数

不同年龄阶段的马尾松林下物种丰富度指数存在明显差异和波动性,灌木、草本物种数表现出几乎完全一致的变化趋势。方差分析表明,不同林龄间的灌木、草本和总的灌草丰富度均具有极显著差异 ( $P < 0.01$ , 图 1, 表 5)。随着林龄的增加,灌草物种数目先下降,5a 时丰富度指数最小,8a 时林下物种数目又急剧增长,在 14a 时达到最大,之后又随林龄增加而有所下降,林龄达到 37a 后林下物种丰富度指数又有所回升。经多重比较,14a 的灌木、草本和总的灌草丰富度指数和 3、8a 的均有极显著差异 ( $P < 0.01$ ),37a 和 3、8、39a 的灌木和总的灌草丰富度指数差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 3.3 不同林龄马尾松林下灌草多样性指数

马尾松林下草本层的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数随林龄的增加变化趋势几乎一致。不同林龄间草本层的 Shannon-Wiener 指数差异显著 ( $P < 0.05$ , 图 2, 表 5), 但 Simpson 指数差异不显著 ( $P >$

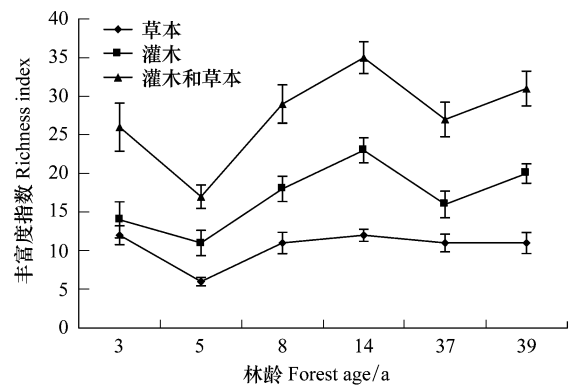


图 1 不同林龄马尾松林下灌草丰富度指数

Fig.1 The species richness index of Shrub and Herbage under the different ages of *Pinus massoniana* forest

0.05 图 2, 表 5), 草本多样性在 8a 时最高,14a 时多样性最低,在 14a 后物种多样性随林龄的增加而增加。灌木层的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数随林龄的增加表现出明显的波动性,不同林龄间的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数均具有极显著

差异( $P < 0.01$ , 图 2, 表 5), 均在 8a 时达到最高, 5a 时最低。

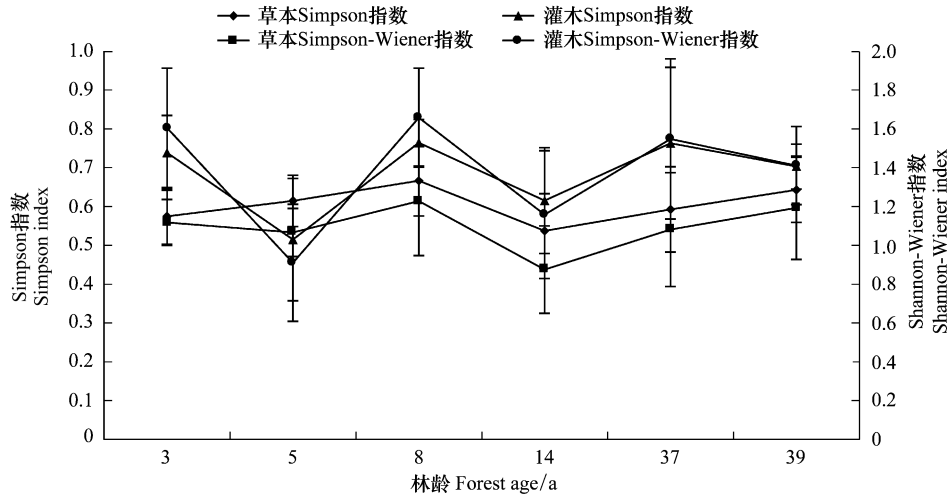


图 2 不同林龄马尾松林下灌草多样性指数

Fig. 2 The species diversity index of the Shrub and Herbage under the different ages of *Pinus massoniana* forest

