

# 华北落叶松天然林密度对林下植被物种组成和多样性的影响研究

丁继伟<sup>1,2</sup>, 张芸香<sup>1</sup>, 郭跃东<sup>1</sup>, 杨三红<sup>1</sup>, 任 达<sup>1,2</sup>, 贺志龙<sup>1,2</sup>, 郭晋平<sup>1,2\*</sup>

(1. 山西农业大学 林学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学 研究生院, 山西 太谷 030801)

**摘 要:**研究林分密度对林下植被物种组成和多样性的影响是研究森林结构与功能关系的基础,也是森林经营中林分结构调整技术的基础,为天然林的经营管理和人工林的近自然经营提供依据。试验采用标准地调查法,记录不同林分密度标准地的每个小样方内出现的所有灌木和草本植物种名、个体数,计算各多样性指数并进行分析。结果表明,研究区华北落叶松天然林林下植被物种组成较为贫乏,有灌木 8 种,草本 22 种;从不同角度分析草本与灌木物种丰富度对林分密度变化的敏感程度得到的结果不同,从物种丰富度变化幅度上看灌木植物对林分密度的变化较为敏感,而从物种丰富度达到峰值的先后顺序来看,草本植物更为敏感;林下植被多样性对林分密度持续增大的响应表现为非单一变化趋势的规律,随着林分密度的增大,林下植被多样性指数呈现先增大后减少的变化规律,林下植被种类先增多后减少,而均匀度指数呈逐渐下降的趋势;五台山华北落叶松天然林林下植被能在 1 072~1 216 株/hm<sup>2</sup> 密度范围保持较高的林下物种多样性水平。

**关键词:**华北落叶松天然林;林分密度;林下植被;物种组成;多样性

**中图分类号:**S791.22      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2018)04-0010-07

## Influences of the Density on Understory Species Composition and Diversity of *Larix principis-rupprechtii* Natural Forest

DING Ji-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun-xiang<sup>1</sup>, GUO Yue-dong<sup>1</sup>, YANG San-hong<sup>1</sup>, REN Da<sup>1,2</sup>,  
HE Zhi-long<sup>1,2</sup>, GUO Jin-ping<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;  
2. Graduate School, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**Abstract:** The study of the effect of stand density on the species composition and diversity of undergrowth vegetation is the basis for understanding the relationship between forest structure and function, and also the basis for the adjustment technology of stand structure in forest management, which would be used in the management of natural forest and close-to-nature management of plantations. Methods of recording names and quantities of all shrubs and herbages in quadrat of the standard plots were adopted to calculate and analyze the diversity indexes. The results indicated that the species composition of *Larix principis-rupprechtii* forest was simple, only 8 shrubs and 22 herbs were recorded. Different results were obtained on the sensitivity of species richness of herbs and shrubs to the changes of stand density from different angles; judging from the change of species richness, shrub plants were more sensitive to the changes of stand density, and from the order of the appearance of peak value, herbaceous plants were more sensitive. The responses of species diversity of undergrowth to the increase of stand density were diverse: with the increase of stand density, the diversity index of undergrowth vegetation increased first and then decreased, the species

收稿日期:2017-12-29    修回日期:2018-02-20

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201404417)。

作者简介:丁继伟,男,在读硕士,研究方向:森林生态系统经营。E-mail:1632027298@qq.com

\* 通信作者:郭晋平,男,教授,博士后,博士生导师,研究方向:景观生态学。E-mail:jinpinguo@126.com

of understory vegetation had the same variation trend,while the evenness index decreased. The understory vegetation of *Larix principis-rupprechtii* could maintain a higher species diversity in the density range of 1 072—1 216 /hm<sup>2</sup> in Mount Wutai.

