

茂兰喀斯特区圆果化香的种内和 种间竞争强度分析

王雁青¹, 姚 凯¹, 王晓双¹, 李仕洪¹, 罗小菊², 刘映良^{1*}

(1 贵州师范大学 生命科学院, 贵阳 550025; 2 贵州师范大学 图书馆, 贵阳 550025)

摘 要: 为了探讨喀斯特区圆果化香(*Platycarya longipes*)群落内物种间的竞争关系, 该研究通过对茂兰国家级自然保护区圆果化香群落内 36 株对象木及 1 502 株竞争木的调查, 结合 Hegyi 的单木竞争指数计算了喀斯特圆果化香的种内和种间竞争强度。结果显示: (1) 圆果化香的种内竞争强度(387.05)显著高于其种间竞争强度(226.19) ($P < 0.01$), 其竞争压力主要来自于种内竞争。(2) 圆果化香的伴生种类较多, 有 59 种, 其中竞争指数 > 5 的树种为云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*) $>$ 华南五针松(*Pinus kwangtungensis*) $>$ 枫香树(*Liquidambar formosana*) $>$ 香叶树(*Lindera communis*) $>$ 密花树(*Myrsine seguinii*) $>$ 清香木(*Pistacia weinmanniifolia*) $>$ 短刺栲(*Castanopsis echidnocarpa*) $>$ 小叶青冈(*Cyclobalanopsis myrsinifolia*) $>$ 青篱柴(*Tirpitzia sinensis*) $>$ 朴树(*Celtis sinensis*)。 (3) 圆果化香与整个林分、伴生树种和种内的竞争指数与对象木的胸径之间均服从幂函数关系($CI = aD^b$), 对象木胸径越大, 其竞争压力越小。(4) 竞争模型预测表明, 随着圆果化香胸径增大, 其种内、种间、整个林分的竞争指数随之降低; 当圆果化香胸径大于第 I 径级($DBH < 3$ cm)时受到种间的竞争压力变小, 当胸径大于第 II 径级($3 \text{ cm} \leq DBH < 6$ cm)时受到的种内竞争压力变小, 当胸径大于第 III 径级($6 \text{ cm} \leq DBH < 9$ cm)时受到的整个林分的竞争压力变小, 说明圆果化香在中小径级就具有较高竞争能力。研究表明, 圆果化香作为建群种, 在群落的发展阶段和稳定阶段都占有较重要的地位, 更适应喀斯特地区环境, 在群落演化中占有很大优势, 为揭示圆果化香种群在喀斯特森林中的地位和作用机制奠定了理论基础。

关键词: 圆果化香; 种内竞争; 种间竞争; 竞争指数

中图分类号: Q948.12⁺2.1

文献标志码: A

Intraspecific and Interspecific Competition Intensity Analysis of *Platycarya longipes* in Karst Area of Maolan

WANG Yanqing¹, YAO Kai¹, WANG Xiaoshuang¹, LI Shihong¹, LUO Xiaojun², LIU Yingliang^{1*}

(1 School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2 Library of Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the competitive relationship in *Platycarya longipes* community in Karst area, this study investigated 36 objective trees and 1 502 competitive trees in *P. longipes* community in Maolan National Nature Reserve. The intraspecific and interspecific competition intensities of *P. longipes* were calculated combined Hegyi's individual tree competition index. The results showed: (1) the intraspe-

收稿日期: 2021-01-25; 修改稿收到日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心(U1812401); 国家自然科学基金地区基金(31760124); 贵州省科技计划(黔科合平台人才[2017]5726)共同资助

作者简介: 王雁青(1996—), 女, 硕士研究生, 从事植物生态学研究。E-mail: 1005081568@qq.com

* 通信作者: 刘映良, 教授, 从事植物生态学研究。E-mail: liuyil-23@126.com

cies competition of *P. longipes* (387.05) was significantly higher than interspecies competition (226.19) ($P < 0.01$). Its competitive pressure mainly comes from intraspecies competition. (2) There are 59 species of *P. longipes* associated trees, the species with competition index > 5 were *Carpinus pubescens* $>$ *Pinus kwangtungensis* $>$ *Liquidambar formosana* $>$ *Lindera communis* $>$ *Myrsine seguinii* $>$ *Pistacia weinmanniifolia* $>$ *Castanopsis echidnocarpa* $>$ *Cyclobalanopsis myrsinifolia* $>$ *Tirpitzia sinensis* $>$ *Celtis sinensis*. (3) The competition index between *P. longipes* and the whole stand, associated tree species and intraspecies was a power function relationship ($CI = aD^b$). The larger the DBH of *P. longipes*, the less the competition pressure was. (4) The competition model predicted that with the increase of the DBH of *P. longipes*, the competition index of *P. longipes* decreased within species, between species and the whole stand. When the DBH of *P. longipes* is greater than the I diameter class (DBH < 3 cm), the interspecies competition pressure becomes smaller, and when the DBH is greater than the II diameter class (3 cm $\leq$ DBH < 6 cm), the intraspecies competition pressure becomes smaller. When DBH was larger than the III diameter class (6 cm $\leq$ DBH < 9 cm), the competitive pressure of the whole stand decreased, indicating that *P. longipes* had higher competitive ability in the middle and small size class. The results showed that *P. longipes*, as the building species, played an important role in both the development and stability stages of the community, and was more adaptable to the environment in the karst area, and had a great advantage in the evolution of the community, which laid a theoretical foundation for revealing the position and mechanism of *P. longipes* in the karst forest.