表 4 林龄对灌木和草本层多样性指数的影响

Table 4 One-way ANOVA for shrub and herbage diversity index affect by forest age

| 变量<br>Variables       | 层次<br>Layer | 自由度<br>df | 平方和<br>Sum of squares | 均方<br>Mean square | F     | P      |
|-----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------------------|-------|--------|
| 丰富度指数 $R_o$           | 灌木层         | 5         | 79.343                | 15.869            | 5.874 | <0.001 |
|                       | 草本层         | 5         | 28.450                | 5.690             | 4.709 | 0.002  |
|                       | 灌草层         | 5         | 158.263               | 31.653            | 6.104 | <0.001 |
| Simpson 指数 $D$        | 灌木层         | 5         | 0.354                 | 0.071             | 3.979 | 0.006  |
|                       | 草本层         | 5         | 0.093                 | 0.019             | 2.273 | 0.067  |
| Shannon-Wiener 指数 $H$ | 灌木层         | 5         | 2.897                 | 0.579             | 5.942 | 0.001  |
|                       | 草本层         | 5         | 0.687                 | 0.137             | 2.496 | 0.048  |
| Pielou 指数 $J_{sw}$    | 灌木层         | 5         | 0.053                 | 0.011             | 1.102 | 0.376  |
|                       | 草本层         | 5         | 0.140                 | 0.028             | 2.837 | 0.029  |
| Alatalo 指数 $AL$       | 灌木层         | 5         | 0.008                 | 0.002             | 0.086 | 0.994  |
|                       | 草本层         | 5         | 0.183                 | 0.037             | 3.517 | 0.011  |

$P < 0.05$  差异显著,  $P < 0.01$  差异极显著,  $P > 0.05$  差异不显著

### 3.4 不同林龄马尾松林下灌草均匀度指数

经单因素方差分析, 不同林龄间草本层  $J_{sw}$  指数和  $AL$  指数均有显著差异 ( $P < 0.05$ , 图 3, 表 5), 不同林龄间灌木层  $J_{sw}$  指数和  $AL$  指数无显著差异 ( $P > 0.05$ , 图 3, 表 5)。草本层  $J_{sw}$  指数和  $AL$  指数均在 3a 时最低, 之后  $J_{sw}$  指数随林龄不断升高, 在 14a 达到最高后略有下降, 在 37a 后又有所回升,  $AL$  指数则在 8a 时最高。灌木层  $J_{sw}$  指数和  $AL$  指数随林龄的增加变化趋势相同, 均在 5a 时最低, 37a 时最高。经多重比较, 3a 生马尾松人工林的草本层  $J_{sw}$  指数和  $AL$  指数与其他各林龄的草本层  $J_{sw}$  指数和  $AL$  指

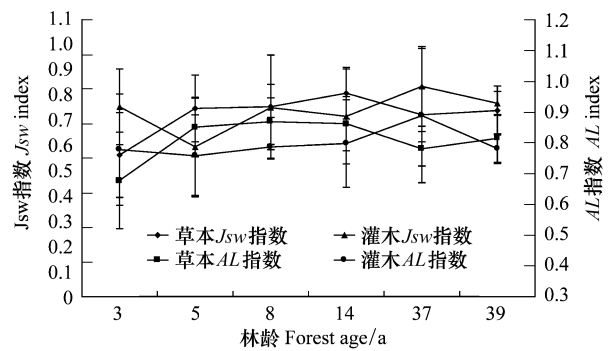


图 3 不同林龄马尾松林下灌草均匀度指数

Fig. 3 The species evenness index of the Shrub and Herbage under the different ages of *Pinus massoniana* forest

数间均有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 5a 和 37a 的马尾松人工林的灌木层  $J_{sw}$  均匀度指数具有显著差异 ( $P <$

$0.05$ ), 而各林龄间的灌木层  $AL$  均匀度指数差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 5 马尾松人工林的群落相似系数  $IS$ Table 5 The coefficient of community similarity  $IS$  of *Pinus massoniana* forest

| 林龄 Forest age/a | 3  | 5    | 8    | 14   | 37   | 39   |
|-----------------|----|------|------|------|------|------|
| 3               |    | 32.6 | 47.3 | 32.8 | 52.8 | 49.1 |
| 5               | 7  |      | 56.5 | 38.5 | 40.9 | 50.0 |
| 8               | 13 | 13   |      | 56.3 | 57.1 | 70.0 |
| 14              | 10 | 10   | 18   |      | 48.4 | 54.5 |
| 37              | 14 | 9    | 16   | 15   |      | 62.1 |
| 39              | 14 | 12   | 21   | 18   | 18   |      |

