

贵州省喀斯特山地 3 种人工林林下植物多样性和地上部生物量及其相关性

马 洁^{1a,1b}, 薛建辉^{1a,2,①}, 吴永波^{1a,1b}, 李东昌^{1a,1b}, 高 婷^{1a,1b}, 钱刘兵^{1a,1b}

[1. 南京林业大学: a. 南方现代林业协同创新中心, b. 生物与环境学院, 江苏 南京 210037;

2. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

摘要:以贵州省喀斯特山地的干香柏(*Cupressus duclouxiana* Hichel)纯林、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)纯林和干香柏-刺槐混交林 3 种人工林为研究样地,并以未造林地为对对照样地,采用植物群落调查法和收获法研究了各样地林下灌木层和草本层植物的物种组成、多样性特征及地上部生物量,并分析了林下地上部生物量与植物多样性的相关性。结果显示:在 3 种人工林和未造林地中共包含林下植物 49 科 84 属 92 种,其中,干香柏-刺槐混交林的物种最丰富。3 种人工林和未造林地灌木层和草本层的优势种类存在一定差异,但齿叶冬青(*Ilex crenata* Thunb.)和小果蔷薇(*Rosa cymosa* Tratt.)是 3 种人工林灌木层共有的优势种,且小果蔷薇也是未造林地的优势种;而青绿藎草(*Carex breviculmis* R. Br.)则是 3 种人工林草本层共有的优势种。3 种人工林灌木层和草本层的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均高于未造林地,且总体上以干香柏-刺槐混交林为最高,并与未造林地存在显著($P<0.05$)差异;而供试 4 个样地间灌木层和草本层的 Pielou 均匀度指数总体上无显著差异。3 种人工林灌木层地上部生物量均高于草本层,占地上部总生物量的 55.58%~68.04%;而未造林地灌木层地上部生物量低于草本层,仅占地上部总生物量的 26.81%。干香柏-刺槐混交林的灌木层地上部生物量、草本层地上部生物量和地上部总生物量均显著高于未造林地。3 种人工林和未造林地灌木层和草本层的地上部生物量和地上部总生物量仅与少数多样性指数有显著或极显著($P<0.01$)相关性,但无明显规律性。综合分析结果表明:人工林林下植物的物种组成、多样性特征和地上部生物量不同程度优于未造林地,且林下地上部生物量与植物多样性的关系存在一定差异,环境异质性差异和生物学特性复杂性是其主要致因;总体上,营造干香柏-刺槐混交林有利于提升林下植物多样性和地上部生物量,建议在喀斯特退化山地人工植被恢复中采用针阔混交林种植方式。

关键词:喀斯特山地;人工林;林下植物;多样性指数;地上部生物量;相关性分析

中图分类号: Q948.15; S718.54⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)01-0017-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.01.03

Diversity and above-ground biomass of undergrowth plants of 3 plantations in karst mountainous region of Guizhou Province and their correlation MA Jie^{1a,1b}, XUE Jianhui^{1a,2,①}, WU Yongbo^{1a,1b}, LI Dongchang^{1a,1b}, GAO Ting^{1a,1b}, QIAN Liubing^{1a,1b} (1. Nanjing Forestry University: a. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, b. College of Biology and the Environment, Nanjing 210037, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(1): 17-26

Abstract: Taking 3 plantations of pure forest of *Cupressus duclouxiana* Hichel, pure forest of *Robinia pseudoacacia* Linn. and mixed forest of *C. duclouxiana*-*R. pseudoacacia* in karst mountainous region of

收稿日期: 2020-08-27

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0502605)

作者简介: 马 洁(1995—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事森林恢复生态学方面的研究。

①通信作者 E-mail: jhxue@cnbg.net

引用格式: 马 洁, 薛建辉, 吴永波, 等. 贵州省喀斯特山地 3 种人工林林下植物多样性和地上部生物量及其相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(1): 17-26.

Guizhou Province as the research plots, and unforested land as the control plot, the species composition, diversity characteristics and above-ground biomass of plants of undergrowth shrub and herb layers in each plot were studied by plant community survey and harvest methods, and the correlation between undergrowth above-ground biomass and plant diversity was analyzed. The results show that there are 92 species in 84 genera of 49 families of undergrowth plants in 3 plantations and unforested land, in which, the species of mixed forest of *C. duclouxiana-R. pseudoacacia* is the most abundant. There are some differences of dominant species of shrub and herb layer of 3 plantations and unforested land, but *Ilex crenata* Thunb. and *Rosa cymosa* Tratt. are the common dominant species in shrub layer of 3 plantations, meanwhile *R. cymosa* is also one of the dominant species in unforested land; while *Carex breviculmis* R. Br. is the common dominant species of herb layer of 3 plantations. The Margalef richness index, Simpson dominance index and Shannon-Wiener diversity index of shrub and herb layers of 3 plantations are higher than those of unforested land, and those of mixed forest of *C. duclouxiana-R. pseudoacacia* are the highest in general, and are significantly ($P < 0.05$) different from unforested land; but there is no significant difference in Pielou evenness index of shrub and herb layers among 4 test plots in general. The above-ground biomass of shrub layer of 3 plantations is higher than that of herb layer, accounting for 55.58%–68.04% of the total above-ground biomass; while the above-ground biomass of shrub layer of unforested land is lower than that of herb layer, only accounting for 26.81% of the total above-ground biomass. The above-ground biomass of shrub layer, above-ground biomass of herb layer and total above-ground biomass of mixed forest of *C. duclouxiana-R. pseudoacacia* are significantly higher than those of unforested land. The above-ground biomasses of shrub and herb layers and total above-ground biomasses of 3 plantations and unforested land only have significant or extremely significant ($P < 0.01$) correlation with a few diversity indexes, but there is no obvious regularity. The comprehensive analysis result shows that the species composition, diversity characteristics and above-ground biomass of undergrowth plants in plantation are better than those in unforested land to different extents, and there are some differences in relationship between undergrowth above-ground biomass and plant diversity, which is mainly caused by difference in environmental heterogeneity and complexity of biological characteristics; in general, the construction of mixed forest of *C. duclouxiana-R. pseudoacacia* is beneficial to the elevation of diversity and above-ground biomass of undergrowth plants, therefore, it is suggested that planting pattern of coniferous and broad-leaved mixed forest can be used in the restoration of artificial vegetation in karst degraded mountainous region.

