

353-358

第19卷第3期
1999年5月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 3
May, 1999

兴安落叶松种群格局的分形特征*

——关联维数

马克明¹ 祖元刚² 倪红伟³

5791.220.2

¹中国科学院生态环境研究中心 北京 100085²东北林业大学(国家教委)森林植物生态学开放研究实验室 哈尔滨 150040³黑龙江省科学院自然资源研究所 哈尔滨 150040

摘要 种群格局关联维数揭示出个体空间关联的尺度变化规律,表明种群个体的空间相关程度,采用关联维数对大兴安岭兴安落叶松种群格局的研究表明,各类兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局具有较高的关联维数(接近2),个体空间关联程度较高,其次序为杜鹃-兴安落叶松林(1.746)>草类-兴安落叶松林(1.740)>越橘-兴安落叶松林(1.350)>杜香-兴安落叶松林(1.468),兴安落叶松-白桦林中兴安落叶松种群格局的关联维数较小(<1.512,远离2),个体间关联较弱,处于劣势伴生地位。通过将各天然森林类型与兴安落叶松人工林比较显示,个体空间相关程度由高至低的次序为兴安落叶松人工林(1.762)>兴安落叶松天然林(1.626)>兴安落叶松-白桦林(1.434),揭示出兴安落叶松种群在不同森林类型中个体空间关联的尺度变化的差异。文中还对综合运用各种分形维数揭示种群格局尺度变化特征的问题进行了讨论。

关键词 兴安落叶松,种群格局,关联维数,空间相关,尺度变化,分形特征

FRACTAL PROPERTIES OF THE SPATIAL PATTERN OF *Larix gmelini* POPULATION; CORRELATION DIMENSION

MA Ke-Ming

(Research Center for Eco-Environmental Science, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China)

ZU Yuan-Gang

(Open Research Laboratory of Forest Plant Ecology, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China)

NI Hong-Wei

(Institute of Natural Resources, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

Abstract Correlation dimension of population pattern can disclose the scaling properties of spatial autocorrelation of individuals and the spatial occupation degree of population. The spatial patterns of *Larix gmelini* populations in Daxingan Mountains were studied. The results showed that correlation dimensions of *Larix gmelini* populations were high in different *Larix* forests (near 2), spatial autocorrelation among individuals was high, and competition among individuals was serious. The order of correlation dimensions is that: *Rhododendron-Larix* forest (1.746) > *Grass-Larix* forest (1.740) > *Vaccinium-Larix* forest

* 国家自然科学基金资助项目(39470129)

收稿日期:1997-12-29,修改稿收到日期:1998-10-05.

(1.550) > *Ledum-Larix* forest (1.468). Correlation dimensions of *Larix gmelini* populations were low in *Larix-Betula* forest (<1.512, far from 2), competition among individuals was weak, the population was in an accompaniment position. Through comparison of correlation dimension among natural *Larix* forests and *Larix* plantation, the order of spatial autocorrelation degree is *Larix* plantation (1.762) > natural *Larix* forest (1.626) > *Larix-Betula* forest (1.434). It shows the differences of scaling property of spatial autocorrelation among individuals of *Larix* population in different forest types. Discussion was made on how to integrate the 3 fractal dimension methods in one study in order to describe the scale variation properties of population pattern more clearly.

Key words *Larix gmelini*, population pattern, correlation dimension, spatial autocorrelation, scale.

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^[1].同时生活于其中的其它生物对不同环境资源的感知尺度也不相同,比如不同体长(body size)的动物利用着不同尺度上的资源,出现资源利用分异^[2],所以种群格局空间关联程度的变化将制约这些生物的数量和生存.可见,对种群个体空间关联尺度变化的研究,将有助于对上述各种关系的深入理解.本文应用分形几何中的关联维数(correlation dimension)刻画兴安落叶松种群格局个体空间关联的尺度变化特征.研究地点概况和取样方法请参见文献^[3].

1 研究方法

1.1 计算方法

依据关联维数的计算公式

$$D_c = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log(C(\epsilon))}{\log(\epsilon)} \quad (1)$$

首先将样方内每一个体与所有其它个体间的欧氏距离——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_ϵ);变换距离值,可以得到一系列 N_ϵ ;通过每一距离值对应的距离个数与距离总个数(N)的比值得到 $C(\epsilon)$.将 $C(\epsilon)$ 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.根据(样方大小为 $20 \times 20 \text{ m}^2$)研究实际,本文确定距离值为0m 到30m,变换步长为0.2m.

