元宝山南方红豆杉克隆种群分布格局的分形特征

向悟生 李先琨* 苏宗明 欧祖兰 陆树华

(广西壮族自治区广西植物研究所, 广西桂林 541006)
(中国科学院)

摘要 南方红豆杉 (*Taxus chinensis* var. *mairei*) 是提取抗癌药物紫杉醇的珍贵资源植物。分布于广西元宝山自然保护区的南方红豆杉, 自然状态下以克隆繁殖方式进行种群更新, 研究其种群克隆生长的空间分布格局, 可揭示种群克隆繁殖特性和生态适应机制, 对南方红豆杉这一珍稀濒危物种的保护和管理具有重要意义。利用分形理论中的计盒维数和信息维数, 对元宝山的南方红豆杉克隆种群空间分布格局的分形特征进行了分析, 结果表明, 种群空间分布格局存在分形特征, 其计盒维数介于 0.993 1~1.353 1 之间, 信息维数介于 1.350 8~1.652 1。南方红豆杉克隆种群格局的计盒维数远离最大理论维数值 2, 种群总体对空间的占据能力较弱。克隆构型指数与种群计盒维数密切相关。分析结果显示, 克隆构型趋于“密集型”的种群具有较强的空间占据能力, 而克隆构型趋于“游击型”的种群其空间占据能力较弱。信息维数与种群的集聚强度密切相关, 其差异反映了种群格局强度的变化, 较大的信息维数反映种群个体的集聚强度较高, 而较小的信息维数则反映出种群个体间的集聚强度较弱, 其维数值大小与分株种群数量、分株种群斑块的空间配置密切相关。

关键词 计盒维数 信息维数 克隆构型 集聚强度 元宝山 克隆种群

FRactal Properties of Distribution Patterns of *Taxus chinensis* var. *mairei* Clonal Populations in the Yuanbaoshan Mountain, China

XIANG Wu-Sheng, LI Xian-Kun*, SU Zong-Ming, OU Zu-Lan, and LU Shu-Hua
Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006, China

Abstract *Aims* *Taxus chinensis* var. *mairei* is the material from which taxol, an effective low-toxicity cancer-resistance medicine, is distilled. This species reproduces asexually, especially through sprouting from stems, which enables *Taxus* to expand its spatial occupation and maintain its population. Therefore, study on clonal properties of *Taxus* populations may provide a scientific basis for protecting and regenerating populations. This study addresses the following questions: 1) what are the fractal properties of population distribution patterns, 2) are clonal architecture and fractal properties correlated and 3) are fractal properties and aggregation correlated?

Methods Based on a survey of *Taxus*, we established four 40 m × 15 m plots in its central distribution area in Yuanbaoshan Nature Reserve. For each plot, we determined the spatial coordinates of each *Taxus* individual. For *Taxus* > 3 m tall, we measured height, crown size, height to branches and diameter at breast height; for shorter *Taxus* seedlings and saplings, only height was measured. We also estimated or measured cover and height of shrubs and herbs. Fractal properties of population patterns were analyzed by using the box-counting dimension and the information dimension.

Important findings The box-counting dimension ranged from 0.993 1 to 1.353 1, which was far from the theoretical value 2, indicating low degree of spatial occupation. Significant correlation between the clonal architecture index and the box-counting dimension indicates that degree of spatial occupation was closely related to clonal architecture, i.e., populations tending to have phalanx clonal architecture had a stronger degree of spatial occupation than those tending to have guerrilla clonal architecture. The information dimension varied from 1.350 8 to 1.652 1 with community type. The Pearson correlation between information dimension and pattern index is significant, suggesting that differences of information dimension could reflect variation of the aggregation intensity. Information dimension was closely related to number and spatial distribution patterns of

收稿日期: 2006-07-07 接受日期: 2007-01-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(39960018)和广西科学基金项目(桂科配 0007008)
本所宁世江副研究员、李瑞棠和唐润琴实验师参加野外调查工作, 并得到元宝山自然保护区管理站的大力协助, 特此致谢
* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: lixk@gxib.cn

ramets.

