

# 濒危植物桫欏种群格局的分形特征

宋萍<sup>1</sup>, 洪伟<sup>1\*</sup>, 吴承祯<sup>1</sup>, 封磊<sup>2</sup>, 范海兰<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002 2. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 采用分形理论中的计盒维数、信息维数和关联维数对福建省瓜溪桫欏自然保护区内不同地段桫欏种群格局的分形特征进行比较分析。结果表明, 8个地段的桫欏种群在空间占据、格局强度和个体空间相关性等方面存在着不同的尺度变化和分形特征, 种群格局计盒维数值在 0.313 2 ~ 1.118 9之间, 大小次序为  $Q3 > Q6 > Q7 > Q1 > Q2 > Q4 > Q5 > Q8$  信息维数在 0.303 1 ~ 1.078之间, 大小次序为  $Q3 > Q7 > Q6 > Q1 > Q2 > Q5 > Q8 > Q4$  关联维数在 0.745 0 ~ 1.145 3之间, 大小次序为  $Q3 > Q6 > Q8 > Q1 > Q5 > Q7 > Q2 > Q4$  分形维数谱显示, 地段 Q1、Q2、Q3、Q6和 Q7的桫欏种群空间结构特征相似, 地段 Q4、Q5与 Q8的种群相似。

**关键词:** 桫欏; 种群格局; 分形

**中图分类号:** Q948

**文献标识码:** A

桫欏 (*Alsophila spinulosa*) 也称树蕨, 是白垩纪末、第三纪早期冰川的孑遗植物, 世界上最古老的活化石和目前仅存的几种珍稀木本蕨类植物之一<sup>[1]</sup>, 也是研究地质地貌、土壤植被及地球历史变迁的良好材料, 具有很高的保护和科研价值。桫欏科植物最早出现于中生代的早侏罗纪或晚三叠纪, 在中生代中期处于兴盛时期, 分布十分广泛。由于地质变迁和气候变化, 特别是第四纪冰期的影响, 桫欏数量急剧下降, 分布区大幅度缩小并南迁, 形成了如今的泛热带分布格局, 桫欏对生境要求十分严格, 其生长、繁衍要求温和湿润的环境, 目前主要分布在我国华南地区 (18.5°N ~ 30.5°N)、东南亚和日本南部, 多生长于地形地貌复杂、多悬崖峭壁、狭谷深壑、溪流众多的山地林下沟谷、林缘湿地、溪谷两旁的阴湿地等, 海拔在 1 000 m 以下的范围内生长正常<sup>[2]</sup>。由于桫欏的生长和繁殖对环境要求甚高, 尤其是其孢子体萌发形成配子体时, 往往由于缺乏适当的湿润环境而造成繁殖障碍, 加上目前地球上人为频繁的干扰活动, 桫欏已处于濒危状态, 被列为国家二级

保护植物<sup>[3]</sup>。

种群空间分布格局是种群生物学特性、种内种间关系及环境条件综合作用的结果, 是种群基本数量特征之一<sup>[3]</sup>。在种群分布格局的研究方法中, 都具有较大的尺度依赖性, 不同的观测尺度所得的结果可能截然不同<sup>[4]</sup>, 这种尺度依赖性的存在, 增加了种群分布类型判断的复杂性和不确定性, 虽然很多学者先后提出了众多的解决尺度问题的方法, 如 Greig-Smith 区组样方法、植物点位图随机取样法等, 但这些方法仍然存在着各种的不足, 难以完全解决尺度依赖问题。分形模型 (Fractal model) 提供了一个能够直接探讨生态学中涉及尺度、等级等难题的数学途径。分形分析强调了尺度的重要性, 尺度变化的内涵通过分维数的变化反映出来, 是刻画尺度依赖问题的有力工具<sup>[5-7]</sup>。采用分形分析的方法研究种群分布格局可以揭示在不同的观测尺度上种群空间分布的变化规律。种群格局计盒维数 (Box-counting dimension) 是对种群占据面积随尺度变化规律的反映, 揭示出种群占据生态空间的程度和

收稿日期 (Received date): 2008-04-06 改回日期 (Accepted): 2008-10-07.

基金项目 (Foundation item): 福建省自然科学基金资助项目 (B0110026). [ Supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (B0110026). ]

作者简介 (Biography): 宋萍 (1977-) 女, 黑龙江尚志人, 硕士, 讲师, 主要从事环境生物与生态学研究。[ Song Ping (1977-) Female Born in Shanghai Heilongjiang Province M. S., Lecturer mainly engaged environmental biology and ecology ] E-mail: songpinghj@163.com Tel: 13265031058

\*通讯作者 (Author for correspondence): Hong Wei E-mail: fhongwei@126.com

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

利用生态空间的能力<sup>[8]</sup>;而种群格局信息维数(Information dimension)则从独立于尺度的角度,揭示了格局强度的尺度变化以及个体分布的非均匀状况<sup>[9]</sup>;关联维数(Correlation dimension)反映出一个集合中点元素的关联特征<sup>[10]</sup>,在种群格局中则体现为个体空间相关程度的强弱与个体间竞争、以及种群整体对空间的占据程度<sup>[11]</sup>。当前关于桫欏种群生态学的研究极少,因此,本文采用分形分析中的计盒维数、信息维数和关联维数对福建省瓜溪桫欏自然保护区内不同生境下的桫欏种群格局的尺度变化特征进行研究,以期多角度了解桫欏种群数量特征,为桫欏种群濒危机制的探索及合理保护提供理论基础。

