

贵州特有植物长柱红山茶种群年龄结构及空间分布格局研究

杨乃坤¹, 邹天才², 刘海燕^{3*}, 汪建文², 黄丽华²

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州科学院, 贵阳 550001; 3. 贵州省植物园, 贵阳 550004)

摘要: 为评估贵州特有植物长柱红山茶(*Camellia mairei* var. *lapidea*)的资源现状,采用样方法对其种群年龄结构和空间分布格局进行了研究。结果表明,长柱红山茶种群年龄结构为衰退型,种群密度以中龄树 > 老年树 > 幼龄树;不同发育阶段种群的空间分布格局不同,幼龄树和中龄树均呈显著集群分布,老年树接近集群分布或随机分布;种群的3个发育阶段之空间关系不密切,均表现为负相关或不相关。长柱红山茶由于其繁殖生物学特性和受其群落之种内、种间竞争及生境异质性的影响而趋于濒危和灭绝。因此,建立长柱红山茶就地保护区和开展引种栽培,扩大其栽培种植范围以增加种群数量是保护长柱红山茶种质资源的有效措施。

关键词: 长柱红山茶; 种群; 年龄结构; 点格局; 空间分布格局

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.02.013

Age Structure and Spatial Distribution Pattern of Endemic Plant *Camellia mairei* var. *lapidea* Population in Guizhou Province, China

YANG Nai-kun¹, ZOU Tian-cai², LIU Hai-yan^{3*}, WANG Jian-wen², HUANG Li-hua²

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China; 3. Guizhou Botanical Garden, Guiyang 550004, China)

Abstract: In order to evaluate resource status of *Camellia mairei* var. *lapidea* endemic in Guizhou, the age structure and spatial distribution pattern of the population were studied by quadrat method. The results showed that the age structure of *C. mairei* var. *lapidea* population was decline type. The population density was in the order of middle-age trees > old trees > young trees. Spatial distribution pattern of *C. mairei* var. *lapidea* population was different in different development stages, which young trees and middle-aged trees had cluster distribution, and old trees were nearly cluster distribution to random distribution. The spatial pattern at different development stages had negative or no relation. *C. mairei* var. *lapidea* is rare and endangered species because of propagation biological characteristics and population habitat heterogeneity. So, it was effective measure to protect *C. mairei* var. *lapidea* germplasm resources by setting up *in situ* reserves and increasing populations by carrying out introduction and cultivation.

Key words: *Camellia mairei* var. *lapidea*; Population; Age structure; Point pattern; Spatial distribution pattern

种群是指生活在一定空间和时间范围内的同种生物个体的总和,种群结构和空间分布格局是现代种群生态学研究的重要内容^[1-3]。种群的年龄结构反映了种群在时间和空间上的变化规律,从而体

现种群动态及其群落的演替趋势^[4-5]。种群空间分布格局是研究种群特征、种群间相互作用以及种群与环境关系的重要手段,分布格局类型可以反映出种群利用环境资源的状况,揭示种群繁殖演替的规

收稿日期: 2014-11-03

接受日期: 2014-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31360075); 国家农业科技成果转化资金资助项目(2014GB2F200245)资助

作者简介: 杨乃坤(1987~), 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: 373893901@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liuhaiyan301@163.com

律,一直是现代生态学研究中的热点^[6-9],对于认识种群繁衍规律、种内和种间关系、种群与环境因子间的相互关系有重要意义。

长柱红山茶[*Camellia mairei* var. *lapidea* (Y. C. Wu) Sealy]是东亚植物区系贵州高原亚地区(Ⅲ D10d)的特有珍稀濒危植物,隶属于山茶科(Theaceae)山茶属红山茶组^[10],其模式标本虽采自雷公山自然保护区,但现集中分布于贵州省赤水市金沙沟自然保护区海拔 1100~1400 m 的常绿落叶阔叶混交林中,集中分布区总面积约 3 km²,分布狭限,数量稀少,但极具经济利用价值^[11-12]。目前对其已开展了资源调查和引种栽培试验^[11,13],但对其种群生态学尚缺乏系统研究。本文以长柱红山茶集中分布区种群为研究对象,对其种群结构和空间分布特征等进行实地调查和系统研究,探讨其分布扩散规律及其环境影响机制,以期珍稀植物长柱红山茶种质资源的有效保护和合理利用提供科学依据,也为深入研究贵州高原植物资源及其区系特征提供参考。

