

林窗尺度对马尾松人工林林下灌草层优势种生态位的早期影响

刘江丽¹, 吕倩¹, 刘俊杰¹, 陈小红^{1,2}, 范川^{1,2}, 李贤伟^{1,2,3*}

(1 四川农业大学 林学院, 成都 611130; 2 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业局重点实验室, 成都 611130; 3 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 成都 611130)

摘 要: 马尾松作为中国广泛栽植的乡土树种, 其人工林群落结构简单和生物多样性低下是普遍存在的生态学问题。探究不同林窗尺度对马尾松人工林林下植被群落的影响, 可为马尾松人工林近自然经营提供理论依据。该研究在 45 a 生马尾松人工林中分别设置 A(50 m²)、B(100 m²)、C(200 m²) 和 D(667 m²) 4 种不同尺度的林窗, 以不做任何处理的马尾松人工林作为对照(CK), 探究采伐开窗后林窗内自然更新 1 a 后的灌草层植物组成、优势种生态位宽度和生态位重叠度分布特征。结果显示: (1) 除 100 m² 林窗下灌木层物种数与对照无显著差异外, 其余林窗灌草层物种数均显著高于对照($P < 0.05$), 且 200 m² 林窗下灌草层物种数均最多, 分别为 35 种和 20 种; 4 种林窗下灌草层物种丰富度指数较对照均显著增加($P < 0.05$), 最大值均出现在 200 m² 林窗下, 其值分别为对照的 1.5 倍和 2.6 倍。(2) 林窗增加了灌草层喜光植物种类, 且在 200 m² 林窗下种类最多, 灌木层喜光植物有 13 种, 草本层喜光植物有 5 种。(3) 4 种林窗下灌草层优势种中, 喜光植物生态位宽度均较大, 200 m² 林窗下灌草层生态位宽度平均值最小, 其对资源利用程度低, 重要值与生态位宽度之间无显著相关性($P > 0.05$)。(4) 4 种林窗下灌草层优势种间生态位重叠度指数均较小。667 m² 林窗下, 灌草层优势种平均生态位重叠度指数最小, 分别为 0.029 和 0.024, 200 m² 林窗下灌草层优势种高生态位重叠度占总数比例最大, 分别为 20% 和 23.8%。研究表明, 采伐开窗促进了马尾松人工林林下植被发育, 丰富了林下植物多样性, 有利于马尾松林稳定持续发展, 对精准提升马尾松人工林质量具有重要意义。

关键词: 马尾松; 林窗; 人工林; 耐荫性; 生态位宽度; 生态位重叠度

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

Early Effect of Forest Gap Size on Niche of Dominant Species in Shrub and Herb Layers under *Pinus massoniana* Plantation

LIU Jiangli¹, LÜ Qian¹, LIU Junjie¹, CHEN Xiaohong^{1,2}, FAN Chuan^{1,2}, LI Xianwei^{1,2,3*}

(1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Key Laboratory of National Forestry and Prairie Bureau on Forest Resources Conservation and Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Chengdu 611130, China; 3 Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: *Pinus massoniana* is a widely planted native tree species in China. The simple community structure and low biodiversity of *P. massoniana* plantation are common ecological problems. Exploring the in-

收稿日期: 2021-09-10; 修改稿收到日期: 2021-12-02

基金项目: 国家“十三五”科技支撑计划项目(2017YFD0600302); 德国政府贷款四川林业可持续经营项目(G1403083); 四川农业大学“大学生创新性实验”(201710626071)

作者简介: 刘江丽(1996—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态和森林培育研究。E-mail: ljli1004908@163.com

* 通信作者: 李贤伟, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林培育学研究。E-mail: lxw@sicau.edu.cn

fluence of different forest gap sizes on the understory vegetation community of *P. massoniana* plantation can provide a theoretical basis for the near-natural management of *P. massoniana* plantation. To explore the distribution of shrub and herb layer plant composition, niche breadth and niche overlap of dominant species in the gap after natural regeneration for 1 year after cutting, we set four different sizes of gaps A (50 m²), B (100 m²), C (200 m²) and D (667 m²) in 45-year-old *P. massoniana* plantation, with the untreated *P. massoniana* plantation as control in this study. The results showed: (1) except that there was no significant difference in the number of species in the shrub layer under the 100 m² gap, the number of species in the shrub and herb layer in the other gaps was significantly higher than that in the control ($P < 0.05$), and the number of species in the shrub and herb layer under the 200 m² gap was the most, with 35 and 20 species, respectively. The species richness index of the shrub and herb layer under the four forest gaps significantly increased compared with the control ($P < 0.05$), the maximum values all appeared under the 200 m² gap, and their values were respectively 1.5 times and 2.6 times that of the control. (2) The species of sun plants of the shrub and herb layer increased in the forest gap, and there were the most species under the 200 m² gap. There were 13 species of sun plants in the shrub layer and 5 species of sun plants in the herb layer. (3) Among the dominant species in the shrub and herb layer under the four forest gaps, the niche breadth of the sun plants was larger, the average niche width of the shrub and herb layer under the 200 m² gap was the smallest, the degree of resource utilization was low, and there was no significant correlation between the important value and the niche breadth ($P > 0.05$). (4) The niche overlap index of the dominant species in the shrub and herb layer under the forest gap was small. Under 667 m² gap, the average niche overlap indexes of dominant species in shrub and herb layer were the lowest, 0.029 and 0.024, respectively. The proportions of high niche overlap of dominant species in 200 m² gap were the highest, 20% and 23.8%, respectively. Studies have shown that cutting and opening windows promote the development of understory vegetation in the *P. massoniana* plantation, enrich the diversity of understory plants, which is conducive to the stable and sustainable development of the *P. massoniana* forest, and is of great significance to accurately improve the quality of the *P. massoniana* plantation.

Key words: *Pinus massoniana*; forest gap; plantation; shade tolerance; niche breadth; niche overlap

生态位可表征生态系统中物种间以及物种与环境之间的关系^[1-2]。在生态系统中利用不同资源、生存在不同空间的物种因不存在资源和空间的争夺而能使群落得以稳定,当不同物种利用相同的资源和空间时,根据优胜劣汰原则,最终会形成以优势物种为主的稳定群落^[3-4]。生态位宽度和生态位重叠作为生态位的两个主要指标,其均能在一定程度上反映群落结构及物种多样性,其中生态位宽度反映物种对资源和空间的利用情况,生态位重叠能反映物种间竞争的激烈程度及群落稳定程度^[5-6]。目前已有的生态位相关研究主要集中在生态位季节性变化^[7]、土壤种类对物种生态位的影响^[8]、土壤细菌生态位^[9]、气候变化对生态位的影响^[10]及生态位模型^[11]等方面,而开窗尺度对林下物种生态位影响的相关研究较少。

马尾松(*Pinus massoniana*)具有耐贫瘠、速生、适应性强等特点,是中国主要造林树种之一,其人工林是中国南方面积最大的人工林^[12]。人工林大多存在土壤肥力下降、生物多样性较低等问题,极大地降低了人工林生态系统的生态价值和经济价值^[13]。

因管理不善,长江流域低山丘陵区马尾松人工林普遍存在生长较差,林下植被群落结构简单等生态问题。目前马尾松人工林是中国南方退化人工林中面积最大的林分类型之一^[14]。如何改善人工林林分结构及提高其生态效益,已成为恢复生态学研究的重要内容^[15-16]。

林窗对林地更新发挥着重要作用^[17]。采伐林窗后林下光照增多,林地裸露面积增大,直接导致地表温度升高,水分含量减少,间接影响林下植被的物种组成^[18]、群落结构和生态服务功能^[19-20]。不同大小的林窗对林下植被群落的影响程度不同^[21],研究林窗尺度对林下植被更新的影响,对深入探索人工林近自然经营具有重要意义。前人研究主要集中于林窗对植物地下资源分配^[22]、土壤微生物多样性^[23]、植被更新^[24]、植被初级生产量^[25]和林分生态服务功能的影响^[26]等,而关于林窗大小如何影响植物群落分布及优势种生态位的相关研究较少。

本研究以 45 a 生马尾松过熟林为研究对象,探究 4 种不同开窗尺度对马尾松林下植被组成及优势种生态位的影响,以期调整其林下群落结构,促进其

充分发挥应有的生态效益和经济效益,为马尾松人工林近自然经营提供理论参考。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

本实验研究区位于四川省华蓥市东方红林场(30°07' N~30°28' N,106°37' E~106°54' E),海拔206.7~1 704.1 m,地处川东低山区。该地区属中亚热带湿润季风气候,具有气候温和、温差较大、雨量充沛、降雨不均等特点^[27]。研究区多年平均气温17.2℃,平均降雨量1 087.84 mm^[28]。土壤为黄壤,土层较瘠薄。未采取任何经营措施的马尾松林龄为45年,郁闭度0.6,平均胸径22 cm,平均树高15 m,林下灌木层主要为樟(*Cinnamomum camphora*)、毛桐(*Mallotus barbatius*)和枹栎(*Quercus serrata*),草本层主要覆盖蕨类。

