

刘俊杰, 吕倩, 沈逸, 刘江丽, 侯侨, 陈雨芩, 范川, 李贤伟. 目标树初期经营对杉木人工林林下植物多样性和土壤理化性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (2): 408-415

Liu JJ, LÜ Q, SHEN Y, LIU JL, HOU Q, CHEN YQ, FAN C, LI XW. Early effects of target tree management on plant diversity and soil physicochemical properties in a *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (2): 408-415

# 目标树初期经营对杉木人工林林下植物多样性和土壤理化性质的影响

刘俊杰<sup>1</sup> 吕倩<sup>1</sup> 沈逸<sup>1</sup> 刘江丽<sup>1</sup> 侯侨<sup>1</sup> 陈雨芩<sup>1</sup> 范川<sup>1, 2, 3</sup> 李贤伟<sup>1, 2, 3</sup>✉

<sup>1</sup>四川农业大学林学院 成都 611130

<sup>2</sup>长江上游森林资源保育与生态安全国家林业局重点实验室(四川农业大学) 成都 611130

<sup>3</sup>长江上游林业生态工程四川省重点实验室 成都 611130

**摘要** 目标树经营为近自然林业的重要手段, 研究其林下植物多样性与土壤理化性质对目标树经营密度的响应机制对于人工林经营有着重要的参考意义。以宜宾市高县月江国有林场杉木人工林为研究对象, 分析3种不同目标树密度(100株/ $\text{hm}^2$ 、150株/ $\text{hm}^2$ 、200株/ $\text{hm}^2$ )在经营1年后的林下植物多样性和土壤理化性质的变化情况。结果显示: (1) 目标树经营后, 灌木层植物生态优势度指数、多样性指数、丰富度指数均有显著增加( $P < 0.05$ ), 阳生性的灌木与草本物种开始出现, 森林植被组成向健康的演替方向发展; (2) 目标树经营各处理均显著提高了土壤总孔隙度、非毛管孔隙、全氮、有机质、速效钾( $P < 0.05$ ), 土壤水解氮有显著下降( $P < 0.05$ ); (3) 植物各多样性指数与土壤全氮、速效钾、有机质密切相关。本研究表明杉木人工林目标树经营初期在不同处理水平下表现变化不一, 但总体表现为对林下植被多样性与土壤理化性质改善作用良好。(图3 表4 参52)

**关键词** 杉木人工林; 目标树密度; 目标树经营; 土壤理化性质; 林下植物多样性

## Early effects of target tree management on plant diversity and soil physicochemical properties in a *Cunninghamia lanceolata* plantation

LIU Junjie<sup>1</sup>, LÜ Qian<sup>1</sup>, SHNE Yi<sup>1</sup>, LIU Jiangli<sup>1</sup>, HOU Qiao<sup>1</sup>, CHEN Yuqin<sup>1</sup>, FAN Chuan<sup>1, 2, 3</sup> & LI Xianwei<sup>1, 2, 3</sup>✉

<sup>1</sup> College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of National Forest Service on Forest Resources Conservation and Ecological Safety in the Upper Reaches of the Yangtze River (Sichuan Agricultural University), Chengdu 611130, China

<sup>3</sup> Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China

**Abstract** Tree density management is an important aspect of near-natural forestry, and the response mechanisms of the diversity of undergrowth vegetation and the physical and chemical properties of soil to target tree density management has significance as a reference for the management and transformation of artificial forests. Taking the *Cunninghamia lanceolata* plantation in the Yuejiang state-owned forest farm of Gaoxian County, Yibin City, China as the research area, we analyzed the changes in plant diversity and soil physical and chemical properties of three different target tree densities (100 plants/ $\text{hm}^2$ , 150 plants/ $\text{hm}^2$ , 200 plants/ $\text{hm}^2$ ) after one year of target tree management. The results show the following: (1) After target tree management, the ecological dominance index, diversity index, and richness index of undergrowth plants all increased significantly ( $P < 0.05$ ), sunny shrub and herb species began to appear, and the composition of forest vegetation developed towards healthy succession; (2) In the early stage of target tree management, the total porosity, non-capillary porosity, total nitrogen, organic matter, and available potassium of soil significantly increased ( $P < 0.05$ ), and the hydrolytic nitrogen of soil significantly decreased ( $P < 0.05$ ); (3) Plant diversity index is closely related to soil total N, available K, and organic matter. Thus, in the initial stage of target tree management of *C. lanceolata* plantations, there are different changes under different treatment levels, but its overall effect is to improve the diversity of undergrowth vegetation and the physical and chemical properties of soil.

**Keywords** *Cunninghamia lanceolata* plantation; target tree density; target tree management; soil physicochemical property; undergrowth plant diversity

收稿日期 Received: 2020-02-13 接受日期 Accepted: 2020-05-08

德国政府贷款四川林业可持续经营项目(G1403083)和科技部2017年度专项(2017YFD0600302-05)资助 Supported by the German Government Loans for Sichuan Forestry Sustainable Management (G1403083) and the Annual Specialization Project of Ministry of Science and Technology of China (2017YFD0600302-05)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: lxx@sicau.edu.cn)

土壤与植物是森林生态系统的重要组成成分，二者相互影响共同作用于生态系统<sup>[1-2]</sup>。国内外研究表明，林下植被的发育在增加生物多样性，使人工林生态系统达到稳定的同时也能够显著提高林下枯落物的分解速率，改善土壤理化性质，进而维持人工林长期生产力<sup>[3-6]</sup>。抚育间伐作为重要的森林管理措施，能够改善林分结构和稳定性，提高人工林的生态效益<sup>[7-9]</sup>。关于人工林的抚育间伐研究已在杉木(*Cunninghamia lanceolata*)<sup>[10]</sup>、落叶松(*Larix gmelinii*)<sup>[11]</sup>、马尾松(*Pinus massoniana*)<sup>[12]</sup>等树种中展开，研究表明，间伐能在一定程度上改善林下环境条件，从而有效促进林下的植被发育，提高灌木层和草本层的植物多样性<sup>[10, 13-14]</sup>。除此之外，适宜的抚育间伐还能显著改善土壤理化性质<sup>[12, 15]</sup>。目标树经营作为一种特殊的抚育间伐方式，原理是选定少数生长状况优的树木作为目标树经营的主体，使用择伐的方式采伐掉目标树周围影响目标树生长的干扰树<sup>[16]</sup>。近年来有关目标树经营的研究多关注于经营过程中的干扰树择伐等措施对森林整体景观格局的影响<sup>[17-19]</sup>。

杉木作为典型的亚热带树种，是我国南方重要速生丰产林之一，在我国林业生产中占据重要地位<sup>[1-2]</sup>。但传统的杉木纯林模式片面追求速生丰产，导致了杉木人工林生态与经济效益降低，林地质量下降以及生物种多样性降低等诸多生态安全问题<sup>[20-21]</sup>。因此，选择何种经营方式在改善林分结构的同时提升土壤肥力水平并且增加生物多样性已成为当前人们关注的焦点<sup>[22]</sup>。但目前关于杉木人工林研究多着眼于不同造林密度<sup>[23]</sup>、不同间伐强度<sup>[4, 24]</sup>或采伐林窗面积<sup>[25]</sup>等传统经营方式对其生长发育的影响，而不同目标树经营密度下对于土壤理化性质和林下植物多样性的影响以及两者的内在关系尚无定论。