Key words: *Platycarya longipes*; intraspecies competition; interspecific competition; competition index

竞争是指环境资源或空间相对有限的情况下,两个或两个以上生物之间所发生的相互关系^[1]。竞争在自然群落中普遍存在,主要表现为种内竞争和种间竞争^[2],这两种竞争形式是塑造森林林分结构和动态的主要因素,也是生态学研究的核心问题之一^[3-4]。Maleki^[5]研究表明,竞争是森林群落中树木生长的基本过程,在种群动态、种群生存和物种更替中起着重要作用。众多学者利用不同指数模型对不同种植物种内与种间竞争强度进行了定量分析^[6-8]。分析后发现 Hegyi 提出的与距离有关的竞争指数模型具有操作简单,准确性高的特点,能较好地反映植株个体生长对生境等资源需求与占有量之间的关系^[9-10],采用 Hegyi 单木竞争指数模型研究植物种内与种间竞争关系已经在很多植物中得到应用,如马尾松 (*Pinus massoniana*)、木荷 (*Schima superba*)^[11]、华南五针松 (*Pinus kwangtungensis*)^[12]、梓叶槭 (*Acer catalpifolium*)^[13]、黄山松 (*Pinus taiwanensis*)^[14]等。本研究将利用 Hegyi 竞争指数对喀斯特区的林木进行竞争分析,为揭示喀斯特区植物的群落地位,以及更好地预测喀斯特植物群落的竞争发展趋势提供理论依据。

圆果化香 (*Platycarya longipes*) 属胡桃科 (Juglandaceae) 化香树属 (*Platycarya*) 落叶小乔木,作为喀斯特生态脆弱区的主要建群种之一。目前,对圆果化香的研究报道主要是关于抗坏血酸含量^[15]、没食子酸含量^[16]及光合特性和叶形态^[17]方

面,也有对圆果化香种群年龄结构及分布格局^[18]、芽的种群结构^[19]和叶构件^[20]等的研究,但关于喀斯特建群种圆果化香种群种内、种间竞争的相关研究未见报道。研究喀斯特地区圆果化香种内、种间竞争强度,有助于了解圆果化香种群在喀斯特森林中的地位 and 作用,为贵州喀斯特生态脆弱区生态系统的保护与管理提供基础。

1 研究区域概况

茂兰国家级自然保护区位于贵州与广西交界的荔波县茂兰地区,地理坐标为 107°52'10"~108°45'40"E, 25°09'20"~25°20'50"N, 海拔 430.0~1 078.6 m, 保护区总面积 21 285 hm², 典型的喀斯特峰丛地貌, 成土母岩以白云岩和石灰岩为主, 森林覆盖率达 88.61%。地面岩石裸露率高, 土层浅薄, 以黑色石灰土为主。中亚热带季风湿润气候, 年平均气温 15.3℃, 活动积温 4 598.6℃, 全年降水量 1 752.5 mm, 年平均相对湿度 83%。群落内乔木层的主要优势种有圆果化香、云贵鹅耳枥 (*Carpinus pubescens*)、华南五针松、枫香树 (*Liquidambar formosana*) 等; 林下灌木层主要有香叶树 (*Lindera communis*)、火棘 (*Pyracantha fortuneana*)、清香木 (*Pistacia weinmanniifolia*)、密花树 (*Myrsine seguinii*) 等; 草本层主要是翠云草 (*Selaginella uncinata*)、天门冬 (*Asparagus cochinchinensis*)、凤尾蕨 (*Pteris cretica*) 等。

2 研究方法

2.1 数据采集

在圆果化香典型和集中分布的地区设置样地面积大小为 20 m×20 m 的样地 9 个,在每个样地随机选取 4 株圆果化香为对象木,共 36 株对象木;样圆的范围是根据所调查样地的林隙半径、上层树的影响范围以及样地的树高及冠幅等进行确定^[21-22],因此,确定以选中的对象木为中心,半径 8 m 内所有乔木和树高大于 1.5 m 的灌木为竞争木,并分别记录对象木、竞争木的种名,测定其胸径、树高、冠幅以及竞争木与相应对象木之间的距离^[4]。野外调查时对萌生植株以胸径最大的分株予以记录。

2.2 径级结构

通过测量对象木和竞争木的胸径(DBH),根据实际情况,参考盘金文等^[23]的方法来划分径级。最终确定每隔 3cm 为一个径级,具体为:Ⅰ级 DBH<3 cm,Ⅱ级 3 cm≤DBH<6 cm,Ⅲ级 6 cm≤DBH<9 cm,以此类推,共 8 个径级。统计各个径级的植株数,并利用 Origin 2018 绘制对象木和竞争木的径级结构图。

2.3 数据分析

单木竞争指数的模型较多,采用 Hegyi 的单木竞争指数不仅可以了解植株个体生长与生存空间的关系,更能体现植株个体对环境质量的要求与现实

生境下植株对环境资源占有量之间的关系^[4, 21-22]。

计算公式参考文献[24],如下所示:

$$CI = \sum_{j=1}^N (D_j / D_i) / L_{ij}$$

公式中:CI(Competition index)为第*i*株对象木受到的竞争指数;*L_{ij}*为对象木*i*与竞争木*j*之间的距离(m);*D_i*和*D_j*分别为对象木*i*和竞争木*j*的胸径(cm);*N*为竞争木株数。

计算出对象木、竞争木的竞争指数之后,以对象木的胸径为自变量,用 SPSS 16.0 软件以对数函数、二项式、幂函数、指数函数等模型对总竞争指数与对象木胸径间的关系进行模拟回归,得出最佳模型,并利用 Origin 2018 制图。

