

## 不同类型侧柏人工林下草本层植物多样性及其生物量研究

杨玉凤<sup>1</sup>, 武利玉<sup>1\*</sup>, 马永林<sup>1</sup>, 魏翻江<sup>2</sup>, 张崇庆<sup>1</sup>, 韩旭<sup>1</sup>, 侯通<sup>1</sup>, 解云云<sup>1</sup>, 刁广杰<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省人大机关官山林场, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**以兰州市仁寿山5种不同类型的侧柏人工林为研究对象,通过样地调查法,探究林分类型与林下草本层植物的多样性及其生物量的相关性。结果表明,1)5种侧柏人工林及天然草地中草本层以禾本科和菊科植物为主,群落之间相似性不高,优势种、伴生种明显,且物种数侧柏纯林>侧柏混交林>天然草地;2)林分类型与林下草本层植物的多样性之间存在不显著的相关关系。侧柏-榆树、侧柏-山杏混交林下草本层植物的 $\alpha$ 多样性最高,其次为天然草地、侧柏纯林,侧柏-山桃、侧柏-刺槐混交林下草本层植物的 $\alpha$ 多样性最低;3)林分类型与林下草本层植物的生物量之间存在不显著的相关关系。侧柏-榆树混交林下草本层植物的地上生物量最小,地下生物量最大,侧柏纯林下草本层植物的地上生物量最大,地下生物量最小。综上所述,在兰州地区相对于天然草地与侧柏纯林,侧柏混交林具有更强的林地生产力和水土保持能力,其中以侧柏-榆树、侧柏-山杏混交林的生态效益最高。

**关键词:**仁寿山;侧柏人工林;草本层植物; $\alpha$ 多样性;生物量

**中图分类号:**S727.29

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)02-0061-08

### Diversity and Biomass of Herbaceous Layer Plants Under Different Types of *Platycladus orientalis* Plantations

YANG Yu-feng<sup>1</sup>, WU Li-yu<sup>1\*</sup>, MA Yong-lin<sup>1</sup>, WEI Fan-jiang<sup>2</sup>, ZHANG Chong-qing<sup>1</sup>, HAN Xu<sup>1</sup>,  
HOU Tong<sup>1</sup>, XIE Yun-yun<sup>1</sup>, DIAO Guang-jie<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Guanshan Forest Farm of Gansu Provincial People's Congress, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** This study investigated the correlation between stand types and the diversity and biomass of understory herbaceous layer plants through sample plot survey method by selecting five different types of *Platycladus orientalis* plantations in the Renshou Mountain, Lanzhou City as the sample plot. The results showed that 1) the herbaceous layer plants of *P. orientalis* plantation and natural grassland were dominated by family Gramineae and Compositae. The community was low in similarity, and the dominant species and associated species were obvious. The quantities of species of pure *P. orientalis* forest was larger than mixed forest. The quantities of species of mixed forest was larger than natural grassland. 2) There was low significant correlation between stand types and diversity of herbaceous layer plants. The  $\alpha$  diversity of herbaceous layer plants under the mixed *P. orientalis*-*Ulmus pumila* forest and the mixed *P. orientalis* *Prunus sibirica* forest was the highest, followed by natural grassland and pure *P. orientalis* forest. The  $\alpha$  diversity was the lowest of herbaceous layer plants under the mixed forests of *P. orientalis*-*Amygdalus davidiana* and *P. orientalis*-*Robinia pseudoacacia*. 3) There was low significant correlation between stand types and biomass of herbaceous layer plants. The aboveground biomass of herbaceous layer plants in the

收稿日期:2022-03-07 修回日期:2022-04-07

基金项目:甘肃省自然科学基金(20JR10RA518)。

第一作者:杨玉凤。研究方向:林草植被恢复与重建。E-mail:2287050752@qq.com

\*通信作者:武利玉,副教授。研究方向:森林培育学及恢复生态学。E-mail:liyu199738@163.com

mixed *P. orientalis*-*U. pumila* forest were the smallest and the underground biomass were the largest. In the pure *P. orientalis* forest, the aboveground biomass of herbaceous plants were the largest, while the underground biomass were the smallest. In conclusion, compared with natural grassland and pure *P. orientalis* forest in Lanzhou, *P. orientalis* mixed forests has stronger forest productivity and soil and water conservation capacity. Among them, the mixed forests of *P. orientalis*-*U. pumila* and *P. orientalis*-*Prunus sibirica* have the highest ecological benefits.

