

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2022.10031

吴鑫磊, 龙婷, 徐超, 梁艳君, 韦健丽敏, 李景文. 东北红豆杉不同生境群落种间关联性[J]. 植物科学学报, 2022, 40(1): 31~38
 Wu XL, Long T, Xu C, Liang YJ, Wei JLM, Li JW. Interspecific association of different communities in *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. habitat[J]. Plant Science Journal, 2022, 40(1): 31~38

东北红豆杉不同生境群落种间关联性

吴鑫磊, 龙婷, 徐超, 梁艳君, 韦健丽敏, 李景文*

(北京林业大学, 北京 100083)

摘要: 本研究在吉林省汪清县杜荒子林场东北红豆杉(*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc.)集中分布区进行调查, 基于方差比率(*VR*)、Ochiai 指数(*OI*)以及 Spearman 秩相关系数检验, 对云冷杉林(群落1)、云冷杉林(群落2)和风桦林(群落3)等3个群落进行了种间关联性分析。结果显示: 3个群落的方差比率 *VR* 均小于1, 其中3号群落主要物种总体呈显著负关联, 而其他两个群落呈不显著负关联; *OI* 分析结果表明1号和2号群落的高关联度($0.6 < OI \leq 1$)物种对比3号群落的占比更高, 东北红豆杉与主要树种的平均 *OI* 从1号到3号群落依次降低; Spearman 秩相关系数检验结果发现大部分物种间相关性不显著, 只有1号群落的正负关联比大于1; 云冷杉林物种间的总体联结度较为紧密, 稳定性也较高, 而风桦林的情况与此相反。

关键词: 东北红豆杉; 野外回归; 生境; 种间联结; 种间相关性

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2022)01-0031-08

Interspecific association of different communities in *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. habitat

Wu Xin-Lei, Long Ting, Xu Chao, Liang Yan-Jun, Wei Jian-Li-Min, Li Jing-Wen*

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This study investigated the concentrated distribution area of *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. in Duhuangzi forest farm, Wangqing County, Jilin Province, China. Based on variance ratio (*VR*), Ochiai index (*OI*), and Spearman rank correlation coefficients, the interspecific associations of three communities were analyzed, including spruce-fir forest (community 1), spruce-fir forest (community 2), and birch forest (community 3). Results showed that the *VR* values of the three communities were all less than 1, and the main species in community 3 showed a significant negative correlation, while the other two communities showed no significant negative correlation. Based on *OI*, the species with high correlation ($0.6 < OI \leq 1$) in communities 1 and 2 accounted for a higher proportion than that in community 3. Average *OI* between *T. cuspidata* and major tree species decreased from community 1 to 3. Based on Spearman rank correlation coefficients, most species showed no significant correlation. Only the positive and negative correlation ratio of community 1 was greater than 1. The overall association between species in the spruce-fir forest was relatively close and stability was high, while the situation in the birch forest showed the opposite pattern.

Key words: *Taxus cuspidata*; Field regression; Habitat; Interspecific association; Interspecific correlation

收稿日期: 2021-06-24, 修回日期: 2021-08-13。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503106)。

This work was supported by a grant from the National Key Research and Development Plan Project (2016YFC0503106).

作者简介: 吴鑫磊(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为保护生物学(E-mail: hnwuxinlei@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: lijingwen@bjfu.edu.cn)。

东北红豆杉(*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc.)在我国主要分布于长白山区、老爷岭和张广才岭^[1, 2]。该物种较耐荫，常生长于红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)林冠下^[3, 4]。自20世纪以来，东北林区遭受了3次较大规模的采伐，大面积的原始阔叶红松林消失^[5, 6]，在此过程中，东北红豆杉的适宜生境群落逐渐丧失和破碎化。同时，随着抗癌物质紫杉醇的发现^[7]，部分东北红豆杉被盗伐、盗挖，个体数量的锐减导致种群濒危程度进一步加重^[8-11]，东北红豆杉已被列入野生极小种群植物(Plant species with extremely small populations, PSESP)重点保护名单^[12]。

