

DOI: 10.5846/stxb202002270350

李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 余飞燕, 董洪君, 王敏, 郝建锋. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2021, 41(3): 1168-1177.

Li T T, Tang Y B, Zhou R H, Yu F Y, Dong H J, Wang M, Hao J F. Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Yunding Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1168-1177.

云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系

李婷婷¹, 唐永彬², 周润惠¹, 余飞燕¹, 董洪君¹, 王 敏¹, 郝建锋^{1,3,*}

1 四川农业大学林学院, 成都 611130

2 四川省资阳市自然资源和规划局, 资阳 641300

3 四川农业大学水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130

摘要:以成都云顶山 5 种人工林(I: 柏木枫杨林; II: 银杏楠木林; III: 光皮桉木香樟林; IV: 枫杨桉木林; V: 柏木林)为研究对象, 重点研究不同人工林林下植物多样性与土壤理化性质差异以及二者间的关系。结果表明: 不同人工林灌草层重要值最高的物种不同, 光皮桉木香樟林林下植物组成最丰富, 而银杏楠木林最贫乏。各人工林灌木层多样性指数 H' 、优势度指数 H' 、丰富度指数 D 均以光皮桉木香樟林最大, 而均匀度指数 J_{sw} 无显著差异; 草本层 H' 、 D 、 J_{sw} 均以柏木林最大, 银杏楠木林最小, 而 H' 差异不显著。不同人工林土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、速效钾、速效磷含量差异显著, pH 值、全磷含量柏木枫杨林最高, 有机质、全氮、速效钾、速效磷含量银杏楠木林最高。显著影响灌木层物种多样性的土壤因子为有机质、速效磷, 草本层为 pH、全磷、速效磷。结论: 光皮桉木香樟林林下整体植物多样性水平最高, 经营此种林分有利于林下植物多样性维持及发展, pH、有机质、全磷、速效磷是影响研究区林下植物多样性的主要土壤因子。

关键词: 人工林; 林下植被; 物种多样性; 土壤理化性质; 冗余分析

Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Yunding Mountain

LI Tingting¹, TANG Yongbin², ZHOU Runhui¹, YU Feiyan¹, DONG Hongjun¹, WANG Min¹, HAO Jianfeng^{1,3,*}

1 College of Forestry Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

2 Natural Resources and Planning Agency of Ziyang, Ziyang 641300, China

3 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Five plantations (I: *Cupressus funebris* and *Pterocarya stenoptera* forest; II: *Ginkgo biloba* and *Phoebe zhennan* forest; III: *Swida wilsoniana* and *Cinnamomum camphora* forest; IV: *Pt. stenoptera* and *Alnus cremastogyne* forest; V: *Cu. funebris* forest) were utilized in the Yunding Mountain, Chengdu, as the research objects to focus on the differences between understory plant diversity and soil physicochemical properties and the relationship between them. The results showed that the species with the highest important values in the shrub and herb layer of five plantations were different. *S. wilsoniana* and *Ci. camphora* forests had the richest understory plant composition whereas *G. biloba* and *Ph. zhennan* forests had the poorest. In the shrub layer, the Shannon-Wiener diversity index H' , Simpson dominance index H' , and species richness index D of the different plantations were the largest in the *S. wilsoniana* and *Ci. camphora* forests, whereas the

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370628); 四川省教育厅一般项目(自然科学, 15ZB0020)

收稿日期: 2020-02-27; **网络出版日期:** 2020-12-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haojf2005@aliyun.com

Pielou evenness index J_{sw} showed no significant difference. In the herb layer, the H , D , and J_{sw} among the different plantations were the largest in the *Cu. Funebris* forest and the smallest in the *G. biloba* and *Ph. zhennan* forests, whereas the difference of the H' in the different plantations was not significant. There were visible differences in the soil pH value and contents of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available potassium, and available phosphorus in the different plantations. The pH value and total phosphorus contents were the highest in the *Cu. funebris* and *Pt. stenoptera* forests, and the organic matter, total nitrogen, available potassium, and available phosphorus contents were the highest in the *G. biloba* and *Ph. zhennan* forests. The soil factors that significantly affected the species diversity of the shrub layer were the organic matter and available phosphorus, whereas in the herb layer these factors were the pH, total phosphorus, and available phosphorus. In summary, the overall levels of understory plant diversity under *S. wilsoniana* and *Ci. camphora* forests were the highest; therefore, the construction of such a plantation is conducive to the maintenance and development of understory plant diversity. Meanwhile, soil pH, organic matter, total phosphorus, and available phosphorus were the main soil factors influencing the understory plant diversity in the study area.

Key Words: plantation; understory vegetation; species diversity; soil physicochemical property; redundancy analysis

物种多样性能反映物种水平上的生物多样性^[1-2],其维持机制一直是生态学的研究热点^[3-4]。林下植被作为森林生态系统的重要组成部分,在促进物种多样性发展、维持系统稳定性、调控物质能量交换等方面发挥着重要作用^[5-6]。如 Wu 等^[7]对中国南方桉树人工林的研究发现,人为去除林下灌草层会导致土壤微生物群落结构改变、凋落物分解减缓,最终必将影响人工林的养分循环及土壤碳排放。Nilsson 等^[8]对瑞典北方森林的研究表明,林下植被是生态系统的主要驱动力,其短期内影响着森林树种的组成,长期来看则是土壤肥力的主要驱动因素,影响着养分有效性及植物生长。

我国人工林面积居于世界首位^[3,9-10],其在我国森林可持续经营管理中发挥着重要作用^[11]。设计完善、多目标经营管理的人工林能够恢复部分天然林所具有的生态系统服务功能^[12]。而林分树种的正确选择则是实现人工林近自然林经营的重要基础。因为林分类型不同会使林冠结构、养分循环、林下微环境等产生差异,最终将导致林下植物组成及其多样性格局变异^[13-14]。因此研究不同人工林林下植物多样性差异及其维持机制,对维持人工林可持续经营具有重要意义。

