

DOI: 10.11766/trxb201904080633

张勇强, 李智超, 厚凌宇, 宋立国, 杨洪国, 孙启武. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 239–250.

ZHANG Yongqiang, LI Zhichao, HOU Lingyu, SONG Ligu, YANG Hongguo, SUN Qiwu. Effects of Stand Density on Understory Species Diversity and Soil Nutrients in Chinese Fir Plantation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 239–250.

## 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响\*

张勇强, 李智超, 厚凌宇, 宋立国, 杨洪国, 孙启武†

(中国林业科学研究院林业研究所, 林木遗传育种国家重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091)

**摘要:** 为研究不同林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响, 以 38 a 生 5 种密度杉木人工林为研究对象, 调查林下植被, 测定土壤理化性质及酶活性, 对物种多样性指数和土壤指标进行单因素方差、相关性分析及主成分分析。结果显示: 杉木人工林下物种种类多达 121 种, 灌木层以杜茎山 (*Maesa japonica*) 为主, 草本层以双盖蕨 (*Diplazium*)、黑足鳞毛蕨 (*Dryopteris fuscipes*) 等蕨类为主。灌木层和草本层物种多样性各指数大多在初植密度为 5 000  $\text{hm}^{-2}$  时最高。不同土层间各种土壤养分变化趋势基本一致, 不同密度间土壤养分变化趋势不同, 更多的土壤养分在高密度或低密度林下达到最大。除了 pH、有机碳以及纤维素酶外, 其他土壤养分受林分密度变化响应均显著 ( $P < 0.05$ )。0~20 cm 土层的土壤养分与草本层物种多样性关系更为密切, 而 20~40 cm 土层的土壤养分与灌木层物种多样性关系更为密切。pH、全氮、碱解氮、有效磷与灌草层多样性指数的相关性最为密切。主成分分析综合得分显示, 初植密度为 6 667  $\text{hm}^{-2}$  时最高 (1.17), 第二为 3 333  $\text{hm}^{-2}$  (0.93), 其次为 5 000  $\text{hm}^{-2}$  (0.28)、1 667  $\text{hm}^{-2}$  (0.12) 和 10 000  $\text{hm}^{-2}$  (-2.49), 得分前两名显著大于其他得分。以上结果表明, 初植密度在 5 000  $\text{hm}^{-2}$  更有利于林下物种多样性的稳定, 但不利于土壤养分的累积; 密度过低或过高皆不利于土壤理化性质和植物多样性的发展, 特别是密度过高时, 对林地伤害巨大; 基于土壤理化性质和植物多样性的主成分分析结果出现“驼峰模式”, 杉木人工林初植密度 6 667  $\text{hm}^{-2}$  和 3 333  $\text{hm}^{-2}$  更适合土壤理化性质和植物多样性的发展。

**关键词:** 林分密度; 杉木人工林; 林下植被; 土壤养分; 主成分分析

**中图分类号:** S714.2      **文献标志码:** A

## Effects of Stand Density on Understory Species Diversity and Soil Nutrients in Chinese Fir Plantation

ZHANG Yongqiang, LI Zhichao, HOU Lingyu, SONG Ligu, YANG Hongguo, SUN Qiwu†

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

\* 国家重点研发专项项目 (2017YFC0505605) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0505605)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: soil2010@qq.com

作者简介: 张勇强 (1994—), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要从事森林土壤研究。E-mail: zyq199445@163.com

收稿日期: 2019-04-08; 收到修改稿日期: 2019-05-31; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-07-05

**Abstract:** 【Objective】 To study effects of stand density on understory species diversity and soil nutrients in Chinese fir plantations, a field survey was carried out in a Chinese fir plantation, 38 years old, varying in stand density in Dagang Mountain, Jiangxi Province. 【Method】 Five plots of woodlands different in stand density were delineated for investigation of understory species therein, and soil samples were collected from each plot for analysis of soil physical and chemical properties and soil enzyme activities. And One-way ANOVA analysis and correlation analysis and principal component analysis of the obtained data were performed for determination of relationships of understory species diversity and soil properties with stand density. Besides, principal component analysis and factor analysis were conducted to calculate scores of various index factors of the plantation, in an attempt to screen out a suitable density for growth of Chinese fir trees in plantations. 【Result】 Results show that there were 121 species of understory plants found under the Chinese fir trees in the plantation. The shrub layer was dominated by *Maesa japonica*, while the herb layer was by ferns, such as *Diplazium* and *Dryopteris fuscipes*. The two layers both were the highest in diversity in the plot, 5 000 trees  $\text{hm}^{-2}$  in initial density. The variation of soil nutrients did not differ much with soil layer, but did with stand density. All the soil nutrients, except pH, organic carbon and cellulase, were the highest in the plots either the highest or the lowest in stand density and obviously varied with stand density. Soil nutrients in the 0~20 cm soil layer were more closely related to herbaceous diversity, while soil nutrients in the 20~40 cm soil layer were more to shrub diversity. The factors of pH, total nitrogen, alkalytic nitrogen, available phosphorus were the most closely related to the species diversity index of the understory. The principal component analysis shows that the plot 6 667 trees  $\text{hm}^{-2}$  in initial stand density was the highest in comprehensive score (1.17), and followed by the plots 3 333 trees  $\text{hm}^{-2}$  (0.93), 5 000 trees  $\text{hm}^{-2}$  (0.28), 1 667 trees  $\text{hm}^{-2}$  (0.12) and 10 000 trees  $\text{hm}^{-2}$  (-2.49). obviously the first two were significantly higher than the other three in score. 【Conclusion】 The research on plant diversity index and soil physicochemical properties reveals that the initial density of 5 000 trees  $\text{hm}^{-2}$  is good to stability of understory species diversity, but not so to accumulation of soil nutrients. The principal component analysis shows that stand density, either too high or too low, is detrimental to the development of soil physical and chemical properties and plant diversity, especially when the density is too high, its damage to forest land is enormous, exhibiting a “hump model”, which indicates the initial densities of 6 667 trees  $\text{hm}^{-2}$  and 3 333 trees  $\text{hm}^{-2}$  are more suitable to the development of soil physical-chemical properties and plant diversity. The “Hump model” shows that taking into comprehensive account, the co-existence of different stand densities in a plantation may better maintain soil properties, increase plant diversity in the ecosystem and improve the ecological environment, thus contributing to multi-purpose cultivation and sustainable development of Chinese fir plantations.