**Key words:***Larix principis-rupprechtii* forest; stand density; understory vegetation; species composition; diversity

林分密度是指单位面积林地上的立木个体数量,是森林群落结构的基础指标,也是森林培育过程中能够人为控制的主要因子。林下植被物种多样性是森林群落的重要组成部分,对维持森林生产力、稳定性、抗逆性和生态系统功能起着重要作用,也是森林群落稳定性和演替趋势的重要指标<sup>[1-4]</sup>。林分密度对林下植被的种类组成有显著影响,导致林下灌木层与草本层的物种组成产生明显分化<sup>[5-7]</sup>,调整林分密度可以显著改变林下植被的群落结构和物种多样性<sup>[8-10]</sup>。因此,研究天然林林分密度对林下植被物种组成和多样性的影响是研究森林结构与功能关系的基础,也是森林经营中林分结构调整技术的基础。

许多研究表明,随着林分密度增大,林下灌木和草本植物的丰富度指数、多样性指数表现出减小趋势<sup>[11-14]</sup>;然而,也有研究表明,林下植被多样性对林分密度的响应具有非同步性<sup>[15-17]</sup>,而且林分密度对灌木层和草本层的影响程度不同,灌木层对林分密度变化的响应比草本层大<sup>[18-19]</sup>。可见,不同区域、不同森林类型和树种,林下植被与林分密度的关系还有很大的不确定性,需要通过更多的研究以揭示其内在规律。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是松科落叶松属中国特有乔木树种,是华北地区高山针叶林带的主要树种,多分布于山西、河北山地上部 1 500~2 800 m 海拔带,常以纯林分布,或与白扦、青扦、白桦、红桦、山杨及山柳等针阔叶树种形成混交林,也是分布区内重要的人工速生丰产用材林树种,在区域森林生态系统和森林资源中占有重要地位。因此,通过对华北落叶松林分密度与林下植被组成结构和物种多样性关系的研究,有助于揭示林

分密度对林下植物群落和物种多样性的影响和调节规律,为华北落叶松天然林科学经营、管理和人工林近自然培育提供依据<sup>[20]</sup>。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地区位于山西省五台山国有林管理局伯强林场的太平沟作业区(39°04'N,113°38'E),处于太行山北段的五台山北坡,该作业区海拔 1 950~2 450 m,属于温带大陆性气候,年均温 -4℃,7 月均温 10℃,1 月均温 18. 8℃,年平均降雨量 500~600 mm,无霜期 160 d。

### 1.2 标准地设置和野外调查

标准地设在五台山国有林管理局伯强林场太平沟作业区,在踏查基础上选择华北落叶松天然林,阴坡半阴坡,坡位中部和中上部,坡度 19°~30°,海拔 2 136~2 309 m,林分年龄 60~74 a,林分平均胸径 17. 2~24. 4 cm,林分平均高 10. 06~16. 75 m,林分密度 576~1 568 株/hm<sup>2</sup>。共设面积 25 m×25 m 的标准地 9 块,在每块标准样地的对角线 1/4 处分别设 2 m×2 m 的林下植被调查重复样方 4 块,共计 36 块。

在设好的标准地内进行标准地调查,记录标准地的经纬度、海拔、坡向、坡位、坡度、土壤类型等立地因子,从下坡部位一侧开始按顺序每木编号,在胸高部位标记测径位置和方向,以起始角为原点,测定立木定位坐标,测定其胸径、树高及冠幅。在每个样方内进行林下植被群落学调查,记录样方内出现的所有灌木和草本植物种名、个体数(株数、丛数)、高度和盖度。标准地概况见表 1。

表 1 标准地概况  
Table 1 General information of sample plots

样地号	海拔/m	坡向	坡度/(°)	坡位	林龄/a	林分密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	林分平均 胸径/cm	林分平均 高度/m
1	2 243	半阴坡	22	中	71	576	24. 36	14. 84
2	2 216	半阴坡	29	中	65	656	23. 83	15. 15
3	2 290	半阴坡	22	中	64	848	21. 86	15. 34
4	2 238	半阴坡	19	中	70	896	19. 8	15. 17
5	2 205	半阴坡	30	中	74	1 072	18. 6	15. 39
6	2 295	阴坡	23	中	60	1 216	18. 16	14. 96
7	2 230	阴坡	25	中	65	1 312	17. 73	14. 72
8	2 309	半阴坡	23	中上	65	1 488	17. 58	15. 06
9	2 136	半阴坡	20	中下	70	1 568	17. 27	15. 13

1.3 数据整理和指标计算

1.3.1 物种重要值的计算 根据样方内调查统计的各物种的株数计算其密度,由物种在样方内出现的次数计算频度,再按以下公式计算各物种的相对密度、相对频度,并根据各物种盖度计算相对盖度,用 3 个相对指标计算物种的重要值。