植物-环境关系一直是生态学研究的重要方面^[15]。环境因子如何影响林下植物分布并导致植物多样性格局变异是生态学家们长期致力研究的问题^[16]。影响林下植物多样性的环境因子包括生物因素与非生物因素两个方面,生物因素如林龄^[11]、林分密度^[9]、人为干扰^[1]等,非生物因素如气候条件^[16]、地形条件^[17]、土壤条件^[16]等。其中土壤因素被广泛认为是中小尺度范围内制约植物多样性的主要方面^[11,18-19]。如 Weigel 等^[16]对欧洲山毛榉林下植物的研究发现,相较于气候因素,土壤因素对林下植物分布的影响力更大。并且随着现代排序方法的成熟可以定量研究各土壤因子对植物多样性的单独影响^[11,19],但不同地区制约多样性的土壤因子可能不同^[4],因此在区域尺度上揭示影响林下植物多样性的土壤驱动因子对理解森林生态系统结构与功能具有重要意义。

目前关于人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质关系的研究还较少,且已有研究多集中于林分密度^[9]、林龄^[11]、林窗^[10]等对林下植物多样性及土壤理化性质的影响,而不同人工林类型方面的研究还少有报道。有鉴于此,以成都云顶山广泛分布的 5 种人工林为研究对象,试图解决以下几个问题:(1)不同人工林林下植物组成;(2)不同人工林林下植物多样性;(3)不同人工林土壤理化性质;(3)影响林下植物多样性的主要土壤因子有哪些?通过以上问题的解决,以期对相关理论研究提供一定数据支撑,并为当地及类似区域人工林经营管理与物种多样性保育提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

云顶山 ($30^{\circ}29' - 30^{\circ}57'N, 104^{\circ}20' - 104^{\circ}52'E$) 属成都平原龙泉山脉中段 (图 1), 位于成都市金堂县境内, 面积约 67 km^2 , 平均海拔 982 m 。该区属亚热带湿润季风气候, 年均日照 1295.5 h , 年均气温 16.6°C , 年均无霜期 285 d , 常年雨量充沛, 年均降水量 920.5 mm 。土壤较肥沃, 以黄壤与紫色土为主。植被属人工种植的生态公益林。

20 世纪 50 年代末, 受“大办钢铁”、“大办公共食堂”等影响, 民众“大砍大伐”、“毁林开荒”等行为使云顶山森林植被受到持续严重破坏, 到 60 年代初期, 其森林覆被已很少。1963—1965 年, 为贯彻执行“调整、巩固、充实、提高”方针, 四川省委、省政府多次强调必须植树造林, 因此金堂县地方政府组织民众开始了大规模的植树造林活动。云顶山树种栽植的初始密度较高, 约为 $1100 \text{ 株}/\text{hm}^2$, 主要树种包括: 柏木 (*Cupressus funebris*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、枫杨 (*Pterocarya stenoptera*)、桤木 (*Alnus cremastogyne*)、光皮槲木 (*Swida wilsoniana*)、灯台 (*Cornus controversa*) 等, 多以不同树种搭配混合栽植。后期由当地林业站组织人员进行管护, 属生态公益林, 禁伐。

经长期自然演替, 云顶山植被类型丰富, 以不同树种混交而成的常绿阔叶林、常绿针叶林、常绿针阔混交林为主, 同时乔木层出现了构树 (*Broussonetia papyrifera*)、珊瑚朴 (*Celtis julianae*)、枇杷 (*Eriobotrya japonica*)、八角枫 (*Alangium chinense*) 等对当地环境适生良好的乡土树种, 人工林群落在向次生林群落方向演替。区内林下植物丰富, 主要灌木有莢蒾 (*Viburnum dilatatum*)、石海椒 (*Reinwardtia indica*)、蚊母树 (*Distylium racemosum*)、五叶地锦 (*Parthenocissus quinquefolia*) 等; 主要草本植物有韩信草 (*Scutellaria indica*)、细野麻 (*Boehmeria gracilis*)、荻草 (*Setaria chondrachne*)、过路黄 (*Lysimachia christinae*) 等。

1.2 植被调查、采样及样品分析

2018 年 9 月, 依据方精云等^[20]的研究方法, 对云顶山进行实地全面踏查, 采用典型抽样法选取研究区广泛分布的 5 种人工林 (图 2): 柏木枫杨林 (I)、银杏楠木林 (II)、光皮槲木香樟林 (III)、枫杨桤木林 (IV)、柏木纯林 (V)。不同人工林各设置 4 个 $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的样地, 共计样地 20 个 (表 1), 总面积 12000 m^2 , 样地选择尽量遵循立地条件基本相似、林相整齐、林层丰富、具有代表性原则。灌木、草本样方设置方法及数据记录内容见张柳桦等^[3]。

土壤理化性质测定指标包括: pH 值、含水量、容重、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾, 土壤样品采集、处理及测定方法见王媚臻等^[9]。

1.3 数据处理及分析

1.3.1 重要值及物种多样性指数计算

植物多样性测定采用物种丰富度指数 (D)、Shannon-wiener 多样性指数 (H')、Simpson 优势度指数 (H') 和 Pielou 均匀度指数 (J_{sw}), 灌木层重要值及物种多样性指数计算公式见王媚臻等^[9]。

1.3.2 数量分析方法

采用 DPS 7.05 中的单因素方差分析法 (One-Way ANOVA) 分析不同人工林物种多样性指数及土壤理化性质的差异 ($P=0.05$), 运用 Excel 2010 统计软件进行数据整理与统计分析。