**Key words:** Stand density; Chinese fir plantation; Understory species; Soil nutrients; Principal component analysis

林下植被是森林生态系统的一个重要组成部分, 林下植被在维护森林生态系统多样性、保持林地生产力、促进森林演替发展和维持生态功能稳定性等方面具有重要作用<sup>[1-3]</sup>。植被和土壤是一个密不可分的整体<sup>[4]</sup>, 土壤是植被生长的基质, 植被的生长状况与土壤密切相关, 林下植被以及凋落物的种类和数量也会影响土壤养分循环。

林分生长主要受林龄、立地质量和林分密度 3 个因子的影响, 其中密度是人工林经营最重要的可控因子之一<sup>[5]</sup>。研究表明, 林分密度对林下植被多样性及土壤质量影响显著<sup>[6-12]</sup>。国内外学者<sup>[11-12]</sup>对不同密度的天然林及人工林的研究显示, 密度较低时, 林木占有资源空间上升, 对土壤养分的利用增

多, 同时种群竞争压力减小, 对林下植被的抑制作用更加明显, 导致土壤养分和林下物种多样性降低; 而密度过大时, 大量单株对土壤养分过分消耗且不能及时归还, 高密度和高郁闭度导致林下水肥气热等条件变差, 同样不利于养分积累及林下植被生存。我国对密度林的研究主要集中于马尾松 (*Pinus massoniana*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、柚木 (*Tectona grandis*)、柏木 (*Cupressus funebris*) 等树种, 且不同林龄或不同树种林下植被及土壤养分对密度的响应各不相同, 最适营林密度差异显著<sup>[7-10]</sup>。杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国南方最主要的用材树种, 第八次全国森林资源清查结果表明, 杉木人工林面积约占我国人工林总面积的 1/4<sup>[13]</sup>。

基于杉木在我国重要的生态价值和经济价值，众多学者对杉木进行了广泛且深入的研究，研究方向主要包括：间伐、连栽对杉木人工林的影响、不同密度或不同林龄下杉木林下的土壤养分状况、生物量以及碳储量、杉木人工林退化成因分析等<sup>[3, 5, 14-17]</sup>。林分密度是人工林培育的重要因素，通过改变密度实现人工林光照和林分温湿度等条件的改善，可促进林下植被种类、数量、生物量和土壤理化性质的提升<sup>[18-19]</sup>。研究者们针对不同密度杉木人工林下植被发育状况、生物量、径材、理化性质等方面做了大量研究<sup>[20-24]</sup>，研究表明，杉木人工林林分密度对林下物种多样性和林分生长有显著影响<sup>[23-25]</sup>，且当人工林下植被达到一定覆盖度和生物量时，对林地土壤肥力有明显改善作用<sup>[18]</sup>。

江西省是我国杉木人工林主产区，其分布区属南方丘陵山地屏障带，是我国“两屏三带”生态安全战略格局骨架的重要组成部分。目前，针对该地区杉木人工林下植物多样性及土壤养分影响的相关研究较缺乏，许多研究者对于林分密度的研究范围在 650~5 000  $\text{hm}^{-2}$ <sup>[17-8, 18, 26]</sup>，且研究样地多为头年间伐，次年调查，密度条件改变的时间短，对植被及土壤养分的影响较小，同时难以避免间伐等人为干扰对林地的影响。本文以 1980 年造林，初植密度为 1 667、3 333、5 000、6 666 以及 10 000  $\text{hm}^{-2}$  的 5 种杉木人工林为研究对象，调查林下植被群落，分析了不同密度杉木人工林下物种多样性及土壤养分的变化规律，从而更清晰地评价密度对于已经生长发育至较稳定阶段杉木人工林的地上和地下部分的影响，目的在于寻找合适的群落结构，使杉木人工

林更加接近天然条件的森林林，为杉木人工林林分结构改造和经营管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及样地选择

研究区位于江西省新余市分宜县西南部年珠林场 (114°30'E~114°45'E, 27°30'N~27°45'N)。该林场属于低山丘陵地貌，气候类型属于亚热带季风气候，全年平均温度 17.2°，年均降水量 1 600 mm，年均无霜期 270 d。雨量充沛，阳光充足，气候温和，无霜期长。母岩以千枚岩为主，土壤为黄、红壤。地带性植被为常绿阔叶林，乔木以杉木为主，林下层灌木主要以杜茎山 (*Maesa japonica*)、大青 (*Clerodendrum cyrtophyllum*) 等为主，草本层主要以双盖蕨 (*Diplazium*)、黑足鳞毛蕨 (*Dryopteris fuscipes*) 为主。

2018 年 10 月，选择 1980 年造 5 种不同密度 (1 667  $\text{hm}^{-2}$ 、3 333  $\text{hm}^{-2}$ 、5 000  $\text{hm}^{-2}$ 、6 667  $\text{hm}^{-2}$ 、10 000  $\text{hm}^{-2}$ ) 杉木人工林作为实验样地，样地海拔高度为 190~210 m，坡向均为南坡，坡度约 15°~20°。针对不同密度杉木人工林的研究样地多通过人为间伐形成，有诸多间伐前后因素的干扰，而本次实验的研究样地为 1980 年造实验样地，该样地在同一高度按水平分布分别造 5 种不同密度杉木林，每块样地造林面积约 1 000  $\text{m}^2$  (33 m×33 m)，并在相应样地下方按照同样造林密度设置两组重复样地，造林前三年进行抚育，后基本无人工干扰，为长期自然发展形成。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic conditions of the sample plots

样地号 Number	初植密度 Initial density/ $\text{hm}^{-2}$	株行距 Plant spacing / (m×m)	存活率 Survival rate /%	海拔 Elevation/ m	坡向与坡度 Aspect & Slope	树高 Tree height/ m	胸径 Diameter at breast height /cm	郁闭度 Canopy density /%
A	1 667	3×2	81	210	S 15°	13.00	20.93	79
B	3 333	2×1.5	75	202	S 15°	11.30	15.76	81
C	5 000	2×1	78	203	S 16°	11.71	16.63	82
D	6 667	1.5×1	77	205	S 16°	10.95	14.79	85
E	10 000	1×1	58	195	S 18°	10.46	14.05	93

## 1.2 植被调查及土样采集

在每个 33 m×33 m 样地中间位置拉出 20 m×20 m 样方, 采用对角线法<sup>[9]</sup>, 在每个样方内选取 5 个 2 m×2 m 的样方调查灌木层, 样方内若有胸径小于 5 cm 的小乔木记为灌木; 同时选取 5 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。调查样方内存活杉木数量, 以计算存活率。

采用 S 形取样法分别采集每个 20 m×20 m 样地内 5 点的 0~20 cm、20~40 cm 土层土壤, 同一土层土壤均匀混合, 装入土壤袋, 风干过筛后进行土壤化学性质以及酶活性分析。在每块 20 m×20 m 的样地内用钢制环刀(直径 5 cm, 容积 100 cm<sup>3</sup>)在不同土层各取 3 个原状土, 带回实验室做土壤物理性质分析。

## 1.3 土壤性质测定方法

土壤容重、含水率采用环刀法<sup>[28]</sup>测定。土壤 pH 采用电位法, 用水浸提测定(水土比 2.5:1); 土壤有机质采用重铬酸钾氧化外加热法测定; 全氮用凯氏定氮法测定; 碱解氮采用扩散法测定; 全磷、有效磷采用钼锑抗比色法测定; 全钾、速效钾采用火焰光度计法测定<sup>[29]</sup>。土壤酶采用酶活性测定试剂盒(捷世康生物科技有限公司, 青岛)进行测定。