Key words: karst mountainous region; plantation; undergrowth plant; diversity index; above-ground biomass; correlation analysis

西南喀斯特山地具有生态脆弱性和高度异质性的特点^[1],表现为易受外界环境干扰、人口承载力低、环境负载容量小,且该区域植被一旦遭到破坏则可导致水土流失、岩石裸露,从而形成了喀斯特山地特有的石漠化景观。植被和土壤质量退化能引起土壤涵养水源能力降低、生物多样性减少以及生态系统服务功能减弱^[2-3]。因此,恢复喀斯特山地人工林植被可提升林下植物多样性,充分发挥其生态系统功能^[4-5]。

林下植物多样性和生物量是衡量人工林植被恢复效果的重要指标。相关研究结果表明:植物多样性对生态系统功能的影响一直是生态学研究热点之一^[6-7];而生物量也是度量生态系统功能的重要指标之一^[8-10]。前人的研究结果^[11-12]表明:人工林林下植物多样性与生物量呈单峰关系、正线性关系和负线

性关系等多种相互关系。例如:孙玉军等^[13]认为,不同龄组长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)的物种丰富度指数与其生物量无显著相关性,但其 Shannon-Wiener 多样性指数与生物量间存在显著的正相关关系;温远光等^[14]的研究结果显示:桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)人工林灌木层生物量和群落总生物量与物种丰富度均呈极显著正相关;姚俊宇等^[15]和李雁鸣等^[16]认为,灌木层植物多样性与草本层生物量存在显著相关性,而草本层植物多样性与灌木层和草本层的生物量无显著相关性。作为具有生态脆弱性和高度异质性的喀斯特山地,其人工林林下植物多样性和生物量的关系尚未明确,不利于喀斯特山地生态环境的改善。

近年来,有关喀斯特山地植物群落的报道多集中在群落植物多样性、林分生境特征和生态系统功能恢

复等方面^[17-19]。喀斯特山地人工林具有相对稳定的生态系统,其群落结构与生产力的关系能够阐明生态系统功能稳定状况,对于喀斯特山地生态系统修复具有重要意义。

目前,贵州省喀斯特山地的人工造林树种主要包括干香柏(又称滇柏)(*Cupressus duclouxiana* Hichel)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、香椿〔*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.〕、侧柏〔*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco〕和杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliver)等。作者以未造林地作为对照样地,以干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林作为贵州省喀斯特山地典型人工林的研究对象,调查分析不同人工林林下灌木层和草本层植物的物种组成、植物多样性和地上部生物量等群落特征,并探讨林下地上部生物量与植物多样性的关系,以期对贵州省喀斯特山地人工林植被恢复与经营管理提供参考依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省普定县白岩镇,具体的地理坐标为东经 105°27'49"~105°58'51"、北纬 26°09'36"~26°31'42",海拔 1 042~1 846 m^[1]。该区域气候温暖

湿润,属亚热带湿润季风气候,年均温 15.1 ℃;降水主要集中在 5 月份至 9 月份,年均降水量 1 000.0~1 369.6 mm,占全年总降水量的 76% 以上;无霜期 289 d;空气相对湿度 79%。该区域土壤类型以典型喀斯特地貌石灰岩土壤为主,土层浅薄且分布不连续。

调查样地为 2002 年采用 1 年生实生苗栽植的干香柏纯林(面积 6.3 hm²)、刺槐纯林(面积 24.8 hm²)和干香柏-刺槐混交林(面积 4.5 hm²),其中干香柏-刺槐混交林为干香柏和刺槐按株数 1:1 栽植,3 种人工林的管理措施基本一致;以未造林地(仅有草本和少量灌木)为对照样地,各样地均位于阳坡。供试各样地的基本概况见表 1,其中,平均胸径与平均株高均为乔木层数据。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置和调查方法 2019 年 10 月,按照海拔和坡度,并根据实际情况在各样地中设置面积为 20 m×20 m 的乔木样方 5 个,样方间距大于 100 m,共设置 20 个乔木样方。采用对角线法在每个乔木样方的四角和中心分别设置面积为 5 m×5 m 的灌木样方 5 个,并在每个灌木样方的中心设置面积为 1 m×1 m 的草本样方 1 个,共设置 100 个灌木样方和 100 个草本样方。

表 1 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地的基本概况¹⁾

Table 1 Basic situation of different plantations and unforested land in karst mountainous region of Guizhou Province¹⁾

样地类型 Type of plot	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	平均胸径/cm Average DBH	平均株高/m Average plant height
干香柏纯林 Pure forest of <i>Cupressus duclouxiana</i>	15-18	1 410	8.13	8.1
刺槐纯林 Pure forest of <i>Robinia pseudoacacia</i>	10-15	1 470	4.77	4.2
干香柏-刺槐混交林 Mixed forest of <i>Cupressus duclouxiana-Robinia pseudoacacia</i>	12-15	1 480	9.31	7.6
未造林地 Unforested land (CK)	12-15	1 480	—	—

¹⁾ DBH: 胸径 Diameter at breast height; —: 无数据 No datum.