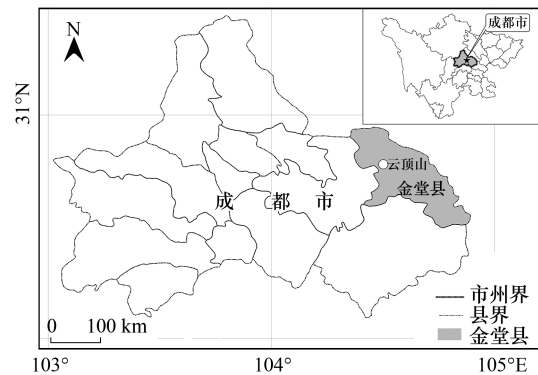


图 1 云顶山地理位置

Fig.1 The geographic location of Yunding Mountain

表 1 样地概况
Table 1 General situation of the sample plot

样地 Plot	人工林 Plantations	林龄 Stand age/a	海拔 Elevation/m	坡度 Slop/(°)	坡向 Aspect/(°)	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Average diameter/cm	平均树高 Average height/m	建群种及比例 Constructive species and their proportions
1	I	54	926	15	NW45	0.8	25.78±1.90a	16.26±1.02a	柏木 <i>Cupressus funebris</i> (35.7%)、
2	I	54	925	15	NW50	0.8	21.61±2.12abcd	14.17±1.27ab	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> (27.0%)
3	I	54	925	15	NW45	0.7	23.15±2.19ab	15.81±1.12a	
4	I	54	923	15	NW50	0.6	20.09±2.25abcde	13.02±1.27abc	
5	II	50	908	3	NW40	0.8	19.27±1.94abcde	13.99±1.14ab	银杏 <i>Ginkgo biloba</i> (35.3%)、
6	II	50	906	3	NW35	0.8	20.78±2.65abcde	12.84±1.18abcd	楠木 <i>Phoebe zhennan</i> (28.7%)
7	II	50	908	3	NW30	0.7	22.92±2.51abc	14.62±1.32ab	
8	II	50	908	3	NW40	0.8	25.63±2.59a	15.76±1.30a	
9	III	54	941	12	正西	0.8	15.24±1.69def	10.23±0.78cde	光皮槭 <i>Swida wilsoniana</i> 木 (37.4%)、
10	III	54	941	12	正西	0.8	10.85±1.07f	8.42±0.64e	香樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i> (26.4%)
11	III	54	934	12	正西	0.9	16.46±0.95bcdef	11.73±0.56bcde	
12	III	54	941	12	正西	0.8	16.43±1.44bcdef	11.78±0.86bcde	
13	IV	56	767	5	SE44	0.8	14.71±1.04def	9.46±0.47cde	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> (40.3%)、
14	IV	56	770	5	SE45	0.9	13.46±0.86ef	9.35±0.41cde	桤木 <i>Alnus cremastogyne</i> (34.6%)
15	IV	56	771	5	SE50	0.8	14.25±0.88def	9.29±0.46de	
16	IV	56	774	5	SE45	0.7	15.27±1.39def	8.74±0.60e	
17	V	58	841	16	SW40	0.7	17.01±0.89bcdef	10.24±0.40cde	柏木 <i>Cupressus funebris</i> (87.3%)
18	V	58	841	16	SW46	0.8	15.66±0.92def	8.53±0.42e	
19	V	58	837	16	SW48	0.7	13.64±0.96ef	9.13±0.50de	
20	V	58	835	16	SW50	0.8	15.89±0.67cdef	9.39±0.30cde	

I: 柏木枫杨林 *Cupressus funebris* and *Pterocarya stenoptera* forest; II: 银杏楠木林 *Ginkgo biloba* and *Phoebe zhennan* forest; III: 光皮槭木香樟林 *Swida wilsoniana* and *Celtis sinensis* forest; IV: 枫杨桤木林 *Pterocarya stenoptera* and *Alnus cremastogyne* forest; V: 柏木林 *Cupressus funebris* forest; NW: 西北 Northwest; SE: 东南 Southeast; SW: 西南 Southwest; 不同小写字母表示在 0.05 水平上具有显著差异

采用 CANOCO 5.0 中的冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 研究不同人工林灌木层、草本层物种多样性指数与土壤环境因子的关系, 并通过蒙特卡洛置换检验确定影响灌草层物种多样性指数的主要因子。其中罗盘仪测量的 0—360° 坡向方位角由下列公式转换为 0—1 之间的坡向数值, 数值越大表示越干热^[11]:

$$\text{TRASP} = 1 - \cos[(\pi/180)(\text{aspect} - 30)]/2$$

2 结果与分析

2.1 不同人工林林下植物组成及重要值

5 种不同人工林林下主要植物组成及重要值见表 2。灌木层中, 柏木枫杨林、银杏楠木林、光皮槭木香樟林分别记录灌木植物 35、25、42 种, 蚊母树在这 3 种人工林中的重要值均为最大, 分别为 0.1302、0.3402、0.1427; 枫杨桤木林与柏木林分别记录灌木植物 34、35 种, 石海椒、黄荆 (*Vitex negundo*) 分别是这 2 种人工林重要值最大的树种, 分别为 0.2859、0.3596。草本层中, 柏木枫杨林共记录草本植物 31 种, 扁竹兰重要值最大, 为 0.2861; 银杏楠木林、光皮槭木香樟林、枫杨桤木林与柏木林分别记录草本植物 27、45、41、41 种, 葶草在这 4 种森林类型中长势均较好, 其重要值介于 0.0844—0.2581 之间。

2.2 不同人工林林下植物多样性

由表 3 可见, 5 种人工林灌木层的多样性指数 H' 、优势度指数 H' 、丰富度指数 D 具有显著差异 ($P < 0.05$), 且具有相似的变化趋势, 表现为光皮槭木香樟林略大于柏木枫杨林, 二者的 H' 、 H' 、 D 显著大于其余 3 种人工林; 不同人工林灌木层的均匀度指数 J_{sw} 无显著差异 ($P > 0.05$)。草本层的 H' 、 D 、 J_{sw} 差异显著, H' 、 J_{sw} 均表现为柏木林 > 枫杨桤木林 > 光皮槭木香樟林 > 柏木枫杨林 > 银杏楠木林, D 表现为柏木林 > 光皮槭木香樟林 > 枫杨桤木

