

韦彩丽, 孔令华, 何晓慧, 等. 黄牛木种群扩散动态研究 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 69-76.
WEI Caili, KONG Linghua, HE Xiaohui, et al. Dispersal dynamics of *Cratoxylum cochinchinense* population[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 69-76.

黄牛木种群扩散动态研究

韦彩丽, 孔令华, 何晓慧, 邓丽婷, 谢正生
(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】研究黄牛木 *Cratoxylum cochinchinense* 种群空间分布格局的形成机制和扩散规律, 旨在促进黄牛木天然林的保护管理, 推动其在珠三角地区生态脆弱地带绿化改造中的应用和推广。【方法】采用样方调查法, 选取广州市茶山和白云山以及台山市石花山的黄牛木典型样地, 通过 ArcGIS 信息平台进行数字化处理, 绘制种群空间分布点图和种群扩散动态分布图, 分析黄牛木的种子传播方式和扩散动态, 构建黄牛木种群的扩散速率 (y)-胸径 (x) 的函数模型, 预测种群扩散规律。【结果】样地中的黄牛木总是在当地风向的下风向呈现聚集分布, 并呈现扩散趋势; 各样地种群冠层投影面积的增长量总是先增大后减小, 不同样地的冠层扩散速率与平均胸径的函数模型均可为一元二次方程; 单株黄牛木的冠幅增长量先增大后减小, 其冠层扩散速率 (y_0) 与胸径 (x_0) 的函数模型为: $y_0 = -0.0135x_0^2 + 0.3106x_0 + b$ ($R^2=0.999, P=0.000$)。【结论】1) 黄牛木种群靠风力扩散; 2) 种群冠层扩散速率先增大后减小, 当种群扩散速率达到最大值时, 冠层投影面积的增长量亦达到最大, 当扩散速率为 0 时, 冠层投影面积的增长量为 0, 此时种群的生长受到限制; 3) 在人工经营下, 当黄牛木的胸径为 11.5 cm 时, 种群处于第 6 径阶, 其冠幅扩散速率达到最大值 1.90 m²/cm, 此时应对种群进行适当间伐, 以保证其最大效益; 当黄牛木胸径达到 23.4 cm 时, 种群处于第 12 径阶, 种群的扩散受到阻碍, 此时应进行疏伐以促进种群的更新生长。

关键词: 黄牛木; 传播方式; 种群扩散; 扩散速率

中图分类号: Q145.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)04-0069-08

Dispersal dynamics of *Cratoxylum cochinchinense* population

WEI Caili, KONG Linghua, HE Xiaohui, DENG Liting, XIE Zhengsheng

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 The formation mechanism and diffusion pattern of the spatial distribution of *Cratoxylum cochinchinense* were studied to promote the protection and management of the natural forest and landscape construction and application in Pearl River Delta areas with poor ecological environment.

【Method】 We used quadrat survey method and selected *C. cochinchinense* stands distributed in three different areas (Chashan area and Baiyun mountain in Guangzhou, and Shihua mountain in Taishan). The maps of population spatial distribution and diffusion dynamics were drawn using digital processing with ArcGIS platform. These maps were used for analyzing seed dispersal mode and dispersal dynamics. The function model of diffusion rate (y)-DBH (x) of the *C. cochinchinense* population was established for predicting population diffusion rate. 【Result】 The *C. cochinchinense* trees always aggregated at the local downwind and showed a distribution trend in sampled areas. The growth in projection area of canopy always increased first and then

收稿日期: 2018-06-18 网络首发时间: 2019-06-25 15:53:30

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20190625.0932.022.html>

作者简介: 韦彩丽 (1992—), 女, 硕士研究生, E-mail: 2291992883@qq.com; 通信作者: 谢正生 (1965—), 男, 副教授, 硕士, E-mail: zsxie@scau.edu.cn

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划项目 (2015BAD07B06-8)

decreased, and the functions of diffusion rate-DBH were univariate quadratic equations in different sampled areas. The growth of canopy of single *C. cochinchinense* tree first increased and then decreased, and the function model of diffusion rate(y_0)-DBH(x_0) for single *C. cochinchinense* tree was: $y_0 = -0.013 5x_0^2 + 0.310 6x_0 + 0.111 3$ ($R^2 = 0.999$, $P = 0.000$). 【Conclusion】 1) *C. cochinchinense* population spread by wind. 2) The diffusion rate of canopy first increased and then decreased. The growth of canopy area increased to the peak when the diffusion rate reached the maximum, and the growth of canopy area was 0 when the diffusion rate was 0. At this time, diffusion of the population was limited. 3) Under artificial management, the diffusion rate of canopy reached the maximum of 1.90 m²/cm when tree DBH was 11.5 cm and the population belonged to the 6th diameter class. At this time thinning should be appropriately done to ensure the maximum benefits. The population diffusion was limited when tree DBH was 23.4 cm and the population belonged to the 12th diameter class. At this time thinning must be done to promote the growth and update of population.