**Key words:** Renshou Mountain; *Platycladus orientalis* forest; herbaceous layer plant; αdiversity; biomass

草本层植物是森林生态系统的重要组成部分,在水土保持、增加生物多样性、提高生态系统稳定性、维持生态系统可持续发展等方面起着重要的作用<sup>[1]</sup>。因为草本层植物所占的生态位小,对环境变化反应敏锐<sup>[2]</sup>,常作为衡量生态系统稳定性和功能恢复的关键指标<sup>[3]</sup>。物种多样性和生物量是植物群落的 2 个基本特征<sup>[4]</sup>,物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式<sup>[5]</sup>,最终反映了各物种在生态系统中对环境资源的利用结果<sup>[6]</sup>。生物量是单位面积内实际存在的有机物质,最终表现了各物种在生态系统中对群落有机质的占有情况<sup>[3]</sup>。通过研究人工林下草本层植物的物种组成、生物量、生长状况和分布情况等群落特征反映物种在群落中的功能及作用<sup>[7]</sup>,衡量人工林生态系统的物种多样性、稳定性和功能性<sup>[6]</sup>。

相关研究表明<sup>[8-11]</sup>,除光照、水分、海拔、坡度、坡向、树龄、密度、郁闭度和冠层结构等生态因子对林下草本层植物的物种多样性及其生物量存在显著影响外,林分类型也是影响林下草本层植物物种多样性及其生物量的重要因子。混交林与纯林下草本层植物的物种组成、物种多样性及地上生物量之间存在显著差异<sup>[12-13]</sup>,且混交林对于林下植被的发育和更新具有明显的促进作用<sup>[14]</sup>。因此,进行林分类型对林下草本层植物物种多样性及其生物量影响的研究是评判人工林是否合理经营,能否持续发展的重要依据。

兰州地区气候干旱,降水少且分布不均并不十分适宜于人工乔木林的营造,但兰州作为省会城市在满足生态用水需求的前提下通过人工造林改善城市环境,投资生态建设是非常必要的。侧柏(*Platycladus orientalis*)耐寒耐旱耐瘠薄,在人工养护的条件下可以在兰州地区大面积种植,对改善当地生态环境起到了关键性作用。但是,如何降低造林成本,解决由于树种单一和种植密度过大而造成的物种多样性降低、林地生产力下降以及生态系统不稳定等问题迫在眉睫<sup>[15]</sup>。目前有关兰州市人工林的研究涵盖了水源涵养<sup>[16-17]</sup>、土壤养分<sup>[18]</sup>和植物群落特征<sup>[19-20]</sup>三大内容,但以侧柏人工林为对象的研究

主要集中在水土保持<sup>[17]</sup>与土壤改良<sup>[18]</sup>两大方面,其林下草本层植物物种多样性及其生物量的研究未见报道。本研究以兰州仁寿山 5 种不同类型的侧柏人工林为研究对象,通过研究林下草本层植物的物种组成、物种多样性及其生物量之间是否存在异质性,进而探究林分类型与林下草本层植物多样性及其生物量的相关关系,以期对兰州市侧柏人工林的结构优化及稳定发展提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省兰州市南北两山绿化工程区之一的仁寿山,海拔 1 506~2 067 m,属温带大陆性气候区,年均气温 9.8℃,年均降水量 300~320 mm,全年气候干燥,温差大,降水少且分布不均。土壤以淡灰钙土为主,有机质含量低,保水保肥能力极差<sup>[15]</sup>。该区域自然植被稀缺,以人工植被为主,乔木有侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Prunus sibirica*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、榆树(*Ulmus pumila*)等;灌木有枸杞(*Lycium chinense*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)等;草本有赖草(*Leymus secalinus*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、甘肃臭草(*Melica przewalskyi*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)等。

### 1.2 样地设置

2021 年 5—10 月,对兰州市仁寿山进行全面实地看查,以同一坡向上海拔、坡度基本相同,造林年限相同,树种配置不同的 5 种侧柏人工林分为研究对象,包括侧柏纯林(C1)、侧柏-刺槐混交林(C2)、侧柏-山桃混交林(C3)、侧柏-榆树混交林(C4)、侧柏-山杏混交林(C5),同时选择立地条件相似的天然草地(CK)作为对照。在每种林分和天然草地内各布设 3 个 10 m×10 m 的标准样地,在每个标准样地内按对角线法布设 5 个 1 m×1 m 的草本样方,共布设 18 个标准样地,90 个草本样方<sup>[21]</sup>。如表 1 所示,对样地内的林木进行每木检尺,记录乔灌木的

树高、枝下高、胸径(地径)、分枝数及冠幅,草本层植物(本次调查中除草本植物外,将株高<50 cm 的乔木幼苗和小灌木记作草本层植物)的株高、多度、盖度以及分布状况等。同时记录每个样地的经纬度、海拔、坡度及坡位等地形参数并计算林分密度、郁闭度、林地更新潜力等林地特征指标<sup>[22]</sup>。

表 1 样地概况  
Table 1 Sample plot survey

样地编号	C1	C2	C3	C4	C5	CK
样地类型	侧柏纯林	侧柏-刺槐	侧柏-山桃	侧柏-榆树	侧柏-山杏	天然草地
平均胸径/cm	3.49	7.93	5.17	5.23	5.73	/
平均树高/m	3.40	6.74	5.19	5.21	5.85	/
平均冠幅/m	1.69	2.33	1.38	1.26	1.90	/
密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	4500	4533	6000	5166	4300	/
郁闭度	0.38	0.52	0.41	0.33	0.41	/
侧柏占比(%)	89.63	47.79	38.89	49.03	36.43	/
更新潜力(%)	5.19	61.76	64.44	60.65	95.35	/