1 样地概况

赤水金沙沟自然保护区地处贵州高原向四川盆地过渡的斜坡地带,是贵州境内中生代晚期最大的沉积区。地层产状平缓,岩区节理发育,为沟谷纵横山高坡陡的侵蚀构造地貌。表土具有较高肥力和延缓向地带性土壤发育的特点,土壤 pH 为 4.5~6.0。属中亚热带气候区,温暖且降水丰富,年均气温为 12.1℃,≥10℃ 的年积温 4100~5000℃,极端最高温为 38.8℃~40℃,极端最低温为 -8.4℃~-12℃,最冷月(1 月)平均气温 2℃~5℃,年降水量为 1200~1300 mm,年均相对湿度大于 84%。自然植被为中亚热带湿润性常绿阔叶林,森林覆盖率高,植被的原生性强,壳斗科(Fagaceae)、山茶科(Theaceae)、樟科(Lauraceae)等常绿树木和毛竹(*Phyllostachys pubescens*)明显处于优势地位。

长柱红山茶原生植株分散,单株或丛生,生境群落植物物种丰富,结构复杂。伴生植物达 23 科 30 余种。乔木层主要有毛竹、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、灯笼花(*Agapetes lacei*)、白楠(*Phoebe neurantha*)等,株高 5~12 m,郁闭度 0.6,毛竹为建群种。灌木层主要有杜茎山(*Maesa japonica*)、箭竹(*Fargesia spathacea*)、百两金(*Ardisia crispa*)等,株高 2~5 m,盖度 50% 左右。草本层主要有里白

(*Hicriopteris glauca*)、中华秋海棠(*Begonia grandis*)、楮头红(*Sarcopyramis nepalensis*)等,株高 0.2~2.0 m,盖度 95% 左右。另外还有一些层间藤本植物,如西南菝葜(*Smilax boeckii*)、南赤廔(*Thladiantha nudiflora*)等。

2 方法

2.1 野外样地调查

2014 年 4 月 1~3 日(晚春)和 8 月 21~26 日(初秋)共 2 次赴金沙沟自然保护区长柱红山茶分布区开展野外实地踏查和观测。选择具有代表性的密集分布区设置样方,样方中心坐标:28°27'45" N 和 106°00'40" E,海拔 1284 m,坡度 73°,坡向 ES125°。土壤类型为山地黄壤, pH 5.8。样方内群落郁闭度 0.6。根据生境实际情况以垂直和沿着坡向的方向为边界设置 1 个 50 m×50 m 的大样方,用测距仪测量每株长柱红山茶到样方边框的垂直距离,记录坐标、树高、胸径和南北向的冠幅。在大样方中用 5 点取样法设置 5 个 5 m×5 m 的中等样方,调查灌木层物种组成、高度和盖度,在每个中等样方中心设置 1 个 1 m×1 m 的小样方,记录草本层物种组成、高度和盖度。

2.2 种群年龄级确定

长柱红山茶为常绿灌木或小乔木,植株矮小且侧枝较多,不易钻取木芯,而伐木又有悖于生物多样性保护的宗旨。因此,本研究采用以径级结构代替年龄结构的方法^[9,14-15],以胸径 0~2 cm 为第 1 径级,即第 1 龄级。胸径每增加 2 cm 径级(龄级)增加 1 级,并绘制种群径级(龄级)结构图。

2.3 空间分布格局分析

采用空间点格局分析法(SPPA,亦称 Ripley's K 系数法)^[9,16-18],基本公式为:

$$\hat{K}(t) = \frac{A}{n^2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{1}{W_{ij}} I_i(u_{ij}) \quad (i \neq j) \quad (1)$$