Key words: *Cratogeomys cochinchinense*; dispersal mode; diffusion of canopy; diffusion rate

种群是物种存在、进化及种间关系的基本单位,是连接群落和个体的纽带,也是生态系统的基本组成部分^[1]。扩散是几乎所有生物生活史的一个基本特征,生物的扩散过程大大影响生物组织的形成,如:个体的存活、生长和繁殖,种群和群落的组成、结构和动态,物种的维持、进化和地理分布等^[2-3]。目前,种群扩散研究日益受到广泛关注,已成为生态学研究中的一个热点领域^[4-7]。在自然界中,大部分植物通过花粉和种子扩散来完成种群的扩张和迁移,花粉和种子扩散是关乎植物群落动态的一个重要生态过程^[8],它与生境、种源特征和传播者有着密切的关系,因植物生活型和所处生境的不同而存在明显的差别^[9-10];同时,它能够直接影响幼苗的命运,进而影响种群的更新动态和分布格局^[11]。因此,种群扩散机制的研究,对种群的维持、物种的进化、物种的成种和预测其种群演化趋势等方面具有重要意义。

黄牛木 *Cratogeomys cochinchinense* 是亚热带地区的乡土树种^[12],其抗逆性好、适生性强,在酸性、砂质等贫瘠土壤中生长良好,是我国华南地区的优良先锋树种^[13-14]。黄牛木还是极具潜力的城市景观树种,其黄褐色树干形成的特色林内景观以及春夏花期形成的彩色景观具有较高观赏价值^[15]。目前,对黄牛木的研究主要集中于成分分析及药用价值方面^[16-17],其种群生态学的研究较少,鲜见有种群扩散方面的研究报道。纵观我国华南珠三角等发达地区,尽管城市内的绿地景观已发展得较为成熟,但城市周边仍有一些生态脆弱的山林地,这些困难立地林相不稳定,景观效果有待提升。黄牛木具备优良的品种特性,可作为该地区植被修复和生态改造工程的优选树种。因此,黄牛木种群扩散动态的研究,不仅可为其种群的天然更新和保护管理提供理

论依据,为华南地区乡土树种的种群扩散研究提供参考,同时也可促进这一优良乡土树种的开发和利用,从而为森林群落的生态修复及生态系统的可持续发展作出贡献。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

茶山公园(简称茶山)位于广州天河区的五山街(原五山镇,茶山是五山中的其中一山),北与沙河镇长湴村(现天河区长兴街)相邻,南至广九铁路。地理位置为 113°21'~113°22'E 和 23°9'~23°8'N,低丘地形,海拔 93.6 m。本文调研样地选自鸡笼顶,样地土壤为花岗岩、变质石英砂岩、流纹岩和红色砾岩发育的赤红壤。

白云山风景名胜区(简称白云山)座落于广州市东北部,位于北纬 23°09'~23°13',东经 113°16'~113°19',为九连山脉向东南延伸的支脉,属丘陵地形,素有“南粤第一山”之称。白云山景区面积 28 km²,最高峰为摩星岭,海拔 382 m,属南亚热带季风海洋性气候,年均气温 21.4~21.8 °C,年降水量 1 689.3~1 876.5 mm,雨季集中在 4—9 月份,且降水量占全年降水量的 85% 以上,年均湿度 79%。本文调研样地选自竹园景区,样地土壤为流纹状花岗岩、砂页岩、石英岩及混合岩母质发育而成的酸性赤红壤^[18]。

石花山森林公园(简称石花山)位于广东省台山市的东北部,地理位置为 22°26'~22°81'N 和 112°81'~112°9'E,石花山虽高 300 余 m,却融奇、秀、幽于一山。台山属亚热带海洋性季风气候,年平均气温 21.8 °C,年平均日照 2 006 h,年均降雨量 1 936 mm。公园内随处可见未被人工化的自然群落,本文调研样地选自西严寺东面山顶,样地土壤

类型为花岗岩发育的酸性赤红壤。

1.2 研究方法

1.2.1 外业调查 在林分踏查的基础上, 采用典型取样法, 选择具有代表性的黄牛木天然群落地段作为样地布设区域。于2015年12月至2016年2月期间, 在广州茶山公园的鸡笼顶(东南坡)、广州白云山风景名胜区的竹园景区(西北坡)分别选取3 900 m²的样地, 并在台山石花山森林公园的西严寺东面选取3 200 m²的样地(其中东南坡2 000 m², 西北坡1 200 m²), 总面积11 000 m²。对样地内所有高度≥1.3 m 的黄牛木个体的胸径、树高、冠幅、枝下高等生长因子进行测定, 高度<1.3 m 的黄牛木个体测定除胸径之外的其他生长因子, 并记录黄牛木个体之间的相对坐标。

1.2.2 种群径阶划分 参照有关种群大小级结构代替年龄结构的分析方法^[19], 以“空间替代时间”, 将林木的胸径大小作为度量其年龄大小的指标。把树高<1.3 m 和胸径<1 cm 的黄牛木幼苗记为1 径阶; 树高≥1.3 m 且胸径≥1 cm 时, 每隔2 cm 增加一个径阶, 将黄牛木依次划分为若干径阶。

1.2.3 种子传播与种群扩散 运用 ArcGIS 分别绘制样地黄牛木种群个体和冠幅空间分布专题图, 分析黄牛木个体的聚集情况和种子的传播方向及种群的扩散方式, 然后采用缓冲区分析与空间计算功