1.2 样地设置及调查

2017年8月,在东方红林场选择海拔、坡度、坡向、坡位、林分密度及郁闭度等条件基本一致、经营历史相同的45 a生马尾松人工林,该林分生态功能处于退化状态,生产功能处于极低效状态,采用完全随机设计的方法设置50 m²(A)、100 m²(B)、200 m²(C)、667 m²(D)的4种椭圆林窗,林窗设于距离林缘10 m以上的林内,每一种处理重复3次,另设置3个20 m×20 m对照林分样地(CK),共设置15个研究样地,各样地间设有5 m缓冲带。林窗大小由激光测距仪测定,并对需采伐马尾松进行测量,计算出株数和蓄积量,林窗边界采用有色丝带进行标记。林窗内采伐的马尾松、毛竹(*Phyllostachys edulis*)、树干及枝条等残体全部移出林窗,林窗内植物再生主要依靠种子和土壤种子库。马尾松人工林样地概况见表1。

2018年10月,对样地中林下植物进行调查,采

用五点取样法在每个样地布设5个3 m×3 m的样方作为灌木样方,再在样地内随机设置10个1 m×1 m的样方作为草本样方^[29]。记录每个灌木样方中各种植物的种名、株数/丛数、冠幅、盖度等^[30]。

1.3 数据处理与计算

1.3.1 物种丰富度指数计算 物种丰富度采用Patrick物种丰富度指数(R)^[31],计算公式如下:

$$R=(S-1)/\ln N$$

式中: S 为样方中出现的物种数, N 为物种总数量。

1.3.2 植物重要值计算 利用样地调查数据,计算出在各样地灌草层中的物种的重要值^[27](IV)。计算公式如下:

$$IV=(\text{相对密度}+\text{相对频度}+\text{相对盖度})/3$$

1.3.3 优势种生态位宽度计算 生态位宽度采用Shannon-Wiener生态位宽度指数^[32],计算公式如下:

$$B_i=-\sum_{j=1}^r P_{ij} \ln P_{ij}$$

式中 B_i 为 i 物种的生态位宽度; $P_{ij}=n_{ij}/N_i$,式中 n_{ij} 为物种 i 在资源 j 上的重要值, N_i 表示物种 i 在所有资源上的重要值之和。 P_{ij} 为物种 i 在资源 j 上的重要值占该种在所有资源上重要值之和的比例, r 为资源位总位数, j 为不同改造模式^[33]。

1.3.4 优势种生态位重叠计算 生态位重叠采用Levins^[34]生态位重叠公式,计算公式如下:

$$L_{ih}=B_{(L)i} \sum_{j=1}^r P_{ij} P_{hj}$$

$$L_{hi}=B_{(L)h} \sum_{j=1}^r P_{ij} P_{hj}$$

$$B_{(L)i}=1/\left(r \sum_{j=1}^r P_{ij}^2\right)$$

式中 L_{ih} 为物种 i 重叠物种 h 的生态位重叠指数; L_{hi} 为物种 h 重叠物种 i 的生态位重叠指数; P_{ij} 、

表1 林窗各样地基本概况

Table 1 Site description for each plot of forest gaps

处理 Treatment	林窗尺度 Gap size/(A/m ²)	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/°	坡向 Aspect	坡位 Slope position
CK	0	30°17'51" N,106°45'55" E	571.8	7	西南 SW	上坡 Uphill
A	50	30°18'04" N,106°44'47" E	574.7	17	西南 SW	上坡 Uphill
B	100	30°17'51" N,106°45'53" E	543.9	9	西南 SW	上坡 Uphill
C	200	30°17'49" N,106°45'55" E	544.1	10	西南 SW	上坡 Uphill
D	667	30°17'51" N,106°44'55" E	565.8	15	西南 SW	上坡 Uphill

N_i 和 n_{ij} 的定义及计算方法同上; $B_{(L)}$ 为 Levins 生态位宽度指数, $B_{(L)i}$ 和 $B_{(L)h}$ 的值为 $[1/r,1]$; L_{ih} 和 L_{hi} 的值为 $[0,1]$ ^[34]。

采用 Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件统计调查数据、计算相关指标及制图,利用方差分析(One-way ANOVA)检测不同尺度林窗下的物种丰富度指数间的差异显著性。优势种重要值和生态位宽度关系采用 Pearson 相关分析。

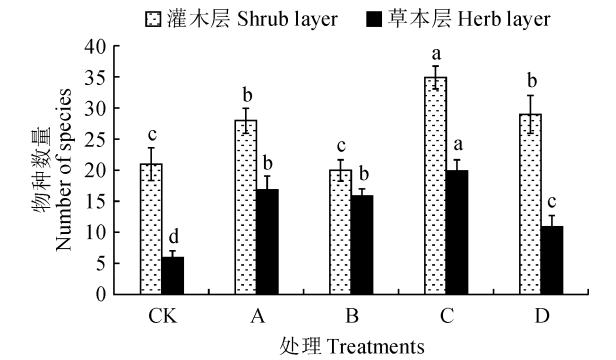
2 结果和分析

2.1 林窗尺度对马尾松人工林灌草层物种数量的影响

由图 1 可见,除 B 林窗灌木层植物种数与 CK 差异不显著,其余林窗灌木层物种数均显著高于 CK($P<0.05$)。CK、A、B、C 和 D 林窗灌木层物种数分别为 21 种、28 种、20 种、35 种和 29 种。各林窗草本层物种数均显著高于 CK($P<0.05$),除 A、B 林窗草本层物种数之间差异不显著,其余处理草本层物种数两两之间差异显著($P<0.05$),CK、A、B、C 和 D 林窗草本层物种数分别为 6 种、17 种、16 种、20 种和 11 种,表明开窗增加了马尾松人工林灌草层植物种类。

2.2 林窗尺度对马尾松人工林灌草层物种丰富度的影响

由图 2 可知,各林窗灌草层的物种丰富度指数较 CK 均显著增加($P<0.05$),各林窗灌草层物种丰富度指数两两之间均存在显著差异($P<0.05$)。



不同小写字母分别表示灌木层或草本层不同林窗间物种数差异显著($P<0.05$)

图 1 马尾松人工林不同林窗尺度对灌草层物种数量的影响

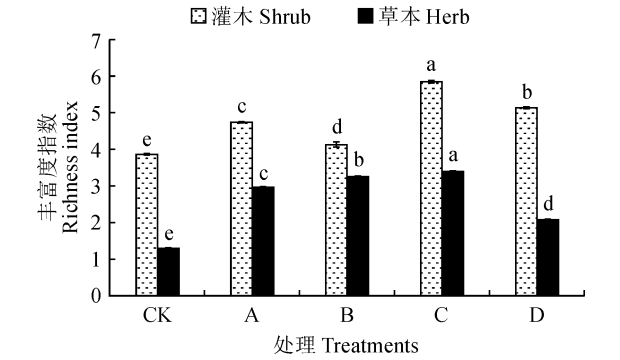
Different lowercase letters indicate that there are significant differences in the number of species among different gaps in shrub layer or herb layer ($P < 0.05$)

Fig. 1 Effects of different gap sizes on the number of species in shrub and herb layer of *P. massoniana* plantation

A、B、C 和 D 林窗灌木层物种丰富度指数分别为 CK 灌木层的 1.2、1.1、1.5 和 1.3 倍,A、B、C 和 D 林窗草本层物种丰富度指数分别为 CK 草本层的 2.3、2.5、2.6 和 1.6 倍,C 林窗灌草层的物种丰富度指数均为最大。

2.3 林窗尺度对马尾松人工林灌草层重要值及耐荫性的影响

由表 2 可知,CK 林下的 21 种灌木隶属于 15 科 18 属;A 林窗的 28 种灌木隶属于 18 科 20 属;B 林窗的 20 种灌木隶属于 14 科 15 属;C 林窗的 35 种灌木隶属于 21 科 29 属;D 林窗的 29 种灌木隶属于 16 科 21 属。由表 3 可得,CK 林下的 6 种草本隶属于 5 科 6 属;A 林窗的 17 种草本隶属于 10 科 17 属;B 林窗的 16 种草本隶属于 10 科 16 属;C 林窗的 20 种草本隶属于 14 科 20 属;D 林窗的 11 种草本隶属于 5 科 10 属。CK 灌木层优势种为地桃花(*Urena lobata*) (7.7)、樟(15.1)、楸木(*Aralia chinensis*) (7.0)、九节龙(*Ardisia pusilla*) (21.6) 和柳杉(*Cryptomeria japonica* var. *sinensis*) (10.9),草本层有金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*) (12.0)、蕨(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*) (21.3)、芒(*Miscanthus sinensis*) (16.2) 等 6 个优势种;A 林窗灌木层优势种有白花泡桐(*Paulownia fortunei*) (6.2)、樟(20.4)、楸木(13.9) 和地桃花(7.6),草本层共有荇草(*Arthraxon hispidus*) (7.7)、蕨(16.2)、芒(7.5) 和酢浆草(*Oxalis corniculata*) (9.1) 等 6 个优势种;B 林窗灌木层