1 研究区概况

福建省瓜溪桫欏自然保护区位于福安市西南部,中心位置在 119°31'E 26°58'N 保护区属中亚热带海洋性季风气候。区内山高谷深,溪流纵横,植被茂密,年平均气温 19.2 ~ 19.8℃,年平均日照时数 1 905.8 h 年平均相对湿度 84%,无霜期 290 d 年平均降水量 1 350 ~ 2 150 mm。土壤呈地带性分布,高山为典型黄壤,低山为典型红壤和水化红壤,在红壤和黄壤之间有明显的黄红壤过渡地带,土壤肥力较高。植被属中亚热带照叶林植被带,闽中、闽东戴云山—鹭峰山北部常绿楮类照叶林小区。植物资源丰富,类型多样。保护区内桫欏种群多与毛竹(Phyllostachys edulis)、大叶紫珠(Calliarpia macrophylla)、芭蕉(Musa basjo)或杉木(Cunninghamia lanceolata)混生,林下植物主要有拟赤杨(Alniphyllum fortunei)、三桠苦(Evodia lepta)、楮头红(Sar-

copyramis nepalensis)、庐山楼梯草(Elatostema stewardii)、杜茎山(Maesa japonica)、细枝柃(Eurya loquai-ana)、高粱泡(Rubus lambertianus)、紫麻(Oreocnide frutescens)、中华里白(Hieracopteris chinensis)、铁线蕨(Adiantum capillusveneris)、海金沙(Lygodium japonicum)、肾蕨(Nephrolepis auriculata)、蕨(Pteridium aquilinum)、芒萁(Dicranopteris dichotoma)等。详细请见参考文献<sup>[1]</sup>。

2 研究方法

2.1 野外调查方法

全面勘察的基础上,在竹林山、龙竹栏、红妹竹林、白水瀑边、蝙蝠洞、桫欏林、桫欏苗地、大竹栏 8 个桫欏分布的代表地段,根据桫欏分布情况,以 10 m×10 m 为单位样方,分别设置面积为 600 m<sup>2</sup>、700 m<sup>2</sup>、600 m<sup>2</sup>、500 m<sup>2</sup>、500 m<sup>2</sup>、600 m<sup>2</sup>、500 m<sup>2</sup>、300 m<sup>2</sup> 的样地,记录样地中各样方的相对位置,其中连续分布的样地面积分别为 10 m×60 m、20 m×20 m、20 m×20 m、10 m×30 m、10 m×30 m、20 m×20 m、10 m×30 m、10 m×20 m 将每样方再划分为 5 m×5 m 的小格子进行植株调查。对样地内的桫欏个体,调查株高、地径、冠幅、冠高、茎干高度、最大叶片的长度以及茎干高大于 1.3 m 的个体的胸径,并以样方的两条边为坐标轴,测定桫欏个体在样方中的坐标位置(x、y);对样地内乔木层树种,调查树高、胸径(树高>1.3 m)、枝下高和冠幅;在每个 10 m×10 m 的样方内随机设置 4 m×4 m 的样方 1 个和 2 m×2 m 的样方 2 个,分别调查灌木层植物的种名、树高,草本层植物的种名、株数或盖度;同时观测各地段环境概况(表 1)。

表 1 不同地段的群落环境概况  
Table 1 Environmental survey of community in different sites

地段 Site	地点 Location	个体数量 Individual number	海拔 Elevation (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope	郁闭度 Canopy density	林型 Forest type
Q1	竹林山 <sup>1)</sup>	74	370	WN	32	0.40	杉木+毛竹+芭蕉 <sup>9)</sup>
Q2	龙竹栏 <sup>2)</sup>	136	370	W	28	0.45	杉木 <sup>10)</sup>
Q3	红妹竹林 <sup>3)</sup>	133	380	WN	32	0.60	毛竹 <sup>11)</sup>
Q4	白水瀑边 <sup>4)</sup>	29	385	N	36	0.40	毛竹+大叶紫珠 <sup>12)</sup>
Q5	蝙蝠洞 <sup>5)</sup>	19	405	WN	31	0.40	毛竹 <sup>13)</sup>
Q6	桫欏林 <sup>6)</sup>	56	395	W	35	0.50	大叶紫珠+芭蕉+毛竹 <sup>14)</sup>
Q7	桫欏苗地 <sup>7)</sup>	86	340	S	38	0.25	杉木 <sup>15)</sup>
Q8	大竹林 <sup>8)</sup>	7	330	N	25	0.50	毛竹+杉木 <sup>16)</sup>

注: 1) Zhulinshan 2) Longzhulan 3) Hongmeizhulin 4) Baishuipubian 5) Bianfudong 6) Suoluolin 7) Suolumiaodi 8) Dazhulin 9) C. lanceolata+P. edulis+M. basjo 10) C. lanceolata 11) P. edulis 12) P. edulis+C. macrophylla 13) P. edulis 14) C. macrophylla+M. basjo+P. edulis 15) C. lanceolata 16) P. edulis+C. lanceolata