3 结果与分析

3.1 对象木与竞争木概况

本研究在茂兰喀斯特区共调查对象木 36 株,竞争木 60 种,1 502 株。对象木最小胸径 1 cm,最大胸径 23.2 cm,平均胸径 7.8 cm。竞争木最小胸径 1 cm,最大胸径 30.4 cm,平均胸径为 5.59 cm。以 3 cm 为一个径阶距,统计对象木和竞争木的平均胸径、树高及植株数量等(表 1)。在以半径 8 m,面积为 200.96 m² 的圆中,平均每株对象木有竞争木 41.72 株。对象木的胸径呈偏态分布(图 1),和竞争木相似;对象木位于第Ⅱ径级时,竞争木数目最多。

表 1 对象木与竞争木概况

Table 1 Status of objective trees and competitive trees

径级 Diameter class	对象木 Objective tree				竞争木 Competitive tree			
	株数 Number	百分比 Percentage /%	平均胸径 Average of diameter at breast high /cm	平均树高 Average of height/m	株数 Number	百分比 Percentage /%	平均胸径 Average of diameter at breast high /cm	平均树高 Average of height/m
Ⅰ (DBH<3 cm)	6	16.70	2.45±0.38	2.81±1.15	220	14.65	5.48±3.78	6.07±3.74
Ⅱ (3 cm≤DBH<6 cm)	11	30.56	4.45±0.96	7.18±3.30	487	32.42	5.19±3.16	5.92±3.97
Ⅲ (6 cm≤DBH<9 cm)	8	22.22	7.69±0.89	10.73±2.44	338	22.50	5.57±4.21	6.07±4.17
Ⅳ (9 cm≤DBH<12 cm)	4	11.11	10.45±1.51	11.85±3.28	152	10.12	6.75±5.12	7.37±4.62
Ⅴ (12 cm≤DBH<15 cm)	4	11.11	14.00±1.24	14.38±1.25	195	12.98	5.30±4.23	6.49±4.59
Ⅵ (15 cm≤DBH<18 cm)	1	2.78	16.00	19.00	18	1.20	7.26±5.85	6.56±4.97
Ⅶ (18 cm≤DBH<21 cm)	1	2.78	18.70	11.50	72	4.79	5.67±3.43	5.70±3.62
Ⅷ (21 cm≤DBH)	1	2.78	23.20	14.00	20	1.33	9.18±7.55	8.65±5.23
合计 Total	36	100.00	—	—	1 502	100.00	—	—

注:数据为平均值±标准差;下同

Note: Data are mean ± standard deviation. The same as below

群落中所含的幼树较为丰富,具有较强的自我更新能力,属进展种群。对象木的平均树高大于竞争木,说明圆果化香在光照资源的竞争上占有优势。

3.2 圆果化香的种内和种间竞争

从表 2 可知,调查的 36 株圆果化香对象木所受到的种内竞争株数为 683 株,竞争指数为 387.05, 占总竞争指数的 63.12%;种间竞争的株数为 819 株,其竞争指数为 226.19, 占总竞争指数的 36.88%。种内竞争的株数虽少于种间竞争,其种内竞争强度显著大于种间竞争($P<0.01$)。说明喀斯特区圆果化香的竞争主要来至于种内。圆果化香生长过程中,不断与周围植株发生竞争,从径级结构来看,第 I 径级的圆果化香受到的种内竞争最大,竞争指数 140.92。第 II 径级的圆果化香受到的种间竞争最大,竞争指数为 93.24。总体来看,圆果化香在第 II 径级受到的竞争最大,竞争指数为 228.73,平均为 20.79。随着径级的增大,平均竞争指数整体上逐渐减小。

本次调查竞争木共 60 种,1 502 株,从竞争木对圆果化香的竞争强度来看(表 3),其中竞争强度最大的是圆果化香,株数比例占 45.47%,竞争指数为 387.05。从伴生树种来看,对圆果化香的竞争作用最大的是云贵鹅耳枥,竞争指数为 36.12;其次是华南五针松,竞争指数为 27.23,群落中枫香树和香叶树,树木较多且距离较近,所以竞争指数也较高,分别为 26.7 和 16.97;最小的是南天竹,竞争指数 0.06。圆果化香种间的竞争前 10 顺序依次为云贵鹅耳枥>华南五针松>枫香树>香叶树>密花树>清香木>短刺栲>小叶青冈>青篱柴>朴树。

3.3 圆果化香胸径与竞争指数的关系及其预测

植物竞争受多方面因素影响,胸径是一个重要的生物因素。研究喀斯特地区建群种圆果化香的胸径与竞争强度关系,结果显示整个林分竞争指数和种内竞争指数以及伴生树种竞争指数都与圆果化香胸径之间近似地服从幂函数关系(图 2)即:

$CI=aD^b$

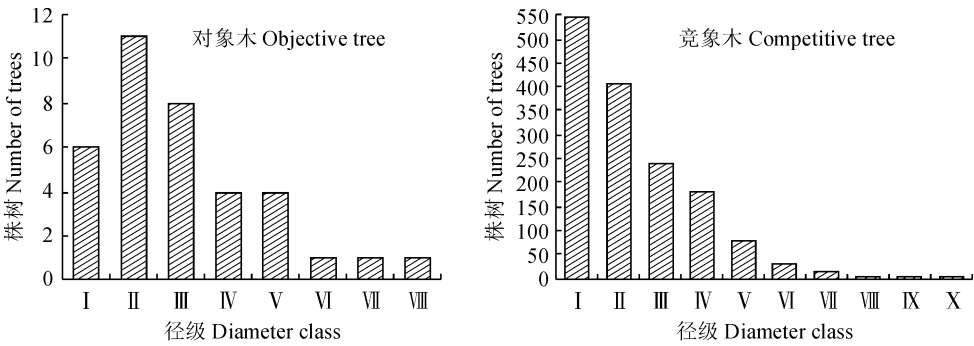


图 1 竞争木和对象木的径级结构图

Fig. 1 Diameter class structure of objective trees and competitive trees

表 2 圆果化香种内与种间竞争强度

Table 2 Intraspecific and interspecific competition intensity of *P. longipes*

径级 Diameter class/cm	种内竞争 Intraspecific competition			种间竞争 Interspecific competition			总竞争指数 Total CI	平均竞争指数 Mean of CI
	对象木株数 Objective trees number	株数 Number	竞争指数 CI	对象木株数 Objective trees number	株数 Number	竞争指数 CI		
I	6	129	140.92	6	91	56.15	197.07	32.845
II	11	210	135.46	11	277	93.27	228.73	20.79
III	8	127	51.87	8	211	43.75	95.62	11.95
IV	4	92	30.44	4	60	13.90	44.34	11.09
V	4	94	21.52	4	101	10.30	31.82	7.96
VI	1	3	1.26	1	15	2.01	3.27	3.27
VII	1	25	4.61	1	47	4.12	8.73	8.73
VIII	1	3	0.97	1	17	2.69	3.66	3.66
合计 Total	36	683	387.05	36	819	226.19	613.24	100.29

表 3 竞争木的组成及其竞争指数

Table 3 Species composition of competitive trees and competition intensities

种名 Tree species name	株数 Number	比例 Percentage /%	平均胸径 Average of diameter at breast high/cm	平均树高 Average of height/m	竞争指数 <i>CI</i>	平均竞 争指数 Mean of <i>CI</i>	竞争指 数排名 <i>CI</i> ranking
圆果化香 <i>Platycarya longipes</i>	683	45.47	7.43±4.35	8.25±4.28	387.05	0.57±0.49	1
云贵鹅耳枥 <i>Carpinus pubescens</i>	126	8.39	3.17±2.14	4.31±2.50	36.12	0.29±0.16	2
华南五针松 <i>Pinus kwangtungensis</i>	44	2.93	6.70±5.11	6.13±3.95	27.23	0.62±0.52	3
枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	49	3.26	7.34±5.92	7.70±4.73	26.70	0.54±0.43	4
香叶树 <i>Lindera communis</i>	49	3.26	3.66±2.12	3.57±1.84	16.97	0.38±0.35	5
密花树 <i>Myrsine seguinii</i>	52	3.46	3.46±2.27	3.93±1.97	10.18	0.20±0.12	6
清香木 <i>Pistacia weinmanniifolia</i>	34	2.26	4.43±3.25	5.04±3.87	9.30	0.27±0.31	7
短刺栲 <i>Castanopsis echidnocarpa</i>	18	1.20	4.36±2.98	5.06±2.97	8.03	0.45±0.30	8
小叶青冈 <i>Cyclobalanopsis myrsinifolia</i>	36	2.40	4.29±2.94	4.37±2.70	7.79	0.22±0.14	9
青篱柴 <i>Tirpitzia sinensis</i>	25	1.66	3.34±1.13	3.28±1.39	7.63	0.31±0.17	10
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	26	1.73	3.12±2.27	5.05±3.24	5.41	0.21±0.14	11
火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	41	2.73	1.90±0.50	2.79±1.43	4.63	0.11±0.09	12
翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i>	11	0.73	5.23±3.79	6.47±3.64	4.57	0.42±0.35	13
粗糠柴 <i>Mallotus philippensis</i>	28	1.86	2.92±1.62	3.45±2.49	4.15	0.15±0.11	14
光叶海桐 <i>Pittosporum glabratum</i>	25	1.66	3.88±2.39	4.44±2.98	3.93	0.16±0.02	15
响叶杨 <i>Populus adenopoda</i>	15	1.00	6.50±4.88	7.11±4.92	3.78	0.25±0.23	16
杨梅 <i>Myrica rubra</i>	7	0.47	8.73±2.89	4.21±1.41	3.58	0.51±0.36	17
马蹄荷 <i>Exbucklandia populnea</i>	22	1.46	3.59±2.55	4.00±2.59	3.22	0.15±0.12	18
大叶青冈 <i>Cyclobalanopsis jenseniana</i>	20	1.33	3.81±2.50	4.55±2.83	3.19	0.16±0.13	19
掌叶木 <i>Handeliodendron bodinieri</i>	6	0.40	14.33±5.34	14.12±4.23	3.10	0.52±0.24	20
亮叶猴耳环 <i>Archidendron lucidum</i>	12	0.80	4.56±1.94	3.92±1.72	2.84	0.24±0.15	21
小果柿 <i>Diospyros vaccinioides</i>	9	0.60	9.22±6.61	10.04±6.01	2.70	0.30±0.22	22
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	6	0.40	6.30±3.50	7.00±4.90	2.64	0.43±0.31	23
牛矢果 <i>Osmanthus matsumuranus</i>	9	0.60	3.16±1.28	3.56±1.57	2.64	0.29±0.12	23
香港四照花 <i>Cornus hongkongensis</i>	13	0.87	4.22±3.36	4.14±2.94	2.63	0.20±0.17	24
合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	3	0.20	7.60±3.82	9.10±3.60	2.32	0.77±0.25	25
山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	12	0.80	2.31±1.05	2.34±0.83	2.29	0.19±0.13	26
毛桐 <i>Mallotus barbatus</i>	12	0.80	3.34±2.77	3.47±2.49	2.02	0.17±0.15	27
黔蚊母树 <i>Distylium tsiangii</i>	9	0.60	2.62±1.39	4.28±2.31	1.58	0.18±0.11	28
鹿角锥 <i>Castanopsis lamontii</i>	4	0.27	5.28±2.11	5.20±1.01	1.25	0.31±0.08	29
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	2	0.13	4.00±0.99	5.85±0.35	1.14	0.57±0.14	30
香椿 <i>Toona sinensis</i>	4	0.27	3.70±1.20	4.8±1.61	0.97	0.24±0.18	31
雀梅藤 <i>Sageretia thea</i>	5	0.33	2.40±0.88	2.49±1.31	0.93	0.19±0.15	32
黄栌 <i>Cotinus coggygria</i>	12	0.80	2.43±1.31	3.4±1.99	0.90	0.07±0.04	33
木半夏 <i>Elaeagnus multiflora</i>	5	0.33	2.30±1.07	2.33±0.93	0.88	0.18±0.10	34
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	3	0.20	2.91±1.22	5.60±4.1	0.84	0.28±0.18	35
裂果卫矛 <i>Euonymus dielsianus</i>	4	0.27	4.73±1.64	4.48±1.72	0.83	0.21±0.09	36
湖北十大功劳 <i>Mahonia confusa</i>	4	0.27	2.43±0.76	1.14±0.56	0.76	0.19±0.12	37
乌药 <i>Lindera aggregata</i>	7	0.47	2.29±1.01	2.55±1.55	0.71	0.10±0.09	38

