

高寒区青海云杉人工林密度与 林下植物多样性的关系

邹 扬¹, 贺康宁^{1*}, 赵 畅¹, 周 建², 赵丹丹², 安国才³

(1 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2 北京林业大学 自然保护区学院, 北京 100083; 3 青海省大通县宝库林场, 青海大通 810100)

摘 要: 为了研究青海云杉人工林密度对林下植物多样性的影响及二者的关系, 探明维持植物多样性、人工林生态系统稳定性及其健康状况的合理林分密度, 以青海大通宝库林区 6 种不同密度(3 400 株/hm²、2 900 株/hm²、2 600 株/hm²、2 300 株/hm²、2 150 株/hm²、1 750 株/hm²) 25 年生青海云杉人工林林下植物的重要值、丰富度指数、多样性指数、均匀度指数为指标, 对林下植被多样性随林分密度的变化规律进行分析。结果表明: (1) 青海云杉人工林下共有维管束植物 60 种, 非维管束植物 1 种, 隶属于 29 科 45 属。(2) 灌木层植被优势种受密度影响较大, 草本层植被优势种受密度影响较小。(3) 青海云杉密度分别与灌木层和草本层的 *S* 指数、*H'* 指数、*Ea* 指数均呈显著相关关系, 且相关系数分别为 0.688、0.937、0.762 和 0.679、0.870、0.505。(4) 随着青海云杉密度的增加, 林下植被多样性呈先减少后增大再减少的变化规律, 且密度为 2 600 株/hm² 时, 林下植物多样性综合得分最高。研究认为, 青海云杉林下植被多样性对其密度响应具有非同步性; 密度为 2 600 株/hm² 时比较适合林下植被生长, 并保持林下植物多样性水平。

关键词: 植物多样性; 青海云杉人工林; 林分密度; 关系; 高寒区

中图分类号: Q948.15⁺7

文献标志码: A

Relationship between Plantation Density and the Plants Diversity under Forest of *Picea crassifolia* in Alpine Region

ZOU Yang¹, HE Kangning^{*}, ZHAO Chang¹, ZHOU Jian², ZHAO Dandan², AN Guocai³

(1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3 Baoku Forest Farm of Datong County, Datong, Qinghai 810100, China)

Abstract: Six types of 25 years stand density(3 400 plants/hm², 2 900 plants/hm², 2 600 plants/hm², 2 300 plants/hm², 2 150 plants/hm² and 1 750 plants/hm²) were selected, and the law of importance values, species richness, species diversity index, evenness index with stand density were analyzed to study the relationship between stand density and plant diversity of under growth of *Picea crassifolia* plantation in Baoku Forest farm at Datong County of Qinghai Province. The aim of this paper was to verify an appropriate stand density that could improve plants diversity and maintain the stability of plantation ecosystem. The result showed that: (1) There were 60 vascular plants and one nonvascular plant in 45 families and 29 genera of under growth in *P. crassifolia* in the study area. (2) Stand density had a significant influence on dominant plants in shrub layer, but the influence was not obvious in herb layer; (3) There was a positive correlation

收稿日期: 2013-08-09; 修改稿收到日期: 2013-10-08

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划 (2011BAD38B05)

作者简介: 邹 扬(1990—), 男, 在读硕士研究生, 主要研究水土保持、林业生态工程。E-mail: 814965890@qq.com

* 通信作者: 贺康宁, 教授, 博士研究生导师, 从事水土保持、林业生态工程研究。E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

between stand diversity and species richness index, Shannon-Wiener index and Alatalo index in shrub layer, and the correlation coefficients were 0.688, 0.937, 0.762, respectively. With respect to herb layer, the correlation between them was also obvious, and the correlation coefficients were 0.679, 0.870, 0.505, respectively. (4) As stand density increased, plants diversity decreased firstly, then increased and finally decreased. The research suggested that the response of plant diversity of understory vegetation to stand density was non-synchronous. When density arrived at 2 600 hm^2 , the understory plant diversity reached the maximum, which indicated that the density was more appropriate for growth and development of understory vegetation, and can contribute to an increase in forest diversity.