相关函数 $C(\epsilon)$ 刻画了随 ϵ 的增加,“点对”数(小于 ϵ 的距离数)是如何增长的分布函数. ϵ 取得太大时,所有点对数均包含在 $C(\epsilon)$ 内,反映不出系统的内部性质;反之 ϵ 取得太小时,系统中一切偶然噪声都会表现出来.只有在一段适当的 ϵ 的取值内, $C(\epsilon)$ 与 ϵ 才会表现出 $C(\epsilon) \propto \epsilon^{D_c}$ 的关系,此时 D_c 值是关联维数的一个很好逼近^[4],它在统计意义上揭示出一个分形集内部各元素之间的空间关联程度.

1.2 种群格局关联维数的生态意义

选择兴安落叶松人工林为例进一步明确种群格局关联维数的生态意义,因为个体均匀分布的人工林更有助于揭示种群格局关联维数本身的特性和作用.对于人工林点位图(图1),分别在两个尺度范围内得到了不同的关联维数(图2),这种幂律关系就是种群格局的统计自相似性(statistical selfsimilarity),直线的斜率就是关联维数^[4].可见种群格局关联维数是种群个体空间关联随尺度变化规律的反映,揭示出种群个体空间相关程度.

计算种群格局关联维数的过程中,如果只存在一个有意义的线性无标度区间,表明种群个体空间分布

1) 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征: 信息维数. 生态学报(待发表).

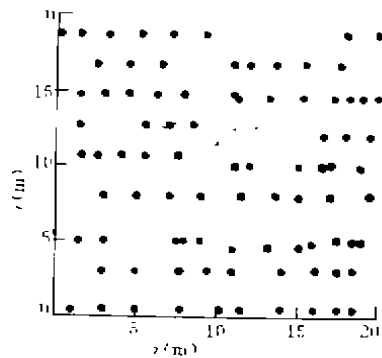


图1 兴安落叶松人工林种群个体分布点位图

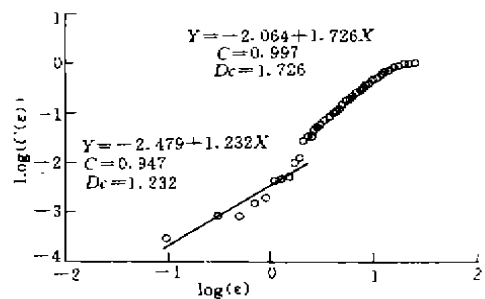
Fig. 1 Individual distribution of *Larix gmelini* plantation

图2 兴安落叶松人工林种群格局的关联维数

Fig. 2 Correlation dimension of *Larix gmelini* plantation

都遵从相同的规律,即每一个体周围随相关距离 ϵ 的增加,个体数的增长规律均相同,统计意义上种群个体分布是非聚集的,但是图2被拟合为两条直线,得到了两个关联维数,拐点的出现具有生态意义。两个尺度域存在不同的关联维数表明种群格局在这两个尺度域上的个体空间相关程度不同。拐点尺度前后,个体空间关联程度的剧烈变化反映出种群格局在不同尺度上存在着显著差异,与信息维数和计盒维数类似,它也揭示了种群个体的聚集规模^[1]。

图2显示关联维数为1.726,表明种群个体空间关联的尺度变化程度很高(参见图1)。图2中拐点对应的尺度是2.22m,与样方内的林木平均冠幅(2.4m)相当,表明聚块大小与单株林木相当,是对人工林均匀分布格局的反映。

种群格局关联维数在统计意义上揭示出种群个体空间相关的尺度变化规律,大的关联维数(接近于2),表明种群个体的空间相关程度高,个体间竞争强烈,种群整体对空间的占据程度较高;反之关联维数小,个体空间相关程度低,个体间竞争较弱,种群整体对空间的占据也较弱。