式中, A 为样地面积; n 为总点数; t 为距离尺度; u_{ij} 为树木 i 与树木 j 的间距,当 u_{ij} 小于 t 时, $I_i(u_{ij})=1$; 当 u_{ij} 大于 t 时, $I_i(u_{ij})=0$; W_{ij} 为以树木 i 为圆心、以 u_{ij} 为半径的圆落在面积 A 中的弧长与整个圆周的比值,其为一个点(植株)可被观察到的概率^[19-20]。

现通常采用 Ripley's K 的修正函数:

$$L(t) = \sqrt{\hat{K}(t)/\pi} - t \quad (2)$$

利用 Monte-Carlo 方法通过 10000 次随机空间模拟计算 $L(t)$ 的 99% 置信区间。若实测 $L(t)$ 值大于置信区间上限为集群分布, 在置信区间内为随机分布, 小于置信区间下限为均匀分布^[4]。

分析两个发育阶段的关系实际上是对他们的点格局进行分析, 也叫多元点格局分析^[5,17], 即:

$$\hat{K}_{12}(t) = \frac{A}{n_1 n_2} \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{W_{ij}} I_i(u_{ij}) \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为阶段 1 和阶段 2 的个体数(点数); A 为样地面积; $I_i(u_{ij})$ 和 W_{ij} 含义同(1)式, 不同的是 i 和 j 分别代表阶段 1 和阶段 2 的个体。

同样, 用 Monte-Carlo 方法检验拟合置信区间 $L_{12}(t)$, 以检验两种间的关联是否显著。

$$L_{12}(t) = \sqrt{\hat{K}_{12}(t)/\pi} - t \quad (4)$$

若实测 $L_{12}(t)$ 值大于置信区间上限为显著正相关, 在置信区间内为不相关, 小于置信区间下限为显著负相关。所有数据分析用生态学软件包 ADE-4 完成^[21]。

3 结果和分析

3.1 种群径级分布及年龄结构

从图 1 可以看出, 长柱红山茶种群的径级结构呈“纺锤”形, 中龄植株数量较多, 幼龄植株和老

龄植株数量较少。样方中共有 150 株长柱红山茶, 其中胸径 0~2.5 cm 的幼龄植株 19 株, 占 12.67%, 2.5~12.5 cm 的中龄植株 106 株, 占 70.67%, 胸径 > 12.5 cm 的老年树 25 株, 占 16.67%。胸径 ≤ 7.5 cm 时, 种群的个体数量随着径级的增加而增加, 当胸径 > 7.5 cm 时, 个体数量则随着径级的增加而减少, 这表明长柱红山茶种群的年龄结构属于衰退型。

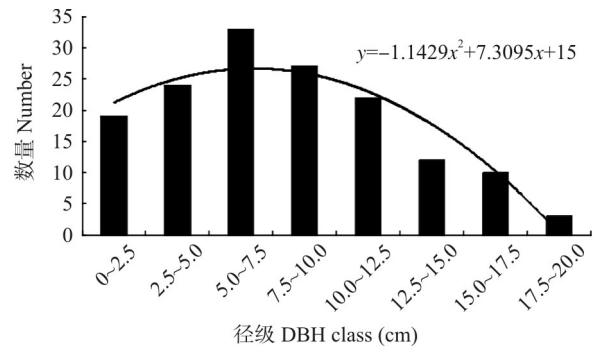


图 1 长柱红山茶种群的径级结构

Fig. 1 DBH classes of *Camellia mairei* var. *lapidea* population

3.2 种群空间分布格局

图 2 是长柱红山茶幼龄树、中龄树和老年树在样地中的分布点。由图 2 可知, 长柱红山茶种群 3 个发育阶段的植株密度存在较大差异, 以中龄树个体最多, 其次是老年树, 幼龄树最少。3 个发育阶段的分布格局均呈一定程度的集群分布, 但却不能