Key words: plants diversity; *Picea crassifolia* plantation; stand density; relationship; alpine region

植物多样性是指植物水平的生物多样性,也即群落内物种种类、结构与功能方面的丰富度及其相互间的差异性^[1],是衡量一定地区生物资源丰富程度的一个客观指标^[2]。它不仅反映群落组织化水平,而且可以通过结构与功能的关系间接反映群落功能的特征,包括直接和间接地体现群落和生态系统的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度、生境差异等^[3-6]。多样性的提高,可以有效地减轻林分病虫害的发生和增加生态系统的稳定性^[7],McCann^[8]认为,群落的稳定性在一定程度上依赖于种群数量,当种群密度接近平衡密度时,群落的稳定性就高。而Tilman等^[9]对草地生态系统研究后认为,较高的物种多样性可以增加植物群落的生产力、生态系统营养的保持力和生态系统的稳定性。

青海云杉是中国青藏高原东北边缘特有种^[10-11]。是祁连山林区涵养水源效益最佳的森林类型。分布广;面积大;林相单一,充分显示了它在涵养水源、保持水土中的地位。许多学者对青海云杉林做过不同方面的研究,如造林密度^[12],群落结构特征^[11]等,但对于密度对林下植被多样性的影响缺少关注,不同密度青海云杉林,林下微环境也不同,从而导致林下植被发生变化,而林下植被在促进人工林养分循环,提高系统稳定性及维护林地长期生产力中起着十分重要的作用^[13]。鲁绍伟等^[14]研究认为林下植物及其生长情况,能直接反映林内光照、土壤水分、土壤营养状况等环境条件的优劣,对不同密度的环境条件,起着很好的指示作用。王树森等^[15]研究指出,在合理的密度下,人工林的生物多样性会有较大改善,而且有利于向天然群落方向发展。分析青海云杉人工林密度与林下植被多样性之间的关系,可得出改善植物多样性,维持人工林生态系统稳定的适宜林分密度,为今后合理经营青海云杉人工林,充分发挥其涵养水源、保持水土的生态水文功能提供一定的技术支持,同时也为人工林向天然群落发展创造条件。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

大通县位于青海省东部,为青藏高原高寒区,是祁连山与黄土高原的过渡地带,地理坐标 $100^{\circ}51' \sim 101^{\circ}56'E, 36^{\circ}43' \sim 37^{\circ}23'N$ 。全县属半干旱、半湿润温凉性气候。年气温日较差为 14.7°C ,年内无霜期 $70 \sim 120 \text{ d}$,全年 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 $1\,908^{\circ}\text{C}$ 。试验地位于大通县宝库林场,海拔 $2\,610 \sim 4\,622 \text{ m}$,年平均气温 2.4°C ,年平均降雨量 569.9 mm ,平均森林覆盖率为 79.0% ,土壤类型为黄土母质上发育的山地棕褐土和栗钙土,土壤深厚^[16]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 选取不同林分密度的 25 年生青海云杉人工林,每种密度设置样地 3 块(表 1),每个样地面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,采用典型取样的方法在每个乔木样地内选取 4 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的灌木样方和 5 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本样方。分层进行植物种类的调查统计。内容包括:乔木层统计所有植株的种名、株数、胸径、高度和冠幅;灌木层测定树高 $< 2 \text{ m}$ 的乔木幼苗幼树、灌木及藤本植物的种名、个体数(丛数),高度及盖度。草本层统计植物种名、株数(丛数)高度和盖度。同时记录样地的经度、纬度、海拔、坡向、坡位、坡度等生境因子。