采用 GPS 仪等工具确定各样地的经度、纬度、海拔和坡度等基本信息。在乔木样方中记录所有乔木的种名、胸径和株高,在灌木样方中记录所有种类(包括藤本植物及乔木幼苗)的种名、株高和株数等,在草本样方中记录所有草本种类(包括蕨类植物)的种名、株高、株数和盖度等。

1.2.2 地上部生物量测定 采用收获法^[20]测定灌木层和草本层的地上部生物量。分别收割灌木样方和草本样方内所有植物的地上部分,于 85 ℃ 条件下烘

干至恒质量,并采用百分之一电子天平称量各样方的植物地上部干质量。

1.3 数据计算和统计处理

根据人工林和未造林地灌木样方和草本样方的植物地上部干质量和样方面积分别计算灌木层和草本层的地上部生物量,二者之和即为各样地的林下地上部总生物量。

参照文献[21]中的方法,分别采用 Margalef 丰富度指数(R)、Simpson 优势度指数(D)、Shannon-

Wiener 多样性指数 (H) 和 Pielou 均匀度指数 (J) 分析各样地灌木层和草本层的植物多样性; 参照文献 [22] 中的方法, 并采用公式“重要值 = (相对密度 + 相对频度 + 相对盖度) / 3” 计算各样地灌木层和草本层种类的重要值。

使用 EXCEL 2010 软件对获得的实验数据进行整理和分析。使用 SPSS 20.0 软件对植物多样性指数和地上部生物量进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 并对林下植物多样性与地上部生物量进行相关性分析。

2 结果和分析

2.1 林下灌木层和草本层的物种组成和多样性

2.1.1 林下植物的物种组成 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的物种组成见表 2。结果显示: 在干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林 3 种人工林以及未造林地的灌木层和草本层中, 共包含植物 49 科 84 属 92 种; 灌木层的小果蔷薇 (*Rosa cymosa* Tratt.)、木蓝 (*Indigofera tinctoria* Linn.)、火棘 (*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li) 和平枝栒子 (*Cotoneaster horizontalis* Dcne.) 以及草本层的青绿薹草 (*Carex breviculmis* R. Br.)、苧草 [*Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino]、地果 (*Ficus tikoua* Bur.)、牛至 (*Origanum vulgare* Linn.)、苣荬菜 (*Sonchus wightianus* DC.) 和千金子 [*Leptochloa*

chinensis (Linn.) Nees] 这 10 个种类的分布范围较广, 是 3 种人工林和未造林地的共有种。

干香柏纯林林下有植物 28 科 42 属 44 种。其中, 灌木层有 11 科 14 属 15 种, 以蔷薇科 (Rosaceae)、冬青科 (Aquifoliaceae) 和豆科 (Fabaceae) 的种数较多, 分别有 3、2 和 2 种, 分别占灌木层总种数的 20.0%、13.3% 和 13.3%; 草本层有 21 科 28 属 29 种, 以唇形科 (Lamiaceae) 和禾本科 (Poaceae) 的种数较多, 分别有 5 和 3 种, 分别占草本层总种数的 17.2% 和 10.3%。

刺槐纯林林下有植物 28 科 42 属 45 种。其中, 灌木层有 7 科 12 属 14 种, 以蔷薇科种数最多, 有 4 种, 占灌木层总种数的 28.6%; 草本层有 23 科 32 属 37 种, 以菊科 (Asteraceae)、禾本科和蔷薇科的种数较多, 分别有 8、5 和 5 种, 分别占草本层总种数的 21.6%、13.5% 和 13.5%。

干香柏-刺槐混交林林下有植物 30 科 53 属 56 种, 丰富度最高。其中, 灌木层有 8 科 10 属 10 种, 以蔷薇科种数最多, 有 3 种, 占灌木层总种数的 30.0%; 草本层有 24 科 43 属 46 种, 以菊科和禾本科的种数较多, 分别有 9 和 5 种, 分别占草本层总种数的 19.6% 和 10.9%。

未造林地林下有植物 10 科 13 属 13 种。其中, 灌木层有 2 科 4 属 4 种, 以蔷薇科种数最多, 有 3 种, 占灌木层总种数的 75.0%; 草本层有 8 科 9 属 9 种, 以菊科种数最多, 有 2 种, 占草本层总种数的 22.2%。

表 2 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的物种组成

Table 2 Species composition of shrub and herb layers of different plantations and unforested land in karst mountainous region of Guizhou Province

样地类型 ¹⁾ Type of plot ¹⁾	灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer			总计 Total		
	科数 Family number	属数 Genus number	种数 Species number	科数 Family number	属数 Genus number	种数 Species number	科数 Family number	属数 Genus number	种数 Species number
CD	11	14	15	21	28	29	28	42	44
RP	7	12	14	23	32	37	28	42	45
CR	8	10	10	24	43	46	30	53	56
CK	2	4	4	8	9	9	10	13	13

¹⁾ CD: 干香柏纯林 Pure forest of *Cupressus duclouxiana* Hichel; RP: 刺槐纯林 Pure forest of *Robinia pseudoacacia* Linn.; CR: 干香柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Cupressus duclouxiana*-*Robinia pseudoacacia*; CK: 未造林地 Unforested land.