不同小写字母分别表示灌木层或草本层不同林窗间植物丰富度差异显著($P<0.05$)

图 2 马尾松人工林不同林窗尺度对灌草层物种丰富度指数的影响

Different lowercase letters indicate significant differences in plant richness in the shrub layer or the herb layer at different forest gap sizes ($P < 0.05$)

Fig. 2 Effect of different gap sizes on species richness index of shrub and herb layer in *P. massoniana* plantation

表 2 马尾松人工林林窗下灌木层物种重要值及耐荫性

Table 2 Important value and shade tolerance of shrub layer species under the gap of *P. massoniana* plantation

种 Species	科 Family	属 Genus	耐荫性 Shade tolerance	重要值 Important value/%				
				CK	A	B	C	D
樟 <i>C. camphora</i>	樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	Ⅱ	15.1	20.3	17.3	9.7	13.3
茶 <i>C. sinensis</i>	山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	Ⅱ	1.8	—	—	—	—
槲木 <i>A. chinensis</i>	五加科 Araliaceae	槲木属 <i>Aralia</i>	I	7.0	13.9	6.2	6.2	23.3
地桃花 <i>U. lobata</i>	锦葵科 Malvaceae	梵天花属 <i>Urena</i>	I	7.7	7.6	3.9	10.2	2.4
枹栎 <i>Q. serrata</i>	壳斗科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>	I	3.8	3.6	7.0	4.1	1.0
荚蒾 <i>V. dilatatum</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	I	1.4	—	—	—	0.9
九节龙 <i>A. pusilla</i>	紫金牛科 Myrsinaceae	紫金牛属 <i>Ardisia</i>	Ⅲ	21.6	—	—	—	13.6
梨叶悬钩子 <i>R. piriifolius</i>	蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	Ⅲ	3.2	3.5	6.7	1.2	5.9
柳杉 <i>C. fortunei</i>	杉科 Taxodiaceae	柳杉属 <i>Cryptomeria</i>	Ⅱ	10.9	2.2	3.6	1.2	—
毛桐 <i>M. barbatus</i>	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	I	4.3	—	—	9.3	—
铁仔 <i>M. africana</i>	紫金牛科 Myrsinaceae	铁仔属 <i>Myrsine</i>	I	2.6	—	4.0	3.1	4.4
细枝柃 <i>E. loquaiana</i>	山茶科 Theaceae	柃木属 <i>Eurya</i>	Ⅱ	3.8	1.1	—	2.4	—
柞木 <i>X. racemosum</i>	大风子科 Flacourtiaceae	柞木属 <i>Xylosma</i>	I	3.7	—	—	—	—
竹叶榕 <i>F. stenophylla</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	I	1.3	—	—	1.0	0.8
菝葜 <i>S. china</i>	菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	Ⅱ	1	3.4	7.7	1.1	3.2
高粱泡 <i>R. lambertianus</i>	蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	Ⅱ	1.7	1.9	6.1	—	0.7
尖叶菝葜 <i>S. arisanensis</i>	菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	Ⅲ	1.1	—	—	—	0.8
鲫鱼胆 <i>M. perlarius</i>	紫金牛科 Myrsinaceae	杜茎山属 <i>Maesa</i>	Ⅱ	1.9	—	—	—	—
毛萼莓 <i>R. chroosepalus</i>	蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	Ⅱ	1.3	3.4	1.8	1.5	—
细圆藤 <i>P. glaucus</i>	防己科 Menispermaceae	细圆藤属 <i>Pericampylus</i>	Ⅱ	2.3	2.9	—	—	—
展毛野牡丹 <i>M. candidum</i>	野牡丹科 Melastomataceae	野牡丹属 <i>Melastoma</i>	I	2.5	4.0	—	3	—
白箭 <i>A. trifoliatus</i>	五加科 Araliaceae	五加属 <i>Acanthopanax</i>	I	—	0.5	—	1.0	1.5
白叶莓 <i>R. innominatus</i>	蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	Ⅱ	—	0.5	—	—	—
寒莓 <i>R. buergeri</i>	蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	Ⅲ	—	4.1	3.4	3.1	4.6
黄荆 <i>V. negundo</i>	马鞭草科 Verbenaceae	牡荆属 <i>Vitex</i>	Ⅱ	—	1.2	—	2.8	2.4
柃木 <i>E. japonica</i>	山茶科 Theaceae	柃木属 <i>Eurya</i>	Ⅲ	—	2.3	4.8	2.1	2
白花泡桐 <i>P. fortunei</i>	玄参科 Scrophulariaceae	泡桐属 <i>Paulownia</i>	I	—	6.2	1.2	—	—
琴叶榕 <i>F. pandurata</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	I	—	1.5	2.7	2.2	2.1
三裂蛇葡萄 <i>A. delavayana</i>	葡萄科 Vitaceae	蛇葡萄属 <i>Ampelopsis</i>	Ⅱ	—	0.7	—	1.8	1.8
山木通 <i>C. finetiana</i>	毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	Ⅱ	—	2.3	1.6	1.0	1.6
木姜子 <i>L. pungens</i>	樟科 Lauraceae	木姜子属 <i>Litsea</i>	Ⅱ	—	2.1	1.3	1.6	2.6
土茯苓 <i>S. glabra</i>	菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	Ⅱ	—	0.7	—	—	—
托柄菝葜 <i>S. discotis</i>	菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	Ⅲ	—	2.2	4.6	3.6	0.9
野鸦椿 <i>E. japonica</i>	省沽油科 Staphyleaceae	野鸦椿属 <i>Euscaphis</i>	I	—	1.1	—	—	2.0
长托菝葜 <i>S. ferox</i>	菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	Ⅲ	—	1.3	—	—	0.8
紫金牛 <i>A. japonica</i>	紫金牛科 Myrsinaceae	紫金牛属 <i>Ardisia</i>	Ⅲ	—	3.9	—	7.2	—
六月雪 <i>S. japonica</i>	茜草科 Rubiaceae	白马骨属 <i>Serissa</i>	Ⅱ	—	1.6	—	—	—
地果 <i>F. tikoua</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	I	—	—	13.6	—	—
烟管荚蒾 <i>V. utile</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	Ⅱ	—	—	1.2	2.3	—
盐肤木 <i>R. chinensis</i>	漆树科 Anacardiaceae	盐肤木属 <i>Rhus</i>	Ⅱ	—	—	1.3	0.9	0.9
紫麻 <i>O. frutescens</i>	荨麻科 Urticaceae	紫麻属 <i>Oreocnide</i>	Ⅲ	—	—	—	6.0	—
小果蔷薇 <i>R. cymosa</i>	蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	I	—	—	—	0.8	1.2
鞘柄菝葜 <i>S. stans</i>	菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	Ⅲ	—	—	—	—	—
山莓 <i>R. corchorifolius</i>	蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	I	—	—	—	1.7	1.7

续表 2 Continued Table 2									
种 Species	科 Family	属 Genus	耐荫性 Shade tolerance	重要值 Important value/%					
				CK	A	B	C	D	
绿叶地锦 <i>P. laetevirens</i>	葡萄科 Vitaceae	地锦属 <i>Parthenocissus</i>	Ⅱ	—	—	—	1.4	0.8	
络石 <i>T. jasminoides</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	络石属 <i>Trachelospermum</i>	Ⅱ	—	—	—	0.8	—	
光叶山矾 <i>S. lancifolia</i>	山矾科 Symplocaceae	山矾属 <i>Symplocos</i>	Ⅲ	—	—	—	1.3	—	
革叶猕猴桃 <i>A. rubricaulis</i> var. <i>coriacea</i>	猕猴桃科 Actinidiaceae	猕猴桃属 <i>Actinidia</i>	Ⅱ	—	—	—	1.5	—	
川山橙 <i>M. hemsleyanus</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	山橙属 <i>Melodinus</i>	I	—	—	—	0.9	—	
常春藤 <i>H. nepalensis</i> var. <i>sinensis</i>	五加科 Araliaceae	常春藤属 <i>Hedera</i>	Ⅱ	—	—	—	1.1	—	
栗 <i>C. mollissima</i>	壳斗科 Fagaceae	栗属 <i>Castanea</i>	I	—	—	—	0.9	—	
尖叶清风藤 <i>S. swinhoei</i>	清风藤科 Sabiaceae	清风藤属 <i>Sabia</i>	Ⅱ	—	—	—	—	1.7	
异叶榕 <i>F. heteromorpha</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	Ⅱ	—	—	—	—	1.1	
注: I. 喜光; Ⅱ. 中性; Ⅲ. 耐阴; —. 未发现。下同									
Note: I. Love the light; Ⅱ. Neutral; Ⅲ. Shade tolerance; —. Negative. The same as below									