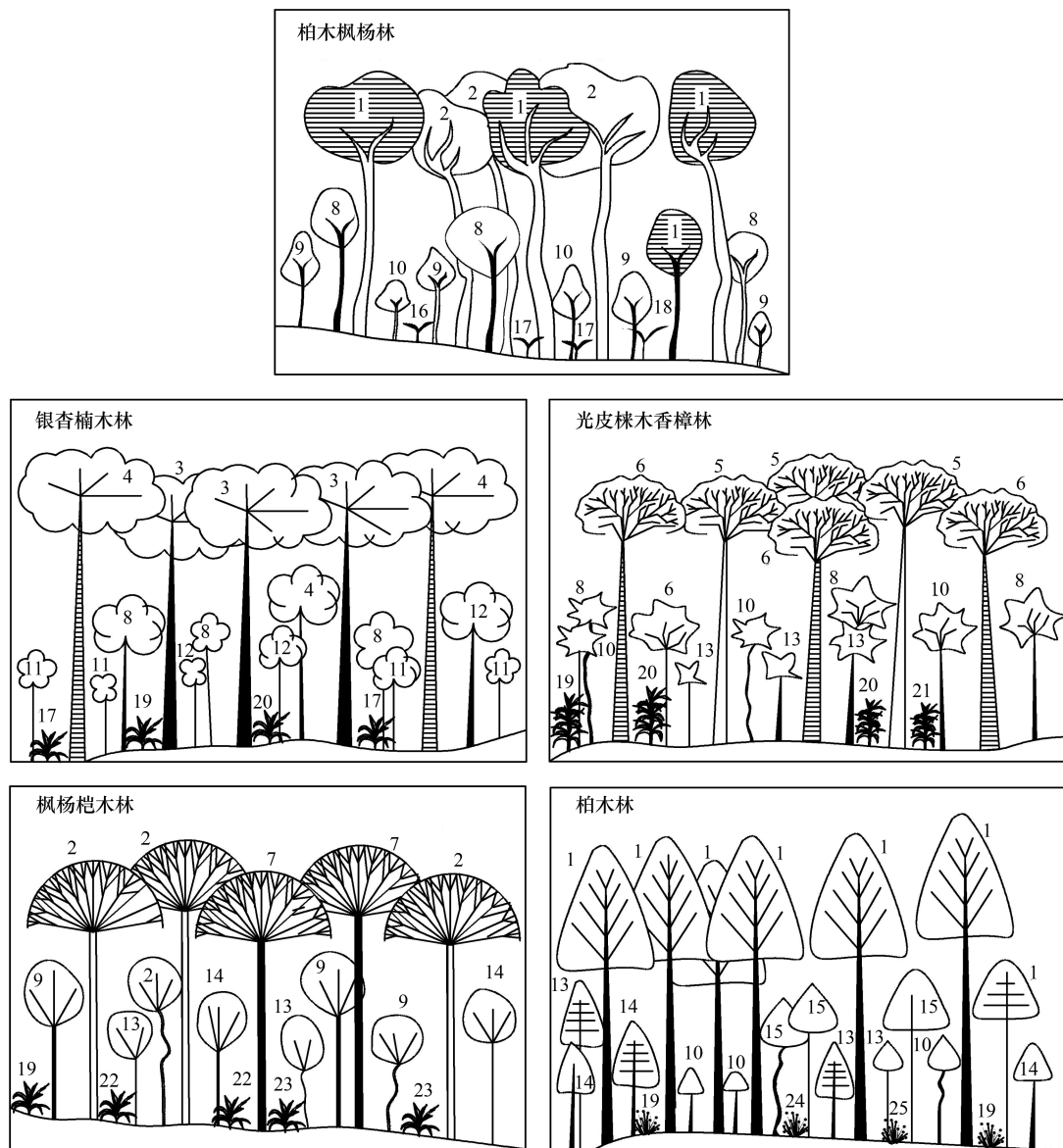


图2 不同人工林群落剖面示意图

Fig.2 Illustration of vertical structure of different plantation communities

1: 柏木 *Cupressus funebris*; 2: 枫杨 *Pterocarya stenoptera*; 3: 银杏 *Ginkgo biloba*; 4: 楠木 *Phoebe zhennan*; 5: 光皮柞木 *Swida wilsoniana*; 6: 香樟 *Celtis sinensis*; 7: 桤木 *Alnus cremastogyne*; 8: 蚊母树 *Distylium racemosum*; 9: 箭竹 *Fargesia spathacea*; 10: 蕊帽忍冬 *Lonicera pileata*; 11: 五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia*; 12: 棕榈 *Trachycarpus fortunei*; 13: 石海椒 *Reinwardtia indica*; 14: 荚蒾 *Viburnum dilatatum*; 15: 黄荆 *Vitex negundo*; 16: 扁竹兰 *Iris confusa*; 17: 大麻 *Cannabis sativa*; 18: 细野麻 *Boehmeria gracilis*; 19: 茅草 *Setaria chondrachne*; 20: 韩信草 *Scutellaria indica*; 21: 舞花姜 *Globba racemosa*; 22: 艾草 *Leonurus artemisia*; 23: 土牛膝 *Achyranthes aspera*; 24: 白接骨 *Asystasiella neesiana*; 25: 三花莨 *Caryopteris terniflora*

林>柏木枫杨林>银杏楠木林;不同人工林草本层 H' 无显著差异。

2.3 不同人工林土壤理化性质

由表4可见,不同人工林的土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、速效钾、速效磷具有显著差异 ($P<0.05$), 土壤含水量、土壤容重、全钾差异不显著 ($P>0.05$)。土壤 pH 值均大于 7, 呈弱碱性, 枫杨桤木林 pH 值显著低于其他 4 种人工林类型。有机质、全氮变化趋势相似, 表现为银杏楠木林最高, 柏木枫杨林与枫杨桤木林稍低于银杏楠木林, 光皮柞木香樟林与柏木林最低。全磷表现为柏木枫杨林>枫杨桤木林>银杏楠木林>柏木林>光皮柞木香樟林。速效磷与速效钾变化规律一致, 表现为银杏楠木林显著高于其余 4 种人工林, 且均呈银杏楠木