作为一种濒危植物，东北红豆杉的人工繁育十分重要。科学家已开展了一系列相关研究，如利用种子萌发培育实生苗、扦插、组织培养等方法进行繁殖，相关技术已较为成熟^[13-15]。但要维持东北红豆杉野生种群的稳定，还需了解其自然状态下的生态学特征。目前，人们对东北红豆杉的种群结构^[16]、生境适宜性^[8]、生境群落物种组成^[17, 18]等进行了研究，结果表明东北红豆杉对林分类型有一定选择性。在原始群落中，红松林主林层树种可以为东北红豆杉提供良好的遮荫条件。然而，随着采伐的进行，生境群落也会发生变化。对东北红豆杉群落进行研究发现，不同类型群落中的东北红豆杉种群特征存在差异，群落类型是一个重要的影响因子^[3]。在野外调查中，我们也发现东北红豆杉种群数量与群落类型及群落物种组成有关。基于此，本研究利用种间关联性分析方法，探讨不同的东北红豆杉生境地群落中主要树种的联结关系，旨在阐明不同群落种间关联特征与东北红豆杉种群的关系，为东北红豆杉生境恢复与回归保护地选择等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究在东北红豆杉集中分布的吉林省东部

汪清县杜荒子林场^[3, 8]进行。该林场位于长白山东麓(43°12'N, 130°36'E)，海拔800~1000 m，以山地丘陵为主，属温带季风气候，雨热同期，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，寒冬时间较长，年均气温低于5°C，年均降水量500~600 mm^[19]。该区域内植物种类繁多，主要针叶树种有臭冷杉(*Abies nephrolepis*(Trautv.) Maxim.)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* Carr. var. *microsperma* (Lindl.) Cheng et L. K. Fu)和红松等，主要阔叶树种包括紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、风桦(*Betula costata* Trautv.)和花楷槭(*Acer ukurunduense* Trautv. et Mey.)等。

1.2 群落样地布设与调查

在汪清县杜荒子林场中对东北红豆杉集中分布区域进行了种群踏查，发现在人为采伐的影响下，该区域典型建群树种红松的优势度较低，由于采伐干扰，林型特征较为复杂，结合林相以及生境状况，并参考东北长白山林区次生群落的相关文献^[20-23]，选取了其中3个有代表性且受干扰较轻的群落进行研究，群落概况见表1。

在3个不同生境群落中各布设9个样方，样方大小为20 m × 20 m，将每个样方划分成4个10 m × 10 m的小样方，每个小样方内依次布设1个5 m × 5 m的灌木样方和1个3 m × 3 m的草本样方，记录样方的海拔、经纬度、坡向、坡度、坡位、郁闭度等环境参数^[24]。调查记录样方内乔木(胸径≥4 cm)种类、胸径、冠幅和树高等；灌木的种类、株数、平均基径、平均高度和盖度等；草本样方内草本的种类、株数、平均高度和盖度等。

1.3 重要值计算

重要值(Importance value, IV)是物种相对多度、频度和显著度的综合，可以表征物种在群落中的优势和地位，重要值的计算公式为^[5]：

表1 群落基本概况
Table 1 Basic information on three communities

编号 No.	群落 Community	经纬度 Longitude and latitude	坡向 Aspect	郁闭度 Canopy density	原始植被 Primary vegetation
No. 1	云冷杉林 Spruce-fir forest	43°12'14.75"N, 130°36'39.2"E	西北	0.8	阔叶红松林
No. 2	云冷杉林 Spruce-fir forest	43°12'27.73"N, 130°36'26.92"E	东	0.7	阔叶红松林
No. 3	风桦林 Birch forest	43°12'28.31"N, 130°36'17.12"E	东	0.5	阔叶红松林

$$IV = \frac{\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对显著度}}{3} \times 100 \quad (1)$$

本文将每个群落中重要值大于 3 的乔木树种(表 2)作为群落中的主要乔木树种进行关联性分析^[5]。

表 2 主要乔木树种汇总
Table 2 Summary of main tree species

编号 No.	树种 Tree species
1	东北红豆杉 <i>Taxus cuspidata</i> Sieb. et Zucc.
2	臭冷杉 <i>Abies nephrolepis</i> (Trautv.) Maxim.
3	花楷槭 <i>Acer ukurunduense</i> Trautv. et Mey.
4	青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i> Maxim.
5	风桦 <i>Betula costata</i> Trautv.
6	鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> Carr. var. <i>microsperma</i> (Lindl.) Cheng et L. K. Fu
7	紫椴 <i>Tilia amurensis</i> Rupr.
8	红松 <i>Pinus koraiensis</i> Siebold et Zuccarini
9	香杨 <i>Populus koreana</i> Rehd.
10	山杨 <i>Populus davidiana</i> Dode.
11	裂叶榆 <i>Ulmus laciniata</i> (Trautv.) Mayr.
12	长白落叶松 <i>Larix olgensis</i> Henry.