## 1.4 数据处理

林下灌草多样性计算方法:

重要值(IV):

$$IV = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3 \quad (1)$$

丰富度指数 R:

$$R = S \quad (2)$$

辛普森(Simpson)多样性指数 D:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s Pi^2 \quad (3)$$

香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数 H:

$$H = - \sum_{i=1}^s Pi \ln Pi \quad (4)$$

均匀度(Pielou)指数  $J_{sw}$ :  $J_{sw} = H / \ln S$  (5)

式中, S 为物种总数;  $P_i$  为物种  $i$  的相对多度。

采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 20.0 对数据进行单因素方差分析(Tukey's HSD 检验,  $\alpha=0.05$ ,  $n=3$ )、相关性分析(皮尔森相关,  $P < 0.05$ ), 用 GraphPad PRISM<sup>®</sup>软件绘图。

## 2 结果

### 2.1 不同密度杉木人工林下物种组成及重要值

重要值是以综合数值来表示群落中不同种群的相对重要性, 是研究群落结构的重要指标之一<sup>[30]</sup>。在所有样方中, 杉木人工林下出现的植物种类共 56 科 98 属 121 种, 其中, 木本植物共 39 科 72 属 94 种, 草本植物 17 科 26 属 27 种。分别对林下灌木层和草本层的重要值进行统计, 结果表明: 在灌木层中, 杜茎山在各个密度林下均占有较大优势, 大青、珍珠莲(*Ficus sarmentosa*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)相对其他物种在各个密度林下稍占优势; 在草本层中, 蕨类植物, 尤其双盖蕨、黑足鳞毛蕨、边缘鳞盖蕨(*Microlepia marginata*)等占有较大优势。在密度为 1 667 hm<sup>-2</sup>时, 菝葜(*Smilax china*)和草珊瑚(*Sarcandra glabra*)相对其他物种稍占优势; 在密度为 3 333 hm<sup>-2</sup>时, 五味子(*Schisandra chinensis*)占有较大优势, 土茯苓(*Smilax glabra*)、钩藤(*Uncaria rhynchophylla*)稍占优势; 当密度达到 10 000 hm<sup>-2</sup>时, 灌木层出现玉叶金花(*Mussaenda elongata*), 还出现较之前密度林更多的木荷(*Schima superbamp.*)和刨花楠(*Machilus pauhoi*), 在草本层莎草(*Cyperus rotundus*)成为占据较大优势的草本。

### 2.2 不同密度杉木人工林下物种多样性

将灌木和草本的丰富度指数、辛普森指数、香农-威纳指数和均匀度(Pielou)指数分别按不同密度分组并进行单因素方差分析, 结果表明, 林分密度并不能显著影响植物多样性(表 2), 不同密度下灌木和草本的各指数虽各不相同, 但组间差异不显著( $P > 0.05$ )。

对各指数对密度变化的响应进行回归分析(图 1), 结果表明, 灌木和草本物种丰富度变化趋势在不同密度杉木林下不一致, 灌木丰富度指数随着杉木林密度的增大而增大, 在杉木密度最大

表 2 不同密度杉木林下灌木多样性

样地号 Number	R		D		H		$J_{sw}$	
	灌木 Shrub	草本 Herb	灌木 Shrub	草本 Herb	灌木 Shrub	草本 Herb	灌木 Shrub	草本 Herb
A	22.33±3.21a	8.00±1.73a	0.87±0.08a	0.80±0.06a	2.66±0.32a	1.71±0.08a	0.86±0.08a	0.83±0.05a
B	23.67±2.08a	10.00±1.73a	0.86±0.07a	0.83±0.03a	2.62±0.33a	2.00±0.07a	0.83±0.08a	0.88±0.06a
C	23.67±5.03a	12.00±3.61a	0.90±0.05a	0.84±0.07a	2.79±0.39a	2.13±0.38a	0.88±0.06a	0.87±0.04a
D	25.67±2.08a	9.00±1.00a	0.84±0.08a	0.81±0.06a	2.61±0.31a	1.93±0.22a	0.80±0.08a	0.88±0.07a
E	27.00±1.00a	8.50±0.50a	0.81±0.01a	0.71±0.02a	2.68±0.08a	1.62±0.08a	0.81±0.02a	0.76±0.02a

注：同列不同字母表示不同密度间差异显著 ( $P < 0.05$ )， $R$  = 丰富度指数， $D$  = 辛普森指数， $H$  = 香农-威纳指数， $J_{sw}$  = 均匀度指数。下同 Note: Different letters in the same column indicate significant difference between plots different in density ( $P < 0.05$ ).  $R$  = richness index,  $D$  = Simpson index,  $H$  = Shannon index,  $J_{sw}$  = Pielou index. The same below

时灌木丰富度指数达到最高；草本丰富度指数则随杉木密度的增大呈现先增大后减小的趋势，在杉木中等密度时草本丰富度指数最高，在杉木密度较大和密度较小时草本的丰富度指数均较低。灌木的辛普森指数虽在密度为 5 000  $\text{hm}^{-2}$  时最高，但整体趋势表现为随密度的增大而减小；灌木的香农-威纳指数在密度为 5 000  $\text{hm}^{-2}$  时最高，但随

林分密度的变化趋势并不明显；灌木的均匀度指数同样在密度为 5 000  $\text{hm}^{-2}$  时最高，但整体趋势表现为随密度的增大而降低。草本层的四种指数均在 5 000  $\text{hm}^{-2}$  左右时达到最大值，且各指数变化趋势基本一致，均表现为随着密度的增大先增大后减小的趋势，从图 1 中也不难看出，当密度过高时，各指数的降低趋势更加明显。