表 3 马尾松人工林林窗下草本层物种重要值及耐荫性

Table 3 Important value of species and shade tolerance of herb layer under the gap of <i>P. massoniana</i> plantation									
种 Species	科 Family	属 Genus	耐荫性 Shade tolerance	重要值 Important value/%					
				CK	A	B	C	D	
金星蕨 <i>P. glanduligera</i>	金星蕨科 Thelypteridaceae	金星蕨属 <i>Parathelypteris</i>	Ⅲ	12.0	4.5	8.6	3.7	1.9	
蕨 <i>P. aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>	蕨科 Pteridiaceae	蕨属 <i>Pteridium</i>	I	21.3	16.2	17.9	7.7	8.2	
芒 <i>M. sinensis</i>	禾本科 Gramineae	芒属 <i>Miscanthus</i>	I	16.2	7.5	5.2	3.4	10.7	
乌蕨 <i>S. chusanum</i>	陵齿蕨科 Lindsaeaceae	乌蕨属 <i>Stenoloma</i>	Ⅲ	11.1	5.6	9.4	—	—	
异羽复叶耳蕨 <i>A. simplicior</i>	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	复叶耳蕨属 <i>Arachniodes</i>	Ⅲ	12.9	—	—	—	11.8	
皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	禾本科 Gramineae	狗尾草属 <i>Setaria</i>	Ⅲ	26.5	20.8	13.0	12.3	15.5	
东风草 <i>B. megacephala</i>	菊科 Compositae	艾纳香属 <i>Blumea</i>	Ⅱ	—	2.2	—	1.6	—	
黄果茄 <i>S. xanthocarpum</i>	茄科 Solanaceae	茄属 <i>Solanum</i>	I	—	2.1	—	—	—	
积雪草 <i>C. asiatica</i>	伞形科 Umbelliferae	积雪草属 <i>Centella</i>	Ⅱ	—	1.2	—	—	—	
荩草 <i>A. hispidus</i>	禾本科 Gramineae	荩草属 <i>Arthraxon</i>	I	—	7.7	9.7	—	9.1	
魁蒿 <i>A. princeps</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	Ⅱ	—	3.4	—	—	—	
四川莎草 <i>C. szechuanensis</i>	莎草科 Cyperaceae	莎草属 <i>Cyperus</i>	I	—	4.0	3.0	—	—	
竹叶草 <i>O. compositus</i>	禾本科 Gramineae	求米草属 <i>Oplismenus</i>	Ⅲ	—	2.1	1.8	9.1	1.3	
知风草 <i>E. ferruginea</i>	禾本科 Gramineae	画眉草属 <i>Eragrostis</i>	I	—	3.0	5.2	0.8	—	
酢浆草 <i>O. corniculata</i>	酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草属 <i>Oxalis</i>	Ⅱ	—	9.1	1.9	5.4	—	
中华复叶耳蕨 <i>A. chinensis</i>	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	复叶耳蕨属 <i>Arachniodes</i>	Ⅲ	—	4.2	2.1	3.4	4.7	
黑足鳞毛蕨 <i>D. fuscipes</i>	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	鳞毛蕨属 <i>Dryopteris</i>	Ⅲ	—	3.6	2.1	3.0	30.5	
锯叶合耳蕨 <i>S. nagensium</i>	菊科 Compositae	合耳蕨属 <i>Synotis</i>	Ⅱ	—	2.8	8.8	—	3.9	
狗脊 <i>W. japonica</i>	乌毛蕨科 Blechnaceae	狗脊属 <i>Woodwardia</i>	I	—	—	7.6	6.9	—	
千金子 <i>L. chinensis</i>	禾本科 Gramineae	千金子属 <i>Leptochloa</i>	Ⅱ	—	—	1.8	—	2.4	
长柄山蚂蝗 <i>P. podocarpum</i>	蝶形花科 Fabaceae	长柄山蚂蝗属 <i>Podocarpium</i>	Ⅱ	—	—	1.9	—	—	
丛枝蓼 <i>P. posumbu</i>	蓼科 Polygonaceae	蓼属 <i>Polygonum</i>	Ⅱ	—	—	—	2.2	—	
淡竹叶 <i>L. gracile</i>	禾本科 Gramineae	淡竹叶属 <i>Lophatherum</i>	Ⅲ	—	—	—	10.4	—	
华南鳞盖蕨 <i>M. hancei</i>	碗蕨科 Dennstaedtiaceae	鳞盖蕨属 <i>Microlepia</i>	Ⅲ	—	—	—	10.1	—	
芒萁 <i>D. dichotoma</i>	里白科 Gleicheniaceae	芒萁属 <i>Dicranopteris</i>	I	—	—	—	4.9	—	
糯米团 <i>G. hirta</i>	蕁麻科 Urticaceae	糯米团属 <i>Gonostegia</i>	Ⅲ	—	—	—	3.1	—	
山麦冬 <i>L. spicata</i>	百合科 Liliaceae	山麦冬属 <i>Liriope</i>	Ⅲ	—	—	—	0.9	—	
鸭跖草 <i>C. communis</i>	鸭跖草科 Commelinaceae	鸭跖草属 <i>Commelina</i>	Ⅱ	—	—	—	1.7	—	
鸢尾 <i>I. tectorum</i>	鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	Ⅱ	—	—	—	2.5	—	
紫菀 <i>A. tataricus</i>	菊科 Compositae	紫菀属 <i>Aster</i>	Ⅲ	—	—	—	6.9	—	

优势种有菝葜(*Smilax china*)(7.7)、槲木(6.2)、地果(*Ficus tikoua*)(13.6)、枹栎(7.0)、高粱泡(*Rubus lambertianus*)(6.1)等7种,草本层有狗脊(*Woodwardia japonica*)(7.6)、金星蕨(8.6)、荇草(9.7)和芒(5.2)等8个优势种;C林窗灌木层优势种有紫麻(*Oreocnide frutescens*)(6.0)、紫金牛(*Ardisia japonica*)(7.2)、毛桐(*Mallotus barbatus*)(9.3)和地桃花(10.2)等6种,草本层有淡竹叶(*Lophatherum gracile*)(10.4)、狗脊(6.9)、华南鳞盖蕨(*Microlepia hancei*)(10.1)等7个优势种;D林窗灌木层优势种有槲木(23.3)、九节龙(13.6)、梨叶悬钩子(*Rubus pirifolius*)(5.9)和樟(13.4),草本层共有荇草(9.1)、蕨(8.2)和芒(10.7)等5个优势种。就耐荫性而言,除A、B林窗灌木层喜光植物种类略少于CK,其余林窗下灌木层喜光植物种类均多于CK,且C林窗灌木层喜光植物种类最多有13种,而D林窗灌木层喜光植物种类略少于C林窗,可能的原因是开窗后光照增加导致喜光植物增多,而随林窗尺度增大,喜光植物间愈加激烈的竞争^[35]形成了适宜耐荫植物生长的环境,此时耐荫植物逐渐取代喜光植物的优势地位。各林窗下草本层喜光植物种类均多于CK,喜光植物种类随林窗尺度增大而减少,C林窗下喜光植物种类数较多有5种,表明开窗有利于促进喜光植物的生长,且C林窗促进作用最明显。

2.4 林窗尺度对马尾松人工林灌草层优势种生态位宽度的影响

由表4可见,CK林下地桃花(0.343)、芒(0.368),A林窗地桃花(0.342)、荇草(0.359),B林窗枹栎(0.368)、荇草(0.368)和狗脊(0.357),C林窗地桃花(0.365)、狗脊(0.364),D林窗槲木(0.363)、荇草(0.367)和芒(0.346)生态位宽度均较大,且皆为喜光植物,说明开窗后林下光照增强导致喜光植物在灌草层中始终占据着优势地位,而适宜耐荫植物生长的荫蔽环境减少,耐荫植物竞争力不敌喜光植物。林窗下灌木层优势种生态位宽度平均值部分高于对照,部分低于对照,随林窗尺度增大,灌木层优势种生态位宽度平均值先减小后增大,且C林窗最小;各林窗下草本层优势种生态位宽度平均值均小于对照,其变化规律和灌木层一致。表明随林窗尺度的增大,灌草层优势种对资源的利用程度先降低而后利用更充分,C林窗各优势种对资源利用程度最低。各林窗下,灌木层优势种喜光植物地桃花和枹栎,草本层优势种喜光植物荇草和狗脊

生态位宽度均较大。B林窗优势种地果、C林窗优势种紫麻、淡竹叶和华南鳞盖蕨的生态位宽度均为0,表明这4个种只存在于某个单一的资源位中。

由表2~5可知,重要值与生态位宽度并不完全呈正相关关系。各林窗下灌木层优势种的重要值与生态位宽度在所有种中的排序大致相同,如CK

表4 马尾松人工林林窗下灌木层优势种生态位宽度
Table 4 Niche breadth of dominant species in shrub layer under the gap of *P. massoniana* plantation