基于此，本研究以宜宾市高县月江国有林场杉木人工林为研究对象，采用100、150、200株/hm<sup>2</sup>3种目标树密度经营，辅以设置对照林分，研究实施1年后目标树经营对杉木人工林灌草层植物多样性及土壤理化性质的影响，旨在响应森林质量精准提升计划，为四川南部地区杉木人工林生态系统服务功能提升提供科学参考与理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宜宾市高县月江国有林场，地处四川盆地南缘。地理坐标为104°21'-104°48'E, 28°11'-28°47'N，海拔274-600 m。属中亚热带温润季风性气候，具有四季明显，雨热同期，夏季高温多雨，冬季温和少雨等特点。年平均气温约为17.9 °C，年均降雨量为1 200 mm，土壤为黄壤。试验选取杉木林为2005年所造，平均胸径12 cm，平均树高10 m。样地经营前林下植被较少，主要植被有紫堇(*Corydalis edulis*)、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)、展毛野牡丹(*Melastoma normale*)等。林木生长不良，其生态功能处于退化状态。

表1 目标树样地概况

Table 1 Situation of target trees under different treatments

处理 Treatment	目标树密度 Density of the target trees (n/hm <sup>2</sup> )	目标树之间距离 Distance of different target trees (s/m)	目标树平均胸径 Average breast diameter (d/cm)	平均胸径 Average breast diameter (d/cm)	平均树高 Average height (h/m)	郁闭度 Canopy density
CK	0	0	-	11.3 ± 1.21	9.2 ± 0.51	0.7
Y1	100	10 × 10	11.4 ± 1.15	11.2 ± 1.42	9.5 ± 0.32	0.6
Y2	150	8.5 × 8.5	11.8 ± 1.36	11.7 ± 1.13	9.9 ± 0.46	0.6
Y3	200	7 × 7	11.8 ± 1.56	11.6 ± 1.22	9.4 ± 0.22	0.5

### 1.2 样地设置

2015年10月，在试验区按照典型抽样原则设置样地：选择立地条件和林分状况基本一致的12块样地，设置3组重复。本试验参照“德国政府财政贷款四川省林业可持续经营管理项目”专家组技术标准执行。分别设置目标树保留密度为0（未进行任何经营措施的样地）、100株/hm<sup>2</sup>、150株/hm<sup>2</sup>、200株/hm<sup>2</sup>，分别记为CK、Y1、Y2、Y3，以便于研究。在各试验地内选取可长期保留、完成天然下种更新并达到目标直径后才采伐利用的林木作为目标树，除去萌枝以及林下的其他灌草，并采伐掉影响其生长的干扰树（以目标树为中心，树冠与目标树接触或一定距离内的周围林木）同时保留未干扰目标树生长的树木与林下植被<sup>[5]</sup>。每个样地周围设置有5 m保护带。目标树采用刷红油漆标记，样地边界采用白色油漆标记。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 土壤样品采集与分析** 在各样地内随机选取3个点采集土样，取样深度为0-10 cm。土壤含水量用烘干法测定，土壤容重用环刀法测定；土壤pH值采用pH/ORP酸度计测定；全氮采用式定氮法测定；水解性氮采用碱解-扩散法测定；全磷采用碱熔-钼锑抗比色法测定；有效磷采用碳酸氢钠浸提法测定；速效钾采用火焰光度法测定；土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定<sup>[26]</sup>。

**1.3.2 植物多样性调查及分析** 2016年9月在杉木人工林内设置12个20 m × 30 m的样方，再在各样方内的4个角和样地的中心分别设5个5 m × 5 m的灌木样方，再在灌木样方内分别设置10个1 m × 1 m的草本样方，调查乔木、灌木、草本样方中植物的种类、个体数、高度、盖度和冠幅等。根据调查所得数据，分析计算样地中各植物的重要值和多样性指数，公式如下：

$$\text{重要值IV} = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3$$

$$\text{生态优势度指数Simpson (D)} : D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{多样性指数Shannon-Wiener (H)} : H = -\sum_{i=1}^S P_i \log P_i$$

$$\text{均匀度指数Pielou: } J_{SW} = -\sum_{i=1}^S P_i \log P_i / \ln S$$

$$\text{物种丰富度指数 (R)} : R = S$$

注：上述各式中，S为样地中物种的总数，P<sub>i</sub>为某个物种个体数占该层中所有种个体数之和的比例<sup>[26]</sup>

### 1.4 数据处理与统计分析

采用Excel 2010对各试验地土壤指标及植物多样性指标进行数据处理与作图，SPSS 20.0对不同目标树密度林下植物多样性指标与土壤理化性质指标分别进行单因素方差分析（one-way ANOVA）和多重比较（LSD）。对植物多样性指数与土壤理化性质进行Pearson相关分析。

## 2 结果分析

### 2.1 不同目标树密度对杉木人工林植物多样性的影响

由图1可知，杉木目标树经营初期，草本层除均匀度指数在Y1有显著下降外（P < 0.05），生态优势度指数、多样性指数、丰富度指数均表现均为随着各处理强度的增加而显著增加

( $P < 0.05$ )；灌木层均匀度指数、生态优势度指数、多样性指数和丰富度指数较CK均增加显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 杉木人工林不同目标树密度下植物组成、重要值

由表2和表3可得，各处理草本层物种数分别为3、5、5、7，其中金星蕨科 (Thelypteridaceae) 金星蕨属 (*Parathelypteris*) 为各处理中的共有优势科属；灌木层物种数分别为4、7、11、9，野牡丹科 (Melastomataceae) 野牡丹属 (*Melastoma*) 与大戟科 (Euphorbiaceae) 野桐属 (*Mallotus*) 为各处理中的共有优势科属。

种数分别为4、7、11、9，野牡丹科 (Melastomataceae) 野牡丹属 (*Melastoma*) 与大戟科 (Euphorbiaceae) 野桐属 (*Mallotus*) 为各处理中的共有优势科属。

草本层CK处理优势种为金星蕨 (*Parathelypteris glanduligera*) (36.84%) 和乌蕨 (*Stenoloma chusanum*) (57.17%)；Y1处理下新增阳生物种蕨 (*Stenoloma*