1.4 总体联结性

群落的总体联结性体现群落中种群间总的关联性, 可以用来表征群落演替的阶段, 当总体联结性较低时, 群落总体呈现负的关联性, 物种间负面的相互作用激烈, 群落处于演替前中期。总体联结性可以采用 Schluter 提出的方差比率 (VR) 来表示^[25], 它是根据零联结模型计算出来的, 具体公式为:

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^s P_i (1 - P_i) \quad (3)$$

$$S_T^2 = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2 \quad (4)$$

$$VR = \frac{\delta_T^2}{S_T^2} \quad (5)$$

式中: P_i 为物种 i 出现的频率, n_i 为物种 i 出现的样地数, N 为总的样地数, S 代表物种的丰富度, T_j 为样地 j 内出现的物种数, t 为样地中出现的物种平均数。当 $VR = 1$ 时表明种间无关联, $VR > 1$ 说明总体呈正关联, 而 $VR < 1$ 则表示种间呈负关联。测定结果用统计量 W 进行检验 ($W = VR \times N$), 当 $\chi^2_{0.95}(N) \leq W \leq \chi^2_{0.05}(N)$ 时, 物种间总体不显著关联,

当 $\chi^2_{0.05}(N) < W$ 或 $\chi^2_{0.95}(N) > W$ 时, 物种间总体显著关联。

1.5 种间关联度

物种间的空间分布在一定程度可以反映物种间的关联程度, 当两个物种关联程度较高时, 它们通常会共同出现在同一个区域。根据这一规律, 利用 2×2 列联表(表 3)统计两个物种在样方内出现的次数。

表 3 2×2 列联表
Table 3 Contingency table (2×2)

物种 A Species A	物种 B Species B	存在	不存在
		Existence	Non-existence
物种 A Species A	存在	a	b
	不存在	c	d

注: 字母 a、b、c 和 d 均代表样方数目, 如 a 代表同时存在物种 A 和 B 的样方数目。

Notes: a, b, c, and d represent number of quadrats. For example, a stands for number of quadrats with both species A and B.

使用 OI 指数来计算物种间的联结程度^[26], 它表征某个范围内两个物种间出现的概率和程度, 可利用列联表(表 2)中的数值计算得出, 公式如下:

$$OI = \frac{a}{\sqrt{(a+b)(a+c)}} \quad (6)$$

当联结指数越趋向 0, 说明两个物种关联性越弱, 当联结指数越趋向 1, 说明两个物种的关联程度越强。

1.6 种间相关性

Spearman 秩相关系数能定量表现物种间的相关性程度, 其原理是利用同时出现在同一样方中的两物种个体数量进行分析, 先将多度数据转化为秩化数据, 再代入公式进行计算^[27]。

Spearman 秩相关系数计算公式如下^[28]:

$$r_p(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}{N^3 - N} \quad (7)$$

式中: N 为总样方数, x_{ij} 和 x_{kj} 分别代表物种 i 和物种 k 在样方 j 中的多度的秩。 $R_p(i, k)$ 的值域为 $[-1, 1]$, 当 $r_p(i, k) > 0$ 时, 表明物种间正相关, 当 $r_p(i, k) < 0$ 时, 表明物种间负相关。

利用 Excel 2016 软件计算重要值, 其中联结系数 VR 、种间关联性利用 R 3.6.2 中 Spaa 函数包计算, 相关性检验通过 Psych 函数包实现^[29]。

2 结果与分析

2.1 不同群落的物种概况

重要值在一定程度上可以反映群落中物种组成概况, 3个群落中主要树种重要值排序见表4。两个云冷杉林中臭冷杉的重要值均最高, 而3号群落中风桦占优势。东北红豆杉在云冷杉林群落1中数量最多, 而在风桦林群落中数量最少(表5)。

2.2 不同群落的总体联结

群落总体联结分析结果见表6, 3个群落的联结系数均小于1, 说明群落主要物种间总体呈现负联结, 其中风桦林中主要物种间呈显著负关联, 其他群落均不显著。

2.3 不同群落主要树种种间关联性

OI 指数可用于描述物种间的关联度。分析结果表明, 云冷杉林群落1物种间 OI 指数主要集中

在[0.4, 0.6)和[0.6, 1)的范围内, 云冷杉林群落2中 OI 指数在[0, 0.4)和[0.6, 1)两个范围内比例较高, 而风桦林群落物种间 OI 指数在[0, 0.4)和[0.6, 1)范围中较高占比较高(表7)。在3个群落中, 东北红豆杉与主要树种的平均关联度分别为0.64、0.56和0.46, 呈现依次递减的趋势, 高联结的种对也由50%以上降低到11.11%, 低联结种对比例由0上升到33.33%(表8)。