1.3 样品采集

地上生物量采用全株收获法,将草本样方内所有草本层植物的地上部分齐根剪下,装入密封袋编号后带回。在实验室称重后放入烘箱,85℃烘干至恒重,测算地上生物量。地下生物量采用挖土块法,在每个草本样方的中心位置以 0~10、10~20、20~30 cm 的土层深度依次向下挖 3 个 20 cm×20 cm 的土块。用 2 mm 的筛子筛出根系,装入密封袋编号后带回。在实验室进行洗根、称重、阴干后入烘箱,85℃烘干至恒重,测算地下生物量<sup>[23]</sup>。

1.4 数据处理

1.4.1 重要值计算

相对多度=某个种的多度/所有种的多度×100%

相对频度=某个种在样方中出现的次数/所有种出现的次数×100%

相对盖度=某个种的盖度/所有种的盖度×100%

重要值=(相对多度+相对频度+相对盖度)/3

1.4.2 多样性计算

Margalef 丰富度指数(M): $M=(S-1)/\ln N$

Simpson 多样性指数(D): $D=1-\sum_{i=1}^S P_i^2$

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

Pielou 均匀度指数(P): $P=H/\ln S$

Jaccard 群落相似系数(J): $J=w/(a+b-w)$

式中:S 为群落中的物种数,N 为群落中物种个体总数, $N_i$  为第 i 个物种的相对个体数, $P_i$  即  $N_i/N$ ;a 为群落 A 中的物种总数,b 为群落 B 中的物种总数,w 为群落 AB 中的共同物种数<sup>[24]</sup>。

1.4.3 数据分析 利用 Excel 进行原始数据的整

理和图表制作,利用 SPSS 进行试验数据分析。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)对各类型样地间草本层植物的物种多样性及其生物量的差异性进行分析;采用 Person 相关分析法对林地特征与侧柏人工林下草本层植物的物种多样性及其生物量的相关性进行分析,设定显著水平为  $P<0.05$ ,极显著水平为  $P<0.01$ <sup>[22]</sup>。

2 结果与分析

2.1 不同林分草本层植物物种组成分析

由表 2 可知,5 种侧柏人工林及天然草地中草本层植物共有 49 种,隶属 20 科 46 属,禾本科植物最多,占物种总数的 24%,其次为菊科和豆科分别占物种总数的 14%和 12%。其中,侧柏纯林(C1)下草本层植物共有 27 种,隶属 13 科 25 属,优势种为赖草,主要伴生种为山蒿和远志;侧柏-刺槐混交林(C2)下草本层植物共有 20 种,隶属 10 科 20 属,优势种为芨芨草,主要伴生种为鹅绒藤;侧柏-山桃混交林(C3)下草本层植物共有 22 种,隶属 13 科 22 属,优势种为冰草,主要伴生种为甘肃臭草和鹅绒藤;侧柏-榆树混交林(C4)下草本层植物共有 24 种,隶属 15 科 23 属,优势种为甘肃臭草,伴生种有鹅绒藤、骆驼蓬、青蒿等;侧柏-山杏混交林(C5)下草本层植物共有 23 种,隶属 14 科 22 属,优势种为赖草,主要伴生种为鹅绒藤、蒙古苕芭和冰草;天然草地(CK)的草本层植物共有 18 种,隶属 13 科 17 属,优势种为赖草,主要伴生种为山蒿。草本层植物物种数为侧柏纯林>侧柏-榆树混交林>侧柏-山杏混交林>侧柏-山桃混交林>侧柏-刺槐混交林>天然草地,其中,侧柏纯林、侧柏-山杏混交林和天然草地的优势科均为禾本科和菊科,优势种均为赖草,但主要伴生种不同;侧柏-刺槐、侧柏-山桃、侧柏-榆树混交