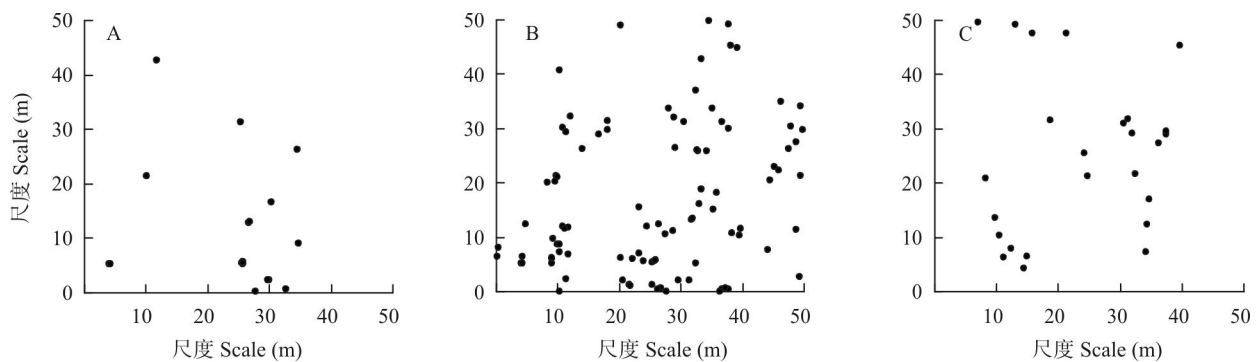


图 2 长柱红山茶种群不同发育阶段个体在样地中的分布。A: 幼龄树; B: 中龄树; C: 老龄树。

Fig. 2 Point pattern of individuals of different development stages of *Camellia mairei* var. *lapidea* population. A: Young tree; B: Middle-age tree; C: Old tree.

清楚显示出这种集群分布与尺度之间的关系。

图 3 是长柱红山茶种群的 3 个发育阶段空间点格局分析, 实线为用实际数据计算的 $L(t)$ 曲线, 虚线为拟合的上下包迹线(即置信水平)。分析时取 t 的间隔为 1 m, t 的最大值为样方边长的一半(25 m),

图中 x 坐标 t 直接用空间距离(m)表示。可见, 长柱红山茶种群不同发育阶段的分布格局随尺度的变化差异较大, 幼龄树(图 3:A)在尺度 0~19 m 和 22~25 m 内均为极显著的集群分布, 而在 19~22 m 内则呈随机分布; 中龄树(图 3:B)在所有尺度下均

呈现出极显著的集群分布;老年树(图 3:C)在尺度 0~3 m 和 9~25 m 时为随机分布,在尺度 3~9 m 时接近集群分布但集群特征不显著。

3.3 不同发育阶段种群的空间关联分析

采用 Ripley's K 函数分析长柱红山茶种群的幼龄树、中龄树和老年树的空间关联性(图 4)。可见,

幼龄树与中龄树(图 4:A)在所有尺度内,实测 $L_{12}(t)$ 值均在上下包迹线之间,说明它们之间无关联。幼龄树与老年树(图 4:B)在尺度 0~3 m 和 10~25 m 内无关联,而在 3~10 m 内呈显著负相关关系。中龄树与老年树(图 4:C)在所有尺度内均无相关性。这表明,长柱红山茶种群不同年龄的个体间存在着种内竞争,且竞争强度的差异明显。