相对密度=(某种的密度/所有种的密度之和)  
×100%

相对频度=(某种的频度/所有种的频度之和)  
×100%

相对盖度=(某种的盖度/所有种的盖度之和)  
×100%

重要值=相对密度+相对频度+相对盖度

1.3.2 物种多样性指数的计算 物种丰富度指数

S:样方内所有物种的总数

Simpson 指数: $D=1-\sum_{i=1}^s P_i^2$

Shannon-Weiner 指数: $H=-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$

Pielou 均匀度指数: $J=\frac{-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i}{\ln S}$

式中,S 是群落中的物种总数, $P_i$  是某物种的个体数占群落中所有物种总个体数的比值。

2 结果与分析

2.1 不同密度林下植被物种组成分析

不同林分密度林下植被的物种组成及其重要值见表 2。

表 2 不同密度华北落叶松林下植被物种重要值

Table 2 Species and their importance values of understory vegetation in *Larix principis-rupprechtii* natural stands with different stand density

物种	林分密度/(trees · hm <sup>-2</sup> )								
	576	656	848	896	1 072	1 216	1 312	1 488	1 568
八宝茶( <i>Euonymus przewalskii</i> )	0.16	0.35	0.24	0.51	0.19	0.15	0.19	0.27	0.63
五台忍冬( <i>Lonicera szechuanica</i> )	—	0.22	—	—	0.21	0.10	0.15	—	—
刺果茶藨子( <i>Ribes burejense</i> )	—	—	—	0.15	—	0.31	0.26	—	0.10
三裂绣线菊( <i>Spiraea trilobata</i> )	—	—	—	—	0.22	0.24	0.17	—	—
六道木( <i>Abelia biflora</i> )	—	—	—	—	0.23	0.35	—	0.20	—
山刺玫( <i>Rosa davurica</i> )	—	—	0.11	—	—	—	0.16	—	—
西北栒子( <i>Cotoneaster zabelii</i> )	—	—	—	—	—	0.12	—	—	—
紫羊茅( <i>Festuca rubra</i> )	1.31	1.42	1.61	—	1.48	1.52	1.62	—	—
苔草( <i>Carex</i> sp.)	0.90	0.62	0.54	1.27	—	—	—	2.04	1.82
高羊茅( <i>Festuca elata</i> )	—	—	—	—	0.56	—	0.39	—	—
早熟禾( <i>Poa annua</i> )	—	—	—	—	0.16	—	0.31	—	—
羊草( <i>Leymus chinensis</i> )	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—
黑麦草( <i>Lolium perenne</i> )	—	—	—	—	—	—	—	—	0.20
野草莓( <i>Fragaria vesca</i> )	—	0.80	0.46	0.80	0.44	0.48	0.30	0.33	0.42
华北楼斗菜( <i>Aquilegia yabeana</i> )	0.56	0.12	—	0.83	0.17	0.98	—	—	0.15
卷耳( <i>Cerastium arvense</i> )	0.35	—	0.22	0.28	0.65	—	—	0.20	—
缬草( <i>Valeriana officinalis</i> )	—	—	0.08	—	—	0.34	—	—	—
窃衣( <i>Torilis scabra</i> )	—	—	0.21	0.21	—	—	0.43	0.48	—
茜草( <i>Rubia cordifolia</i> )	—	0.11	—	0.08	—	—	0.74	—	—
驴蹄草( <i>Caltha palustris</i> )	—	—	—	—	—	0.36	—	—	—
堇菜( <i>Viola verecunda</i> )	—	0.19	—	—	0.27	—	—	—	—
平车前( <i>Plantago depressa</i> )	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—
苣荬菜( <i>Sonchus arvensis</i> )	—	—	—	0.12	—	—	—	—	—
老鹳草( <i>Geranium wilfordii</i> )	—	—	—	—	0.80	—	—	—	—
林荫千里光( <i>Senecio nemorensis</i> )	—	—	—	—	—	0.34	—	—	—
糙苏( <i>Phlomis umbrosa</i> )	—	—	—	—	—	0.15	—	—	—
蕨菜( <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i> )	—	—	—	—	—	—	—	1.06	—
唐松草( <i>Thalictrum aquilegiifolium</i> var. <i>sibiricum</i> )	—	—	—	—	—	—	—	0.10	—
黄精( <i>Polygonatum sibiricum</i> )	—	—	—	—	—	—	—	—	0.17
鹿蹄草( <i>Pyrola calliantha</i> )	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—