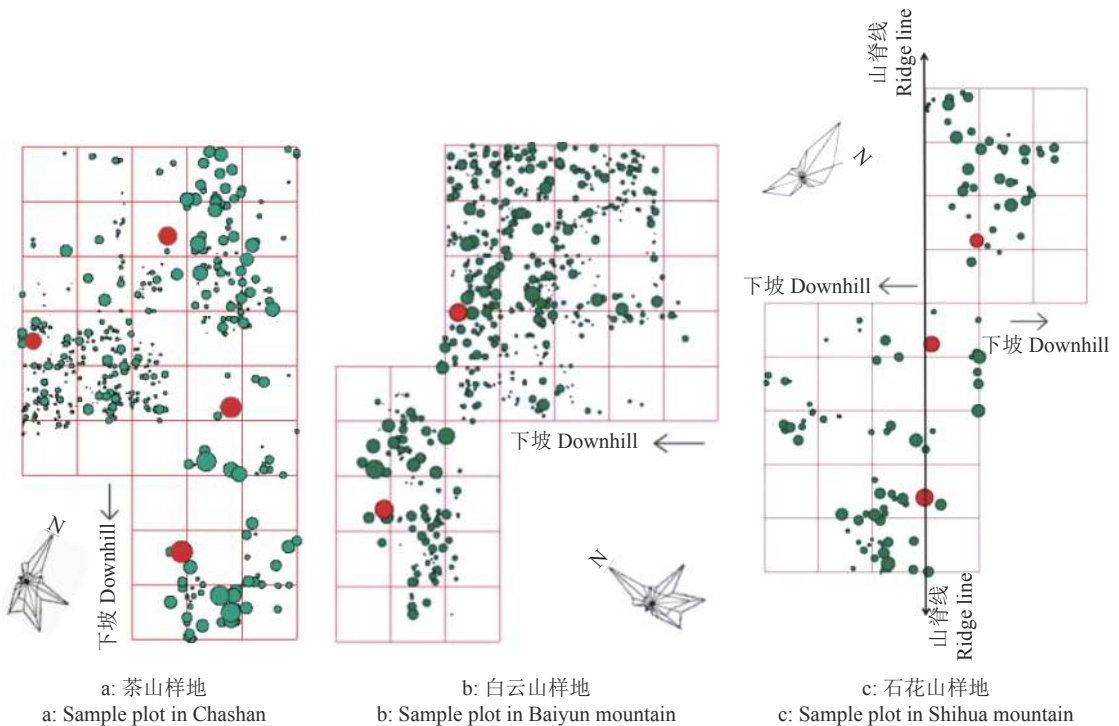
能测定种群各径阶的累计冠层投影面积, 分析其累计面积的增长规律, 结合 SPSS 17.0 软件进行回归模拟分析, 构建种群扩散速率相关模型, 进而预测黄牛木种群扩散的动态规律。

1.2.4 扩散速率 借鉴胡梦宇^[20]对藜蒴 *Castanopsis fissa* 种群扩散速率的研究方法, 通过计算种群达到某一冠幅时投影增长量所需要的时间, 测算黄牛木种群的扩散速率, 即单位时间内种群冠层投影的增长面积。本文以胸径代替时间变化, 种群扩散速率=种群冠层增长面积/胸径。

2 结果与分析

2.1 种群扩散方式分析

绘制各样地黄牛木种群扩散分布图(图1)。从图1可以看出, 黄牛木个体总是在母树某一方向上呈现明显的聚集分布并逐渐向外扩散, 但这一方向不全为下坡方向, 白云山的黄牛木种群甚至沿斜上坡方向扩散。可见, 黄牛木扩散不只是靠种子重力传播。从图1还可以看出, 3个样地的黄牛木种群均表现出不同程度的聚集分布, 而且在常年风向的下风向的聚集现象更为明显, 说明黄牛木种子的传播受风向影响的可能性较大。风传播是常见的非生物传播方式, 许多植物的果实和种子以此方式传播^[21], 它们一般具有下述特征: 1) 细小质轻, 能悬浮在空



图中每一景观栅格为 10 m×10 m, 着色区域代表黄牛木个体的空间分布情况, 红色区域为其种群斑块内的胸径最大个体, 即种群母树

Each lattice is 10 m × 10 m in the graph, the coloring part indicates spatial distribution of *Cratoxylum cochinchinense*, and the red part indicates the parent tree with the largest DBH in population

图1 黄牛木种群扩散分布情况

Fig. 1 Diffusion and distribution of *Cratoxylum cochinchinense* population

气中被风力吹送至远处, 如兰科植物稗 *Echinochloa crusgalli*、马唐 *Digitaria sanguinalis* 等; 2) 果实或种子的表面常生有絮毛、果翅, 或其他有助于承受风力飞翔的特殊构造, 如马兜铃 *Aristolochia debilis*、云杉属 *Picea*、滇油杉 *Keteleeria evelyniana* 等。黄牛木种子为蒴果, 一侧具翅, 成熟期为夏季, 成熟后小而轻^[22]。初步推断, 风力是黄牛木种群扩散传播的主要动力。