物种 Species	生态位宽度 Niche breadth				
	CK	A	B	C	D
樟 <i>C. camphora</i>	0.321	0.321	0.337	0.263	0.306
槲木 <i>A. chinensis</i>	0.221	0.311	0.206	0.205	0.363
地桃花 <i>U. lobata</i>	0.343	0.342	—	0.365	—
九节龙 <i>A. pusilla</i>	0.3	—	—	—	0.367
柳杉 <i>C. fortunei</i>	0.303	—	—	—	—
白花泡桐 <i>P. fortunei</i>	—	0.148	—	—	—
菝葜 <i>S. china</i>	—	—	0.356	—	—
地果 <i>F. tikou</i>	—	—	0	—	—
枹栎 <i>Q. serrata</i>	—	—	0.368	—	—
高粱泡 <i>R. lambertianus</i>	—	—	0.313	—	—
梨叶悬钩子 <i>R. pirifolius</i>	—	—	0.365	—	0.359
紫麻 <i>O. frutescens</i>	—	—	—	0	—
紫金牛 <i>A. japonica</i>	—	—	—	0.282	—
毛桐 <i>M. barbatus</i>	—	—	—	0.259	—

表5 马尾松人工林林窗下草本层优势种生态位宽度
Table 5 Niche breadth of dominant species in herb layer under the gap of *P. massoniana* plantation

物种 Species	生态位宽度 Niche breadth				
	CK	A	B	C	D
金星蕨 <i>P. glanduligera</i>	0.367	—	0.357	—	—
蕨 <i>P. aquilinum</i>	0.361	0.337	—	—	0.249
芒 <i>M. sinensis</i>	0.368	0.304	0.256	—	0.346
乌蕨 <i>S. chusanum</i>	0.363	0.367	0.368	—	—
异羽复叶耳蕨 <i>A. simplicior</i>	0.339	—	—	—	0.353
皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	0.361	0.368	0.282	0.275	0.306
积雪草 <i>C. asiatica</i>	—	—	—	—	—
荇草 <i>A. hispidus</i>	—	0.359	0.368	—	0.367
酢浆草 <i>O. corniculata</i>	—	0.327	—	0.366	—
狗脊 <i>W. japonica</i>	—	—	0.357	0.364	—
锯叶合耳菊 <i>S. nagensium</i>	—	—	0.322	—	—
知风草 <i>E. ferruginea</i>	—	—	0.324	—	—
淡竹叶 <i>L. gracile</i>	—	—	—	0.000	—
华南鳞盖蕨 <i>M. hancei</i>	—	—	—	0.000	—
竹叶草 <i>O. compositus</i>	—	—	—	0.282	—
紫菀 <i>A. tataricus</i>	—	—	—	0.000	—

灌木层的地桃花和樟的重要值分别为 7.7% 和 15.1%,生态位宽度分别为 0.343 和 0.321,而草本层却存在重要值与生态位宽度排序不同的情况,如 CK 草本层的芒重要值较小为 16.2%,而其生态位宽度在优势种中最大为 0.368。对各处理下灌草层优势种的重要值和生态位宽度进行 Pearson 相关性分析,结果表明(表 6)两者无显著相关性($P>0.05$)。

2.5 林窗尺度对马尾松人工林灌草层优势种间生态位重叠的影响

由表 7 和 8 可知,各处理林下灌草层优势种种间生态位重叠度值均在 0.200 以下,表明各处理下灌草层优势种间并未形成剧烈竞争,对生存空间的争夺现象不明显。其中,CK、A、B、C 和 D 林窗灌木层优势种间生态位重叠度平均值分别为 0.034、0.032、0.044、0.042 和 0.029,各草本层优势种间生态位重叠度平均值分别为 0.054、0.035、0.042、0.048 和 0.024。由此可见,林窗下灌木层优势种间生态位重叠度平均值部分高于对照,部分低于对照,无明显规律,而草本层优势种生态位重叠度平均值均低于对照,表明开窗后林下草本层优势种间竞争减弱。各处理下,D 林窗灌草层优势种间生态位重叠度平均值最小。CK 灌木层优势种间生态位重叠度值高于 0.080 的种对数占总数的 10.0%,其中最

大为柳杉-九节龙(0.113);A 林窗灌木层优势种间生态位重叠度值高于 0.080 的种对数占总数的 8.3%,最大为樟-白花泡桐(0.080);B 林窗灌木层优势种间生态位重叠度值高于 0.080 的种对数占总数的 14.3%,最大为高粱泡-地果(0.184);C 林窗灌木层优势种间生态位重叠度值高于 0.080 的种对数占总数的 20.0%,最大为紫金牛-紫麻(0.182);D 林窗灌木层优势种间生态位重叠度值均低于 0.080,其中最大为九节龙-槲木(0.044)。CK 草本层优势种间生态位重叠度值高于 0.080 的种对数占总数的 3.3%,最大为乌蕨(*Odontosoria chusana*)-异羽复叶耳蕨(*Arachniodes simplicior*)(0.081);A 林窗草本层优势种间生态位重叠度值均低于 0.080,其中最大为皱叶狗尾草(*Setaria plicata*)-酢浆草(0.073);B 林窗草本层优势种间生态位重叠度值高于 0.080 的种对数占总数的 10.7%,最大为知风草(*Eragrostis ferruginea*)-锯叶合耳菊(*Synotis nagensium*)(0.103);C 林窗草本层优势种间生态位重叠度值高于 0.080 的种对数占总数的 23.8%,最大为竹叶草(*Oplismenus compositus*)-淡竹叶(0.182)、竹叶草-华南鳞盖蕨(0.182)和竹叶草-紫菀(*Aster tataricus*)(0.182);D 林窗草本层优势种间生态位重叠度值均低于 0.080,最大为荩草-异羽复叶耳蕨(0.060)。在所有处理中,部分物种因较高的平均生态位重叠度而尤为突出,分别是 A 林窗白花泡桐、B 林窗地果、C 林窗紫麻、狗脊、竹叶草和酢浆草,表明它们占据着较多的资源,与其他物种竞争激烈。值得一提的是,B 林窗地果、C 林窗紫麻、C 林窗淡竹叶、华南鳞盖蕨和紫菀与其他优势种间生态位重叠度值均为 0,表明这 5 种植物与其他优势种在资源或空间利用上完全不存在重合部分。

表 6 马尾松人工林林下灌草层优势种重要值与生态位宽度的相关性系数

Table 6 Correlation coefficient between important value of dominant species and niche breadth in shrub and herb layer under *P. massoniana* plantation

植被类型 Vegetation type	处理 Treatment	Pearson 相关系数 Pearson correlation index	显著性(P.) Significance(P.)
灌木 Shrub	CK	0.243	0.694
	A	0.511	0.489
	B	-0.329	0.471
	C	0.748	0.088
	D	0.748	0.252
草本 Herb	CK	0.116	0.826
	A	0.252	0.630
	B	0.358	0.384
	C	-0.314	0.492
	D	0.119	0.849

注:重要值与生态位宽度在 $P>0.05$ 水平上无显著相关性
Note: There was no significant correlation between important value and niche breadth at $P>0.05$ level

3 讨 论

3.1 林窗尺度对马尾松人工林林下灌草层物种丰富度的影响

丰富度指数表示局部地区均质生境中物种数量,许多研究都用其来指示物种多样性的变化^[36]。本研究发现,开窗后马尾松人工林灌草层物种丰富度指数均显著提高,其随林窗尺度的增大呈现出先增大而后减小的变化规律,这与刘兵兵等^[37]在杨桦次生林林窗下物种多样性研究中的发现类似。在四川南部开展的马尾松不同林窗尺度下植物多样性研究中,物种丰富度指数随林窗尺度的变化趋势和本研究大体一致^[38]。可能的原因是林下植物生长主

要与光照和水分等微环境有关,适当的林窗面积能保持林隙微环境及森林小气候,能提高生物多样性,而较大的林窗又接近无林地的微环境,不利于促进多种植物种类生长^[37]。

3.2 林窗尺度对马尾松人工林林下灌草层生态位宽度的影响

生态位宽度表征物种对资源空间的利用程度^[39]。本研究发现,各林窗下灌草层生态位宽度平

表 7 马尾松人工林林窗下灌木层优势种生态位重叠度
Table 7 Niche overlap of dominant species in shrub layer under the gap of *P. massoniana* plantation