2.1.2 灌木层和草本层的主要种类 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地的灌木层和草本层主要种类的重要值见表 3。结果显示: 齿叶冬青 (*Ilex crenata* Thunb.) 和小果蔷薇是干香柏纯林、刺槐纯林

和干香柏-刺槐混交林 3 种人工林灌木层共有的优势种 (重要值大于 10%), 且小果蔷薇也是未造林地的优势种; 而青绿薹草则是 3 种人工林草本层共有的优势种。

在干香柏纯林中, 灌木层主要种类有 9 种, 草本层主要种类有 9 种。其中, 灌木层优势种有齿叶冬青、六月雪 [*Serissa japonica* (Thunb.) Thunb.]、小果蔷薇和木蓝; 草本层优势种有青绿薹草、毛蕨

[*Cyclosorus interruptus* (Willd.) H. Ito]、橘草 [*Cymbopogon goeringii* (Steud.) A. Camus]、地果和地耳草 (*Hypericum japonicum* Thunb. ex Murray)。

在刺槐纯林中, 灌木层主要种类有 7 种, 草本层

表 3 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的主要种类

Table 3 Main species in shrub and herb layers of different plantations and unforested land in karst mountainous region of Guizhou Province

科 Family	种类 Species	各样地主要种类的重要值/% ¹⁾ Importance value of main species in each plot ¹⁾			
		CD	RP	CR	CK
灌木层 Shrub layer					
蔷薇科 Rosaceae	小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i>	11.55	18.20	11.39	30.09
	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	8.61	25.80	5.06	17.24
	白叶莓 <i>Rubus innominatus</i>		22.31		8.22
	茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>			8.45	
冬青科 Aquifoliaceae	齿叶冬青 <i>Ilex crenata</i>	18.02	11.45	21.20	
	冬青 <i>Ilex chinensis</i>	4.95			
豆科 Fabaceae	平枝栒子 <i>Cotoneaster horizontalis</i>	8.83	14.26	8.83	10.77
芸香科 Rutaceae	木蓝 <i>Indigofera tinctoria</i>	10.37	7.51	6.12	16.90
鼠李科 Rhamnaceae	花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i>	5.02		17.90	
藤黄科 Clusiaceae	雀梅藤 <i>Sageretia thea</i>		12.96	14.50	
紫葳科 Bignoniaceae	金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i>	7.63		7.21	
	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>				
茜草科 Rubiaceae	六月雪 <i>Serissa japonica</i>	16.91			
草本层 Herb layer					
莎草科 Cyperaceae	青绿薹草 <i>Carex breviculmis</i>	14.91	32.30	11.94	
禾本科 Poaceae	橘草 <i>Cymbopogon goeringii</i>	12.11			
	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	9.42			
	金色狗尾草 <i>Setaria pumila</i>		10.99		
	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>			12.99	7.66
	稗 <i>Echinochloa crus-galli</i>			8.45	
	毛蕨 <i>Cyclosorus interruptus</i>	12.46			
金星蕨科 Thelypteridaceae	毛蕨 <i>Cyclosorus interruptus</i>	12.46			
桑科 Moraceae	地果 <i>Ficus tikoua</i>	11.63		9.87	22.21
大戟科 Euphorbiaceae	千金子 <i>Leptochloa chinensis</i>	7.48		6.40	21.54
堇菜科 Violaceae	堇菜 <i>Viola verecumda</i>	6.57		7.30	
铁线蕨科 Adiantaceae	铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i>	6.30			
报春花科 Primulaceae	过路黄 <i>Lysimachia christinae</i>		20.43	9.48	
伞形科 Apiaceae	积雪草 <i>Centella asiatica</i>		14.27	6.53	
	天胡荽 <i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>		10.92		
	辽藁本 <i>Ligusticum jeholense</i>				9.16
蔷薇科 Rosaceae	蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>		8.42		
	插田泡 <i>Rubus coreanus</i>		7.70		
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>			6.13	
景天科 Crassulaceae	红景天 <i>Rhodiola rosea</i>		5.64		
	垂盆草 <i>Sedum sarmentosum</i>				9.05
豆科 Fabaceae	锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>				23.76
菊科 Asteraceae	苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i>				7.26
	刺儿菜 <i>Cirsium arvense</i> var. <i>integrifolium</i>				5.03
唇形科 Lamiaceae	牛至 <i>Origanum vulgare</i>				5.94
念珠藻科 Nostocaceae	地耳草 <i>Hypericum japonicum</i>	11.10			

¹⁾ CD: 干香柏纯林 Pure forest of *Cupressus duclouxiana* Hichel; RP: 刺槐纯林 Pure forest of *Robinia pseudoacacia* Linn.; CR: 干香柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Cupressus duclouxiana*-*Robinia pseudoacacia*; CK: 未造林地 Unforested land.

主要种类有8种。其中,灌木层优势种有火棘、白叶莓(*Rubus innominatus* S. Moore)、小果蔷薇、平枝栒子、雀梅藤[*Sageretia thea* (Osbeck) Johnst.]和齿叶冬青,且火棘和白叶莓的重要值均在20%以上,具有显著优势;草本层优势种有青绿藎草、过路黄(*Lysimachia christinae* Hance)、积雪草[*Centella asiatica* (Linn.) Urban]、金色狗尾草[*Setaria pumila* (Poiret) Roemer et Schultes]和天胡荽(*Hydrocotyle sibthorpioides* Lam.),且青绿藎草和过路黄的重要值均在20%以上,具有显著优势。

在干香柏-刺槐混交林中,灌木层主要种类有9种,草本层主要种类有9种。其中,灌木层优势种有齿叶冬青、花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)、雀梅藤和小果蔷薇,且齿叶冬青的重要值在20%以上,具有显著优势;草本层优势种有苧草和青绿藎草。