由表 2 可以看出,华北落叶松天然林从 576~1 568株/hm<sup>2</sup> 不同密度林下植被共出现物种 30 个,分属 19 科 29 属;其中,灌木 8 种,分属 5 科 8 属,草本 22 种,分属 14 科 21 属。

在不同密度林分中,禾本科紫羊茅、莎草科苔草构成了草本植被本底,高羊茅、早熟禾、羊草、黑麦草等是替代种,华北稷斗菜、野草莓是斑块状或零星分布的双子叶草本植物的代表种,卷耳、缬草、窃衣等属于相应的替代种;耐阴性很强的矮小灌木八宝茶是各密度林分中灌木植物的代表种,五台忍冬、刺果茶藨子、三裂绣线菊、六道木等也是林下常出现的灌木种。

### 2.2 林下植被物种丰富度指数随林分密度的变化

由表 3 可以看出,物种丰富度指数随林分密度的增大表现为单峰态响应模式,在林分密度为 1 216 株/hm<sup>2</sup> 时林下植被的物种丰富度指数达到峰值。

表 3 不同林分密度下物种多样性指数

Table 3 Specie diversity indexes of understory vegetation in stands with different densities				
林分密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	物种 丰富度	辛普森 指数(D)	香农-维纳 指数(H)	Pielou 均匀度 指数(J)
576	7	0.534	1.124	0.627
656	8	0.507	1.088	0.523
848	9	0.628	1.197	0.576
896	9	0.587	1.116	0.508
1 072	12	0.618	1.202	0.484
1 216	13	0.684	1.294	0.490
1 312	11	0.660	1.190	0.464
1 488	8	0.425	0.926	0.402
1 568	7	0.379	0.805	0.387

由图 1 可见,林下植被灌木和草本植物物种数在不同林分密度之间的差异较大,灌木种数变化在 1~6,而草本植物种数变化在 5~8。其中,灌木种在林分密度 1 100~1 300 株/hm<sup>2</sup> 出现峰值,草本植物种在林分密度 1 000~1 200 株/hm<sup>2</sup> 出现峰值。