表 2 各类型样地草本层植物的重要值

Table 2 Importance values of herbaceous layer plants in all types of plots

%

种	C1	C2	C3	C4	C5	CK
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	30.34	2.20			20.51	18.24
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	1.34					
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	1.78		3.03	1.35		
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	0.47	5.70	22.98	3.46	9.24	3.06
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>			1.22	0.55	1.01	
芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	5.36	34.78		4.80		7.02
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>		1.28				
披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>		1.05				
醉马草 <i>Achnatherum inebrians</i>	1.19					
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>			1.01			
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>				6.72		
甘肃臭草 <i>Melica przewalskyi</i>	0.73	5.55	13.10	14.37	6.30	
山蒿 <i>Artemisia brachyloba</i>	15.20		5.66	6.65	1.45	13.82
青蒿 <i>Artemisia caruifolia</i>	5.50	4.63		6.02		5.31
刺儿菜 <i>Cirsium arvense</i> var. <i>integrifolium</i>				0.99		
小苦荬 <i>Ixeridium dentatum</i>	1.61	0.81			0.56	
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	0.43					
中亚紫菀木 <i>Asterothamnus centralasiaticus</i>	0.63					
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	6.78	0.82	3.08	5.71	2.61	2.72
刺槐(乔木幼苗) <i>Robinia pseudoacacia</i>			2.73	0.85		
苦马豆 <i>Sphaerophysa salsula</i>					0.60	
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>					0.60	
荒漠锦鸡儿(小灌木) <i>Caragana roborovskii</i>	0.37					
柠条锦鸡儿(小灌木) <i>Caragana korshinskii</i>			1.44			
草木樨状黄芩 <i>Astragalus melilotoides</i>				1.59	3.20	3.93
山杏(乔木幼苗) <i>Prunus sibirica</i>		7.49			0.60	
山桃(乔木幼苗) <i>Amygdalus davidiana</i>		4.17	12.56	5.63	6.14	
山荆子(乔木幼苗) <i>Malus baccata</i>		0.81				
藜 <i>Chenopodium album</i>		0.94	0.69	1.77		2.24
地肤 <i>Kochia scoparia</i>	0.74					
盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	0.53		0.99			
忍冬(幼苗) <i>Lonicera japonica</i>		1.57			0.45	
葱皮忍冬(小灌木) <i>Lonicera ferdinandi</i>		0.88				
滩地韭 <i>Allium oreoprasum</i>	1.63		2.36		1.53	5.13
西北天门冬 <i>Asparagus breslerianus</i>	1.74	1.88	0.78	5.22	1.72	2.91
多裂骆驼蓬 <i>Peganum multiseptum</i>	0.43		5.68	7.37	3.15	9.02
蝎虎蹄瓣 <i>Zygophyllum mucronatum</i>	0.88		0.78			
亚麻 <i>Linum usitatissimum</i>	0.87				0.48	1.46
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	11.44					
红砂(小灌木) <i>Reaumuria soongarica</i>	5.57		3.50	4.50	5.45	10.66
枸杞(小灌木) <i>Lycium chinense</i>		0.82	2.33	1.61		
侧柏(乔木幼苗) <i>Platycladus orientalis</i>	1.30	1.75		1.15	1.95	
榆树(乔木幼苗) <i>Ulmus pumila</i>		11.66	3.42	5.81	8.51	1.19
鹅绒藤 <i>Cynanchum chinense</i>	0.45	11.22	11.07	8.35	13.04	2.24
中麻黄(小灌木) <i>Ephedra intermedia</i>	2.25			2.10		
节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	0.43		0.78	2.71	0.85	3.25
火炬树(乔木幼苗) <i>Rhus typhina</i>				0.74		
蒙古苕芭 <i>Cymbaria mongolica</i>					10.05	3.54
星毛补血草 <i>Limonium potaninii</i>			0.80			4.23

注:株高&lt;50 cm 的乔木幼苗和小灌木均记作草本层植物。



林的优势科均为禾本科,优势种各不相同,但主要伴生种都包括鹅绒藤。综上所述,不同样地草本层植物的物种组成之间存在差异,且天然草地与人工林下草本层植物的物种数之间差异较大。

## 2.2 不同林分草本层植物多样性分析

对各类型样地草本层植物的 Margalef 指数( $M$ )、Simpson 指数( $D$ )、Shannon-Wiener 指数( $H$ )和 Pielou 指数( $P$ )进行单因素方差分析,结果如图 1 所示。各类型样地间草本层植物的 Margalef 指数( $M$ )表现为侧柏-榆树混交林>侧柏-山杏混交林>侧柏纯林>侧柏-刺槐、侧柏-山桃混交林>天然草地。其中,天然草地和侧柏-榆树混交林与侧柏-刺槐和侧柏-山桃混交林中草本层植物的 Margalef 指数( $M$ )之间存在显著差异;Simpson 指数( $D$ )表现为侧柏-榆树混交林>侧柏-山杏混交林>

天然草地>侧柏纯林、侧柏-山桃混交林>侧柏-刺槐混交林。其中,天然草地与侧柏-刺槐混交林、侧柏-榆树混交林与侧柏-刺槐和侧柏-山桃混交林的 Simpson 指数( $D$ )之间存在显著差异;Shannon-Wiener 指数( $H$ )表现为侧柏-榆树混交林>侧柏-山杏混交林>天然草地>侧柏-山桃混交林>侧柏纯林>侧柏-刺槐混交林。其中,天然草地与侧柏纯林、侧柏-刺槐、侧柏-山桃和侧柏-榆树混交林,侧柏-榆树混交林与侧柏纯林和侧柏-刺槐混交林,侧柏-刺槐混交林与侧柏-山杏混交林的 Shannon-Wiener 指数( $H$ )之间存在显著差异;Pielou 指数( $P$ )表现为侧柏-榆树混交林>天然草地>侧柏-山杏混交林>侧柏-山桃混交林>侧柏纯林>侧柏-刺槐混交林。其中,侧柏-榆树混交林与侧柏纯林和侧柏-刺槐混交林的 Pielou 指数( $P$ )之间存在显著差异。