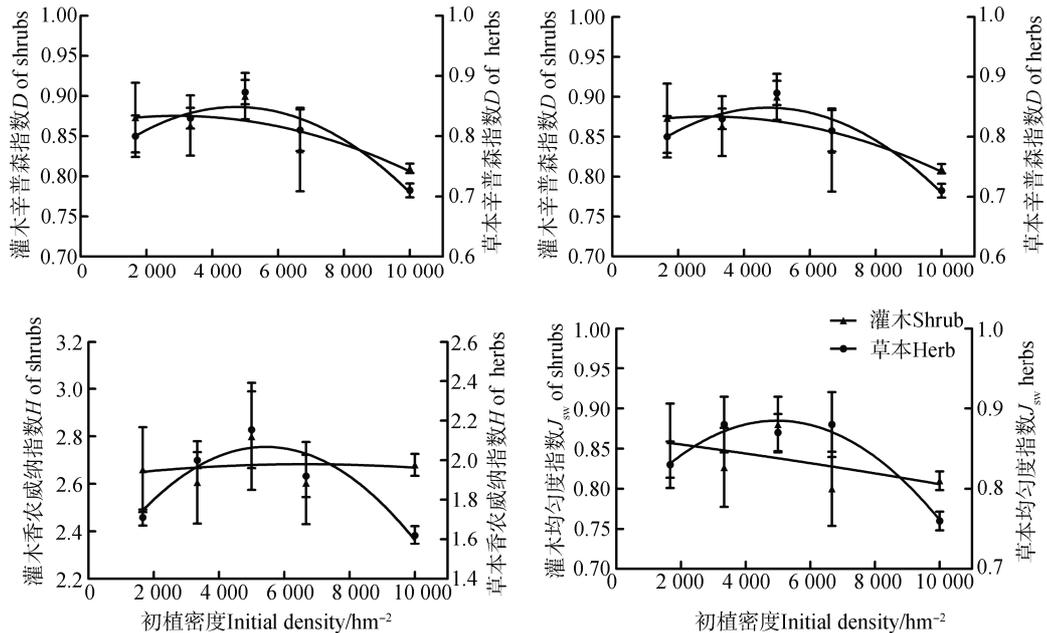


图 1 不同密度杉木人工林物种多样性指数

Fig. 1 Species diversity of in the *Cunninghamia lanceolata* plantation relative to stand density

### 2.3 不同密度杉木人工林土壤养分

在 0~20 cm 土层，各个林分密度间杉木人工林土壤全氮、碱解氮差异显著 ( $P < 0.05$ )；在 20~40 cm 土层，不同林分密度间杉木人工林土壤全钾和速效

钾含量差异均显著；不同密度杉木林的土壤全磷和有效磷含量在各个土层差异均显著。随着杉木林密度的增大，在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层，pH、全磷、速效钾均表现出先降低后升高的变化趋势，

且均在密度为 10 000  $\text{hm}^{-2}$  时达到最大; 土壤有机碳、全氮、碱解氮以及全钾的含量随着密度的增大变化趋势不明显, 有机碳和全氮在密度为 3 333  $\text{hm}^{-2}$  时达到

最大, 全钾和碱解氮在密度为 6 667  $\text{hm}^{-2}$  时达到最大; 有效磷随着密度的增大呈现先增大后减小的变化趋势, 在密度为 5 000  $\text{hm}^{-2}$  时达到最大 (表 3)。

表 3 不同密度杉木林下土壤化学性质

Table 3 Soil chemistry properties in the Chinese fir plantations relative to stand density

样地号 Number	SL/cm	pH	SOM/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
A	0~20	4.41±0.14a	29.56±5.49a	1.86±0.23ab	363.0±65.6ab
	20~40	4.37±0.13a	8.88±3.46b	0.80±0.17b	331.2±63.4a
B	0~20	4.25±0.13a	30.48±6.77a	1.90±0.19a	281.7±20.9b
	20~40	4.37±0.05a	9.35±1.55ab	0.87±0.14a	254.6±40.2a
C	0~20	4.26±0.02a	22.89±5.89b	1.50±0.32bc	176.4±9.9c
	20~40	4.38±0.03a	7.63±1.70c	0.81±0.08b	148.6±5.4b
D	0~20	4.30±0.03a	29.92±2.56a	1.87±0.02ab	337.5±10.9ab
	20~40	4.36±0.07a	11.37±1.18a	0.89±0.13a	272.9±42.8a
E	0~20	4.44±0.10a	22.27±1.68b	1.45±0.09c	384.9±70.5a
	20~40	4.51±0.08a	11.16±1.03a	0.91±0.02a	301.2±88.3a

样地号 Number	SL/cm	TK/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	AN/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	AP/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	AK/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
A	0~20	24.81±1.74a	78.10±15.24abc	2.80±0.59b	62.67±9.50a
	20~40	19.03±0.50b	38.89±4.87a	1.00±0.17c	33.47±8.13ab
B	0~20	22.86±0.72a	100.5±46.5ab	3.19±0.98ab	58.75±20.72a
	20~40	21.42±0.70ab	48.71±9.93a	1.03±0.10c	33.94±15.96ab
C	0~20	21.61±1.02a	61.94±9.33bc	4.47±0.71a	49.91±11.85a
	20~40	19.04±1.91b	38.07±11.22a	2.93±0.68b	30.70±8.09b
D	0~20	24.95±1.54a	105.6±2.3a	4.17±1.12ab	40.07±0.30a
	20~40	22.29±2.19a	45.46±13.80a	3.85±0.71a	24.41±2.61b
E	0~20	24.54±4.16a	57.00±1.05c	2.74±0.15b	63.97±9.93a
	20~40	18.69±1.22b	42.19±2.73a	2.42±0.23b	49.72±4.58a

注: 相同土层中, 同列不同字母表示不同密度间差异显著 ( $P < 0.05$ ), SL = 土层, SOM = 有机质, TN = 全氮, TP = 全磷, TK = 全钾, AN = 碱解氮, AP = 有效磷, AK = 速效钾。下同 Note: Different letters in the same column mean significant difference between plots different in stand density and the same in soil layer ( $P < 0.05$ ), SL = Soil layer, SOM = Soil organic matter, TN = Total nitrogen, TP = Total phosphorus, TK = Total potassium, AN = Alkaline nitrogen, AP = Available phosphorus, AK = Available potassium. The same below

不同密度杉木林土壤含水率在各个土层差异均显著; 在 0~20 cm 土层, 多酚氧化酶和纤维素酶在各个密度下差异均显著; 在 20~40 cm 土层, 酸性磷酸酶在不同密度下差异显著。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 容重、多酚氧化酶以及酸性磷酸酶随着密度的增大呈现出先下降, 后上升, 最后又下降

的趋势, 且均在密度为 5 000  $\text{hm}^{-2}$  时达到最大; 含水率随着密度的增大先升高后降低最后又升高, 在密度为 10 000  $\text{hm}^{-2}$  时达到最大; 脲酶随着密度的升高先增高后降低, 在密度为 1 667  $\text{hm}^{-2}$  时最大; 纤维素酶随着密度增大的变化规律不明显, 在密度 3 333  $\text{hm}^{-2}$  时最大 (表 4)。

表 4 不同密度杉木林土壤物理性质及酶活性

Table 4 Physical properties and enzyme activities of the soil under Chinese firs relative to stand density