林>枫杨桤木林>柏木枫杨林>光皮桫木香樟林>柏木林规律分布。

表 2 不同人工林林下主要植物组成及重要值
Table 2 Species composition and important values of main species of understory vegetation in different plantations

层次 Layer	类型 Type	主要物种及其重要值 Main species and their important values	和值 Sum value
灌木层 Shrub layer	I	蚊母树(0.1302)+箭竹(0.1047)+蕊帽忍冬(0.0990)+白筴(0.0810) <i>Distylium racemosum</i> + <i>Fargesia spathacea</i> + <i>Lonicera pileata</i> + <i>Acanthopanax trifoliatum</i>	0.4149
	II	蚊母树(0.3402)+五叶地锦(0.1530)+棕榈(0.0995)+珊瑚朴(0.0614) <i>Distylium racemosum</i> + <i>Parthenocissus quinquefolia</i> + <i>Trachycarpus fortunei</i> + <i>Celtis julianae</i>	0.6541
	III	蚊母树(0.1427)+蕊帽忍冬(0.1037)+石海椒(0.0969)+珊瑚朴(0.0800) <i>Distylium racemosum</i> + <i>Lonicera pileata</i> + <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Celtis julianae</i>	0.4233
	IV	石海椒(0.2859)+箭竹(0.0910)+莢蒾(0.0831)+豆腐柴(0.0736) <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Fargesia spathacea</i> + <i>Viburnum dilatatum</i> + <i>Premna microphylla</i>	0.5336
	V	黄荆(0.3596)+石海椒(0.1148)+莢蒾(0.0994)+蕊帽忍冬(0.0982) <i>Vitex negundo</i> + <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Viburnum dilatatum</i> + <i>Lonicera pileata</i>	0.6720
草本层 Herb layer	I	扁竹兰(0.2861)+火麻(0.1457)+细野麻(0.0817)+楼梯草(0.0725) <i>Iris confusa</i> + <i>Cannabis sativa</i> + <i>Boehmeria gracilis</i> + <i>Elatostema involucratum</i>	0.5860
	II	火麻(0.2303)+荳草(0.2181)+韩信草(0.1310)+细野麻(0.0503) <i>Cannabis sativa</i> + <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Scutellaria indica</i> + <i>Boehmeria gracilis</i>	0.6297
	III	荳草(0.2581)+韩信草(0.0814)+舞花姜(0.0586)+白英(0.0501) <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Scutellaria indica</i> + <i>Globba racemosa</i> + <i>Solanum lyratum</i>	0.4482
	IV	艾草(0.1614)+土牛膝(0.1032)+荳草(0.0844)+麦冬(0.0721) <i>Leonurus artemisia</i> + <i>Achyranthes aspera</i> + <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Ophiopogon japonicus</i>	0.4211
	V	荳草(0.1818)+白接骨(0.1161)+三花莢(0.0558)+麦冬(0.0488) <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Asystasiella neesiana</i> + <i>Caryopteris terniflora</i> + <i>Ophiopogon japonicus</i>	0.4025

表 3 不同人工林灌木层与草本层物种多样性指数比较
Table 3 Comparison of species diversity indexes between shrub layer and herb layer of different plantations

层次 Layer	人工林 Plantations	多样性指数 H Shannon-Wiener diversity index H	优势度指数 H' Simpson dominance index H'	丰富度指数 D Species richness index D	均匀度指数 J_{sw} Pielou evenness index J_{sw}
灌木层 Shurb layer	I	2.136±0.043a	0.822±0.014a	20.25±1.601ab	0.713±0.022a
	II	1.591±0.061b	0.704±0.027ab	14.75±0.629c	0.594±0.033a
	III	2.236±0.099a	0.825±0.020a	24.50±1.848a	0.701±0.027a
	IV	1.677±0.159b	0.652±0.068b	18.25±0.854bc	0.578±0.054a
	V	1.885±0.144ab	0.761±0.032ab	18.00±1.080bc	0.655±0.053a
草本层 Herb layer	I	2.186±0.093bc	0.846±0.022a	16.75±2.057bc	0.783±0.022ab
	II	1.887±0.113c	0.790±0.025a	15.25±1.652c	0.696±0.025b
	III	2.515±0.163ab	0.865±0.036a	24.25±1.797a	0.790±0.042ab
	IV	2.556±0.179ab	0.870±0.045a	23.25±1.652ab	0.813±0.049ab
	V	2.756±0.054a	0.908±0.011a	24.50±1.658a	0.865±0.028a

2.4 物种多样性指数与土壤环境因子的 RDA 分析

由表 5 及图 3 可知,灌木层中,RDA1 轴主要反映有机质 (Organic matter, OM)、速效钾 (Available potassium, AK)、速效磷 (Available phosphorus, AP)、坡度 (Slop) 的变化,在 RDA1 轴上,随着 OM、AK、AP 减少及 Slop 增加,多样性指数 H 、优势度指数 H' 、丰富度指数 D 、均匀度指数 J_{sw} 均增加。RDA2 轴主要反映土壤含水量 (Soil water content, SWS) 的变化,在 RDA2 轴上,随着 SWS 减少, D 减小,而 H 、 H' 、 J_{sw} 均增加。蒙特卡洛置换检验结果表明,OM、AP 是显著影响灌木层物种多样性的土壤因子。