2.4 不同群落重要树种种间相关性

主要木本植物的Spearman秩相关系数见表9。在云冷杉林群落1中, 显著和极显著正相关种对共有两对, 比例为7.14%, 在3个群落中最高。云冷杉林群落1的正负关联比为1.15, 而其他两个群落的正负关联比均小于1。东北红豆杉与部分树种间的相关系数见表10, 尽管在大多数情况下,

表4 不同群落的物种重要值排序
Table 4 Species importance value ranking of different communities

群落 Community	排序 Order	树种 Tree species	重要值 Importance value	排序 Order	树种 Tree species	重要值 Importance value
No. 1	1	臭冷杉	25.41	5	鱼鳞云杉	9.36
	2	紫椴	21.74	6	风桦	5.31
	3	东北红豆杉	14.25	7	青楷槭	4.42
	4	花楷槭	11.78	8	红松	3.81
No. 2	1	臭冷杉	24.28	6	东北红豆杉	10.07
	2	紫椴	14.28	7	青楷槭	5.29
	3	鱼鳞云杉	14.20	8	长白落叶松	3.42
	4	花楷槭	11.77	9	红松	3.25
	5	风桦	10.10			
No. 3	1	风桦	22.27	6	青楷槭	6.30
	2	紫椴	15.77	7	香杨	5.72
	3	花楷槭	11.54	8	臭冷杉	5.19
	4	鱼鳞云杉	11.37	9	山杨	4.21
	5	东北红豆杉	7.02	10	裂叶榆	4.13

表5 不同群落样地中东北红豆杉种群状况
Table 5 Population status of *Taxus cuspidata* in different communities

群落 Community	样方数 No. of plots	株数 Abundance	平均胸径 / cm Average DBH	断面积 / m ² /hm ² Basal area	重要值 Importance value
No. 1	9	81	18.70 ± 9.12	7.65	14.25
No. 2	9	44	17.78 ± 9.50	3.88	10.07
No. 3	9	26	20.89 ± 7.91	2.81	7.02

表6 不同群落中主要物种间的整体关联性
Table 6 Overall associations among main species in different communities

群落 Community	方差比率 Variance ratio	检验统计量 Statistic ω	χ^2 临界值 χ^2 threshold value	测度结果 Result of measurement
No. 1	0.81	29.04	[23.27, 51.00]	不显著负联结
No. 2	0.70	25.19	[23.27, 51.00]	不显著负联结
No. 3	0.55	19.95	[23.27, 51.00]	显著负联结

表 7 不同群落中主要树种 Ochiai 指数 (OI)
Table 7 Ochiai index (OI) of main interspecific associations in different communities

群落 Community	$0 \leq OI < 0.4$		$0.4 \leq OI < 0.6$		$0.6 \leq OI \leq 1$	
	树种对 Species pairs	百分比 / % Percentage	树种对 Species pairs	百分比 / % Percentage	树种对 Species pairs	百分比 / % Percentage
No. 1	4	14.29	14	50	10	35.71
No. 2	13	36.11	7	19.44	16	44.44
No. 3	15	33.33	23	51.11	7	15.56

表 8 不同群落中东北红豆杉与主要树种 Ochiai 指数 (OI)
Table 8 Ochiai index (OI) of *Taxus cuspidata* and main tree species in different communities

群落 Community	$0 \leq OI < 0.4$		$0.4 \leq OI < 0.6$		$0.6 \leq OI \leq 1$	
	树种对 Species pairs	百分比 / % Percentage	树种对 Species pairs	百分比 / % Percentage	树种对 Species pairs	百分比 / % Percentage
No. 1	0	0	3	42.86	4	57.14
No. 2	2	25	1	12.50	5	62.50
No. 3	3	33.33	5	55.56	1	11.11

表 9 不同群落中主要树种 Spearman 秩相关检验
Table 9 Spearman rank correlation coefficients of main tree species in different communities

群落 Community	正相关 Positive correlation			负相关 Negative correlation		
	$P < 0.01$	$0.01 < P < 0.05$	$P > 0.05$	$P < 0.01$	$0.01 < P < 0.05$	$P > 0.05$
No. 1	1 (3.57)	1 (3.57)	13 (46.43)	0 (0)	1 (3.57)	12 (42.86)
No. 2	0 (0)	1 (2.78)	12 (33.33)	1 (2.78)	0 (0)	22 (61.11)
No. 3	0 (0)	1 (2.22)	18 (40.00)	0 (0)	2 (4.44)	24 (53.33)

注: 括号前为种对数, 括号中为种对数所占的百分比。

Notes: Number of species is in front of brackets and percentage of species pairs is inside brackets.