1.2.2 资料分析和数据处理

重要值(IV) = (相对多度 + 相对频度 + 相对优势度) / 3

其中,相对多度为物种株数与所有物种总株数之比;相对频度为物种在样方中出现的次数与所有物种出现的总次数之比;相对优势度为物种的优势度与所有物种优势度总和之比。

丰富度指数: $R_0 = S$

多样性指数: Simpson 指数(D): $D = 1 / \sum P_i^2$

Shannon-Wiener 指数(H'): $H' = - \sum P_i \ln P_i$

均匀度指数: Pielou 指数(J'): $J' = H / \ln S$

表 1 青海云杉人工林调查样地基本信息
Table 1 Environmental factors in plots of *P. crassifolia* plantation

编号 Plot number	株行距 Plant spacing /(m×m)	密度 Stand density /(plant·hm ⁻²)	海拔 Altitude /m	坡度 Slope degree/°	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect	郁闭度 Canopy density
I	2×1.5	3 350	2 900	18	中下 Middle and lower	北 North	0.75
	2×1.5	3 300	2 844	16	中 Middle	北 North	0.7
	2×1.5	3 425	2 836	18	中 Middle	西北 Northwest	0.75
II	1.8×1.8	2 950	2 859	22	中下 Middle and lower	北 North	0.8
	1.8×1.8	2 875	2 900	22	下 Lower	西北 Northwest	0.7
	1.8×1.8	3 000	2 919	23	下 Lower	西北 Northwest	0.85
III	2×2	2 550	2 861	16	下 Lower	北 North	0.7
	2×2	2 600	2 990	18	下 Lower	北 North	0.8
	2×2	2 625	3 035	18	中下 Middle and lower	北 North	0.6
IV	1.5×3	2 425	2 851	16	中 Middle	西北 Northwest	0.5
	1.5×3	2 300	3 000	16	中 Middle	西北 Northwest	0.6
	1.5×3	2 300	3 030	18	中 Middle	北 North	0.5
V	2.5×2	2 200	2 860	23	中下 Middle and lower	北 North	0.6
	2.5×2	2 150	3 025	20	中 Middle	北 North	0.5
	2.5×2	2 125	3 050	22	中 Middle	西北 Northwest	0.5
VI	3×2	1 750	2 960	17	中下 Middle and lower	西北 Northwest	0.5
	3×2	1 800	2 939	16	中 Middle	西北 Northwest	0.5
	3×2	1 750	2 990	16	中 Middle	西北 Northwest	0.5

Alatalo 指数(Ea): $Ea=[(\sum P_i^2)^{-1}-1]/[\exp(-\sum P_i\ln P_i)-1]$

式中, S 是样方的植物种类总和; $P_i=N_i/N$,是种 i 的个体数占有所有种的个体数的比率, N 是样地的总个体数, N_i 是第 i 种的个体数。

利用 SPSS 软件对各指数进行方差分析、主成分分析,并与密度进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 青海云杉人工林不同密度下重要值

重要值是衡量物种在群落中的地位和作用的综合数量指标。青海云杉人工林下共有维管束植物 60 种,非维管束植物 1 种,隶属于 29 科 45 属。其中蔷薇科(Rosaceae)、菊科(Compositae)、豆科(Leguminosae)、毛茛科(Ranunculaceae)和杨柳科(Salicaceae)包含 4 个或以上属,占总科数的 17.25%。忍冬科(Caprifoliaceae)、木贼科(Equisetaceae)、蓼科(Polygonaceae)、莎草科(Cyperaceae)等 9 科包含 2 个或以上属。其余为单属科,占总科数的 51.72%。林分密度的变化导致林内光照水热条件发生改变,进而影响灌木层与草本层的物种组成。由表 2 可看出,密度对灌木植物优势种、重要值影响较大,当密度较小时,蔷薇科的峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、高山绣线菊(*Spiraea morrisonicola*),忍冬科的红花岩生忍冬(*Lonicera rupico-*

la var. *syringantha*)、刚毛忍冬(*Lonicera hispida*)构成灌木层优势种,重要值较大,随着密度的增大,红花忍冬,刚毛忍冬等阳性植物,重要值逐渐减少至消失,卫矛科的八宝茶(*Euonymus przewalskii*),豆科的青甘锦鸡儿(*Caragana tangutica*),蔷薇科的蒙古绣线菊(*Spiraea mongolica*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)的重要值明显增大,构成新的优势种;草本层植物优势种重要值随密度变化不大,苔藓(*Bryophyta*)、莎草科的细叶苔草(*Carex rigescens*)、蓼科的珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、蔷薇科的委陵菜(*Potentilla chinensis*)构成了草本层优势种。