林窗 Forest gap	物种 Species	樟 <i>C. camphora</i>	槲木 <i>A. chinensis</i>	地桃花 <i>U. lobata</i>	九节龙 <i>A. pusilla</i>	柳杉 <i>C. fortunei</i>
CK	樟 <i>C. camphora</i>		0.006	0.015	0.039	0.039
	槲木 <i>A. chinensis</i>	0.004		0.005	0.013	0.012
	地桃花 <i>U. lobata</i>	0.016	0.008		0.051	0.050
	九节龙 <i>A. pusilla</i>	0.037	0.017	0.044		0.112
	柳杉 <i>C. fortunei</i>	0.037	0.017	0.044	0.113	

林窗 Forest gap	物种 Species	樟 <i>C. camphora</i>	槲木 <i>A. chinensis</i>	地桃花 <i>U. lobata</i>	白花泡桐 <i>P. fortunei</i>
A	樟 <i>C. camphora</i>		0.017	0.023	0.080
	槲木 <i>A. chinensis</i>	0.015		0.014	0.048
	地桃花 <i>U. lobata</i>	0.022	0.015		0.069
	白花泡桐 <i>P. fortunei</i>	0.033	0.023	0.030	

林窗 Forest gap	物种 Species	菝葜 <i>S. china</i>	槲木 <i>A. chinensis</i>	地果 <i>F. tikou</i>	枹栎 <i>Q. serrata</i>	高粱泡 <i>R. lambertianus</i>	梨叶悬钩子 <i>R. piriifolius</i>	樟 <i>C. camphora</i>
B	菝葜 <i>S. china</i>		0.014	0.165	0.060	0.097	0.054	0.038
	槲木 <i>A. chinensis</i>	0.008		0.017	0.006	0.010	0.006	0.004
	地果 <i>F. tikou</i>	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	枹栎 <i>Q. serrata</i>	0.062	0.011	0.133		0.078	0.043	0.030
	高粱泡 <i>R. lambertianus</i>	0.085	0.015	0.184	0.066		0.060	0.042
	梨叶悬钩子 <i>R. piriifolius</i>	0.055	0.010	0.119	0.043	0.070		0.027
	樟 <i>C. camphora</i>	0.036	0.006	0.077	0.028	0.045	0.025	

林窗 Forest gap	物种 Species	紫麻 <i>O. frutescens</i>	紫金牛 <i>A. japonica</i>	樟 <i>C. camphora</i>	毛桐 <i>M. barbatus</i>	地桃花 <i>U. lobata</i>	槲木 <i>A. chinensis</i>
C	紫麻 <i>O. frutescens</i>		0	0	0	0	0
	紫金牛 <i>A. japonica</i>	0.182		0.023	0.125	0.058	0.015
	樟 <i>C. camphora</i>	0.034	0.022		0.023	0.011	0.003
	毛桐 <i>M. barbatus</i>	0.177	0.115	0.023		0.057	0.015
	地桃花 <i>U. lobata</i>	0.117	0.075	0.015	0.08		0.01
	槲木 <i>A. chinensis</i>	0.017	0.011	0.002	0.011	0.036	

林窗 Forest gap	物种 Species	槲木 <i>A. chinensis</i>	梨叶悬钩子 <i>R. piriifolius</i>	樟 <i>C. camphora</i>	九节龙 <i>A. pusilla</i>
D	槲木 <i>A. chinensis</i>		0.032	0.020	0.043
	梨叶悬钩子 <i>R. piriifolius</i>	0.032		0.018	0.040
	樟 <i>C. camphora</i>	0.017	0.016		0.021
	九节龙 <i>A. pusilla</i>	0.044	0.041	0.025	

表 8 马尾松人工林林窗下草本层优势种生态位重叠度									
Table 8 Niche overlap of dominant species in herb layer under the gap of <i>P. massoniana</i> plantation									
林窗 Forest gap	物种 Species	金星蕨 <i>P. glanduligera</i>	蕨 <i>P. aquilinum</i>	芒 <i>M. sinensis</i>	乌蕨 <i>S. chusanum</i>	异羽复叶耳蕨 <i>A. simplicior</i>	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>		
CK	金星蕨 <i>P. glanduligera</i>		0.043	0.054	0.061	0.075	0.043		
	蕨 <i>P. aquilinum</i>	0.042		0.041	0.046	0.075	0.043		
	芒 <i>M. sinensis</i>	0.054	0.041		0.059	0.072	0.042		
	乌蕨 <i>S. chusanum</i>	0.061	0.046	0.058		0.081	0.042		
	异羽复叶耳蕨 <i>A. simplicior</i>	0.069	0.053	0.067	0.076		0.053		
	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	0.042	0.032	0.041	0.046	0.057			
林窗 Forest gap	物种 Species	荩草 <i>A. hispidus</i>	蕨 <i>P. aquilinum</i>	芒 <i>M. sinensis</i>	乌蕨 <i>S. chusanum</i>	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	酢浆草 <i>O. corniculata</i>		
A	荩草 <i>A. hispidus</i>		0.024	0.018	0.024	0.037	0.058		
	蕨 <i>P. aquilinum</i>	0.022		0.013	0.026	0.027	0.042		
	芒 <i>M. sinensis</i>	0.015	0.012		0.018	0.019	0.029		
	乌蕨 <i>S. chusanum</i>	0.037	0.029	0.022		0.045	0.070		
	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	0.038	0.030	0.023	0.045		0.073		
	酢浆草 <i>O. corniculata</i>	0.053	0.031	0.031	0.062	0.065			
林窗 Forest gap	物种 Species	狗脊 <i>W. japonica</i>	金星蕨 <i>P. glanduligera</i>	荩草 <i>A. hispidus</i>	芒 <i>M. sinensis</i>	乌蕨 <i>S. chusanum</i>	锯叶合耳菊 <i>S. nagensium</i>	知风草 <i>E. ferruginea</i>	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>
B	狗脊 <i>W. japonica</i>		0.046	0.060	0.020	0.060	0.093	0.092	0.024
	金星蕨 <i>P. glanduligera</i>	0.047		0.037	0.012	0.036	0.057	0.056	0.015
	荩草 <i>A. hispidus</i>	0.062	0.038		0.016	0.049	0.076	0.056	0.015
	芒 <i>M. sinensis</i>	0.014	0.009	0.011		0.011	0.017	0.017	0.005
	乌蕨 <i>S. chusanum</i>	0.061	0.037	0.049	0.016		0.075	0.074	0.020
	锯叶合耳菊 <i>S. nagensium</i>	0.084	0.051	0.067	0.022	0.066		0.102	0.027
	知风草 <i>E. ferruginea</i>	0.084	0.051	0.066	0.022	0.066	0.103		0.027
	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	0.019	0.012	0.015	0.005	0.015	0.024	0.023	
林窗 Forest gap	物种 Species	淡竹叶 <i>L. gracile</i>	狗脊 <i>W. japonica</i>	华南鳞盖蕨 <i>M. hancei</i>	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	竹叶草 <i>O. compositus</i>	紫菀 <i>A. tataricus</i>	酢浆草 <i>O. corniculata</i>	
C	淡竹叶 <i>L. gracile</i>		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	狗脊 <i>W. japonica</i>	0.153		0.153	0.021	0.099	0.153	0.050	
	华南鳞盖蕨 <i>M. hancei</i>	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	
	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	0.038	0.016	0.038		0.025	0.038	0.013	
	竹叶草 <i>O. compositus</i>	0.182	0.077	0.182	0.025		0.182	0.060	
	紫菀 <i>A. tataricus</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	
	酢浆草 <i>O. corniculata</i>	0.120	0.051	0.120	0.017	0.078	0.120		
林窗 Forest gap	物种 Species	荩草 <i>A. hispidus</i>	蕨 <i>P. aquilinum</i>	芒 <i>M. sinensis</i>	异羽复叶耳蕨 <i>A. simplicior</i>		皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>		
D	荩草 <i>A. hispidus</i>		0.015	0.032	0.060		0.022		
	蕨 <i>P. aquilinum</i>	0.010		0.007	0.014		0.005		
	芒 <i>M. sinensis</i>	0.030	0.010		0.041		0.015		
	异羽复叶耳蕨 <i>A. simplicior</i>	0.058	0.019	0.042			0.030		
	皱叶狗尾草 <i>S. plicata</i>	0.019	0.006	0.013	0.026				

均值随林窗尺度增大,呈现出先增大后减小的变化规律,且均在 C 林窗下降到最低值,可能的原因是 C 林窗极丰富的灌草层植物同时争夺空间和资源,导致各物种占据的平均资源和空间量最少。虽各林窗下灌草层中大多喜光植物生态位宽度较大,但部分林窗下耐荫植物也占据着优势地位,如 A 林窗皱叶狗尾草、B 林窗梨叶悬钩子、C 林窗紫金牛、D 林窗九节龙和梨叶悬钩子的生态位宽度均较大,可能是因为占据优势地位的喜光灌木涨势迅猛为草本植物的生长创造了阴暗潮湿的环境。各林窗下喜光植物枹栎和荩草生态位宽度均较大,这与前人在华蓥市马尾松人工林开展的植物多样性研究结果类似^[27],可能是本研究区各生态因子较适宜其生长。