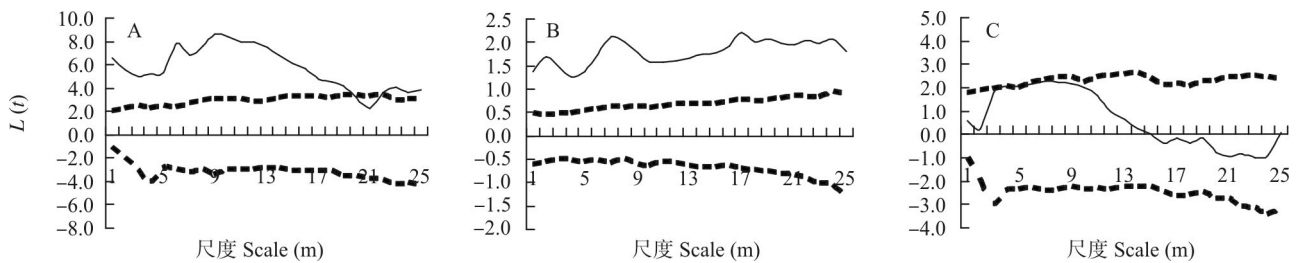


图 3 长柱红山茶种群不同发育阶段的点格局。虚线为拟合的上下包迹线。A: 幼龄树; B: 中龄树; C: 老龄树

Fig. 3 Point pattern of different development stages of *Camellia mairei* var. *lapidea* population. Dashed-lines present upper and lower envelopes, respectively. A: Young tree; B: Middle-age tree; C: Old tree.

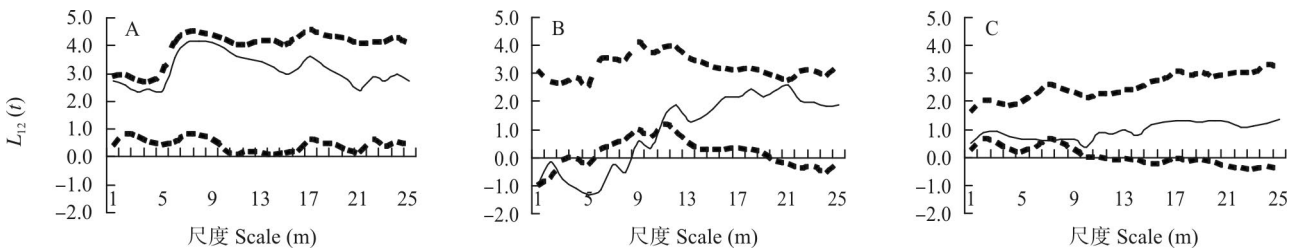


图 4 长柱红山茶种群不同发育阶段间关系的点格局。A: 幼龄树与中龄树; B: 幼龄树与老年树; C: 中龄树与老年树; 虚线为拟合的上下包迹线。

Fig. 4 Point pattern of different development stages associations of *Camellia mairei* var. *lapidea* population. A: Young tree vs. Middle age tree; B: Young tree vs. Old tree; C: Middle-age tree vs. Old tree; Dashed-lines present upper and lower envelopes, respectively.

4 结论和讨论

分析种群的年龄结构是揭示种群动态变化和群落发展趋势的重要手段^[22]。本研究结果表明,赤水金沙沟自然保护区内长柱红山茶种群的年龄结构为衰退型,这符合珍稀濒危物种的种群趋于衰退的一般规律^[23-24]。在野生条件下,长柱红山茶的结籽率较低,果实病虫害发生率高,完好种子 $\leq 35\%$,萌发率 $\leq 2.5\%$ ^[25],致使原生种群内幼苗严重稀少,这是长柱红山茶种群年龄结构呈衰退型的根本原因。另外,长柱红山茶所在群落内草本植物生长茂盛,这使得萌发出的长柱红山茶幼苗在种间竞争中处于劣势地位,因而在其向中龄树发育过程中遭受较大的生存竞争压力,这可能也是导致其种群呈衰退型的另一个原因。

种群的空间分布格局通常是植物自身的生物学特性、生境异质性以及种内种间竞争等生物因素与非生物因素综合作用的结果^[21,26-30]。长柱红山茶 3 个发育阶段的种群分布格局呈现出一定差异,幼、中龄树呈极显著的集群分布,老年树为随机分布或由集群分布转变为随机分布的特点。在自然状态下,长柱红山茶的果实含种子 2~6 颗,果实自然脱落,受重力作用、雨水漂流、或其他生物移动作用而传播,遇到适宜生境而萌发,通常出现 1~3 株幼苗集中生长在一起,导致幼树集群分布显著。因此,自然结实率低、果实病虫害严重发生和自然萌发的成苗率低等生物学特性,造成了其种群幼龄个体数量稀少,分布不均匀,这是幼龄树、中龄树呈集群分布的主要原因。另外,由于群落内草本层分布不均而形成的小生境间的异质性导致其分布极不均匀;