表 10 不同群落中东北红豆杉与部分树种 Spearman 秩相关检验统计表

Table 10 Spearman rank correlation coefficients between *Taxus cuspidata* and other species in different communities

群落 Community	物种对 Species pairs					
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
No. 1	0.27	-0.13	-0.08	0.01	0.17	0.09
No. 2	0.22	-0.16	-0.22	-0.21	0.41*	0.08
No. 3	0.16	-0.18	0.04	-0.15	0.04	-0.16

注: 1, 东北红豆杉; 2, 臭冷杉; 3, 花楷槭; 4, 青楷槭; 5, 风桦; 6, 鱼鳞云杉; 7, 紫椴。

Notes: 1, *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc; 2, *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim; 3, *Acer ukurunduense* Trautv. et Mey; 4, *Acer tegmentosum* Maxim; 5, *Betula costata* Trautv.; 6, *Picea jezoensis* Carr. var. *microsperma* (Lindl.) Cheng et L. K. Fu; 7, *Tilia amurensis* Rupr.

东北红豆杉与其他树种的相关性并不显著, 但其与鱼鳞云杉、臭冷杉之间的关系较花楷槭更为密切。

林的分布密度较低^[3]。

3.2 不同群落的种间关联性比较

种间关联性可以从群落物种角度反映物种间的相互作用关系, 对群落的恢复和重建有着极其重要的意义, 已被广泛应用于濒危物种的群落学研究, 如百花山葡萄(*Vitis baihuashanensis* M. S. Kang et D. Z. Lu)、缙云秋海棠(*Begonia jinyunensis* C. I Peng, B. Ding et Q. Wang)和藤枣(*Eleutharrhenia macrocarpa* (Diels) Forman)等群落^[30-32]。在群落演替过程中, 群落物种间的竞争关系会逐渐趋于缓和, 最终形成一个由少数树种为优势种的相

3 讨论

3.1 不同群落中的东北红豆杉种群状况

在3个群落中, 东北红豆杉种群的数量和优势度明显不同。同样是云冷杉林, 在偏北坡的1号群落中, 东北红豆杉的数量更多, 甚至是优势种。从1号到3号群落, 东北红豆杉的数量和优势度依次降低。有学者调查研究表明, 东北红豆杉在红松紫椴林及红松云冷杉林的分布密度较高, 而红松风桦

对稳定的顶级群落，这在总体联结关系上表现为正联结或无联结^[33, 34]。本研究中 3 个群落的总体联结系数均小于 1，表明它们仍然处于不稳定演替阶段，这与李云灵^[35]在黑龙江穆棱对东北红豆杉种间关系的研究结果相似。以风桦为优势种的 3 号群落主要树种间总体呈显著负联结，表明该群落间物种竞争较其他两个群落更为激烈，这可能是由于在风桦林中，喜光速生的山杨 (*Populus davidiana* Dode.)、香杨 (*Populus koreana* Rehd.) 和裂叶榆 (*Ulmus laciniata* (Trautv.) Mayr.) 等也占据了一定的空间，对其他耐阴树种造成了一定的竞争排斥，从而使群落中的物种关联特征呈现出较不稳定的状态。*OI* 指数分析结果表明，1 号群落和 2 号群落的强关联物种对的比例较 3 号群落更高，这与总体联结系数的结果相一致。

本研究中大多数物种间的相关性不显著，与其他文献报道结果类似^[36-38]，但从中仍然能判断出与东北红豆杉最适应的伴生树种，包括臭冷杉和鱼鳞云杉等。只有云冷杉林群落 1 的正负关联比大于 1，说明该群落间物种的关系相比其他两个群落更加稳定。相关系数分析表明，东北红豆杉与臭冷杉和鱼鳞云杉的关系更加密切，可能以云冷杉为优势种的群落生境更有利于东北红豆杉的生存，而风桦林则可能较不利于东北红豆杉的生长。