续表 3 Continued Table 3

种名 Trees species name	株数 Number	比例 Percentage /%	平均胸径 Average of diameter at breast high/cm	平均树高 Average of height/m	竞争指数 CI	平均竞争指数 Mean of CI	竞争指数排名 CI ranking
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	4	0.27	2.95±1.03	4.33±1.24	0.60	0.15±0.04	39
针齿铁仔 <i>Myrsine semiserrata</i>	5	0.33	1.70±0.36	2.16±0.83	0.53	0.11±0.06	40
黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	5	0.33	2.36±0.82	2.7±0.95	0.52	0.10±0.06	41
冬青 <i>Ilex chinensis</i>	2	0.13	9.40±7.17	6.78±4.22	0.51	0.25±0.12	42
茜树 <i>Aidia cochinchinensis</i>	3	0.20	1.90±0.36	2.49±1.57	0.42	0.16±0.14	43
巴东荚蒾 <i>Viburnum henryi</i>	3	0.20	4.10±3.08	5.03±3.14	0.41	0.14±0.02	44
紫珠 <i>Callicarpa bodinieri</i>	4	0.27	1.98±0.52	2.94±0.90	0.40	0.10±0.04	45
桃叶石楠 <i>Photinia prunifolia</i>	2	0.13	2.60±0.28	3.50±0.57	0.37	0.18±0.11	46
滇赤杨叶 <i>Alniphyllum eberhardtii</i>	2	0.13	3.95±2.61	3.40±1.98	0.31	0.15±0.10	47
蔓胡颓子 <i>Elaeagnus glabra</i>	3	0.20	1.87±0.60	1.72±0.44	0.26	0.09±0.06	48
润楠 <i>Machilus nanmu</i>	3	0.20	1.20±0.01	2.07±0.46	0.23	0.08±0.04	49
大花枇杷 <i>Eriobotrya cavaleriei</i>	2	0.13	3.15±0.07	2.65±1.20	0.22	0.11±0.01	50
竹节树 <i>Carallia brachiata</i>	2	0.13	2.35±0.07	3.95±0.21	0.17	0.08±0.05	51
株木 <i>Cornus macrophylla</i>	1	0.07	1.50	2.80	0.16	0.16	52
小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	1	0.07	1.50	2.50	0.16	0.16	52
花椒簕 <i>Zanthoxylum scandens</i>	3	0.20	1.17±0.29	1.85±0.05	0.15	0.05±0.01	53
亮叶桦 <i>Betula luminifera</i>	1	0.07	2.50	5.40	0.14	0.14	54
胡颓子 <i>Elaeagnus pungens</i>	1	0.07	1.60	2.70	0.09	0.09	55
榿木 <i>Loropetalum chinense</i>	1	0.07	10.00	1.75	0.08	0.08	56
木蜡树 <i>Toxicodendron sylvestree</i>	1	0.07	1.30	1.80	0.08	0.08	56
南天竹 <i>Nandina domestica</i>	1	0.07	1.30	2.10	0.06	0.06	57