对角线右上角为相似系数/%, 左下角为物种共有数

### 3.5 马尾松人工林的物种组成相似性

从表 4 可以看出, 随着林龄的增加, 马尾松人工林群落物种组成的相似性即 Sorensen 指数在变化。在造林初期 (3、5、8a) 林下植被共有种较少, 但随着林龄的增加, 群落间共有种变多, 群落物种组成的相似性系数也较大, 到了中龄林 (14a) 和成熟林 (37、39a) 阶段, 物种更替速率减缓, 群落间共有种增多, 说明随林龄的增加林下植被群落趋于稳定。即低龄林群落相似系数较低, 到了成熟林阶段 Sorensen 指数又增加, 并高于幼龄林的物种相似性。8a 生的马尾松人工林多样性指数最高, 物种数较多, 故和 39a 的马尾松人工林林下物种相似系数最大, 达 70.0%, 37a 和 39a 的马尾松成熟林林下植物的物种相似系数也较大, 约达 62.1%, 说明到了成熟林阶段植被群落的生境趋于稳定, 植物种类相近。

## 4 结论与讨论

### 4.1 不同林龄群落植物物种组成及重要值

马尾松人工林下出现的植物种类为 42 科 59 属 66 种, 其中木本植物 23 科 33 属 38 种; 草本植物 19 科 26 属 28 种。幼龄林阶段, 林下灌草植物种类变化很大, 物种数由 3a 林龄的 26 种下降到 17 种再到 8a 林龄的 29 种, 主要是由于造林初期光照条件优越, 为大量喜光的先锋植物和随机种所侵入<sup>[3, 32, 35, 45]</sup>, 像葛藤、巨桉、盐肤木、积雪草、小婆婆纳等, 巨桉和盐肤木的重要值都较大, 成为灌木层的优势物种, 之后物种数目下降的原因可能是林下生存空间和养分的竞争加剧, 一些物种在竞争中被淘汰出局<sup>[46-47]</sup>, 8a 时林下植物物种又急剧增加, 这可能

是因为 8a 生马尾松已经基本成林, 郁闭度达到 50%—60%, 为一些耐阴植物的出现提供了良好的生境条件。中龄林的林分郁闭度增加到 80%, 耐阴植物继续入侵和定居, 14a 的马尾松样地处于阴坡, 这主要是由于阴坡比阳坡光照时间短、水分条件好, 低耐旱和喜阴物种易存活, 利于植被的生长发育<sup>[48-49]</sup>, 所以 14a 生林下植物物种数目达到最大。说明马尾松人工林林下植物丰富度指数与林分郁闭度有关, 因此在营林改造过程中要定期进行疏伐、修理等措施, 保持最佳的林分郁闭度, 从而增加物种多样性<sup>[50]</sup>。成熟林阶段林下植物种类稍减, 可能是由于马尾松针叶积累较多, 黄酮类和单宁等难分解物质降低了土壤养分质量<sup>[35]</sup>, 导致巴豆、葛藤、乌桕、狗脊蕨等适应力较差的物种消退, 但成熟林植物种类较幼龄林要多并呈现稍显稳定的灌草结构。

野桐、梨叶悬钩子、芒和芒萁在各林龄林分下都占有较大优势, 桉桉、建兰、铁仔、裂叶榕等的重要值虽不大, 但是几乎伴随人工林的各个年龄阶段出现, 说明这些物种对马尾松人工林的林下环境的适应力很强<sup>[3]</sup>。由于林下生境不同, 不同物种的喜好和适应性不同, 所以不同时期的优势物种也在变化, 幼龄林桉桉、美洲商陆等的重要值较大, 中龄林林分下桉桉、蕨占有绝对优势, 重要值都在 23% 以上, 其他种重要值大小分布较均衡, 彼此差异不大, 成熟林则是展毛野牡丹占优势。