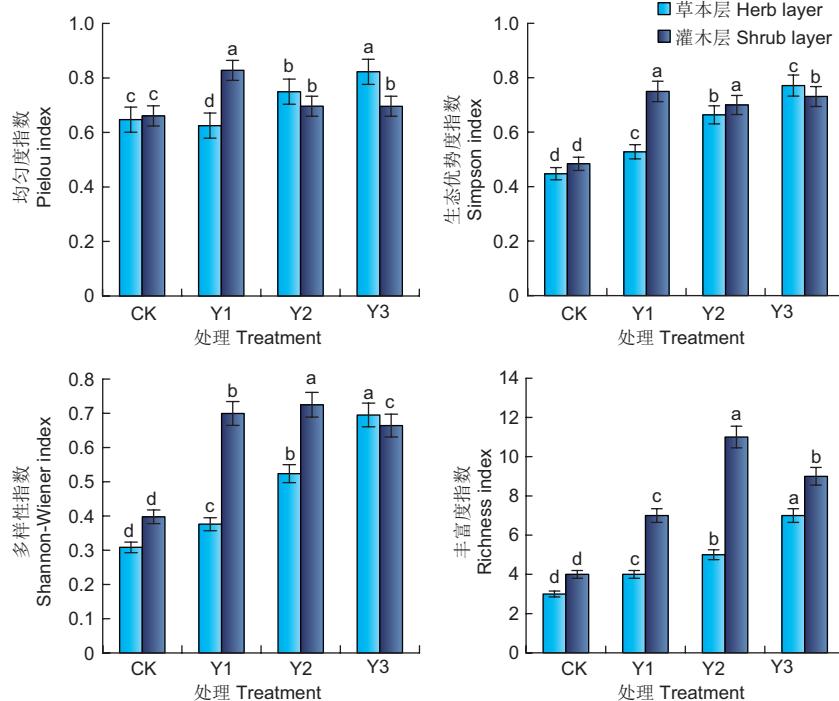


图1 杉木人工林不同目标树密度对植物多样性的影响。不同小写字母表示不同目标树密度下植物多样性数据差异显著 ( $P < 0.05$ )。

**Fig.1 Plant diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantation under different target tree densities.** Different small letters represent significant difference ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同目标树密度下草本层植物组成、重要值及其生活型

Table 2 Main species composition, life form and important value of the herb layer under different target tree densities

科 Family	属 Genus	种 Species	重要值 Important value (IV/%)			
			CK	Y1	Y2	Y3
金星蕨科 Thelypteridaceae	金星蕨属 <i>Parathelypteris</i>	金星蕨 <i>P. glanduligera</i>	36.84	39.83	25.71	30.80
罂粟科 Papaveraceae	紫堇属 <i>Corydalis</i>	紫堇 <i>C. edulis</i>	5.99	48.78	41.70	23.20
陵齿蕨科 Lindsaeaceae	乌蕨属 <i>Stenoloma</i>	乌蕨 <i>S. chusanum</i>	57.17	5.21	25.33	14.44
蕨科 Pteridaceae	蕨属 <i>Pteridium</i>	蕨 <i>P. aquilinum</i>		3.38		16.49
禾本科 Gramineae	芒属 <i>Misanthus</i>	芒 <i>M. sinensis</i>		2.80	3.11	10.55
石蒜科 Amaryllidaceae	仙茅属 <i>Curculigo</i>	仙茅 <i>C. orchoides</i>			4.15	
莎草科 Cyperaceae	薹草属 <i>Carex</i>	浆果薹草 <i>C. baccans</i>				2.00
桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	地果 <i>F. tikoua</i>				2.52

表 3 不同目标树密度下灌木层植物组成、重要值及其生活型

Table 3 Main species composition, life form and important value of the shrub layer under different target tree densities

科 Family	属 Genus	种 Species	重要值 Important value (IV/%)			
			CK	Y1	Y2	Y3
野牡丹科 Melastomataceae	野牡丹属 <i>Melastoma</i>	展毛野牡丹 <i>M. normale</i>	39.66	29.26	27.84	21.73
大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	毛桐 <i>M. barbatus</i>	16.16	26.47	24.74	32.17
紫金牛科 Myrsinaceae	杜茎山属 <i>Maesa</i>	金珠柳 <i>M. montana</i>	14.97	12.66	11.47	2.22
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	梨叶悬钩子 <i>R. pirifolius</i>	29.21	15.02	9.90	36.71
紫金牛科 Myrsinaceae	铁仔属 <i>Myrsine</i>	铁仔 <i>M. africana</i>		2.53		
大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	杠香藤 <i>M. repandus</i>		5.07		
樟科 Lauraceae	木姜子属 <i>Litsea</i>	山苍子 <i>L. cubeba</i>		8.99	2.73	0.74
壳斗科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>	枹栎 <i>Q. serrata</i>			1.86	
崖豆藤属 Millettia	崖豆藤属 <i>Millettia</i>	网络崖豆藤 <i>M. reticulata</i>			10.29	
五加科 Araliaceae	楤木属 <i>Aralia</i>	楤木 <i>A. chinensis</i>			3.79	0.73
冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 <i>Ilex</i>	冬青 <i>I. chinensis</i>			2.73	1.48
山茶科 Theaceae	柃木属 <i>Eurya</i>	柃木 <i>E. japonica</i>			2.19	
樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	樟 <i>C. camphora</i>			2.46	2.74
榆科 Ulmaceae	朴属 <i>Celtis</i>	黑弹树 <i>C. bungeana</i>				1.48

*chusanum*)、芒 (*Pteridium sinensis*)，优势种变为金星蕨 (39.83%) 和紫堇 (*Corydalis edulis*) (48.78%)；Y2处理下蕨消失，出现新物种仙茅 (*Curculigo orchoides*)，乌蕨重要值上升 (25.33%)，与金星蕨 (25.71%)、紫堇 (41.70%) 共同组成优势种；Y3处理下物种总数较多，新增物种浆果薹草 (*Carex baccans*)、地果 (*Ficus tikoua*)。

灌木层CK处理由展毛野牡丹 (*Melastoma normale*) (39.66%)、毛桐 (*Mallotus barbatus*) (16.16%)、金珠柳 (*Maesa montana*) (14.96%)、梨叶悬钩子 (*Rubus pirifolius*) (29.21%) 组成，且在各个处理均有分布；Y1处理新增阳生物种铁仔 (*Myrsine africana*)、杠香藤 (*Mallotus repandus*) 以及山苍子 (*Litsea cubeba*)；Y2处理新增物种较多，铁仔 (*Myrsine africana*)、杠香藤 (*Mallotus repandus*) 消失；Y3处理下展毛野牡丹 (21.73%)、毛桐 (32.17%)、梨叶悬钩子 (36.71%) 在群落中占主导地位，有新增物种黑弹树 (*Celtis bungeana*)。

### 2.3 杉木人工林不同目标树密度对土壤物理性质的初期影响

由图2可知，土壤物理性质在不同目标树密度处理变化不一。与CK相比，土壤总孔隙度在Y1、Y3处理显著增加 ( $P < 0.05$ )，增幅分别为39%、15.69%，Y2处理下的土壤总孔隙度变化不显著 ( $P > 0.05$ )；Y1、Y2处理的土壤非毛管孔隙较CK均显著增加了2.87倍和2.37倍 ( $P < 0.05$ )，Y3处理变化不显著 ( $P > 0.05$ )；各处理下的土壤含水量、土壤容重、毛管孔隙度与CK相比无显著变化 ( $P > 0.05$ )。