样地号 Number	SL/cm	SBD / (g·cm <sup>-3</sup> )	SM / (g·kg <sup>-1</sup> )	PPO / (mg·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	UE / (μg·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	CL / (mg·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	ACP / (μmol·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )
A	0~20	1.37±0.02bc	282.4±1.0b	8.30±3.50b	346.4±38.2a	37.57±2.84b	15.51±2.21a
	20~40	1.43±0.02b	24.81±0.54b	5.37±1.03c	217.66±47.88a	25.67±10.43b	12.40±1.62a
B	0~20	1.30±0.12c	29.70±1.55a	5.24±0.59c	322.54±66.38b	40.96±7.32a	15.10±2.63a
	20~40	1.39±0.09c	28.34±0.26a	4.00±0.26d	217.07±86.97a	28.73±1.71a	10.51±4.61b
C	0~20	1.46±0.03a	27.83±3.34b	11.40±4.21a	303.33±20.01c	31.72±4.81c	15.59±3.19a
	20~40	1.48±0.11a	25.17±4.14b	7.12±3.47a	201.41±18.46b	26.60±0.95b	9.72±1.89b
D	0~20	1.41±0.02b	20.16±4.42c	11.00±1.00a	295.00±18.03c	38.67±4.51ab	13.33±2.52b
	20~40	1.44±0.04b	16.11±0.33c	6.00±2.00b	180.00±20.01c	25.00±5.02b	8.00±2.65c
E	0~20	1.34±0.05c	30.13±5.91a	8.27±0.22b	333.33±46.19a	27.33±4.93d	11.33±3.21c
	20~40	1.40±0.06c	27.21±7.58a	4.07±0.08d	200.00±20.00b	23.01±0.99c	6.67±2.08d

注：SBD = 容重，SM = 含水率，PPO = 多酚氧化酶，UE = 脲酶，CL = 纤维素酶，ACP = 酸性磷酸酶。下同 Note: SBD = Soil bulk density, SM = Soil moisture, PPO = Polyphenol oxidase, UE = Urease, CL = Cellulase, ACP = Acid phosphatase. The same below

## 2.4 杉木人工林植物多样性与土壤性质的关系

从表 5 可以看出，在 0~20 cm 土层，pH 与草本层的香农-威纳指数以及均匀度指数均呈显著负相关；碱解氮与草本层均匀度指数呈显著正相关；有效磷与草本层的辛普森指数和香农-威纳指数呈极显著正相关，与草本层的丰富度指数和均匀度指数呈显著正相关；多酚氧化酶与草本层辛普森指数呈显著正相关。0~20 cm 土层的各个土壤养分指标与灌木层物种多样性指数均无显著相关性。

在 20~40 cm 土层，pH 与草本层辛普森指数呈显著负相关；全氮与草本层丰富度指数呈显著负相关；纤维素酶与草本层辛普森指数呈显著正相关。全氮与灌木层辛普森指数、香农-威纳指数、均匀度指数均呈显著负相关；碱解氮与灌木层辛普森指数、香农-威纳指数、均匀度指数均呈极显著负相关；土壤容重与灌木层丰富度指数呈显著负相关；脲酶与灌木层香农-威纳指数呈显著负相关；酸性磷酸酶与灌木层均匀度指数呈显著正相关。其他土壤养分指标与林下物种多样性无显著相关性。

## 2.5 基于林下植被多样性与土壤理化性质的综合评分

五种不同密度杉木人工林下，基于林下植被多样性与土壤理化性质共 18 个指标进行主成分分析，

结果表明，第一主成分的方差贡献率为 39.47%，第二主成分的方差贡献率为 29.51%，第三主成分的方差贡献率为 21.34%，前三主成分的累积方差贡献率为 90.31%，足以代表所有指标的贡献结果。因此，提取前三主成分进行分析，可以看出，第一主成分主要包含香农-威纳指数、辛普森指数、有效磷、土壤容重、多酚氧化酶、均匀度指数、纤维素酶、碱解氮、酸性磷酸酶、全氮、全钾和有机碳，第二主成分主要包括全氮、有机碳、碱解氮、纤维素酶、全钾、全磷等，第三主成分主要包括酸性磷酸酶、均匀度指数、脲酶和含水率等。

根据因子载荷值和标准变量计算这三个主成分的权重，然后根据特征值计算每个林分密度的综合得分，并对得分进行归一化处理，得出不同密度杉木人工林基于物种多样性和土壤理化性质的综合得分（表 6），由大到小依次为：初植密度 6 667 hm<sup>-2</sup> (1.17)、3 333 hm<sup>-2</sup> (0.93)、5 000 hm<sup>-2</sup> (0.28)、1 667 hm<sup>-2</sup> (0.12)、10 000 hm<sup>-2</sup> (-2.49)，说明初植密度 10 000 hm<sup>-2</sup> 或者 1 667 hm<sup>-2</sup> 均不利于杉木林下植被多样性的建设和土壤理化性质的的发展，特别是密度过大时，综合得分极低，密度为 5 000 hm<sup>-2</sup> 时，对植物多样性和土壤理化性质的综合得分较 6 667 hm<sup>-2</sup> 或 3 333 hm<sup>-2</sup> 相差显著。

表 5 植物多样性与土壤性质的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between diversity indices and soil nutrients

土壤性质		灌木 Shrub				草本 Herb			
Soil properties	SL/cm	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J<sub>sw</sub></i>	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J<sub>sw</sub></i>
pH	0~20	0.155	-0.119	-0.09	-0.192	-0.35	-0.327	-0.568*	-0.546*
	20~40	0.285	-0.094	-0.077	-0.259	-0.035	-0.516*	-0.358	-0.644**
TN	0~20	-0.154	-0.063	-0.026	0.051	-0.366	0.093	-0.071	0.308
	20~40	-0.298	-0.539*	-0.604*	-0.602*	-0.555*	-0.203	-0.414	-0.033
AN	0~20	-0.171	-0.276	-0.194	-0.165	-0.053	0.385	0.277	0.535*
	20~40	-0.463	-0.819**	-0.834**	-0.805**	-0.286	0.034	-0.102	0.162
AP	0~20	0.205	0.134	0.285	0.247	0.531*	0.699**	0.707**	0.580*
	20~40	0.258	-0.179	-0.128	-0.285	0.046	-0.009	0.178	0.207
SBD	0~20	-0.169	-0.148	-0.154	-0.104	0.044	0.247	0.198	0.331
	20~40	-0.536*	-0.358	-0.478	-0.319	-0.156	-0.012	-0.095	0.045
PPO	0~20	-0.044	-0.274	-0.182	-0.243	0.239	0.676*	0.199	0.092
	20~40	0.383	0.374	0.421	0.371	0.612	0.261	0.445	-0.169
UE	0~20	0.049	-0.499	-0.318	-0.484	-0.222	0.366	-0.054	0.327
	20~40	-0.664	-0.588	-0.681*	-0.585	-0.607	0.035	-0.294	0.57
ACP	0~20	0.503	-0.058	0.174	-0.041	0.102	0.178	0.032	-0.237
	20~40	0.255	0.662	0.589	0.697*	0.249	0.035	0.197	0.052
CL	0~20	0.302	-0.126	0.06	-0.087	-0.263	0.017	-0.226	-0.059
	20~40	-0.331	-0.623	-0.532	-0.577	-0.161	0.698*	0.004	0.426

注: \* 显著相关 ( $P < 0.05$ ), \*\* 极显著相关 ( $P < 0.01$ )。下同 Note: \* significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ). The same below

表 6 不同密度杉木人工林综合评分

Table 6 Comprehensive score of plots of Chinese fir different in stand density

样地号 Number	F1, F2, F3			综合得分	综合排名
	F1	F2	F3	Comprehensive score	Comprehensive ranking
A	-1.62	1.18	1.87	0.12	4
B	-0.11	2.28	0.98	0.93	2
C	2.27	-3.19	1.38	0.28	3
D	2.92	1.33	-2.29	1.17	1
E	-3.46	-1.6	-1.94	-2.49	5

注: F1 = 第一主成分, F2 = 第二主成分, F3 = 第三主成分。Note: F1 = The first principal component, F2 = The second principal component, F3 = The third principal component.