## 2.2 种群格局分形维数的计算方法

### 2.2.1 计盒维数

用格子边长为  $\epsilon$  的网格覆盖种群分布格局的点位图, 若  $N(\epsilon)$  为对应于划分尺度 ( $\epsilon$ ) 的非空格子数, 则计盒维数的  $D_b$  的计算公式为<sup>[8-12]</sup>

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

因此, 计盒维数表征的是相同形状的小集合覆盖一个集合的概率<sup>[13]</sup>。本研究根据样地边长, 将样方边长由 2 等分划分到 20 等分, 划分 19 次。将格子边长与非空格子数双对数图中的线性部分进行直线拟合, 直线斜率的绝对值即为计盒维数  $D_b$ 。

### 2.2.2 信息维数

在对种群分布格局的各样地的点位图由 2 等分划分到 20 等分, 进行网格覆盖过程中, 进一步统计每个非空格子中拥有的个体数量 ( $N_i$ )。设样地内总的个体数为  $N$ , 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  $I_i = -P_i \ln P_i$  那么格子边长为  $\epsilon$  时的总信息量为  $I(\epsilon) = \sum I_i$  将  $I(\epsilon)$  与相应的格子边长  $\epsilon$  的对数值进行直线回归, 得到的拟合直线斜率的绝对值即为信息维数估计。信息维数的计算公式为<sup>[9-12]</sup>

$$D_i = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{I(\epsilon)}{\ln \epsilon} \quad (2)$$

### 2.2.3 关联维数

依据关联维数的计算公式

$$D_c = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\lg(C(\epsilon))}{\lg(\epsilon)} \quad (3)$$

首先将样地内每一个体与所有其他个体间的欧氏距离一一计算出来; 然后给定一个距离值, 查找小于该距离的欧氏距离个数 ( $N_i$ ); 变换距离值, 可以得到一系列  $N_i$ ; 通过每一距离个数与距离总个数 ( $N$ ) 的比值得到。将与对应的距离值在双对数坐标下进行 (分段) 直线拟合, 所得拟合直线的斜率的绝对值为其关联维数<sup>[10]</sup>。根据研究实际 (样地大小), 本研究对 8 个样地分别确定最大距离值为 62 m、30 m、30 m、32 m、32 m、30 m、25 m、32 m 变换步长为 0.2 m

## 3 结果与分析

### 3.1 种群格局计盒维数

桫欏种群在不同地段样地内个体分布格局点位图 (图 1), 不仅可以显示出桫欏种群个体在各地段

样地的水平配置状况, 而且可以反映不同地段的桫欏种群在水平分布格局方面的差异。虽然格局点位图直观明了, 但其只能粗略地估测出在特定尺度下种群全部个体基径面积与样方总面积的比例<sup>[14]</sup>, 以此来评价种群占据生态空间的能力。而以此图为基础, 通过网格覆盖, 则可以进一步计算出种群格局计盒维数, 从而达到定量描述桫欏种群对生态空间的占据能力, 综合反映种群在群落中的适应力和竞争力。对不同地段桫欏种群格局计盒维数的测定表明, 各样地的格子边长与非空格子数双对数值直线拟合结果相关系数均达到显著水平 (表 2)。8 个地段种群格局计盒维数值在 0.313 2 ~ 1.118 9 之间, 均低于 1.5 远离 2 因此整体上桫欏种群占据生态空间的能力较低; 同时, 桫欏种群在不同的地段群落中空间占据情况并不稳定, 各地段种群间变化较为强烈, 其大小次序是  $Q3 > Q6 > Q7 > Q1 > Q2 > Q4 > Q5 > Q8$ 。计盒维数越高, 种群占据生态空间的能力越强, 种群在群落中的适应力、竞争力也越强。地段 Q1、Q2、Q3、Q6 和 Q7 的桫欏种群较其他地段的种群具有相对较大的计盒维数值, 说明这些地段的桫欏种群在群落中占据着相对较大的生态空间, 这些地段的群落环境更适于桫欏种群生存。这些地段内的桫欏种群个体密度较大 (见图 1, 表 2), 并且幼苗数量多, 幼苗多几株拥挤在一起生长, 导致这些地段内的种群呈集群分布, 这种格局在某程度上又反过来有助于形成利于桫欏幼苗生长的小环境, 同时增强抵抗其他植物侵入的能力, 增加其在群落中的竞争力, 形成良性循环, 向有利于种群对营养空间大量占据并不断巩固的方向发展。地段 Q4、Q5 和 Q6 的桫欏种群密度都很低 (见图 1, 表 2), 种群分布格局呈随机型 (见表 2), 个体分布分散, 种群格局计盒维数都很小, 说明这些地段内的桫欏种群在群落中占据生态空间的能力较微弱, 种群生活力、扩展能力不高, 在群落中的作用不大。可见, 计盒维数在揭示不同地段群落中桫欏种群格局尺度变化特征差异的同时, 还反映出该种群在不同群落中的地位和作用的差异, 具有明显的生态意义。为进一步探讨桫欏种群密度与计盒维数的相关性, 以种群个体数量对计盒维数作相关性分析, 结果发现桫欏种群个体数量与不同地段种群格局计盒维数之间存在着明显的正相关关系, 即种群个体数量越多, 种群格局计盒维数也越高, 两者的相关模型为  $y = 0.0108x + 0.3154$  相关系数  $r$  为 0.887 2 达极