### 4.2 不同林龄群落植物多样性

林龄反映着森林群落的抗逆性、完整性及演替的进程等状况, 林龄不同, 其林下植物的多样性会有所差异。本研究结果显示, 马尾松林下草本层的多

样性指数随林龄的增加呈现波动变化,草本层植物生长周期较短,易受到不同状况的干扰,对环境反映敏感,随机性强,因而其多样性水平更具波动性,但 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数的变化趋势一致,均是在 8a 时最高,14a 时最低,8a 时 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数达到最大可能是两方面原因:一是 8a 马尾松人工林林下植物种数较多,二是物种的个体数较多;虽然 14a 时物种数最多,但是可能由于部分物种优势明显,影响了其他物种的生长以至于其他物种个体数较少且植株矮小<sup>[46]</sup>,故其多样性指数不高。草本层的 *Jsw* 指数和 *AL* 指数的变化趋势几乎一致,3a 时最低,虽然此林分中出现的植物种类相对较多,但物种的个体数和覆盖度均较低,因而均匀度较低。之后随林龄的增加多样性指数和均匀度指数缓慢增大,但最大林龄的多样性指数和均匀度指数并不是最高的,这与前人的一些研究结果相似<sup>[51-52]</sup>,这可能是由于经过前期发育过程中的激烈竞争和遴选,多数物种分别找到了各自的生态位,而余下物种被淘汰<sup>[14]</sup>。但成熟林的均匀度指数明显高于幼龄林,可能是成熟林阶段,乔木层的生长已维持在一定水平,其林相、光照等环境因子相对比较稳定,对林下植物的生长、分布影响不大。

相较草本层而言,马尾松人工林灌木层的多样性指数与均匀度指数都较高,在一定程度上说明灌木是较草本更适合当地环境特征的植被配置类型<sup>[1]</sup>。和草本层一样,灌木层的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数也在 8a 时达到最高,但是在 5a 时最低,主要是因为 5a 时蕨、芒、芒萁等优势植物生长茂盛,占据太多生存空间和消耗太多养分,严重限制了某些灌木植物的生长进而导致该物种死亡或消退<sup>[46]</sup>。灌木层的 *Jsw* 指数和 *AL* 指数的变化趋势完全一致,灌木层的均匀度指数变化范围不大,各林龄间的差异不显著,但是随林龄的增加呈现一定的规律性,大体上是成熟林的均匀度指数较幼龄林和中龄林高,源于马尾松成熟林其生境条件相对稳定,林下物种的更替缓慢,且林下灌木如展毛野牡丹、梨叶悬钩子等优势突显,覆盖度较大,因此成熟林的均匀度指数较高。

#### 4.3 不同林龄群落物种间的相似系数

幼龄林时期的林下植被共有种较少,很快随着林龄的增加,群落间共有种变多,群落物种组成的相

似性系数也较大,到了中龄林和成熟林阶段,物种更替速率减缓,群落间共有种增多,Sorensen 指数也增大,马尾松成熟林 37a 和 39a 的林下共有植物种数有 18 种,相似系数达到 62.1%,说明随林龄的增加林下植被群落趋于稳定。

本研究表明,不同年龄马尾松人工林林下植被多样性呈现早期波动,中期降低,后期增加并趋于稳定的变化规律。野桐、梨叶悬钩子、芒、芒萁、柞、建兰、铁仔和裂叶榕等物种贯穿人工林的各个年龄阶段出现,说明这些物种对马尾松人工林的林下环境具有较强的适应力,可以考虑作为马尾松人工林植物恢复的建群种,以更好地维持群落较高的物种多样性和稳定性。在根据立地条件改造人工林的过程中,要充分考虑到林分郁闭度对植物多样性的影响,选择最佳的林分密度和定期的疏伐修整枝条,有助于人工林林下植物多样性的恢复和植被结构的改善,从而促进人工林生态系统功能的恢复。

#### References:

- [1] Wang Y J, Tao J P, Zhang W Y, Zang R G, Wang W, Li X F, Li Y. Dynamics of species diversity vegetation restoration on tudiling of Mao County, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1028-1036.
- [2] Yan M, Bi R C. Vegetation classification and comparative analysis of species diversity of community at different succession stages in Huoshan Mountain of Shanxi Province. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2009, 18(3): 56-62.
- [3] Wu Y, Liu Q, He H, Lin B. Dynamics of species diversity in artificial restoration process of Subalpine coniferous forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [4] Xian J R, Wan F R, Hu T X, Yang H. Dynamics of species diversity in natural restoration process of Subalpine coniferous forest. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2008, 26(2): 158-162.
- [5] Gao X M, Chen L Z. Studies on the species diversity of *Quercus Liaotungensis* communities in Beijing Mountains. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(1): 23-32.
- [6] Huang J H, Han X G. Biodiversity and ecosystem stability. *Chinese Biodiversity*, 1995, 3(1): 31-37.
- [7] McNaughton S J. Stability and diversity of ecological communities. *Nature*, 1978, 274(5668): 251-253.
- [8] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [9] Feng Y Z. Species diversity and managed ecosystem stability. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(6): 853-857.