### 3 讨 论

#### 3.1 密度对杉木人工林下物种组成及多样性的影响

本研究地各个密度的杉木人工林下出现的植物种类共 56 科 98 属 121 种, 其中, 木本植物 39 科 72 属 94 种, 草本植物 17 科 26 属 27 种。本研究中杉木人工林下物种数量以及物种多样性与其他研究地同龄杉木人工林的林下物种数以及物种多样性相比均较高<sup>[15, 31]</sup>。在林下灌木层中, 杜茎山在各个密度林下均占有较大优势, 大青、珍珠莲、毛冬青相对其他物种稍占优势; 在草本层中, 蕨类植物, 尤其双盖蕨、黑足鳞毛蕨、边缘鳞盖蕨等占有较大优势。说明这些物种对研究地杉木人工林林下环境的适应力很强。

本研究中, 灌木的丰富度指数在林分密度为  $10\ 000\ \text{hm}^{-2}$  时达最大 (表 2), 这与柚木、马尾松等<sup>[7, 8]</sup>研究结果不同, 这一结果可能与杉木立木结构有关, 单株杉木高大挺直, 仅有林冠部分枝叶较多, 较马尾松或其他阔叶树种枝叶稀少, 太阳直射时仍有较高透光率, 高密度种植增加了林下环境的复杂性, 使林下灌木种类增多, 但杉木林下灌木多样性指数和均匀度指数均在  $5\ 000\ \text{hm}^{-2}$  时达最大 (表 2), 与其他研究结果一致<sup>[8, 28]</sup>。随着密度的增大, 林下草本丰富度指数、多样性指数、均匀度指数均随着密度的增大表现出先增大后减小的趋势, 其中, 丰富度指数、辛普森指数、香农-威纳指数均在密度为  $5\ 000\ \text{hm}^{-2}$  时达最大, 均匀度指数在  $3\ 333\ \text{hm}^{-2}$  时最大 (图 1)。灌木层和草本层物种多样性大体呈现在  $5\ 000\ \text{hm}^{-2}$  时较高的趋势, 说明初植密度  $5\ 000\ \text{hm}^{-2}$  时的林内光照、水、热等条件更加适合林下物种生长。在对不同密度的其他类型人工林的研究中, 物种多样性也有随着密度增大而先增大后减小的趋势, 但是物种多样性最高的林分密度与本结果相比均较低<sup>[15, 16]</sup>。此外, 除了在  $3\ 333\ \text{hm}^{-2}$  和  $6\ 666\ \text{hm}^{-2}$  密度下草本的均匀度指数高于灌木外, 其他的各个物种多样性指标灌木层均高于草本层 (表 2), 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。

Alem 等<sup>[32]</sup>发现人工林林分密度与林下植物物种多样性无显著关系, 但是人工林下植物物种多样性与到达植被层的光照有显著相关性, 这也说明了

林分密度对林下植被的影响, 主要是通过上层乔木对光照的截留, 所到达植被的光照对林下植被生长发育产生影响, 这一结论恰好解释了本文中灌木丰富度随林分密度增大而增大的结果 (图 1)。本研究也发现林下灌木多样性对于林分密度变化的响应不显著 (表 2), 这说明虽然林下物种多样性在数值上各有高低, 但密度对 38 a 自然生长的杉木人工林下植被的影响尚未达到显著水平, 这还需要继续监测植被与密度之间的关系, 并且针对林分密度带来的光照、温湿度等改变展开更多研究。

#### 3.2 密度对杉木人工林下土壤养分的影响

诸多研究者在对不同类型人工林的研究中均指出, 林分密度对土壤容重、全氮等诸多土壤理化性质有显著影响<sup>[8]</sup>。本研究中, 不同密度杉木人工林对林下土壤含水率、全磷以及有效磷的影响显著, 对于  $0\sim 20\ \text{cm}$  土层的全氮、碱解氮、多酚氧化酶以及纤维素酶影响显著, 对于  $20\sim 40\ \text{cm}$  土层的全钾、速效钾以及酸性磷酸酶影响显著 (表 3, 表 4)。

在不同的土层, 同一种土壤养分含量随林分密度的变化趋势基本一致。对不同密度杉木林下的土壤理化性质分析表明, 密度为  $1\ 667\ \text{hm}^{-2}$ 、 $3\ 333\ \text{hm}^{-2}$  时有利于杉木林生长发育至成熟林龄内土壤有机碳、全氮、纤维素酶以及脲酶的积累 (表 4), 这与胡小燕等<sup>[33]</sup>的研究结果一致; 中密度 ( $5\ 000\ \text{hm}^{-2}$ ) 有利于有效磷、多酚氧化酶、酸性磷酸酶的积累及土壤容重的改善; 较高密度 ( $6\ 667\sim 10\ 000\ \text{hm}^{-2}$ ) 有利于全磷、全钾、速效钾、碱解氮的积累及 pH、含水率的改善 (表 3)。对不同密度马尾松林下土壤的研究<sup>[7]</sup>表明, 土壤养分含量在密度为  $1\ 136\ \text{hm}^{-2}$  时取得最大值; 而对不同密度柚木人工林下土壤的研究<sup>[8]</sup>表明, 在密度为  $650\sim 1\ 450\ \text{hm}^{-2}$  的范围内, 土壤理化性质随着密度的增大先有所改善之后又退化。而依据本研究, 杉木初植密度在  $5\ 000\ \text{hm}^{-2}$  以上更有利于本研究地杉木人工林土壤肥力的维持。

#### 3.3 杉木人工林下物种多样性与土壤养分的相关关系

根据不同土层土壤养分与林下物种多样性的相关关系发现,  $0\sim 20\ \text{cm}$  土层的土壤养分与草本层物种多样性关系更为密切, 而  $20\sim 40\ \text{cm}$  土层的土壤养分与灌木层物种多样性关系更为密切 (表 5)。这是由于草本植物覆盖土壤表层且根系较浅, 直接为

土壤表层输送养分,对表层土影响较大,而对较深层土壤影响很小<sup>[34]</sup>。灌木层的凋落物和根系分泌物会对土壤表层和较深层均有影响,且从本研究中可以发现,灌木层根系对较深层土壤养分的影响较灌木层凋落物对表层土壤养分的影响更大,因为灌木层植物多样性指数与20~40 cm土层的土壤因子相关性更加密切。土壤各养分指标中,pH、全氮、碱解氮、有效磷与灌草层多样性指数的相关性最为密切,而有机碳却与灌草多样性均不显著(表5),可能是因为杉木林下氮、磷含量较低,植物多样性受其限制更明显<sup>[35-36]</sup>。