显著水平。

理论上,如果桫欏种群占据了全部的生态空间,其分布格局的计盒维数为 2 计盒维数为生态占据维,余下的维数为生态间隙维,生态间隙维反映的是种群潜在占据生态空间的能力<sup>[13]</sup>。因此,可以认为,地段 Q1、Q2、Q3、Q6 和 Q7 内的桫欏种群格局计盒维数较高,相应的生态间隙维则较低,而地段 Q4、Q5 和 Q8 内的桫欏种群则具有相对较高的生态间隙维,表明地段 Q4、Q5 和 Q8 内的桫欏种群潜在占据空间的能力较高,群落还可以提供给种群的最大空间限度较大,但实际上由于受群落中种群间的竞争及生态环境条件的限制,其潜在空间占据能力可能难以表现出来<sup>[13]</sup>。

3.2 种群格局信息维数

信息维数表征了不同尺度上系统结构复杂性之间的联系和规律性,揭示了系统结构复杂性的尺度变化程度。它是计盒维数的推广,其不但考虑所取格子是“空”还是“非空”,而且考虑了不同的非空格子所提供的信息量大小,从而反映种群空间分布的非均匀性程度<sup>[15]</sup>。高的信息维数(接近 2)表明种群格局强度尺度变化强烈,个体分布不均匀,随着观测尺度的改变,种群格局分布类型会出现明显的变化<sup>[9]</sup>。不同地段桫欏种群格局信息维数的测定表明,各地段样地格子边长对数值与总信息量之间的

线性关系明显,直线拟合效果均达到了显著水平(见表 2)。8 个地段群落中桫欏种群格局信息维数在 0.303 1 ~ 1.078 间,均远离 2 因此整体上种群格局强度的尺度变化很弱;同时,各地段种群信息维数值差异显著,表明桫欏种群格局强度的尺度变化及个体分布的均匀性程度在不同地段群落中存在较大差异,信息维数的大小次序为  $Q3 > Q7 > Q6 > Q1 > Q2 > Q5 > Q8 > Q4$  这一变化实际上也反映了不同地段中桫欏种群个体的集聚强度的差异,同时也可能与立地条件、年龄,特别是更新状况有关<sup>[15]</sup>。通常,如果种群内更新幼苗、幼树较多,个体聚集成块,个体分布不均匀,会导致信息维数较高;反之个体星散分布,随机性明显,格局强度较低,则信息维数较低<sup>[9]</sup>。另外,由于种群个体竞争的存在,聚集分布多发生在幼苗、幼树或幼树与成熟个体之间,而成熟个体之间很少聚集<sup>[9]</sup>,因此上述信息维数的高低次序,同时揭示了不同地段群落中桫欏种群幼苗、幼树的比例差异。据测定,地段 Q1、Q2、Q3、Q6 和 Q7 内桫欏种群分布格局为集群型,种群个体聚集性较强,聚集强度的大小次序为  $Q2 > Q7 > Q1 > Q6 > Q3$  地段 Q4、Q5 和 Q8 内的种群呈随机型,种群个体零星分布于各群落中<sup>[16]</sup>。此外,地段 Q1、Q2、Q3、Q6 和 Q7 内的桫欏种群幼苗数量多,幼苗多几株拥挤在一起生长,更新状况良好;而