### 2.4 杉木人工林不同目标树密度对土壤化学性质的初期影响

在经过不同目标树密度经营后的林分土壤化学性质变化不一。土壤有效磷在Y2处理下变化显著 ( $P < 0.05$ )，相比于CK增长了1.11倍，Y1与Y3处理变化不显著 ( $P > 0.05$ )；土壤全氮在3种处理下较CK分别显著提升了11.57%、34.72%、

28.70% ( $P < 0.05$ )；土壤水解氮在Y2处理较CK显著增加了12.98% ( $P < 0.05$ )，Y1、Y3处理表现为显著下降了41.42%、30.27% ( $P < 0.05$ )；土壤pH在Y2处理显著增加了6.21% ( $P < 0.05$ )，在Y1、Y3处理变化不显著 ( $P > 0.05$ )；土壤有机质在3种处理下较CK均增长显著 ( $P < 0.05$ )，其中Y3处理下增幅最高，为1.08倍，Y1、Y2增幅分别为86.68%、89.72%；土壤速效钾在Y2、Y3处理分别显著上升6.93%、7.69% ( $P < 0.05$ )；土壤全磷在各处理下变化均不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.5 杉木人工林不同目标树密度下土壤理化性质与植物多样性的相关性分析

由表4可知：土壤总孔隙度与灌木层生态优势度指数显著相关 ( $P < 0.05$ )，与灌木层均匀度指数极显著相关 ( $P < 0.01$ )；土壤全氮与灌木层生态优势度指数存在显著相关关系 ( $P < 0.05$ )，与灌木层物种多样性指数、物种丰富度指数和草本层物种多样性指数、物种丰富度指数、均匀度指数有极显著相关关系 ( $P < 0.01$ )；土壤水解氮与灌木层均匀度指数显著相关 ( $P < 0.05$ )；土壤水解氮与灌木层均匀度指数显著相关 ( $P < 0.05$ )；土壤有机质与草本层均匀度指数显著相关 ( $P < 0.05$ )，与草本层和灌木层的生态优势度指数、物种多样性指数；丰富度指数均存在极显著相关关系 ( $P < 0.01$ )；土壤速效钾极与灌木层的丰富度指数以及草本层的丰富度指数、生态优势度指数、物种多样性指数和均匀度指数极显著相关 ( $P < 0.01$ )，与灌木层的物种多样性指数显著相关 ( $P < 0.05$ )；而土壤含水量、土壤容重、pH、土壤全磷与有效磷与灌木层和草本层植物各多样性指数均无明显的相关关系。

## 3 讨论

### 3.1 杉木人工林不同目标树密度对植物多样性的初期影响

目标树经营通过伐除干扰树扩大了林隙，进而降低了林分的郁闭度，并在减少了一般树对光、水和营养资源的竞争同

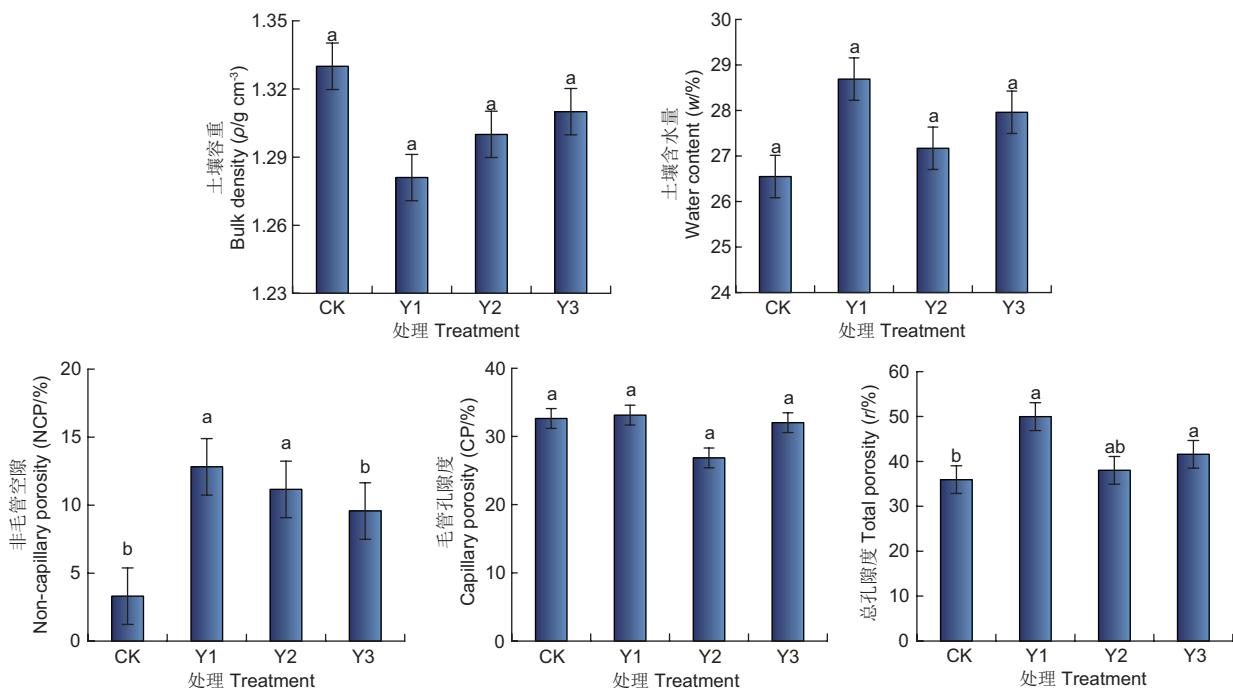


图2 杉木人工林不同目标树密度下的土壤物理性质。不同小写字母表示不同目标树密度下土壤化学性质数据差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Fig.2 Soil physical properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation under different target tree densities. Different small letters indicate that the data of soil chemical properties under different target tree densities are significantly different ( $P < 0.05$ ).