表 4 不同人工林土壤理化性质

Table 4 Soil physicochemical properties of different plantations

土壤理化因子 Soil physicochemical factors	I	II	III	IV	V
SWC/%	22.33±1.66a	26.17±2.56a	27.15±4.39a	24.31±3.32a	18.31±2.14a
SBD/(g/cm ³)	1.22±0.05a	0.99±0.08a	1.30±0.18a	1.08±0.14a	1.14±0.17a
pH	7.80±0.08a	7.70±0.08a	7.65±0.03a	7.36±0.05b	7.60±0.07a
OM/(g/kg)	36.68±1.73ab	47.65±0.73a	20.79±2.62c	41.01±1.45a	26.86±4.98bc
TN(g/kg)	2.15±0.03ab	2.86±0.42a	1.83±0.06b	1.96±0.02b	1.77±0.17b
TP/(g/kg)	11.39±0.40a	8.19±0.89ab	7.13±0.51b	9.74±1.18ab	8.14±1.40ab
TK/(g/kg)	15.69±0.54a	17.25±0.41a	17.51±0.52a	15.79±0.72a	15.12±1.25a
AP/(mg/kg)	180.18±2.13b	383.93±20.06a	127.78±10.59b	188.95±39.19b	107.63±4.34b
AK/(mg/kg)	0.23±0.08b	0.64±0.10a	0.02±0.01b	0.03±0.02b	0.01±0.01b

SWS: 土壤含水量, Soil water content; SBD: 土壤容重, Soil bulk density; pH: 土壤 pH, Soil pH; OM: 有机质, Organic matter; TN: 全氮, Total nitrogen; TP: 全磷, Total phosphorus; TK: 全钾, Total potassium; AP: 速效磷, Available phosphorus; AK: 速效钾, Available potassium

由表 5 及图 4 可知, 草本层中, RDA1 轴主要反映 AP、pH、AK、全氮 (Total nitrogen, TN)、坡向 (Aspect) 的变化, 在 RDA1 轴上, 随着 AP、pH、AK、TN 增加及 Aspect 减小, H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 均减小。RDA2 轴主要反映全钾 (Total potassium, TK) 的变化, 在 RDA2 轴上, 随着 TK 减少, D 减小, 而 H 、 H' 、 J_{sw} 均增加。AP、pH、TP 是显著影响草本层物种多样性的土壤因子。

表 5 冗余分析 (RDA) 排序及蒙特卡洛置换检验结果

Table 5 Results by Redundancy analysis (RDA) ordination with the first two axes and Monte Carlo permutation test

环境因子 Environmental factors	灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			
	RDA1	RDA2	F	P	RDA1	RDA2	F	P
土壤含水量 SWS	0.2881	0.3358	<0.1	0.888	0.2137	0.0846	1.2	0.28
土壤容重 SBD	0.2561	0.062	<0.1	0.864	-0.3851	-0.3029	1.3	0.288
pH	0.1136	-0.2886	<0.1	0.766	0.6718	0.1565	9.0	0.010
有机质 OM	-0.7341	-0.0838	20.8	0.002	0.4760	-0.2557	0.4	0.588
全氮 TN	-0.3985	-0.0509	0.6	0.458	0.6088	-0.3613	0.4	0.556
全磷 TP	0.0569	0.1223	<0.1	0.792	0.2832	-0.2493	5.7	0.048
全钾 TK	0.0184	-0.0020	0.2	0.692	-0.0995	-0.5746	3.4	0.076
速效磷 AP	-0.4641	-0.0392	4.6	0.042	0.8231	-0.2389	32.6	0.002
速效钾 AK	-0.5533	-0.0308	0.7	0.430	0.6183	-0.1533	4.2	0.056
海拔 Elevation	0.3218	-0.3281	<0.1	0.970	0.3578	-0.1803	0.4	0.550
坡度 Slope	0.4856	-0.2983	1.0	0.330	-0.1975	0.2450	0.3	0.588
坡向 Aspect	0.2920	0.0155	4.3	0.072	-0.7506	0.2436	1.2	0.298
特征参数 Characteristic parameter								
特征值 Eigenvalues	0.6407	0.1275			0.9244	0.0118		
累计解释变异 Explained variation	64.07	76.81			92.44	93.63		
多样性-环境因子 相关系数 Correlation	0.9046	0.7774			0.97	0.8279		

3 讨论

3.1 不同人工林林下植物组成及物种多样性

林下植物组成是群落的基本特征^[9-10, 19]。在本研究中, 不同人工林灌草层植物组成及数量分布特征不同, 表明研究区林下植物组成易受上层林冠及林内微环境的影响^[11], 与 Rawlik 等^[5]、赵耀等^[15]的研究结果相

似。Jang 等^[6]对森林木本植物生物量采取不同强度收获后,经 38 年灌木植物生物量均超过处理前水平。张柳桦等^[3]认为人工林中灌木层最具更新活力,林下物种多样性水平与更新潜力主要取决于灌木层。本研究中灌木层多样性指数 H 、优势度指数 H' 、丰富度指数 D 均以光皮柞木香樟林最大,草本层植物组成也较为丰富,因此认为其林下整体多样性水平最高,利于林下植物多样性维持及发展。光照影响着林下植物覆盖方式和个体物种丰度,被认为是林下植物生长最重要的驱动力之一^[11]。Tinya 等^[21]发现林下维管和苔藓植物的多样性和物种组成与不均匀光照条件有关。本研究中草本层的 H 、 D 、均匀度指数 J_{sw} 均以柏木林最大,与王媚臻^[9]认为的柏木林多为“低产低效林分”不同,这可能是由于柏木为针叶树种,其林下光照条件较好,为种子库中非耐阴性草本先锋物种种子的入侵和萌发创造了有利条件^[15]。银杏楠木林灌木层 H 、 D 与草本层 H 、 D 、 J_{sw} 均最小,其林下整体多样性水平最低,物种组成最单一,不利于林下植被可持续发展。