2 结果分析

2.1 兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局的关联维数

杜鹃-兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局关联维数计算结果(表1),关联维数计算中的直线拟合相关系数均在0.99以上, $p < 0.01$,幂律关系极显著。各样地的关联维数在1.664~1.816之间,表明此类型中兴安落叶松种群个体的空间相关尺度变化程度接近。唯样方a分为两个线性区域,小尺度个体相关较强而大尺度个体相关较弱,表明种群个体在小尺度上存在聚集,小尺度区的关联维数揭示了个体空间相关的主要特征。关联维数平均值在1.746,表明此类型中兴安落叶松种群个体空间相关程度较高(接近于2),对水平空间的占据较高。且样方b和c的起始相关距离均小于相应的平均冠幅,表明个体间存在着较强的竞争,并随林龄增长、冠幅加大而趋增强。

越桔-兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局关联维数的计算结果(表1),其相关系数为0.999, $p < 0.01$,线性相关极显著。起始相关距离仅为0.700m,小于平均幅1.555m,表明种群幼树幼苗多,更新好,相关维数为1.550,说明种群个体的空间相关尺度变化不强,竞争较强,整体上对水平空间的占据程度不高。

杜香-兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局关联维数计算结果(表1),线性回归的相关系数均在0.99以上, $p < 0.01$ 线性相关极显著。样地a的关联维数为1.529,尺度范围在1.000~14.125m。样地b的个体空间相关在不同尺度范围(不同的线性区域)存在较大差异,小尺度关联维数为1.406,大尺度关联维数为1.013,表明其小尺度个体相关较强,而大尺度较弱,即种群个体在小尺度聚集。拐点尺度为2m,与计盒维数和信息维数给出的聚块大小(2m)一致^[1],揭示出个体聚集规模。关联维数平均值为1.468,整体看来此类型

下同354页半线下注。

中兴安落叶松种群个体的空间相关较弱,个体间竞争程度不高。

草类-兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局关联维数的计算结果(表1),显示出一个有意义的个体空间相关线性区域(范围在1.259~12.589m),相关系数为0.998, $p < 0.01$,呈现极显著线性相关。关联维数为1.740,表明种群个体空间相关的尺度变化较强,对水平空间的占据程度较高。虽然种群整体分布较均匀,但初始相关程度(1.259m)远小于平均冠幅(4.260m),因此个体间竞争比较激烈。

表1 不同森林类型中兴安落叶松种群格局关联维数

Table 1 Correlation dimensions of *Larix gmelini* population patterns in different forest types

样方号 Plot number	关联维数 Correlation dimension	相关系数 Correlation coefficient	显著水平(p) Significant level	尺度范围(m) Scale range	平均冠幅(m) Mean crown width
兴安落叶松林 <i>Larix</i> forest					
杜鹃-兴安落叶松林 <i>Rhododendron-Larix</i> forest					
a	1.769	0.999	<0.01	0.100~5.012	1.750
b	1.654	0.998	<0.01	1.585~14.125	2.846
c	1.816	0.998	<0.01	1.295~12.589	3.127
平均 Average	1.746				
越桔-兴安落叶松林 <i>Vaccinium-Larix</i> forest					
	1.550	0.999	<0.01	0.700~14.125	1.555
杜香-兴安落叶松林 <i>Ledum-Larix</i> forest					
a	1.529	0.996	<0.01	1.000~14.125	2.027
b	1.406	0.998	<0.01	0.500~1.995	1.021
	1.013	0.999	<0.01	2.000~20.000	1.021
平均 Average	1.468				
草类-兴安落叶松林 <i>Grass-Larix</i> forest					
	1.740	0.998	<0.01	1.259~12.589	4.260
兴安落叶松-白桦林 <i>Larix-Betula</i> forest					
a	1.512	0.992	<0.01	2.512~12.589	1.599
b	1.468	0.997	<0.01	2.512~14.849	1.562
c	1.363	0.996	<0.01	0.631~3.3162	0.672
d	1.394	0.999	<0.01	1.259~10.000	1.271
平均 Average	1.434				
兴安落叶松人工林 <i>Larix</i> plantation					
	1.726	0.997	<0.01	2.239~12.589	2.409