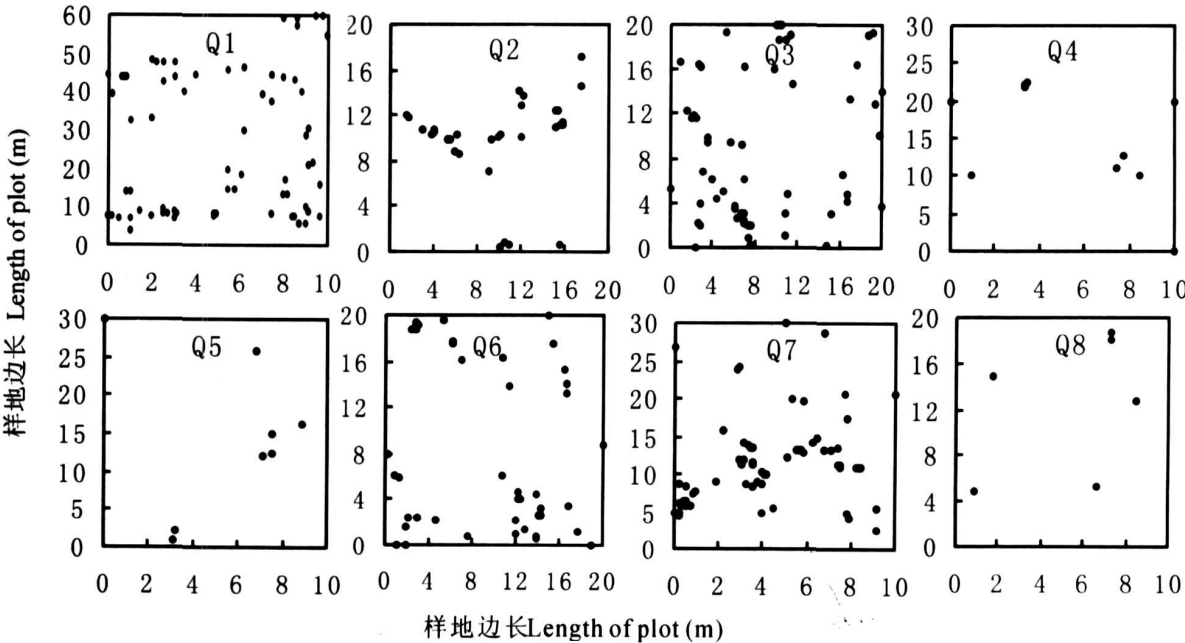


图 1 不同地段桫欏种群个体分布点位图

Fig. 1 Individual distribution of *A. spinulosa* populations in different sites

地段 Q4、Q5 和 Q8 内的种群以大型植株为主, 桫欏幼苗、幼株数量少, 更新能力较差<sup>[16]</sup>。可见, 桫欏种群格局信息维数的高低与其幼苗个体的数量、个体的集聚强度等密切相关, 幼苗数量相对较多、个体集聚性强的地段 Q1、Q2、Q3、Q6 和 Q7 内的桫欏种群信息维数相对较高, 而幼苗数量少、个体分布随机性明显的地段 Q4、Q5 和 Q8 的桫欏种群信息维数则很低。

由表 2 也可发现, 桫欏种群分布格局信息维数的大小与计盒维数的大小具有大体相一致的规律。表明桫欏种群占据空间能力的大小与其种群微观结构的复杂程度具有相关性, 即种群占据空间的能力越强, 种群微观结构越复杂, 个体分布非均匀性越大, 格局强度尺度变化越强烈, 反之亦然。

3.3 种群格局关联维数

在森林群落中, 种群格局的空间关联特征是种群个体对环境资源进行竞争和分配的结果, 不同性质的环境资源具有不同的表现尺度, 从而导致种群格局在不同尺度上空间关联程度的差异<sup>[17]</sup>。种群

关联维数揭示出种群个体空间相关程度, 关联维数大, 表明种群个体的空间相关程度较高, 个体间的竞争强, 种群整体对空间的占据程度较高。反之, 关联维数小, 种群个体空间相关程度低, 个体间的竞争较弱, 种群对空间的占据能力较低。8 个地段桫欏种群关联维数计算过程中的直线拟合相关系数均达到极显著水平 (见表 2), 各地段种群的关联维数在 0.745 0 ~ 1.145 3 间, 远离 2 说明整体上桫欏种群个体空间相关较弱, 个体间的竞争不激烈; 同时, 各地段种群关联维数值差异不显著, 说明桫欏种群在不同地段群落中个体空间相关程度比较相似。不同地段中桫欏种群关联维数的大小次序为 Q3 > Q6 > Q8 > Q1 > Q5 > Q7 > Q2 > Q4 其中, Q3 中的关联维数最大, 说明此地段中的桫欏种群个体的空间相关程度相对最高, 个体间竞争相对最强烈, 个体占据空间的能力最大; Q4 中的关联维数最小, 说明此地段中的桫欏种群个体的空间相关程度很低, 个体零星分布于群落中, 个体间竞争微弱; 其余各地段种群的个体空间相关性介于这两者之间。

表 2 不同地段桫欏种群格局分形维数  
Table 2 Fractal dimension of pattern of A. spinulosa populations in different sites

地段 Site	个体数 Individual number	计盒维数 Box-counting dimension	相关系数 Correlation coefficient	信息维数 Information dimension	相关系数 Correlation coefficient	关联维数 Correlation dimension	相关系数 Correlation coefficient
Q1	74	0.890 8	-0.958 1**	0.969 4	-0.971 4**	0.871 4	0.980 2**
Q2	36	0.872 0	-0.946 8**	0.863 9	-0.961 7**	0.790 0	0.976 5**
Q3	62	1.118 9	-0.941 1**	1.078 0	-0.949 2**	1.145 3	0.993 0**
Q4	11	0.351 9	-0.809 4**	0.303 1	-0.656 0*	0.745 0	0.964 4**
Q5	8	0.324 2	-0.954 4**	0.365 8	-0.961 2**	0.862 0	0.980 3**
Q6	44	1.029 0	-0.946 0**	1.023 1	-0.960 4**	1.105 9	0.994 8**
Q7	71	0.993 5	-0.955 2**	1.026 7	-0.977 7**	0.834 2	0.958 7**
Q8	6	0.313 2	-0.736 1*	0.322 9	-0.732 6*	1.019 8	0.894 2**