2.2 青海云杉人工林不同密度下植物多样性

不同密度的青海云杉林,灌木层与草本层的 S 值存在明显差异(表 3),草本层 S 值高于灌木层,由于灌木层对生长条件的要求高于草本,林下的限制因素增加导致灌木层丰富度降低。随着密度的增加,灌木层与草本层 S 指数均显著降低,相关性系数表明,密度与灌木层、草本层丰富度指数呈显著正相关,说明密度对林下植被种类影响较大;灌木层与草本层 H' 指数随密度的增加,显著降低,而 D 指数变化不明显(图 1),因为 H' 值能反映丰富度的变化,而 D 值受到林下植被组成结构的影响较大,当林下植被组成未发生明显变化, D 值变化不明显。由相关性系数(表 3)可看出,密度与灌木层、草本层

H' 指数呈显著正相关;灌木层与草本层的 J' 指数和 Ea 指数随密度的增加均呈现先减少后增大再减少的变化趋势(图 2), Ea 指数变化幅度较 J' 指数大, 相关性系数表明(表 3), 密度与灌木层、草本层 Ea 指数相关性显著。不同密度青海云杉人工林林下均

匀度指数均为灌木层高于草本层, 表明灌木相对草本而言, 数量较为稳定, 相关性分析表明(表 3)密度与灌木层均匀度指数的相关系数比与草本层高, 说明密度与灌木层植物分布状况关系较为密切。

表 2 青海云杉人工林不同密度林下优势物种重要值

Table 2 Importance values of undergrowth dominant plants at different stand densities of *P. crassifolia* plantation

层次 Layer	物种 Species	重要值 Importance value					
		I	II	III	IV	V	VI
灌木层 Shrub layer	八宝茶 <i>Euonymus przewalskii</i>	19.94	—	5.61	—	—	3.11
	峨眉蔷薇 <i>Rosa omeiensis</i>	35.2	—	—	23.77	20.09	6.77
	青甘锦鸡儿 <i>Caragana tangutica</i>	35.64	—	—	14.93	7.05	—
	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	—	36.62	55	—	—	2.59
	高山绣线菊 <i>Spiraea morrisonicola</i>	—	1.62	—	34.14	20.33	3.25
	红花忍冬 <i>Lonicera rupicola</i> var. <i>syringantha</i>	—	—	—	13.54	22.18	4.97
	刚毛忍冬 <i>Lonicera hispida</i>	—	—	0.89	1.41	17.74	40.88
	蒙古绣线菊 <i>Spiraea mongolica</i>	—	22.18	13.54	0.91	1.94	—
草本层 Herb layer	秦岭柳 <i>Salix alfredi</i>	—	16.27	13.21	—	—	—
	珠牙蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	4.62	4.36	10.82	10.76	10.49	15.48
	细叶苔草 <i>Carex rigescens</i>	17.69	20.38	23.11	26.17	21.64	26.88
	苔藓 <i>Bryophyta</i>	22.21	30.25	28.24	24.01	12	10.13
	东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>	5.74	7.32	—	5.46	4.33	8.87
	双花堇菜 <i>Viola biflora</i>	3.04	6.77	3.22	6.57	—	3.12
	紫花碎米荠 <i>Cardamine tangutorum</i>	5.53	—	4.12	5	2.13	2.04
	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	5.65	—	10.64	6.17	8.81	7.25
	柳叶菜风毛菊 <i>Saussurea epilobioides</i>	2.04	1.56	6.01	2.23	4.8	1.56
	悬钩子 <i>Rubus corchorifolius</i>	1.64	—	4.53	3.66	—	1.24

注: I ~ VI. 青海云杉人工林密度见表 1; 下同。
Note: I ~ VI. Stand densities of *P. crassifolia* plantation is same as Table 1; The same as below.