Key words count-box dimension, information dimension, clonal architecture, aggregate intensity, Yuanbaoshan Mountain, clonal populations

南方红豆杉(*Taxus chinensis* var. *mairei*)属于国家一级保护植物(于永福, 1999), 是提取抗癌药物紫杉醇的珍贵资源植物, 在我国自然分布于华东、中南、西南和西北一些省区。近年来, 由于对红豆杉资源的掠夺性开发与利用, 其资源遭受了极其严重的破坏。广西的南方红豆杉主要分布于桂北海拔 680 m 以上的天然林中, 其中, 广西元宝山自然保护区是南方红豆杉集中分布的地区, 由于这里人为干扰少, 种群得到了有效的保护。自然状态下, 元宝山的南方红豆杉种群主要延续扩展途径是无性繁殖, 即活立木或风倒木茎干、枝干萌生分株并逐渐形成不定根伸入土壤, 最终脱离母株“独立”成株, 占据各自的生存空间。林内常见世代重叠的分株与其母体构建独木成林景观, 这种独特的萌生分株繁殖方式与以往文献报道的根茎繁殖和根颈部萌生等均有明显区别(贺金生等, 1998; 刘庆和钟章成, 1996; 朴顺姬等, 1997), 颇似榕树植物, 这在裸子植物中较为少见, 通过这一无性繁殖过程, 南方红豆杉基株可实现空间上的移动。

种群分布格局是种群在水平空间上的配置或分布状况, 是种群的基本特征之一, 研究植物种群的空间格局有助于认识其生态过程以及它们与生境的相互关系(Greig-Smith, 1983)。克隆植物种群分布格局反映了无性系分株在水平空间的结构, 它主要由克隆种群生物学特性、种间关系和环境条件的综合影响所决定(李先琨等, 2003)。应用分形理论中的计盒维数和信息维数研究南方红豆杉种群克隆生长的空间分布格局, 探讨分株种群对空间资源的占据能力和生态适应能力, 可揭示其克隆繁殖特性, 并可作为保护和管理提供依据。

1 研究区概况

研究地位于广西融水县中部的元宝山自然保护区境内(25°22' ~ 25°32' N, 109°07' ~ 109°13' E)的大苗山山脉的主峰之一——元宝山, 山体呈南北走向, 属中山地貌, 平均海拔 1 000 ~ 1 500 m。此山属中亚热带气候, 山地气候特征明显。据元宝山气象站资料, 年平均气温为 16.4 °C, 1 月平均气温为 4 ~ 8 °C, 极端最低温度为 -8 °C, 7 月平均气温为 24 ~ 27 °C, 极端最高温度为 32 °C, ≥ 10 °C 的年活动积温为

5 300 °C, 年降水量可达 2 379 mm, 林内湿度为 90% 以上。该地区土壤主要为花岗岩发育成的山地红壤、山地黄壤和山地黄棕壤(李先琨等, 2003)。

元宝山的南方红豆杉主要分布于中山针阔混交林内, 所处群落的乔木层主要以南方红豆杉、元宝山冷杉(*Abies yuanbaoshanensis*)、南方铁杉(*Tsuga tchekiangensis*)、红皮木姜(*Listea pedunculata*)、包果石栎(*Lithocarpus cleistocarpa*)、大八角(*Illicium majus*)、尾叶山茶(*Camellia caudate*)、山桂花(*Osmanthus marginatus*)、五尖槭(*Acer maximowiczii*)和细柄莢叶五加(*Acanthopanax evodiaefolius* var. *gracilis*)等为优势种, 灌木层以箭竹(*Sinarundinaria nitida*)为主, 草本层以沿阶草(*Ophiopogon bockianus*)为主。群落总盖度为 95% 以上, 内部潮湿, 苔藓发达, 枯立木、枯倒木较多, 附生现象突出。土壤为花岗岩发育成的黄棕壤, 覆盖度较小, 岩石出露较多, 土层质地疏松。