### 3.4 林分密度对杉木人工林经营的影响

主成分分析结果显示,初植密度在6 667  $\text{hm}^{-2}$ 时和3 333  $\text{hm}^{-2}$ 时,土壤理化性质和植物多样性分析的综合得分明显高于其他密度(表6),与其他研究中密度影响土壤理化性质和植物多样性的单峰模式不同<sup>[1, 19]</sup>,本研究出现了驼峰模式,表明综合土壤和植物两种因素,可能存在两个差别较大的密度级别,均能够较好保持土壤性质并增加生态系统中的植物多样性,改善生态环境,这更有利于多目标培养杉木人工林,实现经营的可持续。例如,想实现大径级用材林的需求,可采用初植密度3 333  $\text{hm}^{-2}$ ;实现杉木量产而不要求材径,可采用初植密度6 667  $\text{hm}^{-2}$ ;若想实现生态经营,也可采用初植密度6 667  $\text{hm}^{-2}$ ,可带来更多的生态效益和经济效益。本研究发现,低密度种植和高密度种植同样不利于土壤养分的积累和植物多样性的发展,低密度浪费营林空间,土壤养分被某些林下植被过度消耗,高密度营林树种过度消耗地力,影响养分循环,同时不利于林下植被发育,对土地损耗巨大。依据不同密度水平下杉木的存活生长状况、土壤养分含量以及林下物种多样性这三个方面,本研究建议将初植密度6 667  $\text{hm}^{-2}$ 作为杉木人工林造林的参考,在此初植密度之下可保持林下物种多样性以及土壤养分的较高水平,且杉木的现存活率达到77%以上,现密度约5144  $\text{hm}^{-2}$ 。在实际的营林过程中,要根据对杉木人工林的具体需求而采取如抽针补阔、补植乡土树种等不同的经营方式,以保持更加适宜的林分密度,促进杉木林群落结构向近自然群落方向发展。

## 4 结 论

各个密度下的杉木人工林下物种种类总数多达121种,灌木层以杜茎山为主,草本层以双盖蕨、黑足鳞毛蕨等蕨类为主。灌木层和草本层物种多样性各指数大多在初植密度为5 000  $\text{hm}^{-2}$ 时最高。不同土层间各个土壤养分变化趋势基本一致,不同密度间土壤养分变化趋势多样,大多在较高密度下( $\geq 5 000 \text{hm}^{-2}$ )达到最大。除了pH、有机碳以及纤维素酶外,其他土壤养分受林分密度变化影响显著。0~20 cm土层的土壤养分与草本层物种多样性关系更为密切,而20~40 cm土层的土壤养分与灌木层物种多样性关系更为密切。土壤各养分指标中,pH、全氮、碱解氮、有效磷与灌草层多样性指数的相关性最为密切。综合土壤理化性质和植被多样性的主成分分析结果显示,初植密度6 667  $\text{hm}^{-2}$ 和3 333  $\text{hm}^{-2}$ 较初植密度为5 000  $\text{hm}^{-2}$ 更有利于二者的可持续发展。

### 参考文献 (References)

- [1] Zou Y, He K N, Zhao C, et al. Relationship between plantation density and the plants diversity under forest of *Picea crassifoliain* alpine region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(12): 2543—2549. [邹扬, 贺康宁, 赵畅, 等. 高寒区青海云杉人工林密度与林下植物多样性的关系. *西北植物学报*, 2013, 33(12): 2543—2549.]
- [2] Lin K M, Huang B L. Studies on  $\beta$ -diversity index of undergrowth plant in Chinese fir plantation. *Chinese Biodiversity*, 2001, 9(2): 157—161. [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]
- [3] Sheng W T, Yang C D, Fan S H. Variation of soil properties of Chinese fir plantation. *Forest Research*, 2003, 16(4): 377—385. [盛炜彤, 杨承栋, 范少辉. 杉木人工林的土壤性质变化. *林业科学研究*, 2003, 16(4): 377—385.]
- [4] Pohl M, Alig D, Korner C, et al. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 91—102.
- [5] Che S H, Zhang J G. Comparative study on stand density measures based on self-thinning theory for Chinese fir plantation. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, 32(3): 343—347. [车少辉, 张建国. 基于自稀疏理论的杉木人工林密度指标研究. *植物研究*, 2012, 32(3): 343—347.]
- [6] Ahmad B, Wang Y H, Hao J, et al. Optimizing stand structure for trade-offs between overstory timber