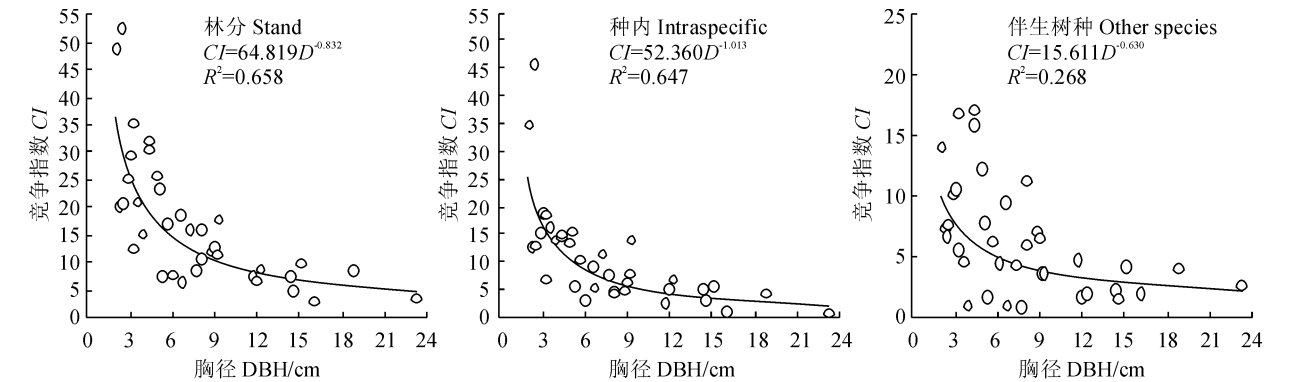


图 2 圆果化香竞争指数与对象木的胸径幂指数回归曲线
Fig. 2 Regression curves of competition index and DBH of *P. longipes*

式中:CI 为竞争指数;D 为对象木胸径;a 和 b 为模型参数。

种内竞争的竞争指数与圆果化香胸径的关系为:
 $CI=52.360D^{-1.013}$ $R^2=0.647$ $P<0.01$
整个林分的竞争指数与圆果化香胸径的关系为:
 $CI=64.819D^{-0.832}$ $R^2=0.658$ $P<0.01$
伴生树种的竞争指数与圆果化香胸径的关系为:

$CI=15.6111D^{-0.630}$ $R^2=0.268$ $P<0.01$
由圆果化香竞争强度与对象木胸径的模型预测来看(表 4),随着圆果化香的生长,胸径不断变大,其种间、种内和伴生树种的竞争指数呈下降趋势,表明圆果化香群落逐渐趋于稳定。伴生树种和对象木竞争时,当对象木胸径小于 3 cm(第 I 径级)时,竞争指数越大,当对象木胸径大于 3 cm(第 I 径级)后,

表 4 圆果化香竞争指数与对象木胸径的模型预测结果

Table 4 The results of model prediction between competition index and DBH in *P. longipes*

径级 Diameter class	圆果化香与种内竞争强度 Competition intensity of <i>P. longipes</i> and intraspecies	圆果化香与整个林分竞争强度 Competition intensity of <i>P. longipes</i> and stand	圆果化香与伴生树种竞争强度 Competition intensity of <i>P. longipes</i> and other species
I	31.84	42.41	11.17
II	10.55	17.35	5.73
III	6.44	11.58	4.23
IV	4.64	8.85	3.45
V	3.63	7.23	2.96
VI	2.98	6.15	2.62
VII	2.52	5.37	2.36
VIII	2.19	4.78	2.16

竞争强度逐渐趋于稳定。在种内竞争时当对象木胸径小于 6 cm(第Ⅱ径级)时,竞争指数最高,且随着胸径的增大,竞争指数逐渐降低。从整个林分来看,当对象木胸径小于 9 cm(第Ⅲ径级)时,竞争指数最高,且随着胸径的增大,竞争指数逐渐降低。这与上述研究结论一致(图 2),表明所得模型能够很好地预测圆果化香的竞争强度。

4 讨 论

植物竞争主要表现为植株对地面以上的光资源的竞争,对地面以下的土壤水分和营养的竞争,竞争指数实质上是植物生长对资源的需求与实际生境下的资源占用之间的联系^[25]。Hegyi 竞争指数模型能较好地体现植株个体对资源的竞争强度^[26]。本研究利用 Hegyi 竞争指数模型,通过对 36 株对象木,1 502 株竞争木的调查,分析得知喀斯特区圆果化香种群种内竞争强度为 387.05,小于种间竞争强度 226.19,说明圆果化香的竞争强度主要来自种内;这与黄小波等^[27]、付梦瑶等^[28]、罗梅等^[29]的研究结果相似。分析其原因可能是因为茂兰喀斯特区的圆果化香数量多且分布集中,植株个体相邻较近,所以植株间种内竞争压力大。圆果化香的竞争强度随径级增加而减小,此结果与林建勇等^[30]研究结论相似。植物在生长初期,对光、水和营养等资源的竞争能力较弱;通过生长,不断扩大生长空间,对有限资源和空间的利用能力增加,同时对邻体的影响范围和程度随之增加^[31-32]。圆果化香的竞争木有 60 种,表明与圆果化香竞争的树种较多,其伴生树种中云贵鹅耳枥、华南五针松、枫香树、香叶树、密花树、

清香木、短刺栲、小叶青冈、青篱柴、朴树等是圆果化香的主要竞争树种,与圆果化香竞争激烈。

根据竞争指数和对象木的胸径回归所得幂函数模型可以看出:圆果化香种内和伴生树种以及整个林分的竞争强度随竞争木胸径的增大而减小,原因是圆果化香林中小径级的植株个体占大多数,林冠被遮挡,会影响植株的生长发育,所受的竞争压力大;径级大的圆果化香个体在群落中处于上层,竞争能力强,所受的竞争压力小。圆果化香所在的喀斯特生态系统岩石裸露率高,环境干旱少水,土层浅薄且不连续,保水保肥能力差,这自然增加了圆果化香种间和种内竞争压力。