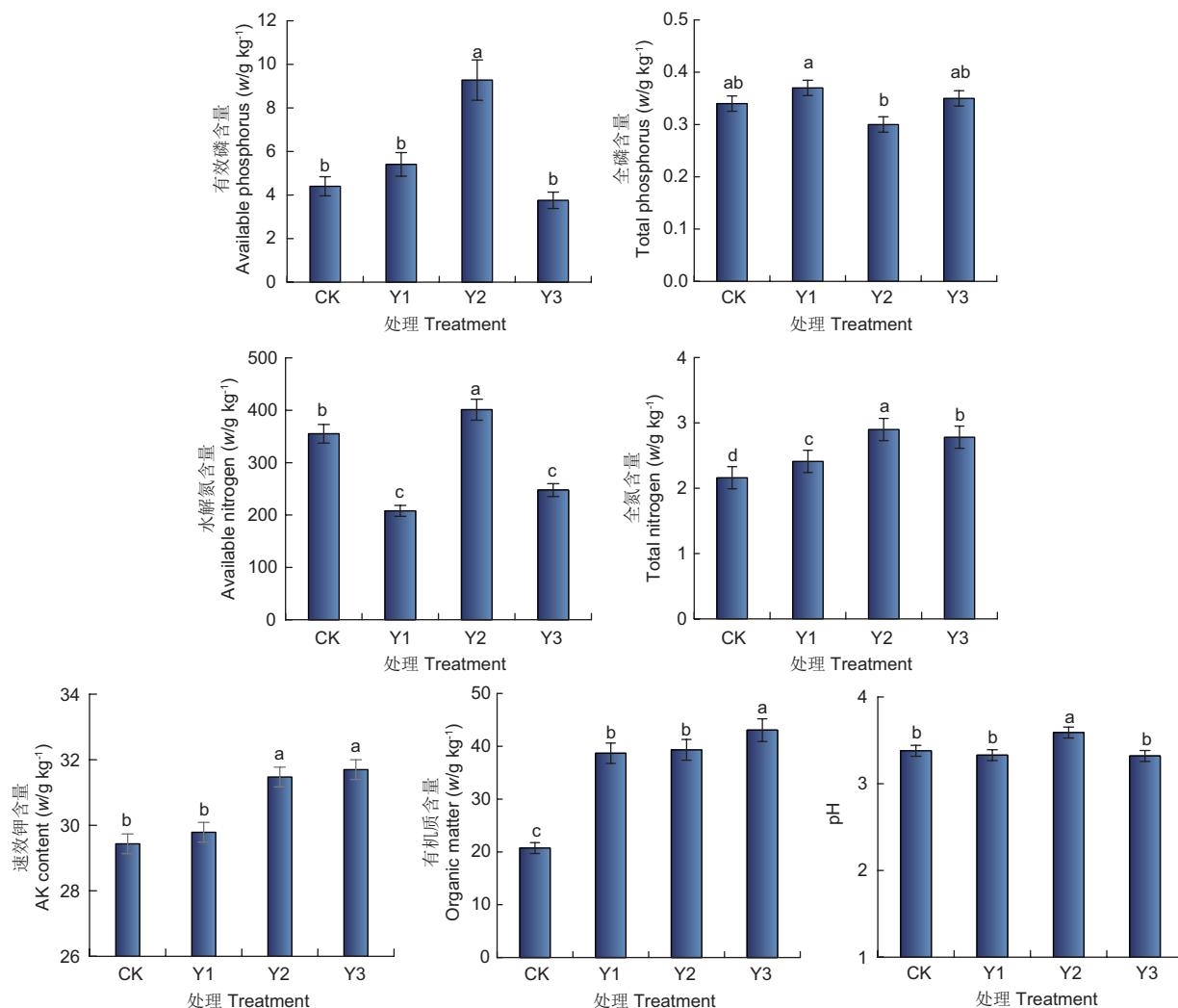


图3 杉木人工林不同目标树密度下的土壤化学性质. 不同小写字母表示不同目标树密度下土壤化学性质数据差异显著 ( $P < 0.05$ ).

**Fig. 3 Soil chemical properties of *Cunninghamia lanceolate* plantation under different target tree densities.** Different small letters indicate that the data of soil chemical properties under different target tree densities are significantly different ( $P < 0.05$ ).

表4 杉木人工林目标树经营初期植物多样性与土壤理化性质的相关分析系数

**Table 4 Correlation coefficient of plant diversity and soil physicochemical properties at the early stage of target tree management of *Cunninghamia lanceolate* plantation**

指标 Index	土含水量 Water content	土壤容 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	pH	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	水解氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus	有机质 Organic matter	速效钾 Available phosphorus
S1	0.116	-0.081	0.148	0.126	0.882**	-0.098	-0.107	0.103	0.823**	0.893**
S2	0.283	-0.276	0.644*	-0.001	0.676*	0.152	-0.511	0.183	0.962**	0.545
D1	0.076	-0.040	0.113	0.040	0.821**	-0.075	-0.136	-0.019	0.769**	0.889**
D2	0.231	-0.261	0.512	0.273	0.784**	-0.040	-0.266	0.413	0.934**	0.603*
H1	-0.003	0.057	-0.081	0.150	0.789**	-0.172	0.087	0.043	0.590*	0.873**
H2	0.316	-0.275	0.776**	-0.306	-0.078	0.446	-0.691*	0.002	0.425	-0.241
J1	0.122	-0.062	0.211	-0.056	0.784**	0.022	-0.252	-0.065	0.803**	0.846**
J2	0.088	-0.148	0.132	0.559	0.971**	-0.337	0.151	0.543	0.829**	0.832**

S1: 草本层 Simpson生态优势度指数; S2: 灌木层 Simpson生态优势度指数; D1: 草本层 Shannon物种多样性指数; D2: 灌木层 Shannon物种多样性指数; H1: 草本层 Pielou均匀度指数; H2: 灌木层 Pielou均匀度指数; J1: 草本层丰富度指数; J2: 灌木层丰富度指数; \* 显著相关; \*\*极显著相关.

S1: Richness index of the herb layer; S2: Richness index of the shrub layer; H1: Shannon-wiener index of the herb layer; H2: Shannon-wiener index of the shrub layer; D1: Simpson index of the herb layer; D2: Simpson index of the shrub layer; J1: Pielou index of the herb layer; J2: Pielou index of the shrub layer; \* Significant correlation; \*\* Highly significant correlation.

时增加了样地中目标树的光照、水分的接触面积, 有利于目标树生长 [27-28]. 此外, 已有研究表明: 目标树经营还有利于优化林分中的物种组成, 干扰树的间伐可以通过降低林分密度和郁闭度来改善林分内的光照条件, 提高植物的营养面积和生

长空间, 促进林下灌木和草本的生长发育 [29-30], 使森林植被组成与立地条件朝着健康的演替方向发展 [31-33]. 因此间伐后林分中阳生性的灌木与草本物种占据较大优势, 这也是经过择伐的林分演替速度加快的主要原因 [34-36]. 在本研究中, 目标树

经营后的杉木人工林林下植被均匀度指数、多样性指数、生态优势度指数和丰富度指数较CK有显著增加,但不同处理下草本层与灌木层的物种多样性变化有所不同。Y1林内光照条件较好,乔灌层对草本层的抑制减弱,促进了阳生草本的快速生长<sup>[37-38]</sup>,草本层出现新的阳生物种蕨、芒以及铁仔、杠香藤、山苍子等,阴生物种乌蕨的数量下降;Y2处理林内光照条件虽较CK有所改善,但随着目标树保留株数的增加,目标树保留区域开始出现阴暗潮湿,林地内整体呈现阳性—中性—阴性的过渡态环境<sup>[26, 39]</sup>,灌木层多样性指数和丰富度指数达到峰值,出现樟、冬青、枹栎等阳生或中性灌木,也出现了包括柃木、网络崖豆藤在内的阴生灌木;Y3处理对于干扰树采伐力度最大,林下植被拥有了更加充足的光照条件,柃木、网络崖豆藤等阴生灌木因失去适宜的生存环境而消失<sup>[40-41]</sup>,灌木层多样性指数和丰富度指数进而下降,但该处理草本层各指数持续增加并达到峰值且出现阳生物种蕨,或是因为草本植物的繁殖能力比灌木更强,更能适应进行了目标树经营处理后的环境<sup>[10, 42]</sup>。