重要值与生态位宽度是表征物种在群落中的地位的重要指标,但两者又有所不同,重要值代表物种在群落中的优势程度,而生态位宽度表示植物的生态位特征^[40]。有研究表明,同一物种的重要值与生态位宽度在群落中有近乎相同的排序^[41]。而本研究表明重要值与生态位宽度不存在明显相关性,这与陈霞等^[42]研究结果相似,可能的原因是生态位宽度同时受重要值、种群个体分布和均匀度等多个因素的影响。

3.3 林窗尺度对马尾松人工林林下灌草层优势种间生态位重叠的影响

生态位重叠表征物种间利用相同资源和空间的程度^[43]。生态位重叠较大的物种间可能因为争夺共同需要的资源而存在较大的竞争,也可能是因两者所需资源重叠过多占据了相近的生态空间而产生激烈竞争^[44]。本研究表明各处理灌草层优势种间竞争较小,可能是因为本研究开展时间距开窗时间较近,林窗下灌草层植物群落未达到该条件下的稳定状态,此时资源和空间完全能够满足林下灌草层植物正常生长需要。各林窗草本层种间生态位重叠度较 CK 小,其中 D 林窗最小,这与已有的林窗对柏木人工林林下植被生态位影响的研究结果相似^[45],可能是因为随林窗尺度进一步增大,丰富的

林下资源能充分满足植物正常生长所需养分和光照等条件,此时竞争减弱。各处理中,C 林窗灌草层种间高生态位重叠度所占比例最大,种间竞争最强,这可能与该林窗下植物种类最丰富有关。林窗尺度的增大使林下灌草层占据较多资源,竞争较强的物种由 A 林窗喜光植物白花泡桐、B 林窗喜光植物地果变为 C 林窗耐荫植物紫麻和竹叶草,可能的原因是喜光植物的生长提供了适宜耐荫植物生长的阴暗潮湿环境。B 林窗地果、C 林窗紫麻、淡竹叶、华南鳞盖蕨和紫菀与其他物种间均不存在生态位重叠,可能是因为各物种的生物学习性和生态特征存在的差异使这 5 个种对资源和环境的利用与其他物种不存在相似性^[46]。

4 结 论

开窗增加了林内光照,改变了林内微环境,促进了马尾松人工林林下灌草层植物发育,喜光植物较未开窗林分明显增多,林下灌草层优势种对资源和空间的利用程度先随林窗尺度增大而降低,后随林窗尺度进一步增大而逐渐变得充分,各优势种对资源和空间的竞争先增强而后逐渐减弱,表明开窗提高了马尾松人工林林下植物多样性,有利于其林下植物群落结构的改善,进而促进马尾松人工林更好地发挥生态效益。在各林窗中,200 m² 林窗下植物物种最丰富,灌草层优势种中喜光植物均较多,此时植物对资源利用程度最低,优势种间对资源和空间的竞争最激烈,表明林下植物群落未达到稳定状态,可能与本研究调查时间距开窗仅 1 a 有关。综上,确定 200 m² 为提高马尾松人工林林下植物多样性、改善林下群落结构的最优林窗尺度。本研究开展野外调查时间距开窗时间较近,还处于试验早期阶段,植物群落未达到稳定状态,为探究开窗后马尾松人工林达到稳定状态时林下植被发育情况,后续可在该地区继续开展林窗下植物多样性及生态位相关研究。

参考文献:

[1] 白晓航, 张金屯. 小五台山森林群落优势种的生态位分析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3 815-3 826.
BAI X H, ZHANG J T. Niche analysis of dominant species of forest community in Xiaowutai Mountain, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 3 815-3 826.

[2] 黄英姿. 生态位理论研究中的数学方法[J]. 应用生态学报, 1994, (3): 331-337.
HUANG Y Z. Mathematical methods in niche theory study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, (3): 331-337.
[3] BADALI M, ZILMAN A. Effects of niche overlap on coexis-

- tence, fixation and invasion in a population of two interacting species[J]. *Royal Society Open Science*, 2020, **7**(2): 192-181.
- [4] WESTMAN W E. Measuring realized niche spaces: climatic response of chaparral and coastal sage scrub[J]. *Ecology*, 1991, **72**(5): 1 678-1 684.
- [5] 只佳增, 周劲松, 杜 浩, 等. 云南山地香蕉园主要杂草生态位[J]. 热带作物学报, 2020, **41**(2): 394-400.
- ZHI J Z, ZHOU J S, DU H, *et al.* Ecological niche of dominant weeds in mountainous banana fields of Hekou, Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, **41**(2): 394-400.
- [6] JOHN V. The niche construction paradigm in ecological time [J]. *Ecological Modelling*, 2008, **214**(2-4): 385-390.
- [7] 谭凤霞, 罗静波, 祁 梅, 等. 长湖水生植物多样性与生态位的季节性变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(5): 1 121-1 129.
- TAN F X, LUO J B, QI M, *et al.* Seasonal variation on the diversity, niche breadth and niche overlap of aquatic plant in Changhu Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(5): 1 121-1 129.
- [8] 王慧敏, 朱仲元, 张 璐. 典型草原不同土壤类型对群落特征和种群生态位的影响——以锡林河流域为例[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(4): 142-148.
- WANG H M, ZHU Z Y, ZHANG L. Effects of different soil types on community characteristics and population niche in typical grasslands—taking the Xilin River Basin as an example [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(4): 142-148.
- [9] QIANG L, LING J L, ADAMS-JONATHAN M, *et al.* Nutrient resource availability mediates niche differentiation and temporal co-occurrence of soil bacterial communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, **163**, doi: 10. 1016/j. apsoil. 2021. 103965.
- [10] RATHER-ZUBAIR A, RAMEEZ A, RASHID D A, *et al.* Predicting shifts in distribution range and niche breadth of plant species in contrasting arid environments under climate change [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, **193**(7), doi: 10. 1007/s10661-021-09160-5.
- [11] KASS J M, ROBERT M, PETER-J G, *et al.* ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modelling of species' niches and distributions[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, doi: 10. 1111/2041-210X. 13628.
- [12] 盘金文, 郭其强, 余大龙, 等. 不同林龄马尾松人工林优势种径级结构及物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(4): 722-728.
- PAN J W, GUO Q Q, YU D L, *et al.* Analysis on diameter class structure of dominant species diversity of *Pinus massoniana* plantation at the different ages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(4): 722-728.
- [13] 冯大兰, 陈道静, 李 彬, 等. 三峡库区万州区马尾松低效林改造对土壤养分的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, **40**(4): 121-126.
- FENG D L, CHEN D J, LI B, *et al.* Effect of different management pattern on soil nutrients of low efficient *Pinus massoniana* forest in Wanzhou district of the Three Gorges reservoir area[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, **40**(4): 121-126.
- [14] 张海涛, 宫澜波, 付万权, 等. 马尾松低效人工林不同改造模式下降雨及产流特征[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(1): 29-34.
- ZHANG H T, GONG Y B, FU W Q, *et al.* Rainfall and runoff in low efficiency *Pinus massoniana* forests with different silvicultural prescriptions[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, **35**(1): 29-34.
- [15] 管云云, 费 菲, 关庆伟, 等. 林窗生态学研究进展[J]. 林业科学, 2016, **52**(4): 91-99.
- GUAN Y Y, FEI F, GUAN Q W, *et al.* Advances in studies of forest gap ecology[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(4): 91-99.
- [16] 高 远, 朱孔山, 郝加琛, 等. 山东蒙山 6 种造林树种 40 余年成林效果评价[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(8): 728-738.
- GAO Y, ZHU K S, HAO J C, *et al.* An evaluation of the afforestation outcome of six tree species in more than 40 years in Mengshan Mountain, Shandong Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, **37**(8): 728-738.
- [17] 邢忠利, 张文辉, 黄财智, 等. 林窗大小对油松实生苗地上部分构型的影响[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(3): 578-585.
- XING Z L, ZHANG W H, HUANG C Z, *et al.* Effects of forest gap size on the aboveground architecture of *Pinus tabulaeformis* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(3): 578-585.
- [18] 杜有新, 刘 伟, 王军峰, 等. 采伐林窗对白云山 3 种人工林林下植物多样性的早期影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2 121-2 128.
- DU Y X, LIU W, WANG J F, *et al.* Early effects of forest harvesting gap on understory plant diversity of three different plantations in Baiyun Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2 121-2 128.
- [19] 李兵兵, 秦 琰, 刘亚茜, 等. 燕山山地油松人工林林隙大小对更新的影响[J]. 林业科学, 2012, **48**(6): 147-151.
- LI B B, QIN Y, LIU Y X, *et al.* Effects of gap size on regeneration of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Yanshan Mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(6): 147-151.
- [20] 臧润国, 王伯荪, 刘静艳. 南亚热带常绿阔叶林不同大小和发育阶段林隙的树种多样性研究[J]. 应用生态学报, 2000, (4): 485-488.