表 3 青海云杉人工林不同密度林下植物多样性分析

Table 3 Plant diversity of undergrowth at different stand densities of *P. crassifolia* plantation

林下植被 Undergrowth		林分密度 Stand density						相关系数 Correlation coefficient
		I	II	III	IV	V	VI	
灌木层 Shrub layer	S	5a	6a	8b	8b	6a	10c	0.688 * *
	H'	1.329a	1.454b	1.574c	1.603c	1.662c	1.663c	0.937 * *
	D	0.71a	0.746a	0.785a	0.716a	0.713a	0.739a	-0.034
	J'	0.737a	0.823b	0.865bc	0.78ab	0.774ab	0.833b	0.169
	Ea	0.742a	0.803b	0.906c	0.89c	0.869c	0.921c	0.762 * *
草本层 Herb layer	S	17a	14b	18a	23c	18a	22c	0.679 * *
	H'	1.484a	1.571b	1.819c	1.811c	1.804c	1.855c	0.870 * *
	D	0.659a	0.667a	0.733b	0.684a	0.653a	0.739b	0.364
	J'	0.583a	0.617a	0.638b	0.573a	0.561a	0.64b	0.067
	Ea	0.473a	0.471a	0.621b	0.559c	0.542c	0.562c	0.505 *

注: 同行数据后标不同小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$); * * 表示在 $P = 0.01$ 水平显著; * 表示在 $P = 0.05$ 水平显著。
Note: The difference normal letters in the same row indicate significant difference at 0.05 level; * *. Correlation is significant at the 0.01 level; *. Correlation is significant at the 0.05 level.

2.3 青海云杉人工林密度与林下植物多样性综合评价

为综合分析比较6种密度林下物种多样性的差

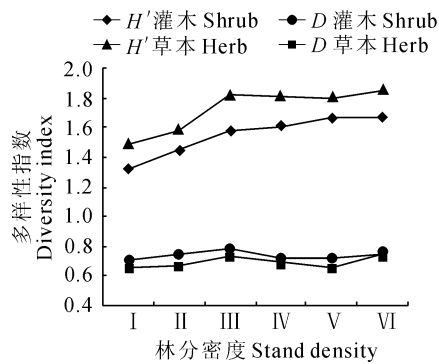


图1 青海云杉人工林不同密度林分多样性指数值
Fig. 1 Species diversity index values of different density stands of *P. crassifolia* plantation

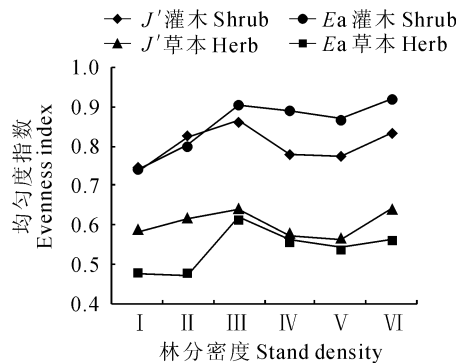


图2 青海云杉人工林不同密度林分均匀度指数值
Fig. 2 Evenness index values of different density stands of *P. crassifolia* plantation

异,以 S 、 H' 、 D 、 J' 、 Ea 为评价指标进行主成分分析。由表 4 可知:第 1 主成分的方差贡献率为 66.6%,几乎可以解释整个总方差,信息量损失较小。由第一主成分得分系数得出植物多样性综合判断值(F)的方程,即: $F = -0.039Y'_S + 0.258Y'_{H'} + 0.470Y'_D + 0.316Y'_{J'} + 0.337Y'_{Ea}$ (Y'_i 为各指标的标准化数据),利用植物多样性综合判断值方程计算不同密度的林下植物多样性得分,并进行排序(表 4)。综合得分表明,6 种密度间林下植物多样性差异显著:Ⅲ>Ⅵ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅴ>Ⅰ,由图 3 可看出,灌木层得分、草本层得分、综合得分变化趋势相同,随密度的增大,均表现为先减少后增大再减少的变化规律,当密度为 2 600 株/ hm^2 时,灌木层得分,草本层得分,综合得分均达到最大,表明此密度下,林下植被多样性最高。