文献显示, 广州的风向常年为偏北或东北方向, 夏季盛行风向为东风和东南风^[23]。从图 1a 可以看出, 在夏季盛行风向 (偏东和东南方向) 和常年风向 (偏北或东北方向) 上, 茶山样地的植株呈现明显的聚集现象和扩散趋势, 在偏东方向上尤为明显, 因此认为种子的扩散受风力的影响极大。当然, 由于该样地夏季盛行风向也是该坡的斜下坡方向, 故不能排除种子由于受重力作用沿斜坡滚落散布在母树周边区域, 使得幼苗在母树周围呈现密集的簇状分布。但从图 1b 可以看出, 白云山种群个体扩散方向为该坡的斜上坡方向, 正是该地种子成熟期盛行风向 (东南风) 的下风向。因此可基本断定, 黄牛木种群靠风力扩散。

台山的风向常年为东北风、偏北风, 夏季盛行南风^[24]。从图 1c 可以看出, 石花山样地的植株在南坡沿正南方向扩散, 即种子成熟期盛行风向; 在北坡沿东北偏北方向扩散, 为该地常年风向。故进一

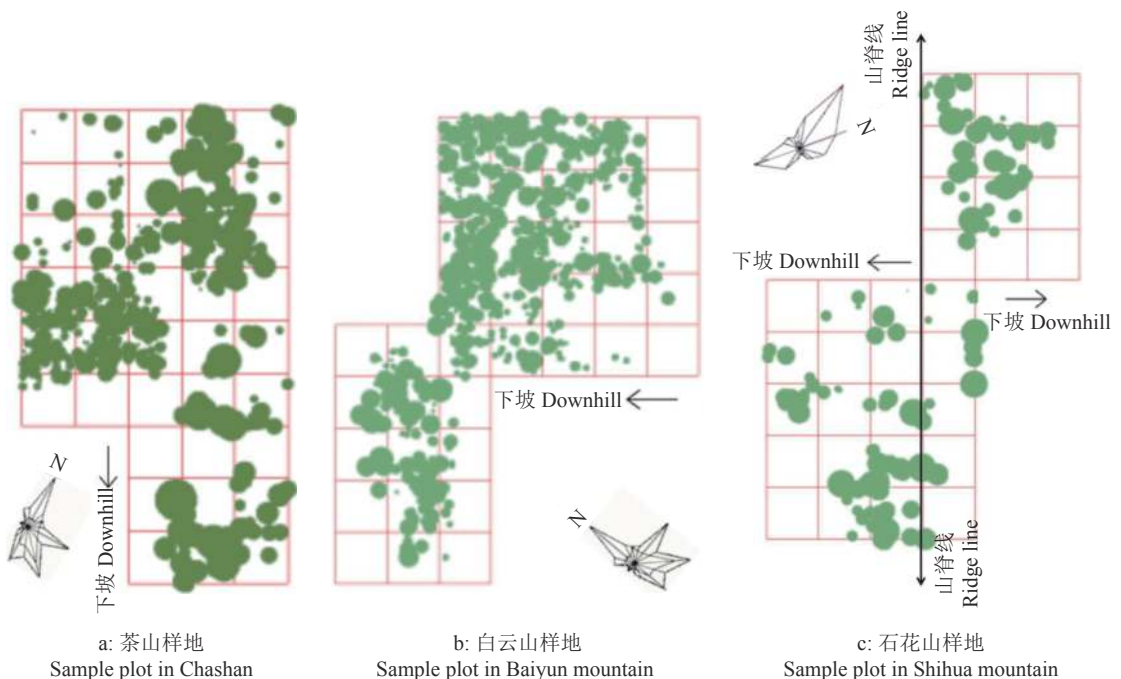
步确定, 黄牛木种群靠风力扩散。

2.2 种群扩散动态分析

上述分析表明, 种群在不同的地域均呈现出聚集分布, 这种分布特性直接关系到林木冠层空间分布的形成。为更直观地呈现黄牛木种群在不同发育阶段的扩散动态, 结合样地中黄牛木个体的相对位置和各径阶平均冠幅, 运用地理信息系统 (GIS) 数字化和输出专题图功能绘制黄牛木种群的冠层扩散分布图 (图 2)。

结合茶山样地的黄牛木种群冠层扩散分布图 (图 2a), 运用 GIS 软件中的合并计算功能, 将各径阶分布依次合并, 通过图层属性表的几何计算功能得到茶山黄牛木各个径阶冠层投影面积, 茶山黄牛木种群第 1~11 径阶冠层投影增长面积依次为 69.245、16.871、182.252、262.519、232.929、258.751、136.663、102.866、64.192、125.410 和 49.288 m² (表 1)。由此可见, 黄牛木种群冠层投影面积的增长量随径阶的增加而先增大后减小, 说明种群扩散程度随径阶增大先上升后下降, 在第 4 径阶时冠层面积增长量达到最大值 262.519 m², 此时种群的扩散程度最高。

结合白云山样地的黄牛木种群冠层扩散分布图 (图 2b), 计算得到白云山黄牛木种群第 1~9 径阶冠层投影增长面积依次为 17.406、102.39、232.904、366.714、262.731、170.537、136.265、16.249 和