在未造林地中,灌木层主要种类有5种,草本层主要种类有9种。灌木层优势种有小果蔷薇、火棘、木蓝和平枝栒子,且小果蔷薇的重要值在30%以上,具有绝对优势;草本层优势种有锦鸡儿[*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehd.]、地果和千金子,重要值均在

20%以上,具有显著优势。

2.1.3 灌木层和草本层的植物多样性 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的植物多样性分析见表4。结果显示:灌木层的 Margalef 丰富度指数(R)、Simpson 优势度指数(D)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H)均小于草本层,而灌木层的 Pielou 均匀度指数(J)则大于草本层。

由表4可见:干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林3种人工林灌木层的 R 、 D 和 H 值均高于未造林地,且均以干香柏-刺槐混交林灌木层最高,而 J 值则以未造林地灌木层为最高。比较结果显示:干香柏-刺槐混交林灌木层的 R 、 D 和 H 值显著($P<0.05$)高于未造林地,而干香柏纯林灌木层的这3个指标与未造林地无显著差异;刺槐纯林灌木层的 R 和 H 值显著高于未造林地,但其 D 值与未造林地无显著差异;3种人工林灌木层的 J 值与未造林地均无显著差异。表明干香柏-刺槐混交林和刺槐纯林灌木层的植物丰富度和多样性水平均高于未造林地,而干香柏纯林灌木层的植物丰富度和多样性水平与未造林地差异较小。

表4 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的植物多样性分析($\bar{X}\pm SD$)

Table 4 Analysis on plant diversity in shrub and herb layers of different plantations and unforested land in karst mountainous region of Guizhou Province ($\bar{X}\pm SD$)

样地类型 ¹⁾ Type of plot ¹⁾	灌木层植物多样性指数 ²⁾ Plant diversity index in shrub layer ²⁾				草本层植物多样性指数 ²⁾ Plant diversity index in herb layer ²⁾			
	R	D	H	J	R	D	H	J
CD	1.37±0.43ab	0.68±0.07b	1.37±0.21b	0.85±0.04a	2.35±0.46b	0.76±0.07bc	1.80±0.42ab	0.72±0.07b
RP	1.56±0.43a	0.69±0.06b	1.52±0.32a	0.87±0.06a	2.01±0.31b	0.80±0.07b	1.98±0.34a	0.78±0.06ab
CR	1.56±0.21a	0.79±0.02a	1.60±0.12a	0.87±0.04a	2.96±0.47a	0.86±0.05a	2.25±0.25a	0.80±0.07a
CK	1.04±0.07b	0.64±0.07b	1.12±0.17b	0.88±0.08a	1.27±0.17c	0.72±0.01c	1.48±0.32b	0.72±0.02b

¹⁾ CD: 干香柏纯林 Pure forest of *Cupressus duclouxiana* Hichel; RP: 刺槐纯林 Pure forest of *Robinia pseudoacacia* Linn.; CR: 干香柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Cupressus duclouxiana*-*Robinia pseudoacacia*; CK: 未造林地 Unforested land.

²⁾ R : Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; D : Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; H : Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; J : Pielou 均匀度指数 Pielou uniformity index. 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

由表4还可见:干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林3种人工林草本层的 R 、 D 和 H 值均高于未造林地,且均以干香柏-刺槐混交林草本层为最高,干香柏-刺槐混交林和刺槐纯林草本层的 J 值也高于未造林地,仅干香柏纯林草本层的 J 值与未造林地相近。比较结果显示:干香柏-刺槐混交林和刺槐纯林草本层的 R 、 D 和 H 值均显著高于未造林地;干香柏纯林草本层的 R 值显著高于未造林地,但其 D

和 H 值与未造林地无显著差异;干香柏-刺槐混交林草本层的 J 值显著高于未造林地,而刺槐纯林和干香柏纯林草本层的 J 值与未造林地无显著差异。刺槐纯林和干香柏纯林草本层的 R 、 D 、 H 和 J 值无显著差异,但刺槐纯林和干香柏纯林的 R 和 D 值显著低于干香柏-刺槐混交林。表明干香柏-刺槐混交林和刺槐纯林草本层的植物丰富度和多样性均高于未造林地,而干香柏纯林草本层的植物丰富度和多样性水平

与未造林地差异较小。

2.2 林下灌木层和草本层的地上部生物量

贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的地上部生物量见表 5。结果显示:干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林 3 种人工林灌木层地上部生物量均高于草本层,而未造林地灌木层地上部生物量则低于草本层。其中,3 种人工林灌木层地上部生物量占地上部总生物量的 55.58%~68.04%,而未造林地灌木层地上部生物量仅占地上部总生物量的 26.81%,表明通过人工造林能明显提高灌木层地上部生物量。

由表 5 可见:干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林 3 种人工林的灌木层地上部生物量和地上部总生物量均高于未造林地,且均以干香柏-刺槐混

交林最高;而草本层地上部生物量则以干香柏-刺槐混交林最高、未造林地次之,2 种纯林的草本层地上部生物量则低于干香柏-刺槐混交林和未造林地。比较结果表明:3 种人工林灌木层的地上部生物量和地上部总生物量均显著 ($P<0.05$) 高于未造林地,且干香柏-刺槐混交林灌木层的地上部生物量和地上部总生物量也显著高于 2 种纯林;干香柏-刺槐混交林草本层地上部生物量显著高于干香柏纯林和刺槐纯林以及未造林地,而 2 种纯林草本层的地上部生物量与未造林地无显著差异;2 种纯林灌木层和草本层的地上部生物量间均无显著差异。表明营造干香柏-刺槐混交林对提升林下灌木层和草本层的地上部生物量均有明显作用,而营造干香柏纯林或刺槐纯林则能提高灌木层的地上部生物量。