- production and understory plant diversity: A case-study of a larch plantation in Northwest China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(9): 2998—3008.
- [ 7 ] Sun Q H, Wu X, Wang M Z, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 732—738. [孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 等. 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 732—738.]
- [ 8 ] Zhou S P, Liang K N, Du J, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation. *Bulletin of Botanical Research*, 2017(2): 42—52. [周树平, 梁坤南, 杜健, 等. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究. *植物研究*, 2017(2): 42—52.]
- [ 9 ] Mao Z H, Zhu J J, Liu Z G, et al. Effects of thinning on species diversity and composition of understory herbs in a larch plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(10): 1201—1207. [毛志宏, 朱教君, 刘足根, 等. 间伐对落叶松人工林内草本植物多样性及其组成的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(10): 1201—1207.]
- [ 10 ] Jin Y Q, Bao W K. Relationships of the understory biomass with stand structure if the Sichuan cypress plantation forests across Sichuan Basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5849—5859. [金艳强, 包维楷. 四川柏木人工林林下植被生物量与林分结构的关系. *生态学报*, 2014, 34(20): 5849—5859.]
- [ 11 ] Xu X L, Sun Y J, Zhou H, et al. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(3): 1—12. [徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 等. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. *林业科学*, 2019, 55(3): 1—12.]
- [ 12 ] Tu Y H. Dynamic characteristics of undergrowth vegetations in *Cunninghamia lanceolata* with different management density. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005(4): 52—55. [涂育合. 杉木不同经营密度的林下植被变化. *西北林学院学报*, 2005(4): 52—55.]
- [ 13 ] Li Y Y, Zheng J Y, Shao M A. Comparison of the attributes of natural forests and plantations in Ziwuling Mountain. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(12): 2447—2456. [李裕元, 郑纪勇, 邵明安. 子午岭天然林与人工林群落特征比较研究. *西北植物学报*, 2005, 25(12): 2447—2456.]
- [ 14 ] Sun D J, Wen Y G, Luo Y H, et al. Effect of close-to-nature management on species diversity in a *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Forest Research*, 2015, 28(2): 202—208. [孙冬婧, 温远光, 罗应华, 等. 近自然化改造对杉木人工林物种多样性的影响. *林业科学研究*, 2015, 28(2): 202—208.]
- [ 15 ] Chao L, Hong T, Li J, et al. Analyses on diameter class structure and species diversity of understory of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* with different forest ages in mid-subtropical region. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2015(2): 88—96. [巢林, 洪滔, 李键, 等. 中亚热带不同林龄杉木人工林径级结构与林下物种多样性分析. *植物资源与环境学报*, 2015(2): 88—96.]
- [ 16 ] Ma R F, Liu J F, Zhang G S, et al. Soil ecological stoichiometric and microbial community characteristics of *Castanopsis kawakamii* forest and their relevance analysis. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2015(1): 19—27. [马瑞丰, 刘金福, 张广帅, 等. 格氏栲林土壤生态化学计量和微生物群落特征及其关联性分析. *植物资源与环境学报*, 2015(1): 19—27.]
- [ 17 ] Chen Y, Lü G H, Li Y. Soil microbial functional diversity of rhizosphere and non-rhizosphere of three dominant herbaceous plants in the Dushanzi District. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3110—3117. [陈悦, 吕光辉, 李岩. 独山子区优势草本植物根际与非根际土壤微生物功能多样性. *生态学报*, 2018, 38(9): 3110—3117.]
- [ 18 ] Sheng W T. A long-term study on development and succession of undergrowth vegetations in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations with different density. *Forest Research*, 2001, 14(5): 463—471. [盛炜彤. 不同密度杉木人工林林下植被发育与演替的定位研究. *林业科学研究*, 2001, 14(5): 463—471.]
- [ 19 ] He Y L, Fu M Y. Review of studies on understory of plantations. *Forest Research*, 2002, 15(6): 727—733. [何艺玲, 傅懋毅. 人工林林下植被的研究现状. *林业科学研究*, 2002, 15(6): 727—733.]
- [ 20 ] Huang X S, Wu C Z, Hong W, et al. The relationship between stand density and biomass of two rotation Chinese fir plantations. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2011, 31(2): 102—105. [黄贤松, 吴承祯, 洪伟, 等. 2种杉木人工林密度与立木生物量的研究. *福建林学院学报*, 2011, 31(2): 102—105.]
- [ 21 ] Ye G F, Tu Y H, Lin R R, et al. On big-diameter-oriented cultivation techniques of *Cunninghamia lanceolata* of different density measures. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 2005, 6(6): 544—549. [叶功富, 涂育合, 林瑞荣, 等. 杉木人工林不同密度管理定向培育大径材. *北华大学学报(自然科学版)*, 2005, 6(6): 544—549.]
- [ 22 ] Cao X Y, Li J P, Yang J, et al. Stoichiometric characterization of soil C, N, and P of different age-group Chinese fir plantation. *Soils*, 2019, 51(2): 290—296. [曹小玉, 李际平, 杨静, 等. 不同龄组杉木林土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征. *土壤*, 2019, 51(2): 290—296.]
- [ 23 ] Wang H L, Liu J, Jiang P K, et al. Advancement in researches on effect of forest management on soil N<sub>2</sub>O

- emission in forest. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 18—30. [王会来, 刘娟, 姜培坤, 等. 营林措施对森林土壤 N<sub>2</sub>O 排放影响的研究进展. *土壤学报*, 2018, 55(1): 18—30.]
- [ 24 ] Wu X Y, Wang W F, Yuan T T, et al. Carbon storage distribution characteristics of Chinese fir plantation in different age group and density. *Forest Inventory and Planning*, 2016, 41(4): 26—31. [武晓玉, 王伟峰, 袁婷婷, 等. 不同龄组和密度杉木人工林碳储量分配特征. *林业调查规划*, 2016, 41(4): 26—31.]
- [ 25 ] Liu Y B. Relationship between undergrowth species diversity and stand density of 29-year-old Chinese fir plantations. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2005, 25(1): 27—30. [刘玉宝. 29年生杉木林下植物多样性与密度的关系. *福建林学院学报*, 2005, 25(1): 27—30.]
- [ 26 ] Xiang C W. Effects of site quality and planting density on wood assortment rate in Chinese fir plantation. *Forest Research*, 2015, 28(5): 654—659. [相聪伟. 杉木人工林材种结构的立地及密度效应研究. *林业科学研究*, 2015, 28(5): 654—659.]
- [ 27 ] Jia Y Y, He Z M, Zhou L L, et al. Effects of planting densities on the growth and space utilization of young *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(5): 1177—1181. [贾亚运, 何宗明, 周丽丽, 等. 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1177—1181.]
- [ 28 ] Yang Y Y, Chen Q B, Li J Q, et al. Vegetation diversity and soil biological fertility of *Pinus armandii* in central Yunnan plateau, China. *Soils*, 2017, 49(1): 90—96. [杨媛媛, 陈奇伯, 黎建强, 等. 滇中高原华山松植物多样性与土壤生物肥力特征. *土壤*, 2017, 49(1): 90—96.]
- [ 29 ] State Forestry Administration. *Forest soil analysis methods*. Beijing: China Standard Press, 2000. [国家林业局. *森林土壤分析方法*. 北京: 中国标准出版社, 2000.]
- [ 30 ] Zhang H F. Species quantity change and ecosystem dynamics in the lower reaches of Tarim River. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 21—24. [张宏锋. 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.]
- [ 31 ] Lin K M, Yu X T, Huang B L, et al. Dynamical characteristics of undergrowth plant diversity in Chinese fir plantations. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1): 13—19. [林开敏, 俞新妥, 黄宝龙, 等. 杉木人工林林下植物物种多样性的动态特征. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(1): 13—19.]
- [ 32 ] Alem S, Pavlis J, Urban J, et al. Pure and mixed plantations of *Eucalyptus camaldulensis* and *Cupressus lusitanica*: their growth interactions and effect on diversity and density of undergrowth woody plants in relation to light. *Open Journal of Forestry*, 2015, 5(4): 375—386.
- [ 33 ] Hu X Y, Duan A G, Zhang J G, et al. Effect of stand density on soil nutrient of Chinese fir mature plantations in south asia subtropical zone. *Forest Research*, 2018, 31(3): 15—23. [胡小燕, 段爱国, 张建国, 等. 南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究. *林业科学研究*, 2018, 31(3): 15—23.]
- [ 34 ] Yu Y, Zou L, Sun T T, et al. Relationship between vegetation diversity and soil functional diversity in native pine forests. *Pratacultural Science*, 2014, 31(7): 1241—1247. [于洋, 邹莉, 孙婷婷, 等. 天然红松林植被多样性与土壤功能多样性的关系. *草业科学*, 2014, 31(7): 1241—1247.]
- [ 35 ] Andrew S M, Totland O, Moe S R. Spatial variation in plant species richness and diversity along human disturbance and environmental gradients in a tropical wetland. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, 23(3): 395—404.
- [ 36 ] Chen C H, Tian D L, Fang X, et al. Correlativity between undergrowth vegetation species diversity/biomass and soil fertility of four types planted forest in suburbs. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2010, 24(6): 213—217. [陈彩虹, 田大伦, 方晰, 等. 城郊4种人工林林下植被物种多样性、生物量与土壤养分相关性. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 213—217.]

(责任编辑: 陈荣府)