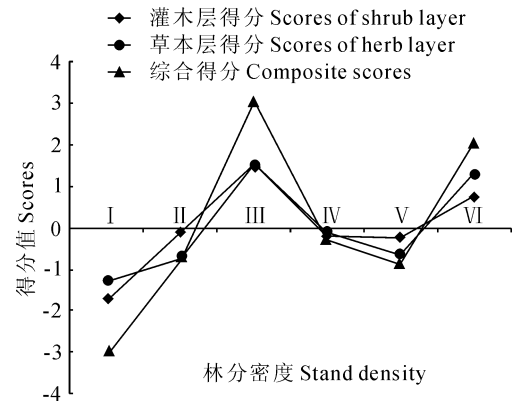


图3 青海云杉人工林不同密度林下植被多样性得分
Fig. 3 Plant diversity scores of different density stands of *P. crassifolia* plantation

表 4 青海云杉人工林植物多样性主成分分析

Table 4 Principal component analysis of plant diversity of *P. crassifolia* plantation

主成分 Principal component	因子 Factor					特征值 Eigenvalue	方差贡献率 % of variance	累计贡献率 Cumulative/%
	<i>S</i>	<i>H'</i>	<i>D</i>	<i>J'</i>	<i>E</i> _a			
P ₁	−0.950	−0.577	0.699	0.941	0.896	3.330	66.6	66.6
得分系数 Score coefficient	−0.039	0.258	0.470	0.316	0.337			
P ₂	0.349	0.765	0.573	0.165	0.226	1.113	22.3	88.9
得分系数 Score coefficient	0.413	0.660	0.297	−0.044	0.009			
林分密度 Stand density	灌木层得分 Score of shrub layer	排序 Sorting	草本层得分 Score of herb layer	排序 Sorting	综合得分 Composite score	排序 Sorting		
I	−1.782	6	−1.309	6	−3.091	6		
II	−0.088	3	−0.728	5	−0.815	4		
III	1.532	1	1.528	1	3.059	1		
IV	−0.197	4	−0.116	3	−0.313	3		
V	−0.231	5	−0.664	4	−0.895	5		
VI	0.766	2	1.289	2	2.055	2		

3 讨 论

阎海平等^[17]通过对北京西山人工林群落物种多样性的研究表明,上层乔木对灌木层的多样性影响不大;李伟伟等^[18]对华北落叶松进行研究后认为草本植物的 Shannon-Wiener 指数受林分密度的影响最大。本研究发现,林分密度与灌木层丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Alatalo 指数相关性显著;其中 Shannon-Wiener 指数与林分密度相关系数最高,除 Simpson 指数外,其余各指数与密度的相关系数均以灌木层大于草本层,说明灌木层植被多样性受密度影响较大,与阎海平、李伟伟等研究得出的结论不符,符合刘玉宝^[19]对 29 年生杉木林研究后得出的林下灌木层植被多样性与林分密度关系最为密切的结论。其原因是青海云杉林整体高度较低,灌木层与乔木层高差较小,由密度变化所产生的冠层结构变异能直接作用于灌木层,使其所处的微生境变化明显,从而导致灌木层植被分化剧烈,草本层处于灌木层之下,由于灌木层的阻隔,冠层结构变化对其所处微生境的影响相对小一些。