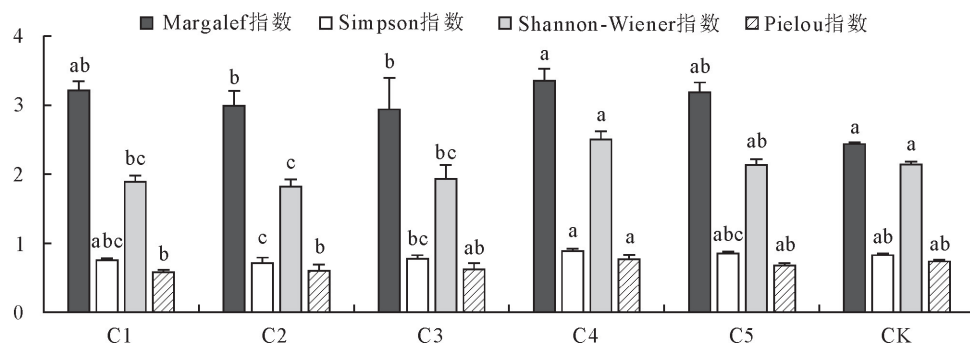


图 1 各类型样地草本层植物的多样性指数

Fig. 1 Diversity index of herbaceous layer plants in all types of plots

## 2.3 不同林分草本层植物群落相似性分析

对各类型样地草本层植物的群落相似系数进行 K-均值聚类分析,以 0.34 与 0.44 为最终聚类中心将群落进行划分,群落相似系数 $<0.34$ ,表示群落相似性较低,群落相似系数 $>0.44$ ,则表示群落相似性较高。由表 3 可知,侧柏-刺槐混交林与天然草地、侧柏纯林、侧柏-山桃和侧柏-山杏混交林的群落相似系数 $<0.34$ ,群落相似性较低,侧柏-榆树混交林与侧柏-山桃混交林的群落相似系数 $>0.44$ ,群落相似性较高。由此可见,各类型样地草本层植物群落的物种组成之间存在差异,且侧柏-刺槐混交林与其他类型样地草本层植物的群落组成之间差异较大。

## 2.4 不同林分草本层植物生物量分析

如图 2 所示,各类型样地间草本层植物的总生物量表现为侧柏-榆树混交林( $445.20 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-山杏混交林( $332.37 \text{ g/m}^2$ )>天然草地( $318.88 \text{ g/m}^2$ )>侧柏纯林( $291.13 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-山桃混交林( $262.17 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-刺槐混交林( $237.96 \text{ g/m}^2$ );地上生物量表现为侧柏纯林( $141.97 \text{ g/m}^2$ )>天然草地( $113.71 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-刺槐混交林( $65.29$

$\text{g/m}^2$ )>侧柏-山桃混交林( $64.00 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-山杏混交林( $50.87 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-榆树混交林( $59.21 \text{ g/m}^2$ );地下生物量表现为侧柏-榆树混交林( $394.33 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-山杏混交林( $273.17 \text{ g/m}^2$ )>天然草地( $205.17 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-山桃混交林( $198.17 \text{ g/m}^2$ )>侧柏-刺槐混交林( $172.67 \text{ g/m}^2$ )>侧柏纯林( $149.17 \text{ g/m}^2$ )。其中,各类型样地草本层植物的地上生物量之间差异不显著,根据图 2 可知,相对于天然草地,侧柏人工林下草本层植物在水平空间的分布上存在较大的异质性;各类型样地草本层植物的地下生物量之间差异显著,侧柏-山杏混交林与侧柏纯林和侧柏-榆树混交林下草本层植物的地下生物量之间存在显著差异。根据图 2 可知,侧柏-榆树和侧柏-山杏混交林下草本层植物在营养物质的储存上存在较大的异质性。

## 2.5 草本层植物多样性及其生物量与林地特征之间的相关性

由表 4 可知,林地特征与林下草本层植物的  $\alpha$  多样性指数及其生物量之间存在不显著的相关关系( $P>0.05$ ),但  $\alpha$  多样性的各指数之间关系密切。

其中,Shannon-Wiener 指数( $H$ )与 Margalef 指数( $M$ )之间呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),与 Simpson 指数( $D$ )之间呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ );Pielou 指数( $P$ )与 Simpson 指数( $D$ )和 Shannon-Wiener 指数( $H$ )之间呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ )。此外,林下草本层植物的生物量与  $\alpha$  多样性指数之间关系密切,且地上生物量与地下生物量之间呈不显著的正相关关系( $P > 0.05$ )。其中,地下生物量与 Simpson 指数( $D$ )之间呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),与 Shannon-Wiener 指数( $H$ )和 Pielou 指数( $P$ )之间呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ )。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 林分类型对林下草本层植物物种组成的影响

研究发现,林分类型对林下草本层植物的物种组成存在影响。在 5 种侧柏人工林及天然草地中出现的草本层植物共有 49 种,隶属 20 科 46 属,以禾本科和菊科植物为主。其中,天然草地中草本层植物的物种数为 18 种,5 种侧柏林下草本层植物的物

表 3 各类型样地草本层植物的群落相似系数

Table 3 Community similarity coefficient of herbaceous layer plants in all types of plots