3.3 生境对群落种间关系的影响

物种间的关系不是一成不变的，而是会随着环境和资源状况的不同产生改变^[27]。本研究发现，在不同生境下，群落的树种组成和群落种间关联的总体规律不同，如云冷杉林在不同坡向的种间关联特征就有所不同，这可能是由于东坡的云冷杉林中光照条件更好，促进了某些喜光树种的生长，加剧了物种间的竞争，从而导致群落物种间的总体关联程度较偏北坡的 1 号云冷杉林更低。

3.4 群落种间关联特征与东北红豆杉种群的关系

群落物种间的关联特征实际上反映了该群落的稳定程度，结合种间关联特征和群落树种组成状况，以臭冷杉为优势种的 1、2 号群落相对稳定，而 3 号群落树种间的竞争较为激烈。东北红豆杉的密度及其与其他树种的平均关联度 (*OI* 指数) 在 1 号到 3 号群落中依次降低，表明东北红豆杉可能与群落的稳定程度有着某种联系，即其适宜在较为稳定的群落中生存，这可能是由于稳定群落中没有明

显的物种竞争更替，其空间已被充分占据，林下拥有良好的荫蔽环境，从而有利于东北红豆杉生长。

综上所述，群落中特定物种所共同形成的生境可能对红豆杉的生存具有一定影响。在对东北红豆杉进行保育时，要重点保护较为稳定的顶级群落。在野外回归过程中，也应重视东北红豆杉的生境选址，优先考虑以红松云冷杉林为主的群落，此外，还可适当补植东北红豆杉的最适伴生树种，营造适合其生长的稳定的生境群落。

参考文献：

- [1] 郑万钧. 中国树木志 [M]. 北京：中国林业出版社，1983: 386-387.
- [2] 吴榜华, 戚继忠. 东北红豆杉植物地理学研究 [J]. 应用与环境生物学报, 1995(3): 219-225.
- [3] Wu BH, Qi JZ. Study on phytogeography of *Taxus cuspidata* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 1995(3): 219-225.
- [4] 龙婷, 陈杰, 杨蓝, 王寅, 徐超, 等. 极小种群东北红豆杉所在群落特征及其环境解释 [J]. 植物科学学报, 2020, 38(1): 77-87
- [5] Long T, Chen J, Yang L, Wang Y, Xu C, et al. Characteristics and environmental interpretation of communities of *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc., a plant species with extremely small populations [J]. Plant Science Journal, 2020, 38(1): 77-87.
- [6] 杨蓝. 东北红豆杉所在群落特征及其影响因子分析 [D]. 北京：北京林业大学，2018.
- [7] 张悦, 郭利平, 易雪梅, 曹伟, 王远遐, 等. 长白山北坡 3 个森林群落主要树种种间联结性 [J]. 生态学报, 2015, 35(1): 106-115.
- [8] Zhang Y, Guo LP, Yi XM, Cao W, Wang YX, et al. Analysis of interspecific associations among major tree species in three forest communities on the north slope of Changbai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 106-115.
- [9] Yu DP, Zhou L, Zhou WM, Ding H, Wang QW, et al. Forest management in northeast China: history, problems, and challenges [J]. Environ Manage, 2011, 48(6): 1122-1135.
- [10] Wani MC, Taylor HL, Wall ME, Coggon P, Mcphail AT. Plant antitumor agents. VI. The isolation and structure of taxol, a novel antileukemic and antitumor agent from *Taxus brevifolia* [J]. J Am Chem Soc, 1971, 93(9): 2325-2327.
- [11] 陈杰, 龙婷, 杨蓝, 王寅, 徐超, 李景文. 东北红豆杉生境适宜性评价 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 51-59.
- [12] Chen J, Long T, Yang L, Wang Y, Xu C, Li JW. Habitat http://www.plantscience.cn