图中每一景观栅格为 10 m×10 m, 着色区域代表黄牛木冠层投影的空间分布

Each lattice is 10 m × 10 m in the graph, the coloring part indicates projection of *Cratogeomys cochinchinense* canopy

图 2 黄牛木种群冠层扩散情况

Fig. 2 Canopy diffusion of *Cratogeomys cochinchinense* population

68.984 m²(表 1)。可见, 黄牛木种群的冠层投影面积的增长量随径阶的增加而先增大后减小, 和茶山的冠层投影面积增长趋势相似, 在第 4 径阶种群扩散程度最高。

结合石花山样地的黄牛木种群冠层扩散分布图(图 2c), 计算得到黄牛木种群从第 1~9 径阶冠层

投影增长面积依次为 0.115、6.207、42.808、100.895、152.533、186.753、194.700、1.672 和 23.743 m²(表 1)。可见, 该地黄牛木种群的冠层扩散趋势与另外 2 个样地相似, 冠层投影面积的增长量随径阶的增加而先增大后减小, 但种群的扩散峰值有所延后, 在第 7 径阶达到最大值, 种群扩散程度最高。

表 1 黄牛木种群生长因子统计与扩散速率测定结果

Table 1 Growth factor statistics and diffusion rate of *Cratoxylum cochinchinense* population

调查地点 Sample plot	径阶 ¹⁾ Diameter class	平均胸径/cm Average DBH	平均冠幅/m Average crown width	投影面积/m ² Canopy projection area	累计投影面积/m ² Cumulative projection area	投影增长面积/m ² Growth of projected area	扩散速率 ^{2)/} (m ² ·cm ⁻¹) Diffusion rate
茶山 Chashan	1	0.7	0.64	57.970	1 500.986	69.245	54.73
	2	2.0	1.54	278.237	1 431.741	16.871	9.24
	3	3.8	2.25	452.280	1 414.870	182.252	90.15
	4	5.8	3.15	506.477	1 232.618	262.519	132.91
	5	7.8	3.54	386.610	970.099	232.929	128.33
	6	9.6	4.23	317.200	737.170	258.751	122.28
	7	11.8	4.36	161.358	478.419	136.663	82.22
	8	13.4	5.99	146.789	341.756	102.866	42.27
	9	15.9	6.38	64.192	238.890	64.192	35.66
	10	17.7	6.58	125.410	174.698	125.410	67.79
	11	19.5	7.90	49.288	49.288	49.288	—
白云山 Baiyun mountain	1	0.8	0.79	74.644	1 374.181	17.406	15.27
	2	1.9	1.24	301.900	1 356.775	102.391	54.52
	3	3.8	1.94	458.132	1 254.384	232.904	112.39
	4	5.9	2.61	517.476	1 021.480	366.714	189.88
	5	7.8	3.28	340.751	654.766	262.731	137.16
	6	9.7	3.84	189.505	392.035	170.537	98.44
	7	11.5	3.99	148.960	221.498	136.265	49.55
	8	14.2	4.55	16.249	85.233	16.249	8.78
	9	16.1	4.69	68.984	68.984	68.984	—
石花山 Shihua mountain	1	0.8	0.38	0.775	709.426	0.115	0.09
	2	2.1	1.11	16.533	709.311	6.207	3.14
	3	4.1	2.10	91.076	703.104	42.808	24.96
	4	5.8	2.66	177.765	660.296	100.895	45.04
	5	8.0	3.49	244.906	559.401	152.533	91.28
	6	9.7	4.23	220.326	406.868	186.753	79.85
	7	12.1	5.25	194.700	220.115	194.700	76.35
	8	14.6	1.45	1.673	25.415	1.672	1.11
	9	16.1	5.50	23.743	23.743	23.743	—

1)第1径阶为树高 <1.3 m 和胸径 <1 cm 的黄牛木个体, 其余径阶为树高 ≥1.3 m 且胸径 ≥1 cm 的黄牛木个体, 胸径每隔 2 cm 增加一个径阶; 2) “—” 代表需测得下一径阶数据方可进行计算

1) The first diameter class includes *Cratoxylum cochinchinense* trees with height <1.3 m and DBH <1 cm, the other diameter classes include trees with height ≥1.3 m and DBH ≥1 cm, and the diameter class increases one class with every 2 cm increase in DBH; 2) “—” indicates the value can not be calculated without data of the next diameter class

2.3 种群扩散速率分析

黄牛木种群始终处于动态变化中, 不同时期的种群斑块有不同的形状及大小。经统计相关数据, 结合 GIS 空间分析与几何计算功能测定黄牛木种群冠层投影面积, 进而计算种群的扩散速率, 测定结果见表 1。

运用 SPSS 17.0 软件进行曲线回归分析, 得到黄牛木种群扩散速率与平均胸径的函数拟合曲线模型, 茶山的相关参数估计值见表 2(其他省略)。

表 2 茶山样地黄牛木种群扩散速率与平均胸径的函数模型方程及参数估计

Table 2 Function model and parameter estimation of diffusion rate - average DBH for *Cratogeomys cochinchinense* population in Chashan sample plot