	C1	C2	C3	C4	C5	CK
C1	1					
C2	0.27	1				
C3	0.36	0.27	1			
C4	0.38	0.38	0.53	1		
C5	0.39	0.34	0.41	0.42	1	
CK	0.36	0.27	0.38	0.35	0.41	1

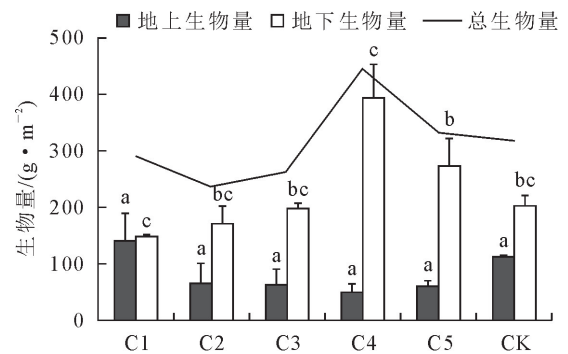


图 2 各类型样地草本层植物的生物量

Fig. 2 The biomass of herbaceous layer plants in all types of plots

表 4 林下草本层植物的  $\alpha$  多样性及其生物量与林地特征之间的相关性

Table 4 Relationship between  $\alpha$  diversity and biomass of understory herbaceous layer plants and woodland characteristics

	$M$	$D$	$H$	$P$	地上生物量	地下生物量
$M$	1					
$D$	0.403	1				
$H$	0.625 *	0.938 **	1			
$P$	0.071	0.854 **	0.782 **	1		
密度	0.304	0.224	0.209	0.116	-0.145	-0.032
郁闭度	-0.059	0.106	0.018	0.149	-0.468	-0.289
更新潜力	-0.271	0.206	0.136	0.474	0.092	0.408
平均胸径	-0.512	-0.078	-0.152	0.33	-0.191	-0.046
平均树高	-0.478	-0.05	-0.105	0.392	-0.197	0.088
平均冠幅	-0.172	-0.003	-0.074	0.052	-0.339	-0.275
地上生物量	0.38	-0.143	-0.006	-0.288	1	0.118
地下生物量	0.512	0.623 *	0.774 **	0.647 **	0.118	1

注:  $M$ , Margalef 指数;  $D$ , Simpson 指数;  $H$ , Shannon-Wiener 指数;  $P$ , Pielou 指数; \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 。

种数由高到低依次为侧柏纯林下 27 种、侧柏-榆树混交林下 24 种、侧柏-山杏混交林下 23 种、侧柏-山桃混交林下 22 种、侧柏-刺槐混交林下 20 种。从物种数来看,各类型样地草本层植物的物种数为侧柏纯林 > 侧柏混交林 > 天然草地,这与巫翠华<sup>[25]</sup>的研究结果一致。一方面,相对于侧柏纯林,侧柏混交林的遮阳能力较强,不能很好地满足林下草本层植物的光照需求,因此侧柏混交林下草本层植物的物种数低于侧柏纯林。另一方面,天然草地内缺少遮阴,阳光照射时间长,土壤水分被大量蒸发,导致草本层植物生长受水分限制,因此天然草地中草本层植物的物种数低于侧柏人工林<sup>[26]</sup>。从物种组成来看,各

类型样地草本层植物的物种组成不同,除侧柏-榆树混交林与侧柏-山桃混交林下草本层植物群落的相似性较高外,其他类型样地中草本层植物群落的相似性大多处于中等水平,这与高艳鹏<sup>[27]</sup>的研究结果一致。一方面,相对于侧柏纯林,侧柏混交林下凋落物的输入量较大,能给予土壤更丰富的养分,促进草本层植物的生长<sup>[22]</sup>。另一方面,受树种冠幅、树形及生长速度的影响,林内所能形成的垂直复层结构不同<sup>[26]</sup>,进而形成不同的林内生境,导致了特定植物群落的形成<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 林分类型对林下草本层植物多样性的影响

研究发现,林分类型对林下草本层植物的物种

多样性存在影响。该区域草本层植物的  $\alpha$  多样性表现为侧柏-榆树、侧柏-山杏混交林 > 天然草地 > 侧柏纯林 > 侧柏-刺槐、侧柏-山桃混交林, 且侧柏人工林下草本层植物的  $\alpha$  多样性与林地特征之间呈不显著的相关性 ( $P > 0.05$ ),  $\alpha$  多样性的各指数之间呈显著的相关关系 ( $P < 0.05$ )。这与徐舟<sup>[28]</sup>、辛云玲<sup>[29]</sup>的研究结果一致, 物种对于不同的生境具有一定的适应性。相对于侧柏纯林, 侧柏混交林的片层结构更加复杂, 且树种配置不同, 片层结构的复杂程度不同, 适宜林下生长的草本层植物不同, 导致不同林分类型的侧柏人工林下草本层植物的物种多样性之间存在差异。黄婷<sup>[30]</sup>、赵耀等<sup>[31]</sup>关于植物多样性与生态因子之间存在相关性的研究结果表明, 生态因子通过影响林内水热条件, 进而影响林下草本层植物的生长。该区域的人工林采用人工灌溉, 灌溉频率为 2 d/次, 林内水分充足, 对草本层植物生长的限制作用较小, 而光照与温度对草本层植物物种多样性的影响较大。因此, 林下草本层植物的  $\alpha$  多样性与林地特征之间存在一定的相关关系, 但相关性不显著。此外, 混交林的不同树种之间存在不同程度的竞争关系, 这种竞争影响草本层植物的生长发育, 是造成不同类型侧柏人工林下草本层植物多样性之间存在差异的原因之一。由此可见, 在兰州地区水分是影响植被多样性的主要因素, 其次为光照和温度条件, 故而在提倡营造混交林的同时应注意林内树种配置, 形成稳定的生态系统, 促进林下草本层植物群落的物种多样性<sup>[33]</sup>。