- suitability assessment of *Taxus cuspidata* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(4): 51–59.
- [9] 张春雨, 高露双, 赵亚洲, 贾玉珍, 李金鑫, 赵秀海. 东北红豆杉雌雄植株径向生长对邻体竞争和气候因子的响应 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1177–1183.
Zhang CY, Gao LS, Zhao YZ, Ja YZ, Li JX, Zhao XH. Response of radial growth to neighboring competition and climate factors in *Taxus cuspidata* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1177–1183.
- [10] 尹雪, 穆立蔷, 李中跃, 韩明浩. 3种鸟类对东北红豆杉的取食方式及传播 [J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(1): 81–85.
Yin X, Mu LQ, Li ZY, Han MH. Fruits foraging patterns and seed dispersal effect of three kinds of birds on *Taxus cuspidata* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(1): 81–85.
- [11] 覃海宁, 杨永, 董仕勇, 何强, 贾渝, 等. 中国高等植物受威胁物种名录 [J]. 生物多样性, 2017, 25(7): 696–744.
Qin HN, Yang Y, Dong SY, He Q, Jia Y, et al. Threatened species list of China's higher plants [J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(7): 696–744.
- [12] 臧润国, 董鸣, 李俊清, 陈小勇, 曾宋君, 等. 典型极小种群野生植物保护与恢复技术研究 [J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7130–7135.
Zang RG, Dong M, Li JQ, Chen XY, Zeng SJ, et al. Conservation and restoration for typical critically endangered wild plants with extremely small population [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7130–7135.
- [13] 刘本玉. 辽西地区东北红豆杉引种繁育技术 [J]. 现代农业科技, 2018(24): 154–155.
- [14] 丰美静, 张恺恺, 黄中文, 邱德有, 陈段芬, 杨艳芳. 东北红豆杉温室扦插繁殖试验 [J]. 北方园艺, 2020(13): 65–70.
Feng MJ, Zhang KK, Huang ZW, Qiu DY, Chen DF, Yang YF. Experiment of cuttage propagation of *Taxus cuspidata* in greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2020(13): 65–70.
- [15] 王冰. 东北红豆杉快速繁殖技术的研究 [D]. 延吉: 延边大学, 2015.
- [16] 刁云飞, 刘延坤, 刘玉龙, 田松岩. 穆棱东北红豆杉种群结构特征 [J]. 中国科学: 生命科学, 2020, 50(4): 391–397.
Diao YF, Liu YK, Liu YL, Tian SY. Population structure characteristics of *Taxus cuspidata* [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2020, 50(4): 391–397.
- [17] 刁云飞, 金光泽, 田松岩, 刘延坤, 刘玉龙, 等. 黑龙江省穆棱东北红豆杉林物种组成与群落结构 [J]. 林业科学, 2016, 52(5): 26–36.
Diao YF, Jin GZ, Tian SY, Liu YK, Liu YK, et al. Species composition and community structure of a *Taxus cuspidata* forest in muling nature reserve of Heilongjiang province, China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(5): 26–36.
- [18] 刘丹, 郭忠玲, 崔晓阳, 范春楠. 5种东北红豆杉植物群丛及其物种多样性的比较 [J]. 生物多样性, 2020, 28(3): 340–349.
Liu D, Guo ZL, Cui XY, Fan CN. Comparison of five associations of *Taxus cuspidata* and their species diversity [J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(3): 340–349.
- [19] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 魏海, 宋治清, 等. 耦合恢复力的林区土地生态适宜性评价——以吉林省汪清县为例 [J]. 地理学报, 2015, 70(3): 476–487.
Liu YX, Wang YL, Peng J, Wei H, Song ZQ, et al. Land ecological suitability assessment for forest coupled with the resilience perspective: a case study in Wangqing county, Jilin province, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 476–487.
- [20] 杜志, 亢新刚, 包昱君, 杨鑫霞. 长白山云冷杉林不同演替阶段的树种空间分布格局及其关联性 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 14–19.
Du Z, Kang XG, Bao YJ, Yang XX. Spatial distribution patterns and associations of tree species during different succession stages in spruce-fir forests of Changbai Mountains, northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(2): 14–19.
- [21] 闫琰, 张春雨, 赵秀海. 长白山不同演替阶段针阔混交林群落物种多度分布格局 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(9): 923–934.
Yan Y, Zhang CY, Zhao XH. Species-abundance distribution patterns at different successional stages of conifer and broad-leaved mixed forest communities in Changbai Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(9): 923–934.
- [22] 刘巍, 曹伟. 长白山云冷杉群落主要种群生态位特征 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1766–1774.
Liu W, Cao W. Niche characteristics of main plant species in spruce-fir forests in Changbai Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1766–1774.
- [23] 龚直文, 顾丽, 亢新刚, 杨华, 赵浩彦. 长白山森林次生演替过程中林木空间格局研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 92–99.
Gong ZW, Gu L, Kang XG, Yang H, Zhao HY. Spatial pattern of forests during secondary succession in Changbai Mountain, northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(2): 92–99.
- [24] 方精云, 朱江玲, 郭兆迪, 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 JY, Zhu JL, Guo ZD, Wang XP, Shen ZH, et al. Methods and protocols for plant community inventory [J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533–548.