### 3.2 杉木人工林不同目标树密度对土壤理化性质与植物多样性的初期影响

土壤是气候、母质、植被、地形长期综合作用下的产物,并随着群落演替不断发生变化。土壤理化性质的差异决定了群落结构的不同,而不同的植物因生长活动、凋落物的分解等活动直接或间接影响着土壤的理化性质<sup>[43-45]</sup>。目标树经营运用间伐方式培育人工林,在改变林分结构的同时其林下环境也将随之发生改变,林下环境的变化将影响土壤物质循环和养分周转,进而引起土壤养分的变化<sup>[46-47]</sup>。在本研究中,杉木人工林目标树经营初期植物多样性显著提升,产生了更多的凋落物与腐殖质,新增的腐殖质与植物的庞大根系对于土壤孔隙度起到了涵养水分的作用<sup>[48-50]</sup>,各处理下土壤的非毛管孔隙度都一定程度的提升。但3种处理下土壤含水量与土壤容重均变化不显著,可能是目标树经营初期对其影响不明显,这与徐雪蕾等人的研究结果<sup>[10]</sup>相似;土壤pH除在Y2处理下有显著上升外均无显著变化,变化范围在3.3-3.6之间。Y2处理下土壤酸度下降的原因可能是目标树经营使得样地林下植物多样性增加,林下植被促进了凋落物养分的分解与转化速率,使更多的养分归还于土壤,从而林地土壤的酸性下降<sup>[41]</sup>;有研究表明

明,有机质的含量是影响土壤中全氮含量的重要因素<sup>[11, 51]</sup>,本实验中土壤有机质和土壤全氮在经过了目标树经营的样地均有了显著提升且与植物多样性指数呈极显著正相关,是因为在目标树经营初期样地林下植被有所增加或干扰树采伐后仍残留了部分未清除的采伐剩余物,使得土壤有机质和土壤全氮得到显著提升<sup>[10, 52]</sup>。Y1与Y3处理土壤水解氮含量的下降则或是因为氮素的补充无法弥补因植物对氮素的需求增加导致的氮分解加快<sup>[12]</sup>;土壤速效钾是植物生长过程中易被较快吸收利用的钾素形态,与草本与灌木的生态优势度指数、多样性指数、丰富度指数均呈显著正相关,是经营样地内物种数量增加的重要影响因子<sup>[26]</sup>;土壤全磷在各处理下均变化不显著,或是由于目标树经营处于初期,经营时间较短,这与刘旭军等人的研究结果<sup>[24]</sup>相似。土壤有效磷在Y2处理下的显著上升,则是由于强度间伐有利于林下植被生物多样性的增加,对磷的转换加快所导致<sup>[9]</sup>。

## 4 结论

目标树经营作为近自然森林经营理念中的重要组成部分,以单株选择目标树和伐除干扰树为特征,能够显著改善林内土壤理化性质,在不破坏森林整体的景观格局的同时有利于形成林下天然树种更新。本实验结果表明:杉木人工林在目标树经营初期,各处理土壤理化性质相比于对照得到了显著提升,同时也一定程度上使得原群落结构和种类组成发生了变化,物种多样性得以维持,群落演替的方向开始发生改变。不同处理水平下杉木人工林目标树经营初期表现各有不同。100 株/hm<sup>2</sup>的目标树样地对于干扰树的间伐改善了样地光照条件,促进了林下植物的演替进程,阳生植物开始出现;150 株/hm<sup>2</sup>的目标树密度下土壤氮磷含量显著增加,作用于整体样地,样地内灌木层物种得到大幅度增长,是所有处理中目标树经营对于样地内土壤理化性质与植物多样性的促进作用最为显著的一组;200株/hm<sup>2</sup>的目标树密度作为对干扰树采伐力度最大的一组,在为样地提供了充足光照条件的同时目标树保留区域也为部分阴生草本提供了生存条件。植物多样性对土壤理化性质的响应过程是一个长期的过程,在后续的研究中,应立足于长期持久性观测来进一步探讨土壤因子、林下植物多样性以及幼苗幼树生长状况对目标树经营的响应机制。

## 参考文献 [References]

- 王合云, 郭建英, 董智, 李红丽, 李锦荣, 陈新闻. 退化程度对大针茅草原植物群落结构特征及物种多样性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30 (3): 106-111 [Wang HY, Guo JY, Dong Z, Li HL, Li JR, Chen XC. Effects of degradation degree on plant community structure and species diversity of *Stipa grandis* grassland [J]. *J Ar Land Res Environ*, 2016, 30 (3): 106-111]
- José SJ, Montes R, Carmen B, Dirk T, Miguel AM. Response of terrestrial-aquatic palm ecotone (Morichal) to anthropogenic disturbance in the Orinoco Lowlands [J]. *Fol Geob*, 2012, 47 (2): 153-178
- Trentini CP, Campanello PI, Villagra M, Ritter L, Ares A, Goldstein G. Thinning of loblolly pine plantations in subtropical Argentina: Impact on microclimate and understory vegetation [J]. *For Ecol Manag*, 2017, 384: 236-247
- 马芳芳, 贾翔, 赵卫, 周旺明, 周莉, 于大炮, 吴志军, 代力民. 间伐强度对辽东落叶松人工林土壤理化性质的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36 (4): 971-977 [Ma FF, Jia X, Zhao W, Zhou WM, Zhou L, Yu DP, Wu ZJ, Dai LM. Effect of thinning intensity on physical and chemical properties of *Larix gmelinii* plantation soil [J]. *Chin J Ecol*, 2017, 36 (4): 971-977]
- Huang PS, Lin HC, Lin CP, Tso IM. The effect of thinning on ground spider diversity and microenvironmental factors of a subtropical spruce plantation forest in East Asia [J]. *Eur J For Res*, 2014, 133 (5): 919-930
- Ares A, Neill AR, Puettmann KJ. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands [J]. *For Ecol Manag*, 2010, 260 (7): 1104-1113
- 王懿祥, 周国模, 白尚斌. 森林可持续发展指标选择[J]. 世界林业研