### 3.3 林分类型对林下草本层植物生物量的影响

研究发现, 林分类型对林下草本层植物的生物量存在影响。该区域草本层植物的总生物量为侧柏-榆树混交林 > 侧柏-山杏混交林 > 天然草地 > 侧柏纯林 > 侧柏-山桃混交林 > 侧柏-刺槐混交林, 且各类型侧柏人工林下草本层植物的地上生物量之间存在不显著差异 ( $P > 0.05$ ), 地下生物量之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 地上生物量与地下生物量之间存在不显著差异 ( $P > 0.05$ )。相对于天然草地, 侧柏-榆树混交林下草本层植物的地上生物量最小, 地下生物量最大, 其次为其他类型的侧柏混交林, 侧柏纯林下草本层植物的地上生物量最大, 地下生物量最小, 这与王玉<sup>[32]</sup>、邵水仙等<sup>[33]</sup>和李萍等<sup>[34]</sup>关于混交林下草本层植物的生物量大于纯林的研究结果相似。一方面, 林层结构影响林内的光照和温度。相对于侧柏纯林, 侧柏混交林的片层结构复杂, 林内光照面积小、时长短, 林下温度低, 草本层植物生长较慢, 地上生物量较小。另一方面, 种间竞争影响林内养分分配。相对于侧柏纯林, 侧柏混交林内的物

种组成较为丰富, 种间竞争压力大, 对于水分、养分的争夺更为激烈, 草本层植物的地下生物量更大。由于该区域采用人工灌溉, 光照和温度并非林下草本层植物生长发育的决定性因素, 所以林下草本层植物的地上生物量之间差异不显著, 地下生物量之间差异显著, 地上生物量与地下生物量之间的相关关系不显著, 且相对于纯林, 混交林的林地生产力更高<sup>[33]</sup>, 水土保持能力更强<sup>[16]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 刘贵峰, 刘玉平, 额尔德木图, 等. 罕山自然保护区 4 种典型天然次生林林下草本植物物种多样性[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 31-37.  
LIU G F, LIU Y P, Eerdemutu, et al. Species diversity of understory herbaceous plants in four typical natural secondary forests in Hanshan Nature Reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 31-37. (in Chinese)
- [2] 杨玉婷, 石玉林, 李战刚, 等. 陕北“三北”防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6542-6551.  
YANG Y T, SHI Y L, LI Z G, et al. Community characteristics of understory herb layer and its relationships with stand structure and soil nutrient availability in the Three-North Shelterbelt of Shaanxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6542-6551. (in Chinese)
- [3] 马克平. 生物多样性与生态系统功能的实验研究[J]. 生物多样性, 2013, 21(3): 247-248, 390-391.  
MA K P. Studies on biodiversity and ecosystem function via manipulation experiments[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(3): 247-248, 390-391. (in Chinese)
- [4] MÁRIALIGETI SÁRA, et al. Environmental drivers of the composition and diversity of the herb layer in mixed temperate forests in Hungary[J]. Plant Ecology, 2016, 217(5): 549-563.
- [5] 朱媛君, 杨晓晖, 时忠杰, 等. 林分因子对张北杨树人工林林下草本层物种多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2869-2879.
- [6] 张柳桦, 齐锦秋, 李婷婷, 等. 林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5709-5717.  
ZHANG L H, QI J Q, LI T T, et al. Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Wenfeng Mountain, Xinjin County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5709-5717. (in Chinese)
- [7] 段劼, 马履一, 贾黎明, 等. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1431-1441.  
DUAN J, MA L Y, JIA L M, et al. Effect of thinning on *Platycladus orientalis* plantation and the diversity of undergrowth vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1431-1441. (in Chinese)
- [8] LIU J, LIU D T, XU K, et al. Biodiversity explains maximum variation in productivity under experimental warming, nitrogen addition and grazing in mountain grasslands[J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(20): 10094-10112.