2 研究方法

2.1 取样方法

在全面考察南方红豆杉群落组成、结构和种群历史的基础上, 依据基株的分布状况, 选择有代表性的地段设置调查样地。由于元宝山的南方红豆杉种群多分布在狭长的沟谷两侧, 调查样地沿其集中分布的沟谷侧面布设, 共设置 4 个 40 m × 15 m 的样地进行调查取样。详细记录样地内高度 ≥ 3 m 的乔木种类、每木高度、枝下高、冠幅和胸径, 灌草层分种调查其盖度和高度, 藤本分种调查其多度及攀援高度; 对乔木的幼苗进行详细统计, 并记录其高度和数量。元宝山的南方红豆杉基株比较容易辨别, 基株主要由倒伏的母株及母株茎干上萌生的分株构成, 部分横生结构断裂的基株可通过断裂部分的腐朽物进行判别。在辨别基株的基础上, 详细统计样地中每个基株的萌生分株的高度、基径(或胸径)和数量。以样地一角为原点建立样地平面坐标, 记录样地内所有南方红豆杉克隆分株的坐标值, 输入计算机建立数据库, 用 SPSS 进行相关的统计分析。

样地 1 群落乔木层以南方红豆杉为优势种, 次优势种为红皮木姜, 灌木层以箭竹为主, 其盖度约为 15% ~ 20%, 草本层以沿阶草为主, 盖度为 20% ~ 30%; 样地 2 群落乔木层优势种为南方红豆杉, 次优

势种为细柄莢叶五加,灌木层以箭竹的盖度较大,约为 30% ~ 40%,草本层中沿阶草的盖度较大,为 10% ~ 20%;样地 3 群落乔木层优势种为南方红豆杉、包果石栎、红皮木姜和尾叶山茶,灌木层以箭竹占优势,其盖度达到 50% ~ 60%,部分小样方中其

盖度甚至可达 90% 以上,草本层以沿阶草为主,盖度为 40% ~ 50%;样地 4 群落乔木层优势种为南方铁杉、元宝山冷杉、南方红豆杉和红皮木姜,灌木层以箭竹为主,其盖度约为 15% ~ 25%,草本层以沿阶草占优势,盖度达 70% ~ 80%。

表 1 样地概况
Table 1 The characteristics of the four plots studied

样地 Plot number	海拔 Elevation (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope	乔木层郁闭度 Arbor canopy density (%)	灌木层盖度 Shrub coverage (%)	乔木层优势种 Dominant species of tree layer
样地 1 Plot 1	1 880	E	20°	83	30	南方红豆杉 <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>
样地 2 Plot 2	1 920	E	10°	89	39	南方红豆杉 + 细柄莢叶五加 <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i> + <i>Acanthopanax evodiaefolius</i> var. <i>gracilis</i>
样地 3 Plot 3	1 960	S	20°	84	67	包果石栎 + 南方红豆杉 <i>Lithocarpus cleistocarpa</i> + <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>
样地 4 Plot 4	1 940	E	25°	88	36	南方铁杉 + 南方红豆杉 <i>Tsuga tchekiangensis</i> + <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>

2.2 计算方法

2.2.1 计盒维数

将样方逐次格栅化,得到一系列相同形状的小格子,计数有南方红豆杉个体的非空小格子数。由于元宝山的南方红豆杉种群多分布于狭长的沟谷两侧,设置的固定样地都为长方形,因此样方格栅化后得到的是长方形小格子,取小格子任一边长 ϵ ,对应的非空格子数记为 $N(\epsilon)$,计算种群的计盒维数 D_b :

$$D_b = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon} \tag{1}$$

根据南方红豆杉克隆种群的生物特性,选择格栅化的尺度为样方边长的 2 等分(对应小格子为 20 m × 7.5 m)至 30 等分(对应小格子为 1.33 m × 0.50 m),将 $N(\epsilon)$ 非空格子数与对应的划分尺度(ϵ) 在双对数坐标系中进行直线拟合或分段直线拟合,所得直线斜率的绝对值为计盒维数的估计值(马克明和祖元刚,2000a)。

2.2.2 信息维数

信息维数的计算公式为:

$$D_i = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{K(\epsilon)}{\ln \epsilon} \tag{2}$$