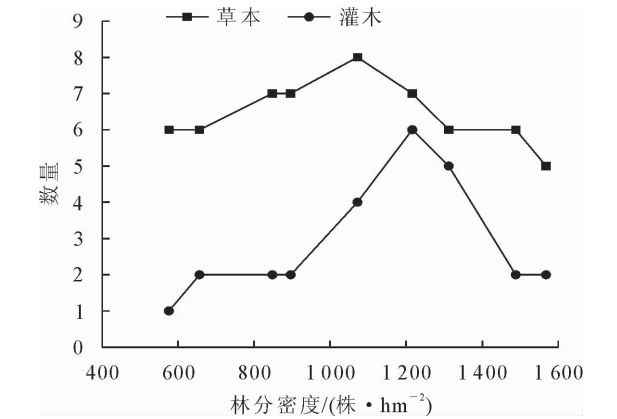


图 1 不同密度林分下灌木与草本物种数变化

Fig. 1 Variation of shrubs and herbs with stand density

### 2.3 不同密度林下植被物种的分类统计

从图 2 可以看出,林下植被物种的科、属数量随林分密度的变化趋势与物种丰富度指数的变化趋势一致。

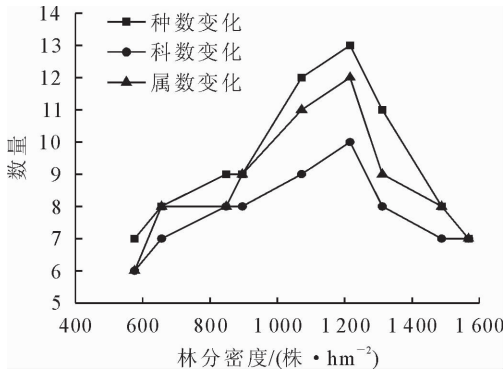


图 2 不同密度林分下植物物种科属数

Fig. 2 Variation of families and genus with stand density

### 2.4 不同密度林下植被物种多样性的变化

从图 3 可以看出,香农-维纳指数和辛普森指数的表征作用相近,以香农维纳指数的区分度更好。林分密度对林下植被物种多样性有显著影响,在 576~1 216 株/hm<sup>2</sup> 范围内,林下植被多样性随林分密度增大而增加,在 1 216~1 568 株/hm<sup>2</sup> 范围内,林下植被物种多样性指数随林分密度增大而明显下降,与物种丰富度指数的变化趋势一致。

林下植被物种均匀度指数随林分密度的变化见图 4。从图 4 可以看出,林下植被物种 Pielou 均匀度指数随林分密度增大而减小。可见,林分密度对林下植物个体空间分布格局有显著影响。

## 3 结论与讨论

### 3.1 讨论

据不完全统计,组成山西华北落叶松林的高等植物有 125 种分别属于 41 科 89 属。研究地区的华北落叶松天然林在 576~1 568 株/hm<sup>2</sup> 密度范围内林下植被共出现物种 30 种,分属 19 科 29 属;其中,灌木 8 种,分属 5 科 8 属,草本 22 种,分属 14 科 21 属,植物种类较少,多集中于禾本科、蔷薇科、毛茛科、菊科和忍冬科。草本植物以禾本科紫羊茅和莎草科苔草最为常见,构成草本植被本底;分布较广的灌木植物多为矮生的卫矛科八宝茶,而忍冬科与蔷薇科较高的灌木种分布稀疏。田平<sup>[9]</sup>等对太岳山华北落叶松人工林进行调查后发现,林下植被共有 41 种,其中灌木 4 种,草本 37 种,且植物种类有些许差异,多集中于菊科、毛茛科、百合科和忍冬科。而差异的形成可能与林分密度大小和研究地区纬度高低有关。

表 4 不同林分密度华北落叶松林下植被物种组成

Table 4 Understory specie components in *L. principis-rupprechtii* stands with different stand densitiys

分类	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )								
	576	656	848	896	1 072	1 216	1 312	1 488	1 568
科数	6	7	8	8	9	10	8	7	7
属数	6	8	8	9	11	12	9	8	7
种数	7	8	9	9	12	13	11	8	7

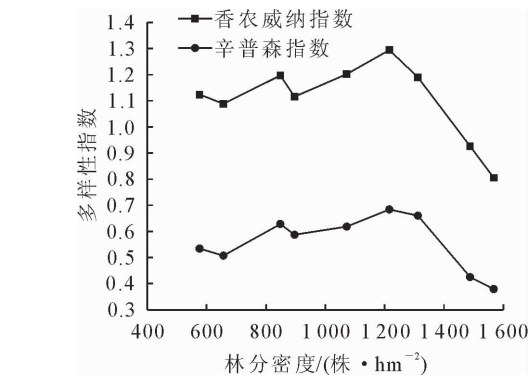


图 3 不同密度林分下多样性指数变化  
Fig. 3 Variation trend of diversity index with different stand densities

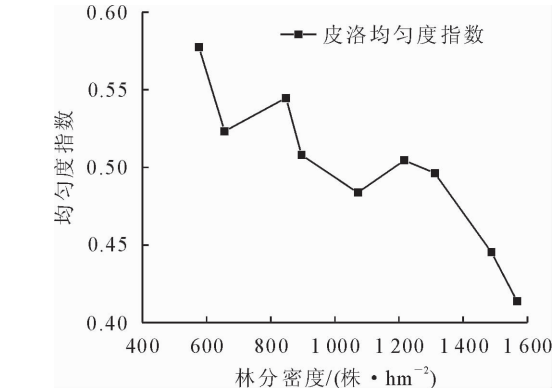


图 4 不同密度林分下均匀度指数变化  
Fig. 4 Variation trend of evenness index with different stand densities