方程 Equation	参数估计值 Estimated parameter							
	R^2	F	v_1	v_2	P	a	b_1	b_2
线性 Linear	0.003	0.023	1	8	0.882	80.041	-0.393	
对数 Logarithm	0.037	0.310	1	8	0.593	61.672	8.042	
倒数 Reciprocal	0.082	0.717	1	8	0.422	85.001	-30.106	
二次 Quadratic	0.443	2.786	2	7	0.129	27.365	18.071	-1.018
复合 Composite	0.018	0.145	1	8	0.713	52.329	1.019	
幂 Power	0.082	0.719	1	8	0.421	40.396	0.229	
S	0.065	0.560	1	8	0.476	4.266	-0.514	
增长 Growth	0.018	0.145	1	8	0.713	3.958	0.019	
指数 Index	0.018	0.145	1	8	0.713	52.329	0.019	
Logistic	0.018	0.145	1	8	0.713	0.019	0.982	

模型构建结果表明, 各样地种群扩散速率的函数模型均为一元二次方程。可以计算出, 当种群的扩散速率无限接近 0 时, 黄牛木种群冠幅的扩散受到阻碍, 此时必须对黄牛木进行间伐, 以促进种群的生长与更新。将 $y=0$ 分别代入各样地的函数模型, 得到 $x_1=19.2$ cm, $x_2=13.8$ cm, $x_3=15.5$ cm; 即黄牛木的茶山种群处于第 10 径阶, 白云山种群处于第 8 径阶, 石花山种群处于第 9 径阶时, 应对黄牛木种群进行间伐。因此, 在目前的生长状态下, 3 个样地均应采取适当的间伐措施, 以促进黄牛木天然林的更新生长和保护管理。

从模型构建结果还可以看出, 各样地黄牛木种群扩散趋势相似, 可以整理获得黄牛木种群扩散的一般规律。计算黄牛木种群胸径和扩散速率的平均值, 并运用 SPSS 软件进行曲线拟合回归分析, 得到黄牛木种群的扩散速率模型: $y = -0.969 2x^2 + 17.336x + 20.531 (R^2=0.943, P=0.020)$ 。

2.4 单株黄牛木扩散速率分析

整理外业调查数据, 得到单株黄牛木各径阶的胸径、冠幅、冠幅面积以及冠幅增长面积, 结果见

R^2 值越大、 P 值越小, 两者的相关性越显著, 据此选取黄牛木种群扩散速率的最适函数模型: 茶山 $y_1 = -1.018 1x_1^2 + 18.071x_1 + 27.365 (R^2=0.443, P=0.129)$; 白云山 $y_2 = -3.086 2x_2^2 + 43.308x_2 - 8.6201 (R^2=0.821, P=0.000)$; 石花山 $y_3 = -1.5698x_3^2 + 26.826x_3 - 39.059 (R^2=0.790, P=0.048)$ 。其中 x 是各个径阶对应的平均胸径, cm; y 是各个径阶对应的扩散速率, m^2/cm 。

表 3。通过对冠幅与胸径进行回归分析, 得到二次函数的 R^2 最大, 为 0.998, P 为 0.000, 说明冠幅 (y) 与胸径 (x) 呈显著正相关, 故单株黄牛木的冠幅与胸径的最佳拟合模型是一元二次方程, 函数公式为 $y_4 = -0.009 6x_4^2 + 0.481 9x_4 + 0.303 9 (R^2=0.999, P=0.000)$ 。当黄牛木的胸径为 3.03 cm 时, 黄牛木的模拟冠幅为 1.18 m, 与实际调查数据 1.67 m 相差不大, 拟合情况较好。

由冠幅-胸径函数得到单株黄牛木冠幅模拟数据, 计算出冠幅扩散速率的数值, 模拟结果见表 3。运用扩散速率与胸径作回归分析, 其最佳拟合模型亦是一元二次方程, 函数公式为: $y_0 = -0.013 5x_0^2 + 0.310 6x_0 + 0.111 3 (R^2=0.999, P=0.000)$ 。

从表 3 中数据可以看出, 单株黄牛木的扩散速率随径阶增大先增大后减小, 说明黄牛木在生长发育的初期, 营养、空间等资源较充足, 种群扩散比较顺利; 随着黄牛木年龄的增长, 种群扩散速率趋势由上升趋势变为下降, 直至无限接近于 0, 其冠幅扩散速率同样无限接近于 0, 此时黄牛木冠幅达到最大值, 若不采取适当措施, 黄牛木的冠幅增长将受到限制。

表3 黄牛木单株生长因子调查与模拟结果

Table 3 Survey and simulation results of growth factors of individual *Cratogeomys cochinchinense* tree