- [10] Xie J Y, Chen L Z. The studies of some aspects of biodiversity on scrubs in the warm temperate zone in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(3): 197-207.
- [11] Xie J Y, Chen L Z. Species diversity characteristics of deciduous forests in the Warm temperate Zone of North China. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(4): 337-354.
- [12] Ru W M, Zhang J T, Zhang F, Zhang G P, Liu R X. Species diversity and community structure of forest communities in Lishan Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 561-566.
- [13] Ru W M, Zhang J T, Bi R C, Zhang F, Zhang G P. Species diversity of undergrowths in Huoshan mountains of Shanxi Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1139-1142.
- [14] Guo L J, Zhang W H, Liu G B. Species diversity and interspecific association in development sequence of Hippophae rhamnoides plantations in loess hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 9-15.
- [15] He Y L, Fu W Y. Review of studies on understorey of plantations. *Forest Research*, 2002, 15(6): 727-733.
- [16] Verma R K, Kapoor K S, Rawat R S, Subramani S P. Analysis of plant diversity in degraded and plantation forests in Kunihar Forest Division of Himachal Pradesh. *Indian Journal of Forestry*, 2005, 28(1): 11-16.
- [17] Zhuang X Y, Qiu M L. An investigation of floristic diversity of three types of plantations in Hong Kong. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1998, 6(3): 196-202.
- [18] Nagaike T, Hayashi A, Abe M, Arai N. Differences in plant species diversity in *Larix kaempferi* plantations of different ages in central Japan. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183(1): 177-193.
- [19] Hunt S L, Gordon A M, Morris D M, Marek G T. Understorey vegetation in northern Ontario jack pine and black spruce plantations; 20-year successional changes. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(9): 1791-1803.
- [20] Ramovs B V, Roberts M R. Understorey vegetation and environment responses to tillage, forest harvesting, and conifer plantation development. *Ecological Applications*, 2003, 13(6): 1682-1700.
- [21] Bobiec A. The mosaic diversity of field layer vegetation in the natural and exploited forests of Bialowieza. *Plant Ecology*, 1998, 136(2): 175-187.
- [22] Qian H, Klinka K, Sivak B. Diversity of the understorey vascular vegetation in 40-year-old and old growth forest stands on Vancouver Island, British Columbia. *Journal of Vegetation Science*, 1997, 8(6): 773-780.
- [23] Duan R Y, Wang C, Wang X A, Zhu Z H, Guo H. Differences in plant species diversity between conifer (*Pinus tabulaeformis*) plantations and natural forests in middle of the Loess plateau. *Russian Journal of Ecology*, 2009, 40(7): 501-509.
- [24] Verma R K, Kapoor K S, Subramani S P, Rawat R S. Evaluation of plant diversity and soil quality under plantations raised in surface mined areas. *Indian Journal of Forestry*, 2004, 27(2): 227-233.
- [25] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, Li Y L. Characteristics of plant community and soil properties in the plantation chronosequence of Caragana Microphylla in Horqin Sandy Land. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(1): 93-100.
- [26] Li X R, Zhang J G, Liu L C, Chen H S, Shi Q H. The plant diversity in the process of artificial vegetation and environmental evolution in drought desert of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 24(3): 257-261.
- [27] Qin X S, Liu Y Q, Xing F W. Species diversity in undergrowth of artificial forests on Lower Hilly land. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(3): 223-228.
- [28] Zhang J E, Xu Q. Major issues in restoration ecology researches. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 109-113.
- [29] Mo J M, Sandra B, Peng S L, Kong G H, Zhang D Q, Zhang Y C. Role of understorey plants on nutrient cycling of a restoring degraded pine forests in a mab reserve of subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1407-1413.
- [30] Mo J M, Peng S L, Sandra B, Fang Y T, Kong G H. Nutrient dynamics in response to harvesting practices in a pine forest of subtropical China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(6): 810-822.
- [31] Fang Y T, Mo J M, Li D J, Cao Y S. Dynamics of energy distribution and its production of a pinus massoniana community in Dinghushan biosphere reserve. *Guihaia*, 2005, 25(1): 26-32.
- [32] Wen Y G, Yuan C A, Li X X, He T P, Lai J Y, Huang M. Development of species diversity in vegetation restoration process in mid mountain region of Damingshan, Guangxi. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(1): 33-40.
- [33] Ma K P, Huang J H, Yu S L, Chen L Z. Plant community diversity in ongling mountain, Beijing, China: II. Species richness, evenness and species diversities. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268-277.
- [34] Zhang H T, Tao J P, Wang L, Zuo J, Wang Y P, He Z, Liu J X, Guo Q X. Influences of herbaceous vines on community characteristics in pioneer succession stages. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 186-191.
- [35] Wang C, Wang X A, Wang L. Plan species diversity of different age pinus tabulaeformis plantations and its relations with soil fertility. *Ecology Magazine*, 2007, 26(8): 1182-1186.
- [36] Liu P, Qin J, Liu J C, Wang H F, Wang X K. Comparison of structure and species diversity of Eucalyptus community. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2227-2235.
- [37] Yan Y, Zeng Y Y, Zhang J H, Zhang J G, Zhong X H. Diversity of plant species of alpine grassland in Nakchu of Tibet, China.

- Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2005, 10(4): 659-664.
- [38] Guo Z G, Liu H Y, Sun X G, Cheng G D. Characteristics of species diversity of plant communities in the upper reaches of Bailong River. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(3): 388-395.
- [39] Wu G L, Huang M Y, Duan R Y, Zhao K. Effects of different traveling disturbances on the species diversity in *Pinus taiwanensis* communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 3924-3930.
- [40] Shi Z M, Liu S R, Cheng R M. Changes in plant species diversity in a restoration sequence of *quercus variabilis* forest stands in Bao Tianman Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(5): 415-421.
- [41] Li X H, Yin X M, Xia B, Li W L, Li Y. Effects of bird seed dispersal on diversity of the invaded plants in several hedge types. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1657-1666.
- [42] Bray J R, Curtis J T. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 1957, 27(4): 325-349.
- [43] Sun J, Li X Z, Wang X W, Lü J J, Li Z M, Hu Y M. Latitudinal changes in species diversity of permafrost wetland plant communities in Great Xing'an Mountain valleys of Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 272-277.
- [44] Zhang H F, Chen Y N, Chen Y P, Li W H. Species quantity change and ecosystem dynamics of lower reaches in the Tarim River. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 21-24.
- [45] Lin K M, Huang B L. Studies on  $\beta$  diversity index of undergrowth plant in Chinese fir plantation. *Biodiversity Science*, 2001, 9(2): 157-161.
- [46] Zhao C Z, Shi F X, Dong X G, Ren H, Sheng Y P, Gao F Y, Yang W B. Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, Northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 115-122.
- [47] Wang Y J, Zhong Z C, Tao J P. Patterns of ramet population of *Iris japonica* Thunb. and their effects on herb diversity in different microsites on Jinyun Mountain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3082-3091.
- [48] Ye M S, Guan W B, Wu B, Ma K M, Liu G H, Wang X L, Chen Q Y. Plant community complexity in the arid valley of Minjiang River, southwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3159-3165.
- [49] Wei Z R, Xiao Y L, Li R. Natural restoration process and diversity change of vegetation on abandoned cropland of bashan mountain region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(2): 99-104.
- [50] Wei T X, Chen Z F, Zhao J, Zheng J K, Zhu W D. Understory biodiversity of managed plantation stands from the inefficient and inferior forests. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(5): 800-806.
- [51] Xie J Y, Chen L Z. Species diversity characteristics of deciduous forests in the warm temperate zone of North China. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(4): 337-344.
- [52] Huang Z L, Kong G H, He D Q. Plant community diversity in Dinghushan Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 193-198.