在计数非空小格子数的基础上,进一步统计每个非空格子中拥有的个体数量 N_i 。若样地内的总个体数为 N ,则每个非空格子中的个体分布概率为 $P_i = N_i/N$,信息量为 $I_i = - P_i \ln P_i$,对应网格边长为 ϵ 时的总信息量为 $K(\epsilon) = \sum I_i$ 。将信息量与相应的网格边长 ϵ 在双对数坐标下进行直线拟合(或分段

直线拟合),得到的拟合直线斜率的绝对值即为信息维数估计值(马克明和祖元刚,2000b)。

2.2.3 种群格局集聚强度测定

测定种群分布格局的类型和集聚强度以分析分形特征与克隆种群个体在水平空间分布上的关系。种群分布格局的类型采用方差/均值比率法来判断,在集聚强度分析中,采用不同参数的计算结果进行对比检验,以保证检验结果的可靠性,在此采用负二项参数 k 、格林指数、丛生指标、平均拥挤指数及扩散指数等指标对集聚强度进行度量(Ladvager & Regnolds, 1990;王伯荪等,1995;江洪,1983)。

3 结果与讨论

3.1 计盒维数

3.1.1 不同群落类型中克隆种群的计盒维数

计盒维数是采用网格覆盖方法得到的分形维数,反映了分形体占据面积随尺度变化的规律,因此种群格局计盒维数揭示了种群对生态空间的占据程度和利用生态空间的能力。计盒维数的大小一般介于 0~2 之间,维数介于 1~2 时揭示的是样地中林木以完整个体为单位对水平空间的占据,而维数介于 0~1 之间时反映的是位点对水平空间的占据(马克明和祖元刚,2000a),在种群格局的研究中,我们所要了解的是林木个体的空间分布特征,因此介于 1~2 之间的维数值才是最有意义的。

图 1 是南方红豆杉克隆种群在 4 个样地内个体分布格局点位图,虽然从点位图中可以较直观地看

出克隆种群在 4 个样地内的分布格局,但它只能粗略地估测出克隆种群在样地中的分布特征。从图 2 可见,在所研究的 4 个样地中, $\ln \epsilon - \ln N(\epsilon)$ 曲线图都存在两个较明显的线性区域,表明种群在两个不同尺度范围内存在不同空间自相似性,分别占据不

同大小的生态空间,说明计盒维数可反映南方红豆杉克隆种群的分布格局。

通过分段直线拟合发现,对应尺度较小的线性区域,其拟合直线斜率的绝对值均小于 1,因此不予考虑。对尺度较大的线性区域进行直线拟合,得到

图 1 南方红豆杉克隆种群分布格局点位图

Fig.1 Spatial distribution patterns of four *Taxus chinensis* var. *mairei* clonal populations

图 2 克隆种群空间格局计盒维数的 $\ln \epsilon - \ln N(\epsilon)$ 曲线图

Fig.2 The $\ln \epsilon - \ln N(\epsilon)$ curves of the box-counting dimensions of four *Taxus chinensis* var. *mairei* clonal populations

克隆种群的计盒维数(表 2)。由表 2 可见 4 个样地南方红豆杉克隆种群的计盒维数分别为 1.242 8、1.128 0、0.993 1 和 1.353 1,线性回归的相关系数都在 0.95 以上,相关极显著,表明回归直线的拟合程度很好,克隆种群的空间格局具有明显的分形特征。种群内的每个个体在其生长发育过程中都需要占据一定的空间资源,由于每个个体的发育程度以及在群落空间中占据的位置不同,其实际利用生态空间的能力也有所不同(梁士楚和王伯荪,2002),因此,在不同群落中南方红豆杉克隆种群的计盒维数存在差异。其中,样地 4 的分株种群个体数量较多且在样地中分布面积较广,种群表现出较强的空间占据能力,其格局的计盒维数较大,而样地 2 和 3 的分株种群数量相对较少且呈数个斑块状分布,占据空间的能力较弱,种群格局的计盒维数较小。