3.2 不同人工林土壤理化性质

土壤结构与肥力水平是植物多样性与稳定性的基础^[1],其决定着生态系统结构、功能及生产水平^[10]。在本研究中,5 种人工林土壤含水量、土壤容重、全钾均无显著差异,说明林分差异对土壤物理结构未产生明显影响。目前森林生态系统土壤肥力与植物多样性关系的研究结果主要有两种:一是两者呈正相关。如 Zheng 等^[22]认为植物多样性越高的森林群落其生产力也越高,土壤中植物凋落物和根系也越多,因此土壤养分含量也相对更高;Chen 等^[23]发现森林、草地、农田生态系统的土壤有机碳、微生物量碳含量随群落物种丰富度增加均呈上升趋势。二是两者为负相关。其理论解释主要包括物种数量特征与资源生态位维度两种角度,如 Strubeltet 等^[24]认为土壤养分含量高使植物种间竞争加剧,优势种利用有利条件迅速生长会导致其他物种生存率减小;Yang 等^[25]认为植物为同一类土壤养分资源竞争,限制养分资源的增加降低了地下资源权衡维度,使共存物种数量减少。与上述后种结果一致,本研究中有土壤机质、全氮、速效钾、速效磷均以银杏楠木林最高,而光皮柞木香樟林与柏木林最低,与其林下植物多样性水平相反。桉木为非豆科共生结瘤固氮植物^[26],枫杨桉木林土壤 pH 值显著低于其他人工林,这可能与桉木根瘤的酸性有机胺释放使土壤游离氢离子富集有关。土壤磷来源相对固定,且移动性差,因此基本不能被植物直接吸收利用^[14]。本研究全磷呈现柏木枫杨林>枫杨桉木林>银杏楠木林>柏木林>光皮柞木香樟林规律,柏木枫杨林与枫杨桉木林全磷最高,这可能与枫杨

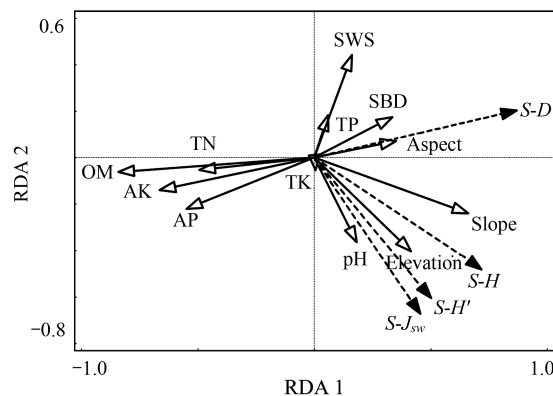


图3 灌木层冗余分析 RDA 排序图

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) biplot of shrub layer

$S-H$: 灌木层多样性指数 Shannon-Wiener diversity index of shrub layer; $S-H'$: 灌木层优势度指数 Simpson dominance index of shrub layer; $S-D$: 灌木层丰富度指数 Species richness index of shrub layer; $S-J_{sw}$: 灌木层均匀度指数 Pielou evenness index of shrub layer; SWS: 土壤含水量 Soil water content; SBD: 土壤容重 Soil bulk density; pH: 土壤 pH Soil pH; OM: 有机质 Organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium

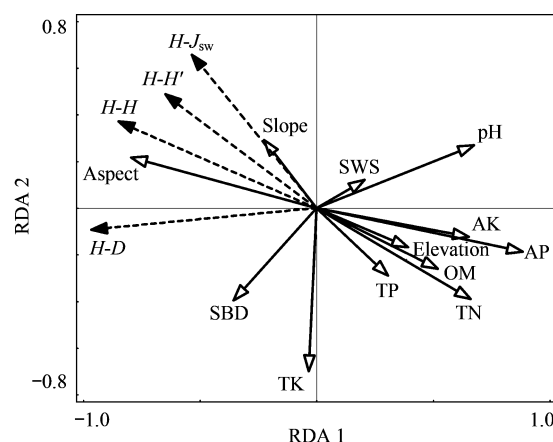


图4 草本层冗余分析 RDA 排序图

Fig.4 Redundancy analysis (RDA) biplot of herb layer

$H-H$: 草本层多样性指数, Shannon-Wiener diversity index of herb layer; $H-H'$: 草本层优势度指数, Simpson dominance index of herb layer; $H-D$: 草本层丰富度指数, Species richness index of herb layer; $H-J_{sw}$: 草本层均匀度指数, Pielou evenness index of herb layer

对土壤养分的特异性吸收有关^[9]。

3.3 林下植物多样性与土壤环境因子的关系

植物多样性与土壤因子之间关系密切^[9]。如姚俊宇等^[1]发现速效钾、有机质、有效磷对山矾次生林植物多样性影响较大。Fu 等^[2]表示有机质、全氮对中国东岭山落叶阔叶林植物多样性影响较大。王媚臻等^[9]发现全氮、钾、有机质为影响柏木人工林林下植物多样性的主要因子。Xu 等^[18]发现 pH、速效磷是热带季雨林植物多样性的主导因子。在本研究中,有机质、速效磷为影响灌木层多样性的主要因子,pH、全磷、速效磷为影响草本层多样性的主要因子,进一步强调了 pH、有机质、土壤磷对森林群落植物多样性的主导驱动作用。本研究未发现土壤含水量、容重对林下灌草层多样性具有显著影响,这可能与土壤物理性质在不同人工林下差异不显著有关。

海拔被认为是影响植物多样性格局的决定性因素^[4,11],其包含了温度、湿度、土壤等多种环境因子变化而在空间尺度上形成的生态尺度^[4]。坡度主要影响土壤含水量及养分再分配,坡度大会使上坡位土壤养分更易流失^[17]。坡向则通过调节太阳辐射及降水再分配,从而影响土壤含水量、土壤温度、土壤风化作用^[19]。在本研究中,海拔、坡度、坡向均不是影响林下灌草层多样性的主导因子,这可能是由于海拔变幅较小(767—926 m)、坡度范围较缓(3—16°),因地形因子而导致的林下微环境差异不明显,与尤业明等^[11]、赵耀等^[15]的研究结果相似。另外,地形因子作用被林冠特征、土壤因子、气候微变化等因素掩盖也可能是其对林下植物多样性无明显影响的原因^[11]。