从表 2 可以看出, 各地段种群格局关联维数与计盒维数及信息维数的变化规律并不一致, 计盒维数及信息维数相对较高的种群, 其关联维数不一定高, 如地段 Q2、Q7 的种群, 反之, 计盒维数及信息维数很低的种群, 其关联维数可能很高, 如地段 Q8 的种群, 这是因为关联维数是采用个体距离值的变化来表示种群个体空间分布的相关性及空间占据, 与个体分布的均匀性密切相关, 即受到个体分布格局强度 (即信息维数) 变化的影响, 一般与计盒维数规

律相近, 但又不同于计盒维数, 关联维数受种群密度的影响稍小。地段 Q2、Q7 中的桫欏种群密度相对较高, 但个体分布很不均匀 (见图 1), 由此导致相对较高的计盒维数和信息维数, 较低的关联维数; 而地段 Q8 的种群密度很低, 但个体分布很均匀 (见图 1), 因而具有低的计盒维数和信息维数, 相对较高的关联维数。种群格局的 3 个分形维数是相互联系, 相互影响的。

## 4 结语与讨论

分形模型 (Fractal models) 是建立在分形几何学 (Fractal geometry) 的基础上发展起来的, 其在生态学上的应用主要体现在分维数 (Fractal dimension) 分析方法上, 即通过变换尺度的方式来揭示非规则性的研究对象在形态、功能、信息等方面的自相似特征<sup>[18]</sup>。由于群落内环境因子空间分布的不规则性和复杂性, 环境因子在连续的尺度上存在的变异性, 而且不同性质的环境资源具有不同的表现尺度, 以及种群个体对这种环境条件的适应性及对环境资源的竞争和分配, 导致了种群分布格局在不同尺度上产生了空间的异质性<sup>[12]</sup>。分形理论作为研究空间变异的工具, 成为定量分析这种空间变异的有效方法, 其中的计盒维数、信息维数和关联维数分别从种群空间占据程度、格局强度和个体空间关联的尺度变化的角度, 揭示种群格局的尺度变化特征, 是独立于尺度的描述种群分布格局的有效手段。

本研究同时采用了计盒维数、信息维数和关联维数对 8 个地段不同群落内的桫欏种群格局的分形特征进行了比较分析, 以避免单一群落、单一分形维数分析的片面性。结果表明, 该种群在空间占据、格局强度和个体空间相关性等方面存在不同的尺度变化和分形特征。8 个地段中, 地段 Q3 的桫欏种群空间利用能力最强, 个体分布最不均匀, 种群更新状况最佳, 个体空间关联最强; 地段 Q2、Q7 的桫欏种群空间利用能力较强, 个体分布较不均匀, 种群更新状况良好, 但个体空间相关较弱; 地段 Q1、Q6 的桫欏种群空间利用能力和个体空间相关性都较强, 种群更新状况良好, 个体空间相关性也较强; 地段 Q8 的桫欏种群空间利用能力最弱, 个体分布比较均匀, 个体空间关联程度较高, 种群更新状况稍差; 地段 Q4、Q5 的桫欏种群空间利用能力、个体空间关联程度都很低, 个体分布比较均匀, 种群更新能力很弱。整体上, 桫欏种群的计盒维数、信息维数和关联维数值都很低, 远离 2 表明其种群的空间占据程度低, 格局强度的尺度变化较弱, 个体分布比较均匀, 个体空间相关性不高。8 个地段群落中桫欏种群格局计盒维数值在 0.313 2 ~ 1.118 9 间, 大小次序为 Q3 > Q6 > Q7 > Q1 > Q2 > Q4 > Q5 > Q8 信息维数在 0.303 1 ~ 1.078 0 之间, 大小次序为 Q3 > Q7 > Q6 > Q1 > Q2 > Q5 > Q8 > Q4 关联维

数在 0.745 0 ~ 1.145 3 之间, 大小次序为 Q3 > Q6 > Q8 > Q1 > Q5 > Q7 > Q2 > Q4。

为完整解释不同地段群落中桫欏种群的空间整体分形特征, 根据表 5 绘制了 8 个地段的种群分形维数谱 (图 2)。可以看出, 地段 Q1、Q2、Q3、Q6 和 Q7 的种群分形维数谱曲折度相似, 而地段 Q4、Q5 和 Q8 的种群相似。分形维数谱将不同地段中桫欏种群的空间结构特征明确区分开来。

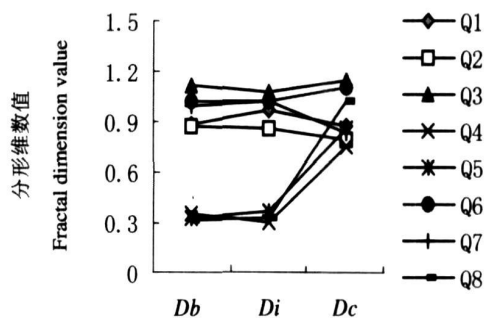


图 2 各地段桫欏种群格局分形维数的比较

Fig 2 Comparison of fractal dimension of *A. spinulosa* populations in different sites