- [9] 赵娜,李玉灵,张劲松,等.冀北山地天然林与人工林植被物种多样性研究[J].西北林学院学报,2011,108(2):15-21.  
ZHAO N,LI Y L,ZHANG J S,*et al.* Plant species diversity of natural forests and plantations of in mountainous land in North Hebei[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,108(2):15-21. (in Chinese)
- [10] TOLERA F, TESSEMA Z. Influences of tree species and canopy cover on aboveground biomass yield and ground cover of herbaceous plants in Eastern Oromia, Ethiopia[J]. American Journal of Agriculture and Forestry, 2021, 9(4): 233.
- [11] 李朝,周伟,关庆伟,等.徐州石灰岩山地侧柏人工林生物量及其影响因子分析[J].安徽农业大学学报,2010,37(4):669-674.  
LI Z,ZHOU W,GUAN Q W,*et al.* Biomass and its influencing factors of *Platycladus orientalis* plantation in the limestone mountains of Xuzhou[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2010, 37(4): 669-674. (in Chinese)
- [12] 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.  
MA J,XUE J H,WU Y B,*et al.* Diversity and above-ground biomass of undergrowth plants of 3 plantations in Karst mountainous region of Guizhou Province and their correlation [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2021, 30(1): 17-26. (in Chinese)
- [13] 刘雨晖.细叶青冈与杉木混交林生物量与林下植物多样性[D].福州:福建农林大学,2018.
- [14] 曲红.晋西黄土高原人工林营造对植物多样性的影响[D].北京:北京林业大学,2008.
- [15] 王万鹏,俞诗源,钟芳,等.兰州市南北两山植物动物资源[M].兰州:甘肃科学技术出版社,2010:154.
- [16] 刘小娥,苏世平,李毅.兰州市南北两山5种典型人工林土壤的渗透特性[J].水土保持通报,2021,41(3):69-75.  
LIU X E,SU S P,LI Y. Soil infiltration characteristics under five forest types in Southern and Northern Mountains of Lanzhou City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 69-75. (in Chinese)
- [17] 马维伟,王辉,连树清.兰州北山侧柏人工林地土壤水分研究[J].土壤,2009,41(1):102-106.  
MA W W,WANG H,LIAN S Q. Soil moisture physical property of *Platycladus orientalis* plantation in Northern Mountain of Lanzhou City[J]. Soils, 2009, 41(1): 102-106. (in Chinese)
- [18] 朱潮,武利玉,张崇庆,等.兰州市北山典型侧柏人工林分叶片与土壤生态化学计量特征[J].水土保持学报,2021,35(4):361-368.  
ZHU C,WU L Y,ZHANG C Q,*et al.* Ecological stoichiometric characteristics of leaves and soil in a typical *Platycladus orientalis* plantation in Beishan of Lanzhou City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 361-368. (in Chinese)
- [19] 武利玉,苏世平,王蕙.兰州南北两山绿化区植物与植被类型初查[J].中国沙漠,2006(4):564-568.
- [20] 许金凤,马红梅,张建全,等.兰州南北两山种子植物区系[J].草业科学,2016,33(3):408-423.
- [21] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J].生物多样性,2009,17(6):533-548.  
FANG J Y,WANG X P,SHEN Z H,*et al.* Methods and protocols for plant community inventory [J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533-548. (in Chinese)
- [22] 张涵丹,康希睿,邵文豪,等.不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征[J].生态学报,2021,41(6):2118-2128.  
ZHANG H D,KANG X R,SHAO W H,*et al.* Characteristics of herbaceous plant biodiversity in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different community structures [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2118-2128. (in Chinese)
- [23] 王玉婕.乌拉特中旗荒漠草原草本群落生物量研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [24] 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2018:492.
- [25] 巫翠华.刺槐人工林群落林下植物多样性研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2021.
- [26] 朱朵菊.刺槐对黄土丘陵区植物群落结构与功能的影响[D].杨陵:西北农林科技大学,2018.
- [27] 高艳鹏.半干旱黄土丘陵沟壑区主要树种人工林密度效应评价[D].北京:北京林业大学,2011.
- [28] 徐舟.晋西黄土区几种典型林分多样性及功能评价研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [29] 辛云玲.陕北黄土区水土保持林分结构特征研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [30] 黄婷.陕北黄土丘陵区典型人工植物群落特征及物种多样性研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2017.
- [31] 赵耀,王百田.晋西黄土区不同林地植物多样性研究[J].北京林业大学学报,2018,40(9):45-54.  
ZHAO Y,WANG B T. Plant diversity of different forestland in the loess region of Western Shanxi Province, Northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(9): 45-54. (in Chinese)
- [32] 王玉.黄土高原半干旱区人工林群落物种多样性研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [33] 邵水仙,李红丽,董智,等.退化砂石山地人工林林下植物群落特征与物种多样性[J].水土保持研究,2015,22(5):146-151, 157.  
SHAO S X,LI H L,DONG Z,*et al.* Community characteristics and species diversity of understory of plantation forests on degraded sandstone mountainous regions[J]. Research Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 146-151, 157. (in Chinese)
- [34] 李萍,朱清科,刘中奇,等.半干旱黄土区地上生物量对立地因子的响应[J].中国水土保持科学,2012,10(2):50-54.  
LI P,ZHU Q K,LIU Z Q,*et al.* Response of aboveground biomass to the standing condition factors in semi-arid region of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 50-54. (in Chinese)