4 结论

综上所述,5 种人工林林下植物组成、物种多样性、土壤理化性质具有差异,光皮桉木香樟林林下植物组成最丰富、物种多样性水平最高,经营此种林分有利于林下植物多样性的可持续发展。同时发现,土壤 pH、有机质、土壤磷为研究区林下植物多样性的主要土壤驱动因子。本文主要分析了不同人工林类型对林下植物多样性及土壤理化性质的影响,进一步可继续研究树种不同混交比例对林下各层次多样性及土壤性质的影响。

参考文献 (References):

- [1] 姚俊宇, 齐锦秋, 张柳桦, 王媚臻, 李婷婷, 张潇月, 郝建锋. 人为干扰对碧峰峡山矾次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2942-2950.
- [2] Fu B J, Liu S L, Ma K M, Zhu Y G. Relationships between soil characteristics, topography and plant diversity in a heterogeneous deciduous broad-leaved forest near Beijing, China. *Plant and Soil*, 2014, 261(1): 47-54.
- [3] 张柳桦, 齐锦秋, 柳苹玉, 周楷玲, 李雪, 李琪, 郝建锋. 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响. 西北植物学报, 2018, 38(1): 166-175.
- [4] 崔倩, 潘存德, 李贵华, 余戈壁, 陈虹, 刘景, 杨玉萍, 刘博. 喀纳斯泰加林群落物种多样性环境解释与自然火干扰. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1824-1832.
- [5] Rawlik M, Kasprowicz M, Jagodziński A M. Differentiation of herb layer vascular flora in reclaimed areas depends on the species composition of forest stands. *Forest Ecology and Management*, 2018, 409: 541-551.
- [6] Jang W, Keyes C R, Page-Dumroese D S. Recovery and diversity of the forest shrub community 38 years after biomass harvesting in the northern Rocky Mountains. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 92: 88-97.
- [7] Wu J P, Liu Z F, Wang X L, Sun Y X, Zhou L X, Lin Y B, Fu S L. Effects of understory removal and tree girdling on soil microbial community composition and litter decomposition in two Eucalyptus plantations in South China. *Functional Ecology*, 2011, 25(4): 921-931.
- [8] Nilsson C M, Wardle D A. Understory vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(8): 421-428.
- [9] 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. 生态学报, 2019, 39(3): 981-988.
- [10] 蒋倩, 姚俊宇, 伍炫蓓, 郝建锋, 裴曾莉, 李天玲, 石博文, 张彬, 齐锦秋. 川西周公山柳杉人工林林窗大小对土壤理化性质和物种多样性的影响. 生态与农村环境学报, 2018, 34(4): 326-332.

- [11] 尤业明, 徐佳玉, 蔡道雄, 刘世荣, 朱宏光, 温远光. 广西凭祥不同年龄红椎林林下植物物种多样性及其环境解释. 生态学报, 2016, 36(1): 164-172.
- [12] Paquette A, Messier C. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 8(1): 27-34.
- [13] Yu M, Sun O J. Effects of forest patch type and site on herb-layer vegetation in a temperate forest ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 14-20.
- [14] 郑永林, 王海燕, 解雅麟, 秦倩倩, 李翔. 北京平原地区不同造林树种林下土壤化学计量特征. 安徽农业大学学报, 2019, 46(6): 968-973.
- [15] 赵耀, 王百田. 晋西黄土区不同林地植物多样性研究. 北京林业大学学报, 2018, 40(9): 45-54.
- [16] Weigel R, Gilles J, Klisz M, Manthey M, Kreyling J. Forest understory vegetation is more related to soil than to climate towards the cold distribution margin of European beech. *Journal of Vegetation Science*, 2019, 30(4): 746-755.
- [17] 温佩颖, 金光泽. 地形对阔叶红松林物种多样性的影响. 生态学报, 2019, 39(3): 945-956.
- [18] Xu W M, Liu L, He T H, Cao M, Sha L Q, Hu Y H, Li Q M, Li J. Soil properties drive a negative correlation between species diversity and genetic diversity in a tropical seasonal rainforest. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20652.
- [19] 杨振奇, 秦富仓, 张晓娜, 李晓琴, 牛晓乐, 刘力川. 砒砂岩区不同立地类型人工沙棘林下草本物种多样性环境解释. 生态学报, 2018, 38(14): 5132-5140.
- [20] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- [21] Tinya F, Ódor P. Congruence of the spatial pattern of light and understory vegetation in an old-growth, temperate mixed forest. *Forest Ecology and Management*, 2016, 381: 84-92.
- [22] Zheng L T, Chen H Y H, Yan E R. Tree species diversity promotes litterfall productivity through crown complementarity in subtropical forests. *Journal of Ecology*, 2019, 107(4): 1852-1861.
- [23] Chen X L, Chen H Y H, Chen C, Ma Z L, Searle E B, Yu Z P, Huang Z Q. Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: a global meta-analysis. *Biological Reviews*, 2020, 95(1): 167-183.
- [24] Strubelt I, Diekmann M, Zacharias D. Changes in species composition and richness in an alluvial hardwood forest over 52 yrs. *Journal of Vegetation Science*, 2017, 28(2): 401-412.
- [25] Yang H J, Jiang L, Li L H, Li A, Wu M Y, Wan S Q. Diversity-dependent stability under mowing and nutrient addition: evidence from a 7-year grassland experiment. *Ecology Letters*, 2012, 15(3): 619-626.
- [26] 马莹玲, 朱思佳, 曾思如, 马红亮, 尹云锋, 杨柳明, 高人. 木麻黄和桉木离体根瘤和立地土壤的固氮酶与 N_2O 还原酶活性的研究. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(2): 121-128.