以及幼苗与草本植物之间激烈的种间生存竞争,也使得其只能以集群形式去争夺和利用环境资源,以维持种群自身的养分供给和生长。这可能是幼、中龄树呈集群分布的另一个原因。随着植物的生长,种内竞争加剧,在密度制约效应引起的种群自疏作用以及自身生理限制因素的影响下^[20],部分植株出现死亡,导致了老龄阶段种群聚集强度减弱,种群空间分布格局演变为随机分布。

种内联结是用来表示同一物种不同发育阶段在空间分布上的关联性,是对一定时期内植物种群组成个体之间相互关系的静态描述,这种关系不仅包括空间分布关系,也包含着个体间的相互影响,揭示了种群的现状,并能反映种群内个体间的相互作用^[14]。长柱红山茶种群各发育阶段的空间格局关系均表现为不相关或负相关,这表明物种在繁衍过程中同时受到种群内部个体间的相互影响和外部环境因素的干扰和限制。在不同生长发育阶段表现出不同的空间分布格局特征,与森林植物群落的它疏过程、干扰格局以及生境异质性有密切关系,如群落内其他物种带来的生存竞争压力、生境中土壤水肥条件均一定程度上影响森林中树种的空间分布格局^[21,31]。长柱红山茶的原生境物种丰富,种间竞争激烈,种群只能以集群的方式去参与激烈的种间竞争。种群幼龄树与中龄树无关联性,这主要是由于山坡较陡,自然脱落的果实或种子在自身重力及雨水冲刷下迁移到离母株较远的地方,加上幼树数量稀少导致的集群现象不及中龄树强烈。幼龄树、中龄树与老年树分布格局呈负关联或无关联,这是由于长柱红山茶自身生物学特性和激烈的种间竞争导致的;另外,中龄树与老年树间的种内竞争也是导致两者分布格局无关联的一个重要原因。

小种群珍稀濒危植物的保护是当前生物多样性保护的重要内容之一,如何有效地保护这些物种是一项艰巨的任务。本研究结果表明,在自然群落中,小种群珍稀濒危特有植物长柱红山茶的年龄结构为衰退型,说明长柱红山茶在种间竞争中处于劣势地位,同时种群空间分布格局表明其群落内存在激烈的种间生存竞争,加上长柱红山茶自然繁殖率低,受立地生境和水热气候条件的影响,其自然繁殖与种群扩散受到限制,种群分布狭窄,现存个体数量已十分稀少,物种趋于濒危,现有的种群将有消亡的风险。因此,建立长柱红山茶就地保护区,保护原种群森林生态系统免受人为干扰和破坏性

采集,抚育小种群是当务之急和保护其种质资源的有效措施。此外,对适合幼苗生长的斑块生态因子进行深入研究,探索解决长柱红山茶的引种栽培、种苗扩繁技术,扩大长柱红山茶的栽培种植范围以增加种群数量,提高有效保护和合理利用的成效等,对于解决珍稀濒危植物的保护利用和变特色资源为经济优势具有重要价值和现实意义。