理论上,如果南方红豆杉克隆种群占据了全部的生态空间,其计盒维数应为 2,其余下的维数为生

态间隙维。计盒维数通常反映种群现实占据生态空间的能力,生态间隙维反映种群潜在占据生态空间的能力(倪红伟等,2000)。根据表 2 中 4 个样地的南方红豆杉克隆种群的生态间隙维分别为 0.787 2、0.872 0、1.006 9 和 0.516 9,表明南方红豆杉克隆种群尚可拓宽的生态空间维数占其现实生态空间的 47%~100%。其中,样地 3 的南方红豆杉克隆种群尚可拓宽的生态空间维数最大,样地 4 中克隆种群尚可拓宽的生态空间维数较小。由于群落内种间的相互作用及环境因子的影响,种群不可能占据所有生态空间(梁士楚和王伯荪,2002),例如,样地 3 中南方红豆杉克隆种群的生态间隙维很大,但其下层的灌木层,尤其是箭竹的盖度很大,与同处于灌木层的分株种群竞争空间资源,使南方红豆杉克隆种群难以拓宽其生态空间。因此,生态间隙维数值只能反映各样地南方红豆杉克隆种群在群落中潜在的占据生态空间的能力。

表 2 元宝山南方红豆杉克隆种群格局的计盒维数

Table 2 Box-counting dimensions of the distribution patterns of four *Taxus chinensis* var. *mairei* clonal populations in the Yuanbaoshan Mountain

样地 Plot number	回归方程 Regression model	计盒维数 Box-counting dimension	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level
样地 1 Plot 1	$y = -1.2428x + 1.6940$	1.2428	0.9630	$p < 0.01$
样地 2 Plot 2	$y = -1.1280x + 1.5976$	1.1280	0.9617	$p < 0.01$
样地 3 Plot 3	$y = -0.9931x + 1.4541$	0.9931	0.9544	$p < 0.01$
样地 4 Plot 4	$y = -1.3531x + 2.1360$	1.3531	0.9843	$p < 0.01$

3.1.2 克隆构型与计盒维数的相关关系

植物的克隆构型表征克隆分株在空间上的分布格局,被认为是植物在其进化过程中形成的与利用异质性环境能力相关的性状(Luo & Dong,2002)。克隆分株间距离大的克隆构型趋于游击型,而克隆分株间距离小的克隆构型则趋于密集型。具游击型克隆构型的植物能利用散布的资源,而具密集型克隆构型的植物则适于利用集中分布的资源(董鸣,1996)。克隆构型不仅在不同的物种(基因型)间可能不同,而且同一物种(基因型)的克隆构型在不同的环境中也可能不同,从而表现出可塑性(Luo & Dong,2002)。因此,在不同的资源条件下,克隆植物通过克隆构型的可塑性而具有不同的利用资源的能力,从而表现出不同的生态占据能力。通过不同群落中南方红豆杉基株克隆构型指数(李镇清,1999)与种群计盒维数的相关关系,可尝试分析克隆构型变化与种群生态空间占据能力的关系。

从表 3 可知,不同群落类型中南方红豆杉基株的克隆构型存在差异,样地 4 群落中基株克隆构型指数接近 0.5,克隆构型趋向于密集型,而样地 2 和样地 3 样地群落中基株克隆构型指数远离 0.5 而接近 1,基株克隆构型趋向游击型(向悟生和李先琨,2003)。不同样地群落中基株克隆构型指数的大小顺序为样地 4>样地 1>样地 2>样地 3,其变化规律与不同样地群落克隆种群格局计盒维数的变化一致。对计盒维数与克隆构型指数进行 Pearson 相关分析,结果表明两者之间存在显著相关关系,因此可以认为,基株克隆构型变化与种群生态空间占据能力存在密切关系。南方红豆杉的分株种群多处于群落的灌木层,因此,林下灌木层的空间资源状况会直接影响分株种群对资源的利用水平,使其表现出不同的空间占据能力。由表 1 可知,样地 3 中,林下灌木层的盖度很大,其灌木层箭竹的平均盖度可达到 60%左右,部分小样方中甚至可达到 90%以上,分