径阶 ¹⁾ Diameter class	数量/株 Number	胸径/cm DBH	实际调查结果 Survey result			模拟分析结果 Simulation analysis result			
			冠幅/m crown width	冠幅面积/m ² crown area	增长面积/m ² growth area	冠幅/m crown width	冠幅面积/m ² crown area	增长面积/m ² growth area	扩散速率/ (m ² ·cm ⁻¹) Diffusion rate
1	422	0.8	0.60	0.286	0.286	0.68	0.366	0.366	0.4
2	607	2.0	1.29	1.316	1.030	1.24	1.209	0.843	0.7
3	389	3.9	2.10	3.451	2.135	2.02	3.209	2.000	1.1
4	250	5.8	2.81	6.189	2.738	2.79	6.114	2.905	1.5
5	123	7.9	3.43	9.259	3.070	3.51	9.681	3.567	1.7
6	59	9.7	4.10	13.190	3.930	4.08	13.060	3.379	1.9
7	34	11.7	4.53	15.658	2.468	4.63	16.828	3.769	1.9
8	8	14.1	5.27	21.809	6.151	5.19	21.126	4.298	1.8
9	7	16.0	5.52	23.926	2.118	5.56	24.238	3.112	1.6

1) 第1径阶为树高 <1.3 m 和胸径 <1 cm 的黄牛木个体, 树高 ≥1.3 m 且胸径 ≥1 cm 的黄牛木个体, 其胸径每隔 2 cm 增加一个径阶

1) The first diameter class includes *Cratogeomys cochinchinense* trees with height <1.3 m and DBH <1 cm, the other diameter classes include trees with height ≥1.3 m and DBH ≥1 cm, and the diameter class increases one class with every 2 cm increase in DBH

3 讨论与结论

本文结合种群生态学和景观生态学的研究方法, 通过 GIS 技术, 对黄牛木种群的扩散规律进行系列分析, 从种子的传播方式到种群的扩散动态, 然后建立种群扩散速率的函数模型, 进而模拟预测种群未来的发展趋势。本研究为植物种群扩散和空间分布研究提供了一种新的思路和方法。

植物种群扩散通常与种子扩散关系密切, 而种子扩散往往需要借助动物、风、水、机械及人等媒介。在热带雨林中, 满身是刺的黑尾狐棕靠刺鼠偷食其种子得以扩散传播^[25]; 胡梦宇^[20] 则通过对不同样地藜蒴种群的景观物种流研究, 确定了藜蒴种子靠重力传播。黄牛木种子质轻具翅, 其种子扩散方向多为当地夏季(黄牛木种子成熟期)盛行风向或常年风向的下风向, 这与风传播的特征吻合^[21, 26], 因此认为黄牛木种群靠风力扩散。但是, 不排除其他方式传播的可能性, 例如, 在种子和根茎的扩散过程中遇到障碍使大量繁殖体集中在一处而其他地方很少或完全没有, 动物及人为活动对聚集分布也有加强作用。今后可以采用标记黄牛木种子的方法来精确、直接地研究种子的传播, 进一步确定种子在不同途径下的传播机制, 丰富黄牛木的生物学理论, 为种群空间分布动态和扩散规律提供更深厚的研究基础。

黄牛木的冠层扩散情况表明, 冠层扩散程度随径阶增大先上升后下降, 原因是群落环境水分、光

照、养分等自然条件从充足到紧缺、种内和种间的竞争加大, 最终导致扩散程度的变化, 这种变化为物种生长扩散过程中的正常现象, 该结果支持了前人的研究^[20, 27-28]。但石花山的扩散程度峰值有所延后, 原因可能是在生长发育初期, 种群基数小, 产生的种子也较少, 以至于扩散程度较低, 随着种群数量的增加, 种群基数也逐年增加, 扩散程度亦逐渐上升; 也有可能是种群在扩散过程中受到环境、人为等方面的影响, 具体原因有待进一步研究。研究黄牛木种群的冠层变化规律, 有利于深入了解植物上层空间随时间变化的特点, 为种群空间分布研究提供理论基础。

运用冠层面积增长动态推算种群扩散规律, 结果表明, 种群扩散速率随种群年龄增加先增大后减小, 各样地种群扩散速率与胸径的函数模型为一元二次方程, 这与胡梦宇^[20]对珠三角地区不同样地藜蒴景观林的研究结果基本一致, 说明不同种群的扩散趋势有相似之处。但各个模拟函数的系数均不相同, 说明不同的生长环境其生长情况可能不同, 模拟方程呈现的是特定区域种群生长扩散的规律, 不能盲目套用, 一概而论。赵强民^[28]通过对广州白云山木荷种群的扩散速率进行研究, 得到木荷种群的冠层累计投影面积与径阶的函数模型为一元一次方程, 说明种群扩散速率的模型构建有不同的拟合选择, 应充分根据不同研究对象进行合理选择。未来, 还要进一步考虑边缘效应、林窗效应、自然稀疏的随机性以及种子传播过程中风速产生的影响, 提

升黄牛木种群扩散速率模拟预测的精确度,为种群的合理间伐及抚育更新提供理论依据。

通过对单株黄牛木的胸径增长和冠幅扩散规律进行研究,利用扩散速率与胸径的函数模型,可进一步确定人工经营下黄牛木种植密度以及间伐时间,由扩散速率-胸径函数模型计算得到,当 y 达到最大值 $1.90 \text{ m}^2/\text{cm}$ 时, $x=11.5 \text{ cm}$,即黄牛木的胸径为 11.5 cm 时,种群处于第 6 径阶,其冠幅扩散速率达到最大值 $1.90 \text{ m}^2/\text{cm}$,此时应对种群进行适当间伐,以保证其最大效益;将 $y=0$ 代入函数,计算得到 $x=23.4$,即黄牛木胸径达到 23.4 cm 时,种群处于第 12 径阶,此时必须对黄牛木进行间伐,否则将会阻碍种群的生长。当然,树种的生长状况处于不断变化中,以上推论为理想状态下黄牛木的间伐时间,但可以肯定的是,适时进行合理的人工疏伐,有利于实现人工经营下黄牛木种群的最大景观价值和森林生产效益。