- 究, 2006, **19** (4): 1-4 [Wang YX, Zhou GM, Bai SB. Selection of indicators for sustainable forest development [J]. *World For Res*, 2006, **19** (4): 1-4]
- 8 黄清麟. 浅谈德国的“近自然森林经营” [J]. 世界林业研究, 2005, **18** (3): 73-77 [Huang QL. On “near natural forest management” in Germany [J]. *World For Res*, 2005, **18** (3): 73-77]
- 9 陆元昌. 近自然森林经营理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006 [Lu YC. *Theory and Practice of Near Natural Forest Management* [M]. Beijing: Science Press, 2006]
- 10 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 张鹏, 胡杨, 王新杰. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 林业科学, 2019, **55** (3): 1-12 [Xu XL, Sun YJ, Zhou H, Zhang P, Hu Y, Wang XJ. Effect of thinning intensity on vegetation and soil properties under *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *For Sci*, 2019, **55** (3): 1-12]
- 11 周焘, 王传宽, 周正虎, 孙志虎. 抚育间伐对长白落叶松人工林土壤碳、氮及其组分的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30** (5): 1651-1658 [Zhou T, Wang CK, Zhou ZH, Sun ZH. Effects of thinning on soil carbon, nitrogen and its components in *Larix olgensis* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30** (5): 1651-1658]
- 12 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2013, **22** (4): 598-604 [Qin J, Tang XH, Yang XM. Effects of different forest types of *Pinus massoniana* on soil physical and chemical properties [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, **22** (4): 598-604]
- 13 张慧, 周国模, 白尚斌, 王懿祥, 尤誉杰, 朱婷婷, 张华峰. 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 H, Zhou GM, Bai SB, Wang YX, You YJ, Zhu TT, Zhang HF. Effect of target tree tending on community structure and diversity of natural secondary shrub in subtropical zone [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28** (5): 1414-1420]
- 14 Verschuyt J, Riffell S, Miller D, Wigley TB. Biodiversity response to intensive biomass production from forest thinning in North American forests – A meta-analysis [J]. *For Ecol Manag*, 2011, **261** (2): 221-232
- 15 Maureen KH, Dave MM, Robert LF, Nancy JL. Reconciling harvest intensity and plant diversity in Boreal ecosystems: does intensification influence understory plant diversity? [J]. *Environ Manag*, 2015, **56** (5): 1091-1103
- 16 戎建涛. 中亚热带天然阔叶用材林目标树经营研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013 [Rong JT. Study on target tree management of natural broad-leaved timber forest in the middle subtropical zone [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013]
- 17 欧建德, 吴志庄, 罗宁. 林窗大小对杉木林内南方红豆杉生长与品质的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27** (10): 3098-3104 [Ou JD, Wu ZZ, Luo N. Effect of gap size on growth and quality of *Taxus chinensis* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27** (10): 3098-3104]
- 18 Nélida JC, Florencia M. Facilitating regeneration of secondary forests with the use of mixed and pure plantations of indigenous tree species [J]. *For Ecol Manag*, 2002, **163** (1): 217-227
- 19 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 YX. Theory and practice of target tree management in artificial *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* forests [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012]
- 20 夏丽丹, 于姣姐, 邓玲玲, 李小艳, 周垂帆, 徐永兴. 杉木人工林地力衰退研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, **31** (2): 37-42 [Xia LD, Yu JD, Deng LL, Li XY, Zhou CF, Xu YX. Research progress on the decline of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *World For Res*, 2018, **31** (2): 37-42]
- 21 Hartemink AE. Soil fertility decline in the tropics with case studies on plantations [J]. *Soil Sci*, 2003, **170** (2): 149-151
- 22 方立红. 试论目标树经营体系对森林保护的作用[J]. 福建农业, 2014 (8): 69-69 [Fang LH. On the effect of target tree management system on forest protection [J]. *FJ Agric*, 2014 (8): 69-69]
- 23 贾亚运, 何宗明, 周丽丽, 马祥庆, 吴鹏飞, 邹显花, 刘青青, 刘雨晖. 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35** (5): 1177-1181 [Jia YY, He ZM, Zhou LL, Ma XQ, Wu PF, Zhou XH, Liu YH. Effect of afforestation density on growth and spatial utilization of young *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35** (5): 1177-1181]
- 24 刘旭军, 程小琴, 田慧霞, 贾小东, 韩海荣. 不同间伐强度下华北落叶松人工林土壤磷组分特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2018, **29** (12): 3941-3948 [Liu XJ, Chen XQ, Tian HX, Jia XD, Han HR. Characteristics and influencing factors of soil phosphorus components of *Larix gmelinii* plantation under different thinning intensities [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29** (12): 3941-3948]
- 25 林同龙. 杉木人工林近自然经营技术的应用效果研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32** (3): 11-16 [Lin TL. Study on the application effect of near natural management technology of *Cunninghamia lanceolata* Plantation [J]. *J Cen S Univ For Technol*, 2012, **32** (3): 11-16]
- 26 吕倩, 康文斯, 郭茂金, 罗涛, 刘俊杰, 范川, 李贤伟. 柏木人工林目标树经营初期对林下植物多样性及土壤理化性质的影响[J]. 应用环境生物学报, 2019, **25** (5): 1036-1043 [Lü Q, Kang WS, Guo MJ, Luo T, Liu JJ, Fan C, Li XW. Effects of target tree management on plant diversity and physical and chemical properties of soil in the early stage of *Cupressus funebris* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **25** (5): 1036-1043]
- 27 Cañellas I, Del Río M, Roig S, Montero G. Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain [J]. *Ann For Sci*, 2004, **61** (3): 243-250
- 28 Steinauer K, Jensen B, Strecker T, Luca ED, Scheu S, Eisenhauer N. Convergence of soil microbial properties after plant colonization of an experimental plant diversity gradient [J]. *BMC Ecol*, 2016, **16** (1): 1-9
- 29 Cheng CP, Wang YD, Fu XL, Xu MJ, Dai XQ, Wang HM. Thinning effect on understory community and photosynthetic characteristics in a subtropical *Pinus massoniana* plantation [J]. *Ca J For Res*, 2017, **47** (8): 1104-1115
- 30 孙冬婧, 温远光, 罗应华, 李晓琼, 张万幸, 明安刚. 近自然化改造对杉木人工林物种多样性的影响[J]. 林业科学研究, 2015, **28** (2): 202-208 [Sun DJ, Wen YG, Luo YF, Li XQ, Zhang WX, Ming AG. Effects of near naturalization on species diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *For Res*, 2015, **28** (2): 202-208]
- 31 陈超凡, 覃林, 段艺璇, 何亚婷, 王鹏, 冯琦雅, 王雅菲, 何友均. 不同经营模式对蒙古栎次生林叶功能性状和土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2018, **38** (23): 8371-8382 [Chen CF, Qin L, Duan YX, He YT, Wang P, Feng QY, Wang YF, He YJ. Effects of different management modes on leaf function and soil physical and