#### 参考文献:

- [1] 王永健, 陶建平, 张炜银, 臧润国, 王微, 李宗峰, 李媛. 茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征. *生态学报*, 2006, 26(4): 1028-1036.
- [2] 闫明, 毕润成. 山西霍山植被分类及不同演替阶段群落物种多样性的比较分析. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(3): 56-62.
- [3] 吴彦, 刘庆, 何海, 林波. 亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性变化. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [4] 鲜骏仁, 万芙蓉, 胡庭兴, 杨华. 亚高山针叶林自然恢复过程中的物种多样性变化. *四川农业大学学报*, 2008, 26(2): 158-162.
- [5] 高贵明, 陈灵芝. 北京山区辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 群落物种多样性的研究. *植物生态学报*, 1998, 22(1): 23-32.
- [6] 黄建辉, 韩兴国. 生物多样性和生态系统稳定性. *生物多样性*, 1995, 3(1): 31-37.
- [9] 冯耀宗. 物种多样性与人工生态系统稳定性探讨. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 853-857.
- [10] 谢晋阳, 陈灵芝. 中国暖温带若干灌丛群落多样性问题的研究. *植物生态学报*, 1997, 21(3): 197-207.
- [11] 谢晋阳, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征. *生态学报*, 1994, 14(4): 337-354.
- [12] 茹文明, 张金屯, 张峰, 张桂萍, 刘瑞祥. 历山森林群落物种多样性与群落结构研究. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 561-566.
- [13] 茹文明, 张金屯, 毕润成, 张峰, 张桂萍. 山西霍山森林群落林下物种多样性研究. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1139-1142.
- [14] 郭连金, 张文辉, 刘国彬. 黄土丘陵区沙棘人工林发育过程中物种多样性及种间关联变化. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 9-15.
- [15] 何艺玲, 傅慰毅. 人工林林下植被的研究现状. *林业科学研究*, 2002, 15(6): 727-733.
- [17] 庄雪影, 邱美玲. 香港三种人工林下植物多样性的调查. *热带亚热带植物学报*, 1998, 6(3): 196-202.
- [25] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 李玉霖. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 93-100.
- [26] 李新荣, 张景光, 刘立超, 陈怀顺, 石庆辉. 我国干旱沙漠人工地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. *生态学报*, 2000, 24(3): 257-261.

- [27] 秦新生, 刘苑秋, 邢福武. 低丘人工林林下植被物种多样性初步研究. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(3): 223-228.
- [28] 章家恩, 徐琪. 恢复生态学研究的一些基本问题探讨. 应用生态学报, 1999, 10(1): 109-113.
- [29] 莫江明, Sandra B, 彭少麟, 孔国辉, 张德强, 张佑昌. 林下层植物在退化马尾松林恢复初期养分循环中的作用. 生态学报, 2002, 22(9): 1407-1413.
- [30] 莫江明, 彭少麟, Sandra B, 方运霆, 孔国辉. 鼎湖山马尾松林植物养分积累动态及其对人为干扰的响应. 植物生态学报, 2004, 28(6): 810-822.
- [31] 方运霆, 莫江明, 李德军, 曹裕松. 鼎湖山马尾松群落能量分配及其生产的动态. 广西植物, 2005, 25(1): 26-32.
- [32] 温远光, 元昌安, 李信贤, 和太平, 赖家业, 黄棉. 大明山中山植被恢复过程植物物种多样性的变化. 植物生态学报, 1998, 22(1): 33-40.
- [33] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [35] 汪超, 王孝安, 王玲. 不同种植年代油松林植物多样性及土壤养分变化. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1182-1186.
- [36] 刘平, 秦晶, 刘建昌, 王华峰, 王效科. 桉树人工林物种多样性变化特征. 生态学报, 2011, 31(8): 2227-2235.
- [38] 郭正刚, 刘慧霞, 孙学刚, 程国栋. 白龙江上游地区森林植物群落物种多样性的研究. 植物生态学报, 2003, 27(3): 388-395.
- [40] 史作民, 刘世荣, 程瑞梅. 宝天曼地区栓皮栎林恢复过程中高等植物物种多样性变化. 植物生态学报, 1998, 22(5): 415-421.
- [44] 张宏锋, 陈亚宁, 陈亚鹏, 李卫红. 塔里木河下游植物群落的物种数量变化与生态系统动态研究. 生态学杂志, 2004, 23(4): 21-24.
- [45] 林开敏, 黄宝龙. 杉木人工林林下植物物种  $\beta$  多样性的研究. 生物多样性, 2001, 9(2): 157-161.
- [46] 赵成章, 石福习, 董小刚, 任珩, 盛亚萍, 高福元, 杨文斌. 祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化. 生态学报, 2011, 31(1): 115-122.
- [49] 魏振荣, 肖云丽, 李锐. 巴山山地退耕地植被自然恢复过程及物种多样性变化. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 99-104.
- [50] 魏天兴, 陈致富, 赵健, 郑江坤, 朱文德. 低效低质人工林优化改造后林下植被多样性研究. 生态环境学报, 2012, 21(5): 800-806.
- [51] 谢晋阳, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征. 生态学报, 1994, 14(4): 337-344.
- [52] 黄忠良, 孔国辉, 何道泉. 鼎湖山植物群落多样性的研究. 生态学报, 2000, 20(2): 193-198.