研究发现,林下植被灌木和草本植物物种数在不同林分密度之间的差异较大。从物种丰富度变化幅度上来看,灌木植物对于林分密度的变化较为敏感,灌木植物种数在 1~6,草本物种数变化范围在 5~8;而从达到各自峰值的先后顺序来看草本植物对于林分密度的变化较为敏感,草本植物在 1 000~1 200 株/hm<sup>2</sup> 林分密度出现峰值,而灌木种在 1 100~1 300 株/hm<sup>2</sup> 林分密度下达到峰值。可见,从不同的角度分析,得到的草本与灌木植物对林分密度变化的敏感程度的结论不同。而李伟伟<sup>[6]</sup>等认为灌木与草本植物对林分密度变化引起林内生境改变的敏感度不同,灌木物种数随林分密度增大而减少的趋势较为缓慢,草本物种数的变化则较为明显。邹

扬<sup>[16]</sup>等发现,高寒区青海云杉人工林中灌木植物受林分密度的影响比草本植物大。吴多洋<sup>[21]</sup>等研究指出,灌木对生境的要求相对较高,因而对林分密度变化引起的生境改变更敏感。

一般认为,林分密度通过改变林分郁闭度等林内环境因子影响林下生境,进而对植被物种数和多样性造成影响<sup>[22]</sup>,且随着林分密度的增大,林下物种丰富度与多样性呈现减小的趋势<sup>[12,18]</sup>。研究地区华北落叶松天然林林下植被的科、属数随林分密度的增大与物种丰富度指数变化规律一致,与多样性指数均呈现先增大后减小的变化规律,表现为单峰态响应模式。在 576~1 216 株/hm<sup>2</sup> 密度范围内,都随林分密度增大而增加,而在 1 216~1 568 株/hm<sup>2</sup> 密度范围内,随林分密度增大而明显下降,在 1 216 株/hm<sup>2</sup> 林分密度下林下植被丰富度指数和多样性指数达到峰值。由此可见,在一定密度范围内,华北落叶松天然林林下植被物种丰富度和多样性指数对林分密度持续增大的响应表现为非单一变化趋势的规律。进一步的对比分析可以发现,在鲁绍伟<sup>[12]</sup>等和刘玉宝<sup>[18]</sup>的试验中,所设置标准样地的海拔远远低于 2 200 m,并不能反映高海拔地区林下植被物种多样性变化规律。

研究还发现,华北落叶松天然林林下植被均匀度指数随林分密度的增大呈现减小的趋势,说明林分密度对林下植被的分布状况影响显著。物种均匀度不受物种丰富度影响,只与物种个体数目在群落或环境中分布的均匀程度有关<sup>[16]</sup>,是对不同物种在个体数上接近程度的衡量。而林分密度能够影响林相与林内光照条件,林分密度较低时,林相整齐且林内光照充足,林下植被物种个体分布比较均匀;随着林分密度的增大,林相杂乱且透光性变差,致使林下植被物种个体分布散乱。可见,均匀度指数在反映林下植被多样性对林分密度变化的响应上有较好的效果。吕静娴<sup>[11]</sup>等、李伟伟<sup>[6]</sup>等通过研究得出与本试验一致的结论,即林下植被均匀度指数随林分密度的增大表现出减小的趋势;而周树平<sup>[17]</sup>等对柚木人工林林下植被的研究结果显示,林下植被均匀度指数随林分密度的增大呈现先增大后减小的趋势。

通过对比分析可以发现,周树平<sup>[17]</sup>等研究对象林龄仅为 14~16 a,而在对北京山区不同区域油松林的研究结果中,林分密度、林龄都是影响林下植被物种多样性的重要因子<sup>[23]</sup>,因此林龄可能是造成林下植被个体分布规律存在差异的原因。可见,林分密度对林下植被物种多样性的影响具有一定的复杂性,要想得出全面规律还需调整林分密度范围、结合林龄及所在地区等因子进行研究分析。

3.2 结论

研究区华北落叶松天然林林下植被物种组成较为贫乏,其中灌木 8 种,分属 5 科 8 属,草本 22 种,分属 14 科 21 属。

从不同角度分析草本与灌木物种丰富度对林分密度变化的敏感程度得到的结果不同,从物种丰富度变化幅度上看灌木植物对林分密度的变化较为敏感,而从物种丰富度达到峰值的先后顺序来看,草本植物更为敏感。

林下植被多样性对林分密度持续增大的响应表现为非单一变化趋势的规律——随着林分密度的增大,林下植被多样性指数呈现先增大后减少的变化规律,林下植被种类先增多后减少,而均匀度指数呈逐渐下降的趋势。

五台山华北落叶松天然林林下植被能在 1 072~1 216 株/hm<sup>2</sup> 密度范围保持较高的物种多样性水平。

参考文献:

[1] 寇萌,焦菊英,杜华栋,等. 黄土丘陵沟壑区不同立地条件草本群落物种多样性与生物量研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28 (1): 12-18.