ZANG R G, WANG B S, LIU J Y. Tree species diversity in gaps of different sizes and developmental stages in lower sub-tropical evergreen broadleaved forest, South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000,(4): 485-488.

[21] 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): 1 238-1 245.

LI Y, YAO X L, HAO J F, *et al.* Effects of forest gap on underforest species diversity in a *Cryptomeria fortune* plantation in Zhougong Mountain, West Sichuan[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(6): 1 238-1 245.

[22] 陈国鹏, 鲜骏仁, 俞筱押. 林窗对岷江冷杉更新幼苗根系生物量积累与分配的影响[J]. 生态学报, 2021,(14): 1-10.

CHEN G P, XIAN J R, YU X Y. Effect of forest gap on accumulations and allocations of root biomass in *Abies fargesii* var. *faxoniana* regeneration seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,(14): 1-10.

[23] 王雪琳, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栲林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征[J]. 北京林业大学学报, 2020,**42**(7): 77-88.

WANG X L, LIU J F, HE Z S, *et al.* Seasonal dynamics of functional diversity of soil microbial communities in *Castanopsis kawakamii* forest gaps[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020,**42**(7): 77-88.

[24] MARTIN M, DAVID W, YONI G, *et al.* Within-gap position shapes fifty years of forest dynamics in a temperate hardwood forest in Connecticut, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **494**, doi: 10. 1016/j. foreco. 2021. 119311.

[25] CAI Y H, YOSUKE T, TORU K, *et al.* Gross primary production of dwarf bamboo, *Sasa senanensis*, in a mature beech forest with a substantial gap-mosaic structure [J]. *Journal of Plant Research*, 2021,**134**(2): 209-221.

[26] VILHAR U. Water regulation ecosystem services following gap formation in Fir-Beech forests in the Dinaric Karst[J]. *Forests*, 2021,**12**(2), doi: 10. 3390/f12020224.

[27] 吕 倩, 尹海峰, 何朋俊, 等. 马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018,**24**(3): 500-507.

LÜ Q, YIN H F, HE P J, *et al.* Effects of early management of *Pinus massoniana* plantation target trees on soil physicochemical properties and plant diversity[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(3): 500-507.

[28] 聂泽旭, 齐 实, 马曦瑶, 等. 华蓥市山区典型林分水源涵养功能评价[J]. 水土保持学报, 2020,**34**(2): 276-282.

NIE Z X, QI S, MA X Y, *et al.* Evaluation of water conservation function of typical stands in mountainous areas of Huaying City[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,**34**(2): 276-282.

[29] 李 慧, 钱金平, 陈 辉, 等. 围栏封育对红松洼自然保护区草原植物群落特征及多样性的影响[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(4): 274-278+283.

LI H, QIAN J P, CHEN H, *et al.* Effects of enclosure on community characteristics and species diversity in Hongsongwa Natural Reserve[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(4): 274-278+283.

[30] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6 154-6 162.

LUO Y H, SUN D J, LIN J Y, *et al.* Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,**33**(19): 6 154-6 162.

[31] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法 (上) [J]. 生物多样性, 1994,(3): 162-168.

MA K P. The method of measuring the diversity of biological community I, a method for measuring α -diversity (part I) [J]. *Biodiversity Science*, 1994,(3): 162-168.

[32] 朱金兆, 朱清科. 生态位理论及其测度研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2003,(1): 100-107.

ZHU J Z, ZHU Q K. A review on niche theory and niche metrics[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003,(1): 100-107.

[33] 陈丝露, 赵 敏, 李贤伟, 等. 柏木低效林不同改造模式优势草本植物多样性及其生态位[J]. 生态学报, 2018,**38**(1): 143-155.

CHEN S L, ZHAO M, LI X W, *et al.* Study on plant diversity and niche characteristics of dominant herbaceous populations under different reconstruction patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,**38**(1): 143-155.

[34] 任青山. 天然次生林主要种群生态位结构的研究[J]. 东北林业大学学报, 1998, **26**(2): 5-10.

REN Q S. Study on niche structure of dominant population in natural secondary forests[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, **26**(2): 5-10.

[35] 赵燕波, 张丹桔, 张 健, 等. 不同郁闭度马尾松人工林林下植物多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(6): 1 048-1 054.

ZHAO Y B, ZHANG D J, ZHANG J, *et al.* Understory vegetation diversity of *Pinus massoniana* plantations with various canopy density[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016,**22**(6): 1 048-1 054.

[36] 代景忠, 闫瑞瑞, 卫智军, 等. 施肥对羊草 (*Leymus chinensis*) 割草场功能群物种丰富度和重要值的影响[J]. 中国沙漠, 2017,**37**(3): 453-461.

DAI J Z, YAN R R, WEI Z J, *et al.* Effects of fertilization

on functional group species richness and important value in *Leymus chinensis* mowing meadow[J]. *Journal of Desert Research*, 2017,**37**(3): 453-461.

[37] 刘兵兵, 张 波, 赵鹏武, 等. 林窗对大兴安岭南段杨桦次生林林下物种多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020,**48**(4): 65-74.

LIU B B, ZHANG B, ZHAO P W, *et al.* Effects of forest gap on under story species diversity of poplar and birch secondary forests in southern section of the Da Xing'an Mountains[J]. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science Edition), 2020,**48**(4): 65-74.

[38] 崔宁洁, 刘 洋, 张 健, 等. 林窗对马尾松人工林植物多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014,**20**(1): 8-14.

CUI N J, LIU Y, ZHANG J, *et al.* Effects of forest gap on plant diversity of *Pinus massoniana* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014,**20**(1): 8-14.

[39] 王国庆, 杜广明, 聂莹莹, 等. 草甸草原封育演替过程中主要植物种群生态位动态分析[J]. 中国草地学报, 2017,**39**(6): 72-78.

WANG G Q, DU G M, NIE Y Y, *et al.* Niche dynamics of bominant species during restoration process of meadow steppe in enclosure[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017,**39**(6): 72-78.

[40] 邓贤兰, 曹裕松, 梁 琴, 等. 井冈山山顶矮林乔木层优势种的生态位研究[J]. 植物资源与环境学报, 2016,**25**(1): 88-93.

DENG X L, CAO Y S, LIANG Q, *et al.* Study on niche of dominant species at arbor layer in montane elfin forest of Jinggangshan[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2016,**25**(1): 88-93.

[41] 陈俊华, 刘兴良, 何 飞, 等. 卧龙巴朗山川滇高山栎灌丛主要木本植物种群生态位特征[J]. 林业科学, 2010,**46**(3): 23-28.

CHEN J H, LIU X L, HE F, *et al.* Niche characteristics of dominant woody populations in *Quercus aquifoliodes* shrub community in Balangshan Mountain in Wolong Nature Reserve[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010,**46**(3): 23-28.

[42] 陈 霞, 袁在翔, 金雪梅, 等. 紫金山针阔混交林主要植物种群生态位特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2020,**40**(8): 113-119.

CHEN X, YUAN Z X, JIN X M, *et al.* Niche characteristic of main plant populations in a coniferous and broad-leaved mixed forest on Zijin Mountain[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, **40**(8): 113-119.

[43] 李一凡, 刘梦芸, 甘先华, 等. 深圳市坝光湿地园银叶树群落优势种生态位特征[J]. 生态环境学报, 2020,**29**(11): 2 171-2 178.

LI Y F, LIU M Y, GAN X H, *et al.* Niche characteristics of the dominant species of the *Heritiera littoralis* community in Baguang Wetland Park, Shenzhen[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020,**29**(11): 2 171-2 178.

[44] 王伟伟, 杨海龙, 贺康宁, 等. 祁连山青海云杉人工林草本层生态位及生态响应研究[J]. 草地学报, 2012,**20**(4): 626-630.

WANG W W, YANG H L, HE K N, *et al.* Niche and ecological response of herb layer in spruce plantation of Qilian Mountains[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012,**20**(4): 626-630.

[45] 陈露蔓, 吕 倩, 刘思泽, 等. 柏木低效人工林开窗初期草本层植物多样性及生态位[J]. 应用与环境生物学报, 2021,**27**(5): 1 178-1 185.

CHEN L M, LÜ Q, LIU S Z, *et al.* Diversity and niche characteristics of herbaceous layer plants in the early stage of forest gap reconstruction of inefficient *Cupressus funebris* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021,**27**(5): 1 178-1 185.

[46] 刘润红, 常 斌, 荣春艳, 等. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种群生态位[J]. 应用生态学报, 2018,**29**(12): 3 917-3 926.

LIU R H, CHANG B, RONG C Y, *et al.* Niche of main woody plant populations of *Pterocarya stenoptera* community in riparian zone of Lijiang River, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018,**29**(12): 3 917-3 926.

(编辑:潘新社)