- [25] Schluter D. A variance test for detecting species associations, with some example applications [J]. *Ecology*, 1984, 65(3): 998–1005.
- [26] Liu L, Wang X, Wen Q, Jia Q, Liu Q. Interspecific associations of plant populations in rare earth mining wasteland in southern China[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 118: 82–88.
- [27] 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 刘彤. 植物种间联结研究内容与方法评述[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8224–8233.
Xu MH, Liu M, Zhai DT, Liu T. A review of contents and methods used to analyze various aspects of plant interspecific associations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 8224–8233.
- [28] Bishara AJ, Hittner JB. Testing the significance of a correlation with nonnormal data: comparison of pearson, spearman, transformation, and resampling approaches [J]. *Psychol Methods*, 2012, 17(3): 399–417.
- [29] 刘润红, 姜勇, 常斌, 李娇凤, 荣春艳, 等. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6881–6893.
Liu RH, Jiang Y, Chang B, Li JF, Rong CY, et al. Interspecific associations and correlations among the main woody plants in a *Pterocarya stenoptera* community in a riparian zone of Lijiang River, Guilin, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6881–6893.
- [30] 李帅锋, 郎学东, 黄小波, 刘万德, 苏建荣, 等. 藤枣生境地木本植物种间关联性与群落稳定性[J]. 生物多样性, 2020, 28(3): 350–357.
Li SF, Lang XD, Huang XB, Liu WD, Su JR, et al. Interspecific association of woody plant species and community stability in the *Eleutharrhena macrocarpa* habitat[J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(3): 350–357.
- [31] 张腾, 郑秋敏, 王玉玲, 刘宇飞, 王茜, 陶建平. 缙云秋海棠与主要伴生物种的种间关联性研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(9): 52–59.
Zhang T, Zheng QM, Wang YL, Liu YF, Wang Q, Tao JP. On interspecific association for *Begonia jinyunensis* and its major associated species[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(9): 52–59.
- [32] 沈雪梨, 吴远密, 朱艺璇, 童玲, 胡巧立, 等. 濒危植物百花山葡萄群落物种生态位特征与种间联结研究[J]. 植物科学学报, 2020, 38(2): 195–204.
Shen XL, Wu YM, Zhu YX, Tong L, Hu QL, et al. Community niche characteristics and interspecific associations of critically endangered species, *Vitis baihuashanensis* M. S. Kang et D. Z. Lu[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38(2): 195–204.
- [33] 张明霞, 王得祥, 康冰, 张岗岗, 刘璞, 等. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 12–21.
Zhang MX, Wang DX, Kang B, Zhang GG, Liu P, et al. Interspecific associations of dominant plant populations in secondary forest of *Pinus armandii* in Qinling Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(1): 12–21.
- [34] 黄世能, 李意德, 骆土寿, 王伯荪. 海南岛尖峰岭次生热带山地雨林树种间的联结动态[J]. 植物生态学报, 2000(5): 569–574.
Huang SN, Li YD, Luo TS, Wang BS. Dynamics of associations between tree species in a secondary tropical montane rain forest at Jianfengling on Hainan island [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000(5): 569–574.
- [35] 李云灵. 东北红豆杉种间关系研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [36] 柳剑丽, 王宗礼, 李平, 高娃. 锡林郭勒典型草原不同群落物种间关系的数量分析[J]. 中国草地学报, 2013, 35(5): 74–79.
Liu JL, Wang ZL, Li P, Gao W. Quantitative analysis of relationships among species of different communities in typical steppe in Xilingol [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(5): 74–79.
- [37] 龚容, 高琼, 王亚林. 围封对温带半干旱典型草原群落种间关联的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(6): 554–563.
Gong R, Gao Q, Wang YL. Effects of exclosure on community inter-specific relationships in a typical temperate grassland [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(6): 554–563.
- [38] 叶权平, 张文辉, 于世川, 薛文艳. 桥山林区麻栎群落主要乔木种群的种间联结性[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3165–3174.
Ye QP, Zhang WH, Yu SC, Xue WY. Interspecific association of the main tree populations of the *Quercus acutissima* community in the Qiaoshan forest area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3165–3174.

(责任编辑: 李惠英)