表 5 贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的地上部生物量 ($\bar{X}\pm SD$)

Table 5 Above-ground biomass of shrub and herb layers of different plantations and unforested land in karst mountainous region of Guizhou Province ($\bar{X}\pm SD$)

样地类型 Type of plot	地上部生物量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) ¹⁾ Above-ground biomass ¹⁾			比例/% ²⁾ Proportion ²⁾	
	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	总计 Total	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer
干香柏纯林 Pure forest of <i>Cupressus duclouxiana</i>	162.66±38.80b	76.40±15.87b	239.06±30.50b	68.04	31.96
刺槐纯林 Pure forest of <i>Robinia pseudoacacia</i>	142.75±61.04b	99.78±6.36b	242.53±61.46b	58.86	41.14
干香柏-刺槐混交林 Mixed forest of <i>Cupressus duclouxiana</i> - <i>Robinia pseudoacacia</i>	231.64±67.27a	185.14±6.03a	416.78±67.60a	55.58	44.42
未造林地 Unforested land (CK)	37.70±15.10c	102.90±13.10b	140.60±25.77c	26.81	73.19

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ 灌木层或草本层的地上部生物量占地上部总生物量的比例 Proportion of above-ground biomass of shrub layer or herb layer in total above-ground biomass.

2.3 林下地上部生物量与植物多样性的相关性

贵州省喀斯特山地不同人工林和未造林地灌木层和草本层的地上部生物量与植物多样性指数的相关系数见表 6;对不同人工林植物多样性指数以及生物量取平均值后,分析人工林灌木层和草本层的地上部生物量与植物多样性的相关性,结果见表 7。

由表 6 可见:干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林 3 种人工林灌木层和草本层的地上部生物量以及地上部总生物量与大多数多样性指数均无显著相关性,仅干香柏纯林的地上部总生物量与灌木层 Simpson 优势度指数 (D) 呈显著 ($P<0.05$) 正相关;刺槐纯林的草本层地上部生物量与灌木层的 D 值呈显著负相关,灌木层地上部生物量和地上部总生物量与草本层的 Margalef 丰富度指数 (R) 分别呈极显著 ($P<0.01$) 和显著正相关;干香柏-刺槐混交林的灌木层地

地上部生物量和地上部总生物量与灌木层的 Pielou 均匀度指数 (J) 均呈显著负相关,草本层地上部生物量与灌木层的 R 值呈显著负相关。未造林地的灌木层地上部生物量和地上部总生物量与灌木层的 R 值、 D 值和 Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 均呈显著或极显著正相关,与灌木层的 J 值以及草本层的各项多样性指数均无显著相关性;草本层地上部生物量与草本层的 H 值呈极显著正相关,与灌木层的各项多样性指数以及草本层的 R 、 D 和 J 值均无显著相关性。

由表 7 可见:总体上看,人工林灌木层和草本层的地上部生物量及地上部总生物量与灌木层的 D 值和草本层的 R 值呈极显著或显著正相关,灌木层地上部生物量和地上部总生物量还与灌木层的 R 值呈极显著或显著正相关,其他指标间的相关性均未达到显著水平。

表6 贵州喀斯特山地不同人工林样地和未造林地灌木层和草本层的地上部生物量与植物多样性指数的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between above-ground biomass and plant diversity index of shrub and herb layers of different plantations and unforested land in karst mountainous region of Guizhou Province

生物量指标 ¹⁾ Biomass index ¹⁾	与灌木层植物多样性指数间的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with plant diversity index of shrub layer ²⁾				与草本层植物多样性指数间的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with plant diversity index of herb layer ²⁾				
	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	
干香柏纯林 Pure forest of <i>Cupressus duclouxiana</i>									
Bs	0.855	0.871	0.757	0.419	0.084	-0.018	0.046	-0.353	
Bh	-0.563	-0.357	-0.173	0.205	-0.253	0.055	0.000	0.557	
Bt	0.795	0.922*	0.873	0.427	-0.024	0.006	0.058	-0.160	
刺槐纯林 Pure forest of <i>Robinia pseudoacacia</i>									
Bs	0.239	-0.204	-0.009	-0.036	0.960**	0.766	0.761	0.511	
Bh	-0.654	-0.906*	-0.876	-0.825	-0.151	-0.583	-0.460	-0.725	
Bt	0.170	-0.297	-0.100	-0.121	0.937*	0.700	0.708	0.432	
干香柏-刺槐混交林 Mixed forest of <i>Cupressus duclouxiana</i> - <i>Robinia pseudoacacia</i>									
Bs	0.081	0.840	0.644	-0.953*	-0.438	-0.649	-0.721	-0.599	
Bh	-0.958*	0.413	0.753	-0.185	0.467	-0.202	-0.247	-0.309	
Bt	-0.005	0.861	0.726	-0.933*	-0.395	-0.647	-0.722	-0.616	
未造林地 Unforested land (CK)									
Bs	0.879*	0.949*	0.911*	0.718	0.280	-0.329	0.522	0.699	
Bh	0.686	0.802	0.647	0.295	0.429	-0.343	0.987**	0.764	
Bt	0.883*	0.983**	0.882*	0.586	0.388	-0.374	0.818	0.813	

¹⁾ Bs: 灌木层的地上部生物量 Above-ground biomass of shrub layer; Bh: 草本层的地上部生物量 Above-ground biomass of herb layer; Bt: 地上部总生物量 Total above-ground biomass.