KOU M, JIAO J Y, DU H D, *et al.* Species diversity and bio-mass of herbosa at different site conditions in the hilly-gullied loess plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 12-18. (in Chinese)

[2] 王健敏,刘娟,陈晓鸣,等. 云南松天然林及人工林群落结构和物种多样性比较[J]. 林业科学研究, 2010, 23(4): 515-522.

WANG J M, LIU J, CHEN X M, *et al.* Comparison of commu-nity structures and species diversity in natural forests and for-est plantation of *Pinus yunnanensis*[J]. Forest Research, 2010, 23(4): 515-522. (in Chinese)

[3] WANGCHUK K, DARANT A, WURZINGER M. Species rich-ness, diversity and density of understory vegetation along disturb-ance gradients in the Himalayan conifer forest[J]. Journal of Moun-tain Science, 2014, 11(5): 1182-1191.

[4] GADOW K, ZHANG G Q, DURRHEIM G. Diversity and pro-duction in an afromontane forest[J]. Forest Ecosystems, 2016, (4): 275-286.

[5] 郝建锋,王德艺,唐永彬,等. 人为干扰对江油地区马尾松人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23

(5): 729-735.

HAO J F, WANG D Y, TANG Y B, *et al.* Effects of human disturbance on species diversity of *Pinus massoniana* plantation in Jiangyou district, Sichuan Province[J]. Ecology and Environ-mental Sciences, 2014, 23(5): 729-735. (in Chinese)

[6] 李伟伟,谷建才,陈瑜,等. 林分密度对华北落叶松人工林林下植被多样性影响的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(6): 84-88.

LI W W, GU J C, CHEN Y, *et al.* Research on the effect of stand density on understory vegetation diversity of *Larix prin-cips-rupprechii* plantation [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(6): 84-88. (in Chinese)

[7] 罗素梅,何东进,谢益林,等. 林分密度对尾赤桉人工林群落结 构与生态效应的影响研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18 (4): 357-363.

LUO S M, HE D J, XIE Y L, *et al.* Effect of stand density on community structure and ecollogical effect of *Eucalyptusuro* Phylta×*E. eamaldensis* plantation[J]. Journal of tropical and Subtropica Botany, 2010, 18(4): 357-363. (in Chinese)

[8] 梁芳,郭晋平. 林下植物多样性影响因素研究进展[J]. 山西林 业科技, 2008(2): 33-35.

LIANG F, GUO J P. Study on factors of affecting understory plant diversity[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2008(2): 33-35. (in Chinese)

[9] 田平,韩海荣,康峰峰,等. 密度调整对太岳山华北落叶松人工 林冠层结构及林下植被的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 45-53.

TIAN P, HAN H R, KANG F F, *et al.* Influence of density ad-justment on canopy structure and understory vegetation of the *Larix principis-rupprechtii* plantment in Taiyue Mountain, Shanxi, China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 45-53. (in Chinese)

[10] 潘萍,宁金魁,赖国桢,等. 飞播马尾松林林分空间结构对林下 植被多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(11): 31-35.

PAN P, NING J K, LAI G Z, *et al.* Effects of stand spatial structure on understory vegetation diversity of aerial seeding *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Northeast For-estry University, 2016, 44(11): 31-35. (in Chinese)

[11] 吕婧娴,王得祥,张宋智,等. 小陇山林区不同密度油松人工林 林下物种多样性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学 版, 2010, 38(11): 49-56.