一般在自然情况下, 一个物种水平分布的维数总是小于或等于 2 但在实际的分维计算中, 有时会出现分维数小于 1 的情况, 对此解释一般是特征尺度若超出个体水平分布格局的分形特征范围, 会导致分形分析在此尺度上的不适用。但在本研究中, 由于受限于桫欏种群个体的分布状况, 有的地段是以带状形式取样的, 以带状分布的物种分析时就可能被认为是呈线性分布, 并且对于濒危物种, 样方中的个体数量很少, 这样计算得到的分形维数就有可能为 0 或 1<sup>[18]</sup>。邓红兵等<sup>[19]</sup>在对三峡库区次生柏木林中物种分布格局的分形特征的研究、张文辉等<sup>[14]</sup>对裂叶沙参参与泡沙参种群分布格局分形特征的分析、潘文斌等<sup>[20]</sup>对保安湖莲群丛分布格局分形特征的初步研究中等, 均出现了种群格局分形维数小于 1 的情况。

3 种分形维数相互补充, 为深入理解种群格局提供了丰富的信息。尤其对于濒危植物的研究, 其个体数量小, 设定同样尺度样地困难, 更不能随机设点, 很难应用传统的研究植物种群分布格局方法研究濒危植物的分布格局<sup>[14]</sup>。因此, 综合运用各种分形方法分析濒危植物桫欏种群在不同环境中的空间格局特征, 更深入地揭示了桫欏种群濒危的某些内

在生物学缺陷或不足, 弥补了传统的研究植物种群分布格局方法中的某些不足。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Huang Lingrong Huang Feng Gai Xingmin An eco-environmental analysis of the Guaxi spinubee tree reserve of Fuan [ J ]. Fore Prospect Design (Fujian), 2002 (1): 47 ~ 49 [ 黄铃荣, 黄锋, 盖新敏. 福安瓜溪桫欏保护区生态环境分析 [ J ]. 林业勘察设计 (福建), 2002 (1): 47 ~ 49]
- [ 2 ] Fu Ligu China Plant Red Data Book: Rare and Endangered Plants I [ M ]. Beijing: Science Press, 1992 [ 傅立国. 中国植物红皮书: 珍稀濒危植物, 第一册 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1992]
- [ 3 ] Hong Wei Liu Jiang Wu Chengzhen A study on structure and spatial distribution paterm of Castanopsis hystrix population [ J ]. Scientia Silvae Sinica, 2001, 37(S1): 6 ~ 10 [ 洪伟, 柳江, 吴承祯. 红锥种群结构和空间分布格局的研究 [ J ]. 林业科学, 2001 37(S1): 6 ~ 10]
- [ 4 ] Diaz S Mercader G Alvarez-Cardenas S Structure and population dynamics of Pinus lagunae M. - F. Passini [ J ]. Forest Ecology and Management, 2000, 134: 249 ~ 256
- [ 5 ] Harte J Kinzig A Green J Self-similarity in the distribution and abundance of species [ J ]. Science, 1999, 284(9): 334 ~ 336
- [ 6 ] Wu Chengzhen Hong Wei Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [ J ]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162 ~ 167 [ 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究 [ J ]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162 ~ 167]
- [ 7 ] Feng Lei Hong Wei Wu Chengzhen et al Fractal Features of crown breadth of different trees in different managements of Chinese Fir plantation [ J ]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2003, 9(5): 455 ~ 459 [ 封磊, 洪伟, 吴承祯, 等. 杉木人工林不同经营模式树冠的分形特征 [ J ]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(5): 455 ~ 459]
- [ 8 ] Ma Kening Zu Yuangang Fractal properties of the spatial pattern of Larix gmelini population: Box-counting dimension [ J ]. Bulletin of Botanical Research, 2000, 20(1): 104 ~ 111 [ 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征: 计盒维数 [ J ]. 植物研究, 2000, 20(1): 104 ~ 111]
- [ 9 ] Ma Kening Zu Yuangang Fractal properties of the spatial pattern of Larix gmelini population: Information dimension [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 187 ~ 192 [ 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征——信息维数 [ J ]. 生态学报, 2000, 20(2): 187 ~ 192]
- [ 10 ] Ma Kening Zu Yuangang Ni Hongwei Fractal properties of the spatial pattern of Larix gmelini population: correlation dimension [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(3): 353 ~ 358 [ 马克明, 祖元刚, 倪红伟. 兴安落叶松种群格局的分形特征——关联维数 [ J ]. 生态学报, 1999, 19(3): 353 ~ 358]
- [ 11 ] Ni Hongwei Guo Yasheng Wu Haiyi The fractal character of the distribution pattern of Deyeuxia angustifolia population II: Information dimension and correlation dimension [ J ]. Bulletin of Botanical Research, 2000, 20(3): 351 ~ 354 [ 倪红伟, 郭亚胜, 吴海一. 小叶章种群分布格局的分形特征 II: 信息维数与关联维数 [ J ]. 木本植物研究, 2000, 20(3): 351 ~ 354]
- [ 12 ] Liang Shiduo Fractal Characteristics of Distribution Pattern of Carpinus pubescens Population [ J ]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2001, 19(4): 263 ~ 268 [ 梁士楚, 云贵鹅耳枥种群分布格局的分形特征 [ J ]. 武汉植物学研究, 2001, 19(4): 263 ~ 268]
- [ 13 ] Ni Hongwei Ma Kening Zhao Fuchen The fractal character of the distribution pattern of Deyeuxia angustifolia population I: Box-counting dimension [ J ]. Bulletin of Botanical Research, 20(2): 229 ~ 234 [ 倪红伟, 马克明, 赵伏臣. 小叶章种群分布格局的分形特征 I: 计盒维数 [ J ]. 植物研究, 2000, 20(2): 229 ~ 234]
- [ 14 ] Zhang Wenghui Zu Yuangang Ma Kening Analysis on the fractal characteristics of distribution patterns of Adenophora biphylla and A. potaninii [ J ]. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(1): 31 ~ 39 [ 张文辉, 祖元刚, 马克明. 裂叶沙参参与泡沙参种群分布格局分形特征的分析 [ J ]. 植物生态学报, 1999, 23(1): 31 ~ 39]
- [ 15 ] Liang Shiduo Wang Bosun Fractal characteristics of the height structure of Brugiera gymnorhiza population [ J ]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(4): 408 ~ 412 [ 梁士楚, 王伯荪. 红树植物木榄种群高度结构的分形特征 [ J ]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 408 ~ 412]
- [ 16 ] Song Ping Hong Wei Wu Chengzhen et al Population structure and its dynamics of rare and endangered plant Alsophila spinulosa [ J ]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 413 ~ 418 [ 宋萍, 洪伟, 吴承祯, 等. 珍稀濒危植物桫欏种群结构与动态研究 [ J ]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 413 ~ 418]
- [ 17 ] Turner M G Landscape ecology: the effect of pattern on process [ J ]. Ann Rev Ecol Sys, 1989, 20: 171 ~ 197
- [ 18 ] Chang Xueli Wu Jianguo Fractal models and their ecological applications [ J ]. Chinese Journal of Ecology, 1996, 15(3): 35 ~ 42 [ 常学礼, 郭建国. 分形模型在生态学研究中的应用 [ J ]. 生态学杂志, 1996, 15(3): 35 ~ 42]
- [ 19 ] Deng Hongbing Zhou Yongbin Wang Qingli et al Fractal characteristics of distribution pattern of plant species in secondary Cupressus funebris forest in the Three Gorges region [ J ]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 518 ~ 520 [ 邓红兵, 周永斌, 王庆礼, 等. 三峡库区次生柏木林中物种分布格局的分形特征 [ J ]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 518 ~ 520]
- [ 20 ] Pan Wubin Cai Qinghua Preliminary studies on fractal character of horizontal pattern of Ass. Nelumbonucifera in Baan Lake [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, 24(5): 405 ~ 411 [ 潘文斌, 蔡庆华. 保安湖莲丛分布格局分形特征的初步研究 [ J ]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 405 ~ 411]