雷相等^[20]研究认为,林分密度通过郁闭度、公顷株数等因子对林下植物多样性造成影响;胡相明等^[21]研究指出,随着林分郁闭度的增大,下层植物多样性逐渐减少。本研究表明:随着密度的增大,林分郁闭度逐渐增大,但林下植物多样性呈现先减少后增大再减少的变化规律,这与李国雷等^[22]对华北落叶松人工林进行研究后认为林下植被多样性对密度响应具有非同步性的结论相符合,当密度由 2 600 株/hm² 增至 3 400 株/hm² 时,随着密度的增大,乔木层对水分的吸收逐渐增大,导致土壤蓄水量降低,土壤层允许生长的植物种类与数量逐渐减少。并且郁闭度的增加,导致林内光照不足,限制了林下植物生长,使得林下植被多样性减小。当密度由 2 600 株/hm² 减至 2 150 株/hm² 时,林下植被多样

性同样也呈减小趋势,原因分为两方面,一方面因为乔木数量减少幅度较少,又缺乏人为干扰,导致林下植被的受抑制情况得不到充分缓解,另一方面,由于数量的减少,青海云杉所占有的空间、水、热等资源率相对增大,种内竞争相对下降,个体得到充分发育,这种负反馈机制,进一步抑制了林下植被的发育。当密度由 2 150 株/hm² 减小到 1 750 株/hm² 时,林下植被多样性增大,因为较小的密度导致林窗的大量形成,林窗效应足以抵消青海云杉的负反馈作用,使得林下植被的生长环境得到改善。本研究发现,林下植被多样性随密度的变化趋势与林下植被均匀度随密度变化趋势接近,说明密度对林下植被的分布状况影响显著,因为均匀度独立于物种丰富度,只与个体数目等指标在各个物种中分布的均匀程度有关,密度能影响林分透光性、林相等,当林内透光性较好,林相整齐时,林下植被分布较为均匀,因此,均匀度指数更能反映密度对林下植被多样性的影响。

多样性综合评分表明:当密度为 2 600 株/hm² 时,林下物种多样性得分最高,表明此密度比较适合林下植被生长发育,保持林下植被多样性。这与杜爱林等^[12]对青海南门峡林区青海云杉造林密度的研究中得出的青海云杉后期应抚育至密度为 3 090 株/hm² 较好的结果有出入,可能是由于其研究的为 10~15 龄青海云杉幼龄林,而本研究为 25 年生青海云杉林,林龄的不同,使得林内环境发生改变,从而得出不同的结论。

青海云杉人工林下共有维管束植物 60 种,非维管束植物 1 种,隶属于 29 科 45 属,灌木层优势物种随密度变化明显,草本层优势物种受密度影响较小;林下植被多样性对密度响应具有非同步性,随着密度的增加,呈现先减少后增大再减少的变化规律;综合评分表明:2 600 株/hm² 为青海云杉人工林最优密度。

参考文献:

- [1] WANG Y (王 妍), WU B (吴 波), LI X Y (李 小 英), et al. Species diversities of different succession stages of *Artemisia ordosica* community in Mu Us Sandyland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2011, **25**(2): 167—172 (in Chinese).
- [2] YANG J (杨 军), FU D P (傅德平), YANG X D (杨晓东), et al. Study on the species diversity of typical plant communities in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2010, **24**(2): 145—149 (in Chinese).
- [3] ZHAO Y Q (赵永泉), PENG D L (彭道黎). Diversity of the main plantation communities in Jiufeng Forest Park, Beijing[J]. *Journal of*