参考文献

- [1] Jiang H. Ecology of *Picea asperata* Population [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1992: 8–26.
江洪. 云杉种群生态学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 8–26.
- [2] Somanathan H, Borges R M. Influence of exploitation on population structure, spatial distribution and reproductive success of dioecious species in a fragmented cloud forest in India [J]. Biol Conserv, 2000, 94(2): 243–256.
- [3] Zhang Y X, Ma K M, Qi J, et al. Size structure and spatial pattern of *Quercus liaotungensis* population along elevation gradient in Dongling Mountain, Beijing [J]. Acta Ecol Sin, 2009, 29(6): 2789–2796.
张育新, 马克明, 祁建, 等. 北京东灵山海拔梯度上辽东栎种群结构和空间分布 [J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2789–2796.
- [4] Zhang J T. Analysis of spatial point pattern for plant species [J]. Acta Phytoecol Sin, 1998, 22(4): 344–349.
张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344–349.
- [5] Condit R, Ashton P S, Baker P, et al. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species [J]. Science, 2000, 288(5470): 1414–1418.
- [6] Miyadokoro T, Nishimura N, Yamamoto S. Population structure and spatial patterns of major trees in a subalpine old-growth coniferous forest, central Japan [J]. For Ecol Manag, 2003, 182 (1/2/3): 259–272.
- [7] Wang B Y, Yu S X. Multi-scale analyses of population distribution patterns [J]. Acta Phytoecol Sin, 2005, 29(2): 235–241.
王本洋, 余世孝. 种群分布格局的多尺度分析 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 235–241.
- [8] Li L, Chen J H, Ren H B, et al. Spatial patterns of *Castanopsis eyrei* and *Schima superba* in mid-subtropical broad-leaved evergreen forest in Gutianshan National Reserve, China [J]. Chin J Plant Ecol, 2010, 34(3): 241–252.
李立, 陈建华, 任海保, 等. 古田山常绿阔叶林优势树种甜槠和木荷的空间格局分析 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(3): 241–252.
- [9] Zhang Q Y, Zhang Y C, Luo P, et al. Ecological characteristics of a *Sabina saltuaria* population at timberline on the south-facing slope of Baima Snow Mountain, southwest China [J]. Chin J Plant Ecol, 2007, 31(5): 857–864.
张桥英, 张运春, 罗鹏, 等. 白马雪山阳坡林线方枝柏种群的生