黄牛木作为华南地区的优良乡土树种,目前仍处于天然群落生长状态,对黄牛木扩散机制的研究还不够深入,对其种子传播后种子的命运、种子适应各种传播途径的机理以及扩散速率与风速之间的关系等方面的研究都有待加强。因此,只有了解了黄牛木的扩散机制,才能采取有针对性的措施,实现黄牛木天然林的合理抚育和有效管理。从人工经营管理的角度而言,分析黄牛木的生长规律和扩散动态,可加快黄牛木在景观绿化及植被修复中的推广应用,从而促进困难立地的生态平衡与发展。

参考文献:

[1] 蔡小英. 武夷山黄山松种群结构与动态研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.

[2] DIECKMANN U, O'HARA B, WEISSER W. The evolutionary ecology of dispersal[J]. *Trends Ecol Evol*, 1999, 14(3): 88-90.

[3] 肖治术, 张知彬. 扩散生态学及其意义[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 107-110.

[4] 赵秋玲, 杜坤, 裴会明, 等. 小陇山林区庙台榧种子扩散格局及天然更新研究[J]. *林业科技通讯*, 2018(8): 3-6.

[5] 全威, 王明, 桑卫国. 外来入侵植物风传扩散过程模拟模型选择[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(9): 2840-2848.

[6] 刘明宇, 唐毅. 风力驱动的榆树疏林种子扩散模拟[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(8): 2524-2531.

[7] 陈文文. 水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*) 自然种群交配系统和扩散格局研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.

[8] 曾心美, 童芬, 刘艳梅, 等. 丫蕊花属植物花粉和种子微形态特征比较及其分类学意义[J]. *西北植物学报*,

2017, 37(4): 695-704.

- [9] 郭志文, 郑景明. 用植物生活史性状预测种子扩散方式[J]. *生物多样性*, 2017, 25(9): 966-971.
- [10] 周禧琳, 吕瑞恒, 韩路, 等. 和田河不同生境灰胡杨种群结构特征及竞争关系分析[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(1): 43-48.
- [11] REY P J, ALCANTARA J M. Recruitment dynamic of a fleshy-fruited plant (*Olea europaea*): Connecting patterns of seed dispersal to seedling establishment[J]. *J Ecol*, 2000, 88(4): 622-633.
- [12] 邢福武, 余明思. 深圳野生植物[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [13] 陈勇, 廖绍波, 李伟东, 等. 番禺区主要植被类型及其改造途径[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 137-140.
- [14] 李果惠, 张尚坤, 叶耀雄, 等. 东莞银瓶山森林公园鹅掌柴群落物种多样性和优势种群动态[J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(3): 65-72.
- [15] 刘东蔚, 王海军, 陈勇, 等. 深圳羊台山黄牛木群落学特征研究[J]. *生态科学*, 2014, 33(2): 379-385.
- [16] MAISUTHISAKUL P, PONGSAWATMANIT R, GORDON M H. Characterization of the phytochemicals and antioxidant properties of extracts from Teaw (*Cratoxylum formosum*)[J]. *Food Chem*, 2007, 100(4): 1620-1629.
- [17] 王祝年, 李晓霞, 王建荣, 等. 黄牛木果实挥发油的化学成分研究[J]. *热带作物学报*, 2010, 31(6): 1047-1049.
- [18] 古炎坤. 生态资源可持续发展理论与实践: 广州市白云山国家重点风景名胜区[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 3-12.
- [19] 戴其生, 张梅林, 徐玉伟, 等. 红楝子人工造林试验初报[J]. *安徽林业科技*, 1997, 4(1): 33-34.
- [20] 胡梦宇. 黎蒴景观林的物种流研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [21] 彭晓昶, 潘燕, 朱晓媛, 等. 云南 7 种常见菊科杂草植物具冠毛种子形态与风传播特征[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(5): 202-211.
- [22] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第 50 卷: 第 2 分册[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [23] 冯娴慧, 魏清泉. 广州城市近地风场特征研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(10): 1558-1561.
- [24] 甘晓英, 杨万基, 甘晓星, 等. 台山市风场特征与工业布局合理性浅析[J]. *广东气象*, 2013, 35(1): 54-58.
- [25] 焦毅. 种子传播的花式招数[J]. *军事文摘*, 2018(6): 38-41.
- [26] 迪利夏提·哈斯木, 阿马努拉·依明尼亚孜, 依明·艾力, 等. 准噶尔荒漠两种猪毛菜果实扩散特性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(7): 151-155.
- [27] 王艳莉, 齐欣宇, 杨昊天, 等. 不同生境下砂蓝刺头 (*Echinops gmelini*) 形态结构及生物量分配特征[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 756-764.
- [28] 赵强民. 广州白云山木荷种群的空间分布格局研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2008.