株种群可利用的空间资源呈分散分布,南方红豆杉基株克隆构型表现出游击型趋向,以利于克隆分株利用这种分散分布的资源,由于分株种群整体对资源的利用水平较低,克隆种群对生态空间的占据能力也较低,样地 1 和样地 4 群落灌木层盖度较小,仅为 20% 左右,克隆分株种群可利用的空间资源相对集中,基株克隆构型趋向密集型,以利于克隆分株利用这种相对集中的空间资源,克隆种群整体表现出较强的空间占据能力。

3.2 信息维数

3.2.1 不同群落类型中克隆种群的信息维数

计盒维数由于只考虑网格覆盖中每个格子中是否有个体存在,但对非空格子中的个体数量未进行统计区分,因而忽略了分形体内部的不均匀性和细微的结构。信息维数是计盒维数的推广,它不但考

虑所取格子是“空”还是“非空”,而且考虑了非空格子所提供的信息量大小,因而可以反映分形内部的不均匀特性。

根据表 4,格子边长对数值 $\ln \epsilon$ 与总信息量 $I(\epsilon)$ 之间的直线拟合的相关系数均在 0.95 以上,线性关系明显,达到极显著的相关水平,表明直线回归的斜率能很好地表征克隆种群空间结构的信息维数。不同群落类型中克隆种群的信息维数的大小次序为样地 3 < 样地 2 < 样地 1 < 样地 4。通常,如果更新幼苗和幼树较多,幼苗和幼树聚集成块,个体分布不均匀,会导致信息维数较高;反之,个体呈散分布,随机性明显,或个体均匀分布,格局强度较低,则信息维数较低(马克明和祖元刚,2000b)。因此,信息维数的差异亦揭示了更新状况的差异。

表 3 不同样地南方红豆杉克隆构型特征(向悟生和李先琨,2003)
Table 3 Clonal architecture characteristics of four *Taxus chinensis* var. *mairei* populations (Xiang & Li, 2003)

样地 Plot	萌生枝强度 ± SE (分枝/基株) Branching intensity ± SE (ramets/genet)	间隔物长度 ± SE Spacer length ± SE (m)	克隆构型指数 Architectural index	克隆构型 Architecture
样地 1 Plot 1	12.70 ± 0.84	0.387 ± 0.085	0.672	趋于密集型 Tending to phalanx
样地 2 Plot 2	6.80 ± 0.41	0.943 ± 0.166	0.823	趋于游击型 Tending to guerrilla
样地 3 Plot 3	5.00 ± 0.70	0.702 ± 0.153	0.840	趋于游击型 Tending to guerrilla
样地 4 Plot 4	6.90 ± 1.04	0.287 ± 0.106	0.593	趋于密集型 Tending to phalanx

表 4 计盒维数与克隆构型指数的 Pearson 相关分析
Table 4 The Pearson correlation between the box-counting dimension and the clonal architecture index

指数 Index	计盒维数 Box-counting dimension		
	Pearson 相关分析 Pearson correlation	样本数 N	显著水平(双尾) Significant level (2-tailed)
克隆构型指数 Clonal architecture index	- 0.952 *	4	0.048

* : 表示在 0.05 水平显著相关 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

3.2.2 信息维数与种群格局集聚强度关系

分析不同样地群落中南方红豆杉克隆种群格局类型和集聚强度可知,不同群落类型中南方红豆杉克隆种群的格局类型均为集群分布,但集聚强度有差异,样地 1 和样地 2 群落中克隆种群个体的集聚强度较大,而样地 3 的集聚强度较小,集聚强度的大小呈样地 3 < 样地 2 < 样地 1 < 样地 4,与种群的信息维数变化规律完全一致,因此,信息维数的变化规律实际上反映了不同样地中种群个体的集聚强度的差异。为了进一步验证信息维数与集聚强度的关系,对不同样地群落中种群格局的信息维数变化和集聚强度的变化进行了 Pearson 相关分析(表 7),结果显示,除用格林指数测定的集聚强度与信息维数

相关不显著外,其余采用负二项参数 k、丛生指标、平均拥挤指数及扩散指数等指标测定的集聚强度均与信息维数存在显著的相关关系,因此认为,信息维数的大小可以反映种群格局集聚强度的变化,较大的信息维数反映种群个体的集聚强度较高,而较小的信息维数则反映出种群个体间的集聚强度较弱。