# Fractal Characteristics of Pattern of Endangered Plant *Alsophila spinulosa* Population

SONG Ping<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>, WU Chengzhen<sup>1</sup>, FENG Lei<sup>2</sup>, FAN Hailan<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

2. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract** The fractal characteristics of pattern of *Alsophila spinulosa* population in different sites in Guaxi *Alsophila spinulosa* Nature Reserve of Fujian Province was analyzed by applying box-counting dimension, information dimension and correlation dimension in fractal theory. The results indicated that *Alsophila spinulosa* populations in 8 sites showed different scale variation and fractal trait on spatial occupation, pattern intensity and spatial correlation of individuals. The box-counting dimension ranged from 0.313 2 to 1.118 9 and the order of that was  $Q3 > Q6 > Q7 > Q1 > Q2 > Q4 > Q5 > Q8$ , information dimension from 0.303 1 to 1.078 and the order of that  $Q3 > Q7 > Q6 > Q1 > Q2 > Q5 > Q8 > Q4$  and the correlation dimension from 0.745 0 to 1.145 3 and the order of that  $Q3 > Q6 > Q8 > Q1 > Q5 > Q7 > Q2 > Q4$ . The spectrum of fractal dimension showed that spatial structure characteristics of those populations in sites Q1, Q2, Q3, Q6 and Q7 were similar, the same to those in sites Q4, Q5 and Q8.

**Key words** *Alsophila spinulosa*, population pattern, fractal

## 封面照片说明: 纳帕海龟背山

纳帕海位于云南省西北部迪庆州香格里拉县城北面,距县城 8 km,属高原季节性湖泊、沼泽草甸,地理位置  $27^{\circ}49' \sim 27^{\circ}55'N$ ,  $99^{\circ}37' \sim 99^{\circ}43'E$ ,海拔 3 266 m,面积 3 125  $hm^2$ 。作为黑颈鹤 (*Grus nigricollis*)和斑头雁 (*Anser indicus*)等候鸟的越冬栖息地,纳帕海高原湿地同时承载着当地牧民的生产生活。藏民族敬畏和爱护飞禽的传统文化,形成并维系着湿地内人与候鸟和谐共处的关系。照片中纳帕海东北角的龟背山,在夏末秋初的积水湖面上,犹如漫游于水天之间的神龟;在冬春季节则与越冬候鸟、牛羊牧群,共同构成“天、地、人”合而为一的壮美景象,体现出自然生态系统和民族传统文化的完美结合。

(杨文忠)