- chemical properties of *Quercus mongolica* secondary forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (23): 8371-8382]
- 32 冯琦雅, 陈超凡, 覃林, 何亚婷, 王鹏, 段艺璇, 王雅菲, 何友均. 不同经营模式对蒙古栎天然次生林林分结构和植物多样性的影  
响[J]. 林业科学, 2018, **54** (1): 12-21 [Feng QY, Chen CF, Qin L, He YT, Wang P, Duan YX, Wang YF, He YJ. Effects of different management modes on stand structure and plant diversity of *Quercus mongolica* natural secondary forest [J]. *For Sci*, 2018, **54** (1): 12-21]
- 33 李荣, 张文辉, 何景峰, 周建云. 不同间伐强度对辽东栎林群落稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (1): 14-20 [Li R, Zhang WH, He JF, Zhou JY. Effect of thinning intensity on community stability of *Quercus mongolica* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22** (1): 14-20]
- 34 Brown K A, Gurevitch J. Long-term impacts of logging on forest diversity in Madagascar [J]. *PNAS*, 2004, **101** (16): 6045-6049
- 35 姜俊, 刘宪钊, 贾宏炎, 明安刚, 陈贝贝, 陆元昌. 杉木人工林近自然改造对林下植被多样性和土壤理化性质的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, **41** (5): 170-177 [Jiang J, Liu XZ, Jia HY, Ming AG, Chen BB, Lu YC. Effects of near naturalization of *Cunninghamia lanceolata* plantation on plant diversity and soil physical and chemical properties [J]. *J Beijing For Univ*, 2019, **41** (5): 170-177]
- 36 Schutz J P. Development of close to nature forestry and the role of ProSilva Europe [J]. *Zbor Gozd Les*, 2011, **94**: 39-42
- 37 王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 刘佳, 刘宇航, 王宇, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2019, **39** (3): 981-988 [Wang MZ, Bi HJ, Jin S, Liu J, Liu YH, Wang Y, Qi JQ, Hao JF. Effects of stand density on species diversity and physical and chemical properties of soil under *Cupressus funebris* plantation in Yunding mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (3): 981-988]
- 38 Alem S, Pavlis J, Urban J, Kucera J. 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 [J]. *Op J For*, 2015, **5** (4): 375-386
- 39 李民义, 张建军, 郭宝妮, 黄明, 茹豪. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J]. 生态学杂志, 2013, **32** (5): 1083-1090 [Li MY, Zhang JJ, Guo BN, Huang M, Ru H. Plant diversity and hydrological effects of *Pinus tabulaeformis* plantation with different densities in the loess area of western Shanxi Province [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32** (5): 1083-1090]
- 40 吕倩, 尹海锋, 何朋俊, 李贤伟, 范川, 冯茂松, 刘俊杰, 王艺峰. 马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24** (3): 500-507 [Lü Q, Yin HF, He PJ, Li XW, Fan C, Feng MS, Liu JJ, Wang YF. Effects of target tree management on soil physical and chemical properties and plant diversity in *Pinus massoniana* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **24** (3): 500-507]
- 41 Ward J. Twenty-five year response of non-crop trees to partial release during precommercial crop tree management [J]. *For Ecol Manag*, 2017, **387**: 12-18
- 42 Sára M, Flóra T, András B, Péter O. Environmental drivers of the composition and diversity of the herb layer in mixed temperate forests in Hungary [J]. *Plant Ecol*, 2016, **217** (5): 549-563
- 43 闫玮明, 孙冰, 裴男才, 王旭, 李非凡, 罗鑫华, 邹滨. 粤北阔叶人工林和次生林植物多样性与土壤理化性质相关性研究[J]. 生态环境学报, 2019, **28** (5): 898-907 [Yan WM, Sun B, Pei NC, Wang X, Li FF, Luo XH, Zhou B. Correlation between plant diversity and soil physical and chemical properties of broad-leaved plantation and secondary forest in northern Guangdong [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28** (5): 898-907]
- 44 魏晨辉, 沈光, 裴忠雪, 任蔓莉, 路嘉丽, 王琼, 王文杰. 不同植物种植对松嫩平原盐碱地土壤理化性质与细根生长的影响[J]. 植物研究, 2015, **35** (5): 759-764 [Wei CH, Shen G, Pei ZX, Ren ML, Lu JL, Wang Q, Wang WJ. Effects of different plant planting on physical and chemical properties and fine root growth of saline alkali soil in Songnen Plain [J]. *Bull Bot Res*, 2015, **35** (5): 759-764]
- 45 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 郭文福, 卢立华, 温远光. 马尾松人工林近自然改造对植物自然更新及物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33** (19): 6154-616 [Luo YH, Sun DJ, Lin JY, Guo WF, Lu LH, Wen YG. Effects of near naturalization of *Pinus massoniana* plantation on plant natural regeneration and species diversity [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (19): 615-616]
- 46 Li XJ, Su Y, Yin HF, Liu SZ, Chen G, Fan C, Feng MS, Li XW. The effects of crop tree management on the fine root traits of *Pinus massoniana* in Sichuan Province, China [J]. *Forests*, 2020, **11** (3): 1-13
- 47 罗艳, 何朋俊, 吕倩, 范川, 冯茂松, 李贤伟, 陈露蔓. 目标树经营初期对马尾松人工林碳贮量的影响[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版): <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20200310.1612.006.html>. [Luo Y, He PJ, Lü Q, Fan C, Feng MS, Li XW, Cheng LM. Early effect of target tree management on carbon storage in *Pinus massoniana* [J/OL]. *J Nanjing For Univ*: [http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20200310.1612.006.html.](http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20200310.1612.006.html)]
- 48 张景普, 于立忠, 刘利芳, 张金鑫, 高尚林, 张文儒, 刘成宇. 不同作业方式对落叶松人工林土壤养分及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35** (6): 1403-1410 [Zhang JP, Yu LZ, Liu LF, Zhang JX, Gao SL, Zhang WR, Liu CY. Effects of different operation modes on soil nutrients and enzyme activities of *Larix gmelinii* plantation [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35** (6): 1403-1410]
- 49 Trettin CC, Jorgensen MF, Gale MR, McLaughlin JW. Recovery of carbon and nutrient pools in a northern forested wetland 11 years after harvesting and site preparation [J]. *For Ecol Manag*, 2011, **262** (9): 1826-1833
- 50 李晓莹, 徐学华, 郭江, 赵顺, 李玉灵. 不同造林树种对铁尾矿基质理化性质和土壤动物的影响[J]. 生态学报, 2014, **34** (20): 5746-5757 [Li XY, Xu XH, Guo J, Zhao S, Li YL. Effects of different afforestation species on physical and chemical properties of iron tailings matrix and soil animals [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (20): 5746-5757]
- 51 Pandey D, Agrawal M, Bohra JS, Adhya TK, Bhattacharyya P. Recalcitrant and labile carbon pools in a sub-humid tropical soil under different tillage combinations: a case study of rice-wheat system [J]. *Soil Till Res*, 2014, **143**: 116-122
- 52 李旭, 王海燕, 杨晓娟, 刘玲, 李卫松, 王岳. 东北近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度土壤肥力研究[J]. 西北林学院学报, 2015, **30** (2): 1-7 [Li X, Wang HY, Yang XJ, Liu L, Li WS, Wang Y. Study on soil fertility of different thinning intensities of *Larix gmelinii* and *Picea asperata* in Northeast China [J]. *J Nw For Univ*, 2015, **30** (2): 1-7]