种群格局的形成,一方面取决于种群自身的生物学特性,另一方面取决于种间相互作用及所处群落环境状况。元宝山的南方红豆杉种群的延续主要以无性繁殖为主,无性繁殖形成的分株种群往往以母株为中心形成聚块;此外,元宝山南方红豆杉种群主要分布在岩石露头较多的沟谷之中,生境条件呈不同尺度和格局的斑块状,生境的异质性作用使分

株种群只能聚集在适于自身生长的微环境中。因此,南方红豆杉克隆种群空间格局集聚强度变化主要取决于分株种群数量和水平空间配置状况的差异。从表 5 和表 6 可知,分株种群数量较多且集聚强度较高的样地 1 和样地 4,其信息维数较大;反

之,则信息维数较小。分析表明,南方红豆杉克隆种群信息维数反映的集聚强度变化实际是对南方红豆杉分株种群斑块及其水平空间配置状况的刻画,因此其维数值大小与分株种群数量及分株种群斑块的水平空间配置状况密切相关。

表 5 元宝山南方红豆杉种群格局的信息维数
Table 5 Information dimensions of the distribution patterns of four *Taxus chinensis* var. *mairei* populations in the Yuanbaoshan Mountain

样地 Plot	分株数 Number of ramets	回归方程 Regression equation	信息维数 Information dimension	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level
样地 1 Plot 1	106	$y = -1.546\ 0x + 2.872\ 1$	1.546 0	0.952 7	$p < 0.01$
样地 2 Plot 2	49	$y = -1.479\ 2x + 2.734\ 6$	1.479 2	0.953 9	$p < 0.01$
样地 3 Plot 3	32	$y = -1.350\ 8x + 2.582\ 8$	1.350 8	0.950 9	$p < 0.01$
样地 4 Plot 4	80	$y = -1.652\ 1x + 3.201\ 3$	1.652 1	0.960 9	$p < 0.01$

表 6 元宝山南方红豆杉克隆种群空间分布格局测定结果(5 m×5 m)
Table 6 Clonal spatial patterns of four *Taxus chinensis* var. *mairei* clonal populations (5 m×5 m) in the Yuanbaoshan Mountain

样地 Plot	格局类型 Type of pattern	负二项参数 k Negative binomial parameter	格林指数 Green 's index	丛生指标 Index of clumping	平均拥挤指数 Index of mean crowding	扩散指数 Index of dispersion
样地 1 Plot 1	集群分布 Clump	0.300 8	0.140 1	12.330 2	14.038 6	6.222 7
样地 2 Plot 2	集群分布 Clump	0.357 7	0.119 4	4.776 2	6.484 6	3.746 3
样地 3 Plot 3	集群分布 Clump	0.756 3	0.057 4	1.377 4	2.419 1	2.320 0
样地 4 Plot 4	集群分布 Clump	0.130 7	0.325 6	15.304 3	17.304 3	8.489 4

表 7 信息维数与集聚强度指数的 Pearson 相关分析
Table 7 The Pearson correlation between information dimension and pattern index

集聚强度指数 Index of aggregate intensity	信息维数 Information dimension	
	Pearson 相关分析 Pearson correlation	显著水平(双尾) Significant level (2-tailed)
负二项参数 Negative binomial parameter	-0.972 *	0.028
格林指数 Green 's index	0.925	0.075
丛生指标 Index of clumping	0.961 *	0.039
平均拥挤指数 Index of mean crowding	0.968 *	0.032
扩散指数 Index of dispersion	0.977 *	0.023

* :表示在 0.05 水平显著相关 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

4 结 论

1)计盒维数和信息维数分别从种群的空间占据能力及种群个体分布的非均匀性的角度来揭示种群分布格局的尺度变化特征,采用计盒维数和信息维数对元宝山南方红豆杉克隆种群水平空间分布格局进行分析,发现其种群空间格局存在分形特征。