- Southwest Forestry College* (西南林学院学报), 2008, **28**(1): 17—22(in Chinese).
- [4] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理和方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 13—36.
- [5] WANG H(王 辉), HE K N(贺康宁), HU X B(胡兴波), *et al.* Effects of allocation of tree species on species diversity of forest floor in alpine region of Qinghai Province[J]. *Research of Soil and Water Conversation* (水土保持研究), 2012, **19**(3): 147—150(in Chinese).
- [6] WANG Y(王 玉), GUO J B(郭建斌). Study on species diversity of *Robinia pseudoacacia* plantation community at semi-arid region on Loess Plateau[J]. *Sichuan Forestry Exploration and Design* (四川林勘设计), 2008, (1): 11—16(in Chinese).
- [7] ZHANG J J(张晶晶), ZHAO ZH(赵 忠), SONG X D(宋西德), *et al.* Biodiversity dynamics of artificial *Robinia pseudoacacia* forest in Weiwei Loess Plateau[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2010, **30**(12): 2 490—2 496(in Chinese).
- [8] MCCANN K S. The diversity-stability debate[J]. *Nature*, 2000, **405**(6 783): 228—233.
- [9] TILMAN D, DOWNING J A. Biodiversity and stability in grassland[J]. *Nature*, 1994, 367: 363—365.
- [10] LIU J Q(刘建泉), QU Y C(屈永才), WANG X F(王学福), *et al.* Structure characteristics of *Picea crassifolia* communities in Qilian Mountains forest area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2009, **23**(7): 121—125(in Chinese).
- [11] LIU J Q(刘建泉), DING G M(丁国民), HAO H(郝 虎), *et al.* Structure and dynamic of *Picea classifolia* community in Qilian Mountains Forest Area[J]. *Journal of Northwest Forestry College* (西北林学院学报), 2008, **23**(1): 14—18(in Chinese).
- [12] DU A L(杜爱林), JIN C X(靳彩霞), LÜ H G(吕鸿光), *et al.* Study on forestation density of Qinghai Spruce in Nanmenxia forest region [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry* (青海农林科技), 2008, (1): 24—26(in Chinese).
- [13] YE SH M(叶绍明), WEN Y G(温远光), YANG M(杨 梅), *et al.* Correlation analysis on productivity and plant diversity of *Eucalyptus plantations* under successive rotation[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2010, **30**(7): 1 458—1 467(in Chinese).
- [14] LU SH W(鲁绍伟), LIU F Q(刘凤芹), YU X X(余新晓), *et al.* Studies on the configuration and function of different density of pines in Rocky Mountain Area of Northern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2007, **27**(9): 144—149(in Chinese).
- [15] WANG SH S(王树森), YU X X(余新晓), LUO Y Y(罗于洋), *et al.* Effects of reforestation on woody plant biodiversity of forest vegetation in Badaling, Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2008, **20**(Z2): 155—159(in Chinese).
- [16] WANG D M(王冬梅), ZHOU X CH(周心澄), HE K N(贺康宁), *et al.* The potential productivity of the main species used in the Datong reafforestation project on former farmland, Qinghai Province[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2004, **24**(2): 2 984—2 990(in Chinese).
- [17] YAN H P(阎海平), TAN X(谭 笑), SUN X Y(孙向阳), *et al.* Studies on species diversity of plantation community on Beijing Xishan [J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2001, **23**(2): 16—19(in Chinese).
- [18] LI W W(李伟伟), GU J C(谷建才), CHEN Y(陈 瑜), *et al.* Research on the effects of stand density on understory vegetation diversity of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2009, **25**(06): 84—88(in Chinese).
- [19] LIU Y B(刘玉宝). Relationship between undergrowth species diversity and stand density of 29-year-old Chinese fir plantation[J]. *Journal of Fujian College of Forestry* (福建林学院学报), 2005, **25**(1): 1—4(in Chinese).
- [20] LEI X D(雷相东), TANG SH ZH(唐守正), LI D L(李冬兰), *et al.* Stand variables affecting understorey plant species diversity in natural forests[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2003, **22**(3): 18—22(in Chinese).
- [21] HU X M(胡相明), CHENG J M(程积民), WAN H E(万惠娥). Structure characteristics of herbages under five types of artificial forest plantations in Loess Hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2006, **26**(3): 41—45(in Chinese).
- [22] LI G L(李国雷), LIU Y(刘 勇), LÜ R H(吕瑞恒), *et al.* Responses of understory vegetation development to regulation of tree density in *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2009, **31**(1): 19—24(in Chinese).