- 态特征 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 857–864.
- [10] Zhou H, Chen X C. *Camellia longistyla*: A new species from Guizhou [J]. Guizhou For Sci Techn, 1983(3): 35–36.
周红, 陈晓春. 长柱红山茶 *Camellia longistyla* —— 我省又一山茶新种 [J]. 贵州林业科技, 1983(3): 35–36.
- [11] Zou T C. Studies on nursery stock produce technique for product market forecast of *Camellia luteoflora* and *Camellia longistyla* [J]. Guizhou Sci, 2000, 18(3): 209–215.
邹天才. 小黄花茶和长柱红山茶种质资源利用的研究 [J]. 贵州科学, 2000, 18(3): 209–215.
- [12] Zou T C, Huang C M, Zhou H Y, et al. Studies on seedling propagation and the cultivation expansion of 10 narrow limited distribution species in Guizhou [J]. Seed, 2007, 26(7): 52–56.
邹天才, 黄彩梅, 周洪英, 等. 10种贵州狭限分布植物的种苗扩繁与栽培试验研究 [J]. 种子, 2007, 26(7): 52–56.
- [13] Zeng F A. Resource survey of *Camellia* oil plants in Guizhou (I) [J]. Guizhou For Sci Techn, 1988(2): 11–25.
曾范安. 贵州山茶属油用植物物种资源调查(一) [J]. 贵州林业科技, 1988(2): 11–25.
- [14] Wang L, Sun Q W, Hao C Y, et al. Point pattern analysis of different age-class *Taxus chinensis* var. *mairei* individuals in mountainous area of southern Anhui Province [J]. Chin J Appl Ecol, 2010, 21(2): 272–278.
王磊, 孙启武, 郝朝运, 等. 皖南山区南方红豆杉种群不同龄级立木的点格局分析 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 272–278.
- [15] Zhang X W, Zhang X P, Guo C Y, et al. Point pattern analysis of *Pteroceltis tatarinowii* population at its different development stages in limestone mountain area of north Anhui, east China [J]. Chin J Ecol, 2013, 32(3): 542–550.
张兴旺, 张小平, 郭传友, 等. 皖北石灰岩山地青檀种群不同发育阶段的点格局分析 [J]. 生态学报, 2013, 32(3): 542–550.
- [16] Ceteris A, Franklin J. Second-order neighborhood analysis of mapped point patterns [J]. Ecology, 1987, 68(3): 473–477.
- [17] Zhang J T, Meng D P. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Larix principis-rupprechtii* in Luya Mountain Reserve, Shanxi, China [J]. Acta Ecol Sin, 2004, 24(1): 35–40.
张金屯, 孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析 [J]. 生态学报, 2004, 24(1): 35–40.
- [18] Li M H, He F H, Liu Y, et al. Spatial distribution pattern of tree individuals in the Schrenk spruce forest, northwest China [J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25(5): 1000–1006.
李明辉, 何风华, 刘云, 等. 天山云杉种群空间格局与动态 [J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1000–1006.
- [19] Diggle P J. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [20] Haase P. Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's K-Function: Introduction and methods of edge correction [J]. J Veg Sci, 1995, 6(4): 575–582.
- [21] Li S F, Liu W D, Su J R, et al. Age structure and spatial distribution patterns of *Taxus yunnanensis* population in Lanping County, Yunnan Province [J]. Acta Bot Boreal-Occid Sin, 2013, 33(4): 792–799.
李帅锋, 刘万德, 苏建荣, 等. 云南兰坪云南红豆杉种群年龄结构与空间分布格局分析 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(4): 792–799.
- [22] Wu X P, Zheng Y, Ma K P. Population distribution and dynamics of *Quercus liaotungensis*, *Fraxinus rhynchophylla* and *Acer mono* in Dongling Mountain, Beijing [J]. Acta Bot Sin, 2002, 44(2): 212–223.
- [23] Zhang W H, Zu Y G, Liu G B. Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species [J]. Acta Ecol Sin, 2002, 22(9): 1512–1520.
张文辉, 祖元刚, 刘国彬. 十种濒危植物的种群生态学特征及濒危因素分析 [J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1512–1520.
- [24] Zhang W H, Xu X B, Zhou J Y, et al. Population dynamics of endangered plant species *Abies chensiensis* [J]. Chin J Appl Ecol, 2005, 16(10): 1799–1804.
张文辉, 许晓波, 周建云, 等. 濒危植物秦岭冷杉种群数量动态 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1799–1804.
- [25] Liu H Y, Huang C M, Zou T C, et al. Study on propagation by seed of five species endemic *Camellia* in Guizhou [J]. Seed, 2010, 29(11): 105–106.
刘海燕, 黄彩梅, 邹天才, 等. 5种贵州特有山茶的种子繁殖试验研究 [J]. 种子, 2010, 29(11): 105–106.
- [26] Queenborough S A, Burslem D F R P, Garwood N C, et al. Habitat niche partitioning by 16 species of Myristicaceae in Amazonian Ecuador [J]. Plant Ecol, 2007, 192(2): 193–207.
- [27] Lin Y C, Chang L W, Yang K C, et al. Point patterns of tree distribution determined by habitat heterogeneity and dispersal limitation [J]. Oecologia, 2011, 165(1): 175–184.
- [28] Yuan C M, Meng G T, Fang X J, et al. Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant *Alcimandra cathartii* [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(12): 3866–3872.
袁春明, 孟广涛, 方向京, 等. 珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布 [J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3866–3872.
- [29] He F L, Duncan R P. Density-dependent effects on tree survival in an old-growth *Douglas fir* forest [J]. J Ecol, 2000, 88(4): 676–688.
- [30] Liu G F, Ding Y, Zang R G, et al. Distribution patterns of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* population in Tianshan Mountains [J]. Chin J Appl Ecol, 2011, 22(1): 9–13.
刘贵峰, 丁易, 臧润国, 等. 天山云杉种群分布格局 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 9–13.
- [31] John R, Dalling J W, Harms K E, et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species [J]. Proc Nat Acad Sci USA, 2007, 104(3): 864–869.