2)南方红豆杉克隆种群格局的计盒维数介于 0.993 1~1.353 1 之间,均远离最大理论维数值 2,种群总体对空间的占据能力较弱。

3)计盒维数与克隆构型指数存在显著相关关

系,因此认为,基株克隆构型变化与种群生态空间占据能力密切相关,基株克隆构型趋于密集型的种群具有较强的空间占据能力,而基株构型趋于游击型的种群,其空间占据能力较弱。

4)克隆种群格局的信息维数在 1.350 8~1.652 1 之间,信息维数的大小反映了种群格局强度的变化,较大的信息维数反映种群个体的集聚强度较高,而较小的信息维数则反映出种群个体间的集聚强度较弱。

5)南方红豆杉克隆种群分形维数大小与分株种群数量和分株种群斑块的空间配置密切相关。

参 考 文 献

- Dong M (董鸣) (1996). Clone growth in plants in relation to resource heterogeneity: foraging behavior. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 38, 828 – 835. (in Chinese with English abstract)
- Greig-Smith P (1983). *Quantitative Plant Ecology* 3rd edn. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- He JS (贺金生), Chen WL (陈伟烈), Liu F (刘峰) (1998). Study on the sprouting process of *Fagus engleriana* in Shennongjia Mountains. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 22, 385 – 391. (in Chinese with English abstract)
- Jiang H (江洪) (1983). *Population Ecology of Spruce* (云杉种群生态学). Science Press, Beijing, 41 – 50. (in Chinese)
- Ladvager JA, Regnolds JF (Translated by Li YZ (李育中)) (1990). *Statistical Ecology* (统计生态学). Inner Mongolia University Press, Huhhot, 10 – 24. (in Chinese)
- Li XK (李先琨), Xiang WS (向悟生), Ou ZL (欧祖兰), Su ZM (苏宗明) (2003). Clonal growth spatial pattern and dynamics of the endangered plant *Taxus mairei* population. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), 25, 625 – 632. (in Chinese with English abstract)
- Li ZQ (李镇清) (1999). Architecture of clonal plants and morphological responses to habitat heterogeneity. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 41, 893 – 895. (in Chinese with English abstract)
- Liang SC (梁士楚), Wang BS (王伯荪) (2002). Fractal characteristics of the height structure of *Bruguiera gymnorrhiza* population. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 26, 408 – 412. (in Chinese with English abstract)
- Liu Q (刘庆), Zhong ZC (钟章成) (1996). Clonal growth pattern of *Pleioblastus maculata* clone population. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 7, 240 – 244. (in Chinese with English abstract)
- Luo XG, Dong M (2002). Architectural plasticity in response to soil moisture in the stoloniferous herb, *Duchesnea indica*. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 44, 97 – 100.
- Ma KM (马克明), Zu YG (祖元刚) (2000a). Fractal characteristics of the spatial pattern of *Larix gmelini* population: box-counting dimension. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 20, 104 – 111. (in Chinese with English abstract)
- Ma KM (马克明), Zu YG (祖元刚) (2000b). Fractal properties of the spatial pattern of *Larix gmelini* population: information dimension. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 20, 187 – 192. (in Chinese with English abstract)
- Ni HW (倪红伟), Ma KM (马克明), Zhao FC (赵伏臣) (2000). The fractal character of the distribution pattern of *Deyeuxia angustifolia* population. I. Box-counting dimension. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 20, 229 – 234. (in Chinese with English abstract)
- Piao SJ (朴顺姬), Yang C (杨持), Huang SF (黄绍峰) (1997). Density and growth dynamics of *Leymus chinensis* population. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 21, 60 – 66. (in Chinese with English abstract)
- Wang BS (王伯荪), Li MG (李鸣光), Peng SL (彭少麟) (1995). *Phytopopulology* (植物种群学). Guangdong Higher Education Press, Guangzhou, 8 – 30. (in Chinese)
- Xiang WS (向悟生), Li XK (李先琨) (2003). Architecture of clonal population *Taxus chinensis* var. *mairei* on Yuanbaoshan Mountain. *Journal of Fujian College of Forestry* (福建林学院学报), 23, 240 – 244. (in Chinese with English abstract)
- Yu YF (于永福) (1999). The landmark of wild plant conservation in China. *Plants* (植物杂志), (5), 3 – 11. (in Chinese)