LV J X, WANG D X, ZHANG S Z, *et al.* Study on the species diversity of undergrowth in the different stand densities of *Pinus tabulaeformis* plantation of Xiaolongshan area [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2010, 38(11): 49-56. (in Chinese)

[12] 鲁绍伟,刘凤芹,余新晓,等. 华北土石山区不同造林密度的油 松林结构与功能研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 144-149.

LU S W, LIU F Q, YU X X, *et al.* Studys on the configuration and function of different density of *Pines* in rocky mountain area of Northern China[J]. Journal of Arid Land Resources and Enviroment, 2007, 21(9): 144-149. (in Chinese)

[13] 徐扬,刘勇,李国雷,等. 间伐强度对油松中龄人工林林下植被

多样性的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(3):135-138.

XU Y,LIU Y,LI G L,*et al.* Effects of the thinning intensity on the diversity of undergrowth vegetation in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition,2008,32(3):135-138. (in Chinese)

[14] 侯磊,张硕新,陈云明,等. 林分密度对人工油松林下植物的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(3):46-52.

HOU L,ZHANG S X,CHEN Y M,*et al.* Impact of stand density on the vegetation under artificial *Pinustabulaeformis* [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(3):46-52. (in Chinese)

[15] 李国雷,刘勇,吕瑞恒,等. 华北落叶松人工林密度调控对林下植被发育的作用过程[J]. 北京林业大学学报,2009,31(1):19-24.

LI G L,LIU Y,LV R H,*et al.* Responses of understory vegetation development to regulation of tree density in *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(1):19-24. (in Chinese)

[16] 邹扬,贺康宁,赵畅,等. 高寒区青海云杉人工林密度与林下植物多样性的关系[J]. 西北植物学报,2013,33(12):2543-2549.

ZOU Y,HE K N,ZHAO C,*et al.* Relationship between plantation density and the plants diversity under forest of *Picea crassifolia* in alpine region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2013,33(12):2543-2549. (in Chinese)

[17] 周树平,梁坤南,杜健,等. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究[J]. 植物研究,2017,37(2):200-210.

ZHOU S P,LIANG K N,DU J,*et al.* Research on understory vegetation and soil physical-chemical properties of teak plantation with difference stand densities [J]. Bulletin of Botanical Research,2017,37(2):200-210. (in Chinese)

[18] 刘玉宝. 29年生杉木林下植物多样性与密度的关系[J]. 福建林学院学报,2005,25(1):27-30.

LIU Y B. Relationship between undergrowth species diversity and stand density of 29-year-old Chinese fir plantations[J]. Journal of Fujian College of Forestry,2005,25(1):27-30. (in Chinese)

[19] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.

KANG B,LIU S R,CAI D X,*et al.* Effects of *Pinus massoniana* plantation stand density on understory vegetation and soil properties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2009,20(10):2323-2331. (in Chinese)

[20] 玉宝,张秋良,王立明. 天然林多目标经营研究现状及趋势[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):189-195.

YU B,ZHANG Q L,WANG L M. Research status and trend on multifunctional management of natural forest[J]. Journal of Northwest Forest University,2015,30(1):189-195. (in Chinese)

[21] 吴多洋,焦菊英,于卫洁,等. 陕北刺槐林木生长及林下植被与土壤水分对种植密度的响应特征[J]. 西北植物学报,2017,37(2):346-355.

WU D Y,JIAO J Y,YU W J,*et al.* Response characteristics of *Locust* growth,understory vegetation and soil moisture on planting density in Northern Shaanxi [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2017,37(2):346-355. (in Chinese)

[22] 雷相东,唐守正,李冬兰,等. 影响天然林下层植物物种多样性的林分因子的研究[J]. 生态学杂志,2003,22(3):18-22.

LEI X D,TANG S Z,LI D L,*et al.* Stand variables affecting understorey plant species diversity in natural forests[J]. Chinese Journal of Ecology,2003,22(3):18-22. (in Chinese)

[23] 李利平,邢韶华,赵勃,等. 北京山区不同区域油松林植物多样性比较研究[J]. 北京林业大学学报,2005,27(4):12-16.

LI L P,XING S H,ZHAO B,*et al.* Comparative analysis of plant diversity of *Pinustabulaeformis* forest in ten regions of Beijing mountainous areas[J]. Journal of Beijing Forestry University,2005,27(4):12-16. (in Chinese)