圆果化香受到生境内伴生树种的竞争压力在第Ⅰ径级最大,当圆果化香胸径大于第Ⅰ径级受到伴生树种的竞争压力竞争压力变小,当胸径大于第Ⅱ径级时,受到的种内竞争压力变小,当胸径大于第Ⅲ径级时,受到的整个林分的竞争压力变小。相比于游娟等^[33]研究中海南五针松(*Pinus fenzeliana*)在胸径大于 35 cm 时受外界竞争压力变小,李帅锋等^[2]研究中云南红豆杉(*Taxus yunnanensis*)在胸径大于 25 cm 时受外界竞争压力变小,而圆果化香在胸径大于 9 cm 时受到的种内和种间竞争压力均变小,说明圆果化香具有较强竞争能力。在喀斯特植被中,云贵鹅耳枥、华南五针松、香叶树和小叶青冈等都是竞争能力较强的树种,也是喀斯特地区群落的主要组成树种。圆果化香是适应性最强的树种,在群落的发展阶段和稳定阶段都占有较重要的地位,竞争能力强,更适应喀斯特地区环境,在群落发展中占有很大优势。

参考文献:

[1] 陈仁飞,姬明飞,关佳威,等. 植物对称性竞争与非对称性竞争研究进展及展望[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(5): 530-540.
CHEN R F, JI M F, GUAN J W, *et al.* Advances and prospects in plant symmetric and asymmetric competition[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(5): 530-540.

[2] 李帅锋,刘万德,苏建荣,等. 滇西北金沙江流域云南红豆杉群落种内与种间竞争[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(1): 33-38.
LI S F, LIU W D, SU J R, *et al.* Intra-and interspecific competitions of *Taxus yunnanensis* population in Jinsha River Basin of northwest Yunnan Province, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(1): 33-38.

[3] 张忠华,胡刚,秦川,等. 青秀山风景区优势种大叶桫欏种内与种间的竞争关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(1): 67-71.
ZHANG Z H, HU G, QIN C, *et al.* Intraspecific and interspecific competition of dominant tree *Castanopsis fissa* in Qingxiushan Scenic Spot, Guangxi, Southern China[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, **36**(1): 67-71.

[4] FRAVER S, DAMATO A W, BRADFORD J B, *et al.* Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: Influence of tree spatial patterning[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2014, **25**(2): 374-385.

[5] MALEKI K, KIVISTE A, KORJUS H. Analysis of individual tree competition on diameter growth of silver birch in Estonia[J]. *Forest Systems*, 2015, **24**(2): e023. DOI:10.5424/fs/2015242-05742.

[6] 曹小玉,李际平,陈磊,等. 基于加权 Voronoi 图的杉木生态公益林种内、种间竞争[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(9): 2 553-2 561.
CAO X Y, LI J P, CHEN L, *et al.* Intraspecific and interspecific competition analysis of *Cunninghamia lanceolata* ecological forest based on weighted Voronoi diagram[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(9): 2 553-2 561.

[7] 段仁燕,王孝安. 太白红杉种内和种间竞争研究[J]. 植物生态学报, 2005, **29**(2): 242-250.
DUAN R Y, WANG X A. Intraspecific and interspecific competition in *Larix chinensis* [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, **29**(2): 242-250.

[8] YANG X Z, ZHANG W H, HE Q Y. Effects of intraspecific competition on growth, architecture and biomass allocation of *Quercus Liaotungensis* [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2019, **14**(1): 284-294.

[9] 张思玉,郑世群. 笔架山常绿阔叶林优势种群种内种间竞争的数量研究[J]. 林业科学, 2001, **37**(S1): 185-188.
ZHANG S Y, ZHENG S Q. Quantitive study on intraspecific and interspecific competition for dominant population of evergreen broad-leaved forest in Bijia Mountain[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, **37**(S1): 185-188.

[10] BIGING G S, DOBBERTIN M. Evaluation of competition indices in individual tree growth models[J]. *Forest Science*, 1995, **41**(2): 360-377.

[11] 汪清,潘萍,欧阳勋志,等. 马尾松-木荷不同比例混交林种内和种间竞争强度[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(1): 49-57.
WANG Q, PAN P, OUYANG X Z, *et al.* Intraspecific and interspecific competition intensity of mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in different proportions [J]. *Chin J Ecol*, 2021, **40**(1): 49-57.

[12] 王俊,王泳腾,段洋波,等. 广东南岭国家级自然保护区华南五针松种内和种间关系研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, **42**(5): 25-32.
WANG J, WANG Y T, DUAN Y B, *et al.* Interspecific and intraspecific competitions of *Pinus kwangtungensis* in Nanling National Nature Reserve, Guangdong Province of Southern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, **42**(5): 25-32.

[13] 许恒,刘艳红. 珍稀濒危植物梓叶槭种群径级结构与种内种间竞争关系[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(6): 1 160-1 170.
XU H, LIU Y H. Relationship between diameter class structure and intraspecific and interspecific competitions of precious and endangering plant *Acer catalpifolium* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(6): 1 160-1 170.

[14] 段仁燕,黄敏毅,吴甘霖,等. 天柱山黄山松种内与种间竞争的研究[J]. 广西植物, 2008, **28**(1): 78-81.
DUAN R Y, HUANG M Y, WU G L, *et al.* Study on intraspecific and interspecific competition of *Pinus taiwanensis* [J]. *Guihaia*, 2008, **28**(1): 78-81.

[15] 杨艳. 分光光度法测圆果化香树的抗坏血酸含量[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(18): 9 523-9 524.
YANG Y. Determination of ascorbic acid content in *Platycarya longipes* wu by spectrophotometry [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(18): 9 523-9 524.

[16] 杨艳,周健,陈晓,等. 圆果化香树中没食子酸的含量测定[J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, **17**(13): 107-109.
YANG Y, ZHOU J, CHEN X, *et al.* Determination of Gallic acid in *Platycarya longipes* [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2011, **17**(13): 107-109.