²⁾ *R*: Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; *D*: Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; *H*: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *J*: Pielou 均匀度指数 Pielou uniformity index. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表7 贵州喀斯特山地人工林灌木层和草本层的地上部生物量与植物多样性指数的相关系数

Table 7 Correlation coefficient between above-ground biomass and plant diversity index of shrub and herb layers of plantations in karst mountainous region of Guizhou Province

生物量指标 ¹⁾ Biomass index ¹⁾	与灌木层植物多样性指数间的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with plant diversity index of shrub layer ²⁾				与草本层植物多样性指数间的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with plant diversity index of herb layer ²⁾				
	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	
Bs	0.585**	0.595*	0.358	-0.157	0.756**	0.316	0.299	0.070	
Bh	0.157	0.628*	0.332	0.057	0.523*	0.484	0.467	0.441	
Bt	0.505*	0.698**	0.397	-0.075	0.776**	0.445	0.425	0.262	

¹⁾ Bs: 灌木层的地上部生物量 Above-ground biomass of shrub layer; Bh: 草本层的地上部生物量 Above-ground biomass of herb layer; Bt: 地上部总生物量 Total above-ground biomass.

²⁾ *R*: Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; *D*: Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; *H*: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *J*: Pielou 均匀度指数 Pielou uniformity index. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 讨论和结论

3.1 不同人工林林下植物多样性差异分析

林下植物多样性反映了林下植物的均匀度和丰富度,与林下植物群落的结构类型、林分发展阶段及稳定程度有关^[23-25]。李品荣等^[26]通过对西南桦(*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don)混交林的研究,发现该混交林林下的植物种类、多样性和稳定性以及林分生境异质性均高于纯林;王世雷等^[27]认为,

与纯林相比,混交林可以提高林分生境的异质性,更有利于物种生存;胡玉燕^[28]也认为混交林的植物丰富度和多样性均高于纯林,并建议采用混交林间种模式进行人工造林;王玉杰等^[29]的研究结果表明:与纯林相比,混交林灌木层和草本层的植物多样性均较高,且混交度越高多样性指数越高。本文研究结果也显示:干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林3种人工林灌木层和草本层的植物组成和植物多样性均高于未造林地,其中,干香柏-刺槐混交林林下灌木层和草本层的物种丰富度及物种多样性高于干

香柏纯林和刺槐纯林。因而,在改善林分结构、增加林分生境异质性和林分稳定性方面,混交林优于纯林^[4,30],建议在喀斯特退化山地植被恢复过程中采用混交林模式进行造林。

3.2 人工林林下地上部生物量与植物多样性的关系

林下植物生物量反映了植物群落的结构、功能和生长状况^[31-33]。本文研究结果表明:干香柏-刺槐混交林的地上部生物量显著高于干香柏纯林和刺槐纯林,可能原因是不同人工林林下植物的物种组成不同,从而导致其地上部生物量的积累存在不同程度的差异^[34-35]。另外,干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林3种人工林灌木层地上部生物量均高于草本层,可能与草本层受灌木层的遮蔽、光照强度较弱和光合产物积累较少有关。

由于研究地域^[11]、研究尺度^[36]和植被类型^[37-38]的差异,林下植物生物量与其多样性状况的关系并不完全一致^[39-40]。群落的植物生物量既可能随植物多样性的增加而增大,也可能与植物多样性呈单峰型关系。当植物群落中种类数量较少时,环境异质性低,生物量随种数的增加而增大;而随种数的增加,环境异质性逐渐增强,种间竞争加剧,生存资源利用逐渐饱和,此时生物量最大;种数进一步增加,因种间竞争而导致生存资源不足,生物量则减小^[41]。

本文的研究结果显示,混交林和纯林的地上部生物量与植物多样性的关系存在差异。例如:在干香柏纯林中,灌木层和草本层的地上部生物量与其Margalef丰富度指数(R)均无显著相关性;在刺槐纯林中,灌木层的地上部生物量和地上部总生物量与草本层的 R 值均呈显著正相关;在干香柏-刺槐混交林中,草本层的地上部生物量与灌木层的 R 值呈显著负相关,造成这一现象的原因可能与上述3种人工林的林分特征不同有关。刺槐纯林的林下环境异质性较低,随林下植物种数的增加其生物量越大;干香柏纯林的林下植物种数已达到其生存资源利用饱和的程度,生物量也达到最大值,此时植物多样性不再是其生物量的影响因子;干香柏-刺槐混交林的环境异质性最强,当林下植物种数增加时,由于种间对生存资源的竞争导致其林下生物量的降低。总之,人工林林下生物量与植物多样性的关系较为复杂,短期及小尺度的研究难以对其规律性和影响因子有深入的解析,因而,今后需扩大样地面积并建立永久性样地,进行长期综合的调查研究。

3.3 结论

综上所述,贵州省喀斯特山地干香柏纯林、刺槐纯林和干香柏-刺槐混交林3种人工林的林下植物的多样性和地上部总生物量均高于未造林地,表明通过人工造林可有效恢复喀斯特山地的植物多样性,增强其稳定性和生态系统服务功能。干香柏-刺槐混交林的林下植物多样性和地上部生物量均高于干香柏纯林和刺槐纯林,表明营造针阔混交林有利于提高林下植物多样性。据此,建议在喀斯特退化山地人工植被恢复过程中可选择营造针阔混交林,从而提高林下植物的生态恢复功能。

参考文献:

- [1] 张喜,霍达,向凯旋,等.样地面积对黔中喀斯特石漠灌丛林植物多样性的影响[J].生态学杂志,2019,38(5):1305-1313.
- [2] 刘成刚,薛建辉.喀斯特石漠化山地不同类型人工林土壤的基本性质和综合评价[J].植物生态学报,2011,35(10):1050-1060.
- [3] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.
- [4] MIDGLEY G F. Biodiversity and ecosystem function[J]. Science, 2012, 335(6065): 174-175.
- [5] 张倩,韩贵琳,柳满,等.贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素[J].生态学杂志,2019,38(2):321-328.
- [6] 杨路存,赵玉红,徐文华,等.青海省高寒灌丛物种多样性、生物量及其关系[J].生态学报,2018,38(1):309-315.
- [7] 冶民生,关文彬,谭辉,等.岷江干旱河谷灌丛 α 多样性分析[J].生态学报,2004,24(6):1123-1130.
- [8] WANG C, CAO G, WANG Q, et al. Changes in plant biomass and species composition of alpine *Kobresia* meadows along altitudinal gradient on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2008, 51(1): 86-94.
- [9] 王勇军,黄从德,张健,等.岷江干旱河谷灌丛物种多样性、生物量及其关系[J].干旱区研究,2010,27(4):567-572.
- [10] 刘国华,马克明,傅伯杰,等.岷江干旱河谷主要灌丛类型地上生物量研究[J].生态学报,2003,23(9):1757-1764.
- [11] MA W, HE J S, YANG Y, et al. Environmental factors covary with plant diversity-productivity relationships among Chinese grassland sites[J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19: 233-243.
- [12] BAI Y, WU J, PAN Q, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: evidence from the Eurasian Steppe[J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 44: 1023-1034.
- [13] 孙玉军,马炜,刘艳红.与物种多样性有关的长白落叶松人工林生物量[J].生态学报,2015,35(10):3329-3338.
- [14] 温远光,陈放,刘世荣,等.广西桉树人工林物种多样性与生物量关系[J].林业科学,2008,44(4):14-19.

- [15] 姚俊宇, 伍炫蓓, 孙千惠, 等. 林窗大小对川西马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 214-220.
- [16] 李雁鸣, 杨德军, 张劲峰. 西南桦人工林物种多样性与生物量相关性研究[J]. 山东林业科技, 2012(6): 4-7, 13.
- [17] 兰斯安, 宋敏, 曾馥平, 等. 木论喀斯特森林木本植物多样性垂直格局[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7374-7383.
- [18] 刘玉国, 刘长成, 魏雅芬, 等. 贵州省普定县不同植被演替阶段的物种组成与群落结构特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1009-1018.
- [19] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 434-448.
- [20] 郝文芳, 陈存根, 梁宗锁, 等. 植被生物量的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 175-182.
- [21] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 等. 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2856-2866.
- [22] 李艳, 姚小兰, 郝建锋, 等. 林窗对川西周公山柳杉人工林林下物种多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(6): 1238-1245.
- [23] 闫玮明, 孙冰, 裴男才, 等. 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.
- [24] 茹文明, 张金屯, 张峰, 等. 历山森林群落物种多样性与群落结构研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 561-566.
- [25] 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[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 9-15.
- [26] 李品荣, 曾觉民, 陈强, 等. 西南桦人工纯林与混交林群落学特征比较[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 14-16.
- [27] 王世雷, 贺康宁, 刘可暄, 等. 青海高寒区不同人工林下植被的多样性及生态位研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 67-72.
- [28] 胡玉燕. 2种杉木人工林林下植被多样性研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 174-177, 239.
- [29] 王玉杰, 李绍才, 缪宁, 等. 四川盆周山地5种典型林分的植物多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(7): 89-98.
- [30] LONGWORTH J B, WILLIAMSON G B. Composition and diversity of woody plants in tree plantations versus secondary forests in Costa Rican Lowlands[J]. Tropical Conservation Science, 2018, 11: 1-13.
- [31] GATTI R C, CASTALDI S, LINDSELL J A, et al. The impact of selective logging and clearcutting on forest structure, tree diversity and above-ground biomass of African tropical forests[J]. Ecological Research, 2015, 30: 119-132.
- [32] LUXMOORE R J, THARP M L, POST W M. Simulated biomass and soil carbon of loblolly pine and cottonwood plantations across a thermal gradient in southeastern United States[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 254: 291-299.
- [33] RIZVI R H, DHYANI S K, YADAV R S, et al. Biomass production and carbon stock of poplar agroforestry systems in Yamunanagar and Saharanpur districts of northwestern India[J]. Current Science, 2011, 100(5): 736-742.
- [34] SCHERBER C, EISENHAUER N, WEISSER W W, et al. Bottom-up effects of plant diversity on multitrophic interactions in a biodiversity experiment[J]. Nature, 2010, 468: 553-556.
- [35] 王伟伟, 杨海龙, 贺康宁, 等. 青海高寒区不同人工林配置下草本群落生态位研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 156-160, 165.
- [36] 任引, 彭丹, 潘俊忠, 等. 不同时空尺度下武夷山甜槠林物种多样性与生物量的动态关系[J]. 林业科学, 2010, 46(8): 33-38.
- [37] ADLER P B, SEABLOOM E W, BORER E T, et al. Productivity is a poor predictor of plant species richness[J]. Science, 2011, 333(6050): 1750-1753.
- [38] 王萌, 徐冰, 张大勇, 等. 内蒙古草原锡林河流域植物群落生物量及多样性沿土壤水分含量梯度的变化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(4): 445-449.
- [39] CHENG C, WANG Y, FU X, et al. Thinning effect on undergrowth community and photosynthetic characteristics in a subtropical *Pinus massoniana* plantation[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2017, 47(8): 1104-1115.
- [40] 漆良华, 彭镇华, 张旭东, 等. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局[J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1697-1702.
- [41] 高一飞, 张静, 唐旭利, 等. 亚热带马尾松林恢复过程中物种丰富度及生物量变化[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 22-29.

(责任编辑: 郭严冬)