[17] 饶森,吴沿友. 喀斯特不同坡位圆果化香的生理与形态特征比较[J]. 地球与环境, 2017, **45**(1): 10-17.
RAO S, WU Y Y. Comparison of physiological and morphological traits of *Platycarya longipes* in different slope locations in Karst area [J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(1): 10-17.

[18] 胥晏,罗小菊,刘映良,等. 贵州不同地区圆果化香种群年龄结构及空间分布格局分析[J]. 分子植物育种, 2019, **17**(11): 3 769-3 777.
XU Y, LUO X J, LIU Y L, *et al.* Age structure and spatial distribution pattern analysis of *Platycarya longipes* population in different regions of Guizhou Province [J]. *Molecular*

Plant Breeding, 2019, **17**(11): 3 769-3 777.

[19] 喻理飞. 圆果化香芽种群结构初步研究[J]. 贵州科学, 2003, **21**(Z1): 64-68.
YU L F. Primary study on the structure of bud population for *Platycarya longipes* [J]. *Guizhou Science*, 2003, **21** (Z1): 64-68.

[20] 唐丽霞, 喻理飞. 圆果化香叶构件种群动态生命表[J]. 贵州农业科学, 2009, **37**(9): 169-173.
TANG L X, YU L F. Dynamic life table of leaf population of *Platycarya longipes* [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, **37**(9): 169-173.

[21] 蒋国梅, 孙 国, 张光富, 等. 濒危植物宝华玉兰种内与种间竞争[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(2): 201-206.
JIANG G M, SUN G, ZHANG G F, *et al.* Intra-and inter-specific competition of endangered plant *Magnolia zenii* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(2): 201-206.

[22] 项小燕, 吴甘霖, 段仁燕, 等. 大别山五针松种内和种间竞争强度[J]. 生态学报, 2015, **35**(2): 389-395.
XIANG X Y, WU G L, DUAN R Y, *et al.* Intraspecific and interspecific competition of *Pinus dabeshanensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(2): 389-395.

[23] 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 and species diversity of *Pinus massoniana* plantation at the different ages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39** (4): 722-728.

[24] HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands [C]//Fries J. Growth models for tree and stand simulation. Stockholm: Royal College of Forestry; 1974: 74-90.

[25] 巢 林, 刘艳艳, 张伟东, 等. 沼泽交错带白桦个体生长动态及径级结构与种内种间竞争[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(3): 577-583.
CHAO L, LIU Y Y, ZHANG W D, *et al.* Diameter class structure, growth dynamic, intraspecific and interspecific competitions of *Betula platyphylla* on swamp ecotone[J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(3): 577-583.

[26] 李志洪, 胡淑仪, 李 伟, 等. 粤东北马尾松-木荷混交林种内种间竞争强度分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33** (8): 91-95.
LI Z H, HU S Y, LI W, *et al.* Intra-specific and inter-specific competitions among major trees species in *Pinus massoniana* and *Schima superba* mixed forest in northeastern Guangdong Province[J]. *Journal of Central South Univer-*
sity of Forestry & Technology, 2013, **33**(8): 91-95.

[27] 黄小波, 刘万德, 苏建荣, 等. 云南松天然林的种内和种间竞争[J]. 林业科学研究, 2016, **29**(2): 209-215.
HUANG X B, LIU W D, SU J R, *et al.* Intraspecific and interspecific competition of *Pinus yunnanensis* natural forest [J]. *Forest Research*, 2016, **29**(2): 209-215.

[28] 付梦瑶, 崔秋芳, 吴 明, 等. 松栎混交林中马尾松的种内种间竞争[J]. 河南农业大学学报, 2016, **50**(3): 311-317.
FU M Y, CUI Q F, WU M, *et al.* Intraspecific and inter-specific competition of *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima* mixed artificial forest[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2016, **50**(3): 311-317.

[29] 罗 梅, 陈绍志. 不同龄组长白落叶松种内及种间竞争研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, **40**(9): 33-44.
LUO M, CHEN S Z. Intraspecific and interspecific competition of *Larix olgensis* plantations in different age groups[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40** (9): 33-44.

[30] 林建勇, 李 娟, 梁瑞龙. 灌木层的叉叶苏铁种内和种间竞争[J]. 森林与环境学报, 2019, **39**(2): 159-164.
LIN J Y, LI J, LIANG R L. Intraspecific and interspecific competition of *Cycas micholitzii* in the shrub layer[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, **39** (2): 159-164.

[31] 喻 泓, 杨晓晖, 慈龙骏. 内蒙古呼伦贝尔沙地不同樟子松林竞争强度的比较[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 250-255.
YU H, YANG X H, CI L J. Competition intensity of Mongolian pine forests in Hulun Buir sand region of Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(2): 250-255.

[32] 毛 磊, 杨丹青, 王冬梅, 等. 红花尔基自然保护区天然樟子松林种内种间竞争分析[J]. 植物资源与环境学报, 2008, **17**(2): 9-14.
MAO L, YANG D Q, WANG D M, *et al.* Analyses of intraspecific and interspecific competition of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest in Honghuaerji Nature Reserve of Inner Mongolia[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2008, **17**(2): 9-14.

[33] 游 娟, 林乐乐, 谢 磊, 等. 鹦哥岭海南五针松的种内和种间竞争[J]. 广西植物, 2017, **37**(6): 776-782.
YOU J, LIN L L, XIE L, *et al.* Interaspecific and intraspecific competitions of *Pinus fenzeliana* in Yinggeling, Hainan Province[J]. *Guihaia*, 2017, **37**(6): 776-782.

(编辑:潘新社)