各类兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局的关联维数各具特点,揭示出不同类型中种群个体空间相关尺度变化的不同规律。各类型中兴安落叶松种群格局的关联维数大小依次为杜鹃-兴安落叶松林1.746>草类-兴安落叶松林1.740>越桔-兴安落叶松林1.550>杜香-兴安落叶松林1.468,表明杜鹃-兴安落叶松林个体平均关联程度最高,对空间的占据最强;杜香-兴安落叶松林中个体平均关联程度最低,个体聚集且对空间占据程度低。兴安落叶松林的关联维数一般在1.5以上,平均值在1.626,较接近2,故总体上兴安落叶松林中兴安落叶松种群对水平空间的占据较强,个体平均关联较强,个体空间分布比较均匀。

2.2 兴安落叶松-白桦林中兴安落叶松种群格局的关联维数

兴安落叶松种群格局关联维数计算结果(表1),直线拟合相关系数均在0.99以上, $p < 0.01$,呈极显著线性相关。关联的起始尺度一般大于或接近平均冠幅,表明个体空间相关较弱。关联维数一般小于1.5,远

离2,且变异不明显,也说明该种群对空间的占据程度较低。关联维数平均值为1.434,表明整体上兴安落叶松-白桦林中兴安落叶松种群个体空间相关较弱,个体间竞争不激烈,对空间占据的程度亦较低。兴安落叶松种群于兴安落叶松-白桦林中虽处于劣势伴生地位,但各样地的平均冠幅均较小(小于2m),表明此类型中幼苗幼树个体比例较大。

2.3 各森林类型中兴安落叶松种群格局关联维数比较

对比各森林类型中兴安落叶松种群格局的关联维数(表1),兴安落叶松人工林的空间相关最强1.762,兴安落叶松天然林次之1.626,兴安落叶松-白桦林最低1.434,这一顺序也是个体间竞争程度的次序。一般说来兴安落叶松天然林的聚集程度最高(这一点从信息维数可以看出)¹⁾,个体间的竞争程度似乎也应该最高,但事实上,关联维数是在统计意义上得到的,虽然从局部看来兴安落叶松天然林个体竞争最激烈,但从整体样方的角度来看,它只是在聚块内部个体竞争强烈,而聚块之间的竞争较弱。兴安落叶松人工林虽然局部个体竞争(关联)较弱,但它在各方向和各地点上的竞争程度均等,故统计看来它的个体关联程度均高于兴安落叶松天然林。兴安落叶松-白桦林中由于白桦占优势,兴安落叶松个体间的空间相关一般会受到白桦分布的严重制约,个体呈散分布,竞争较弱,关联维数最低。可见,关联维数是采用个体距离数的变化来表征种群个体空间分布的相关性及空间占据,故一般与计盒维数规律相近,但会受到个体分布格局强度(即信息维数)变化的影响。3个分形维数互相联系,相互影响。

3 讨论

种群格局计盒维数、信息维数和关联维数分别从空间占据程度、格局强度和个体空间关联的尺度变化出发,揭示了种群格局的尺度变化特征¹⁾。它们相辅相成相互补充,为深入理解种群格局提供了丰富信息。综合运用各种分形方法将有助于更加全面地解释兴安落叶松种群在不同环境中的空间格局特征,揭示兴安落叶松种群的结构、功能和特点。

3.1 兴安落叶松林中兴安落叶松种群格局的分形特征

比较分析显示(表2),几类兴安落叶松林中,越桔-兴安落叶松林空间利用能力最强,个体聚集(幼苗幼树多),但平均关联稍弱,分布不很均匀,是所有类型中兴安落叶松种群生长状况和更新状况最佳的一类兴安落叶松林。杜鹃-兴安落叶松林对空间的利用能力稍差,个体聚集稍弱(幼苗幼树稍少),但平均个体关联最强,分布最均匀,其生长状况和更新状况均较越桔-兴安落叶松林稍差。草类-兴安落叶松林虽利用水平空间的能力很强,个体平均关联很强,分布均匀,但个体聚集最差(幼苗幼树最少),故虽生长状况良好,但更新状况很差,这可能是灌木-草本植物丰富,影响兴安落叶松种子萌发所致。杜香-兴安落叶松林利用水平空间的能力最差,个体平均关联较弱,分布不很均匀,个体聚集也不很强(幼苗幼树不很多),故其生长状况不佳,更新状况一般。可见,各类兴安落叶松林的生长状况差异不大,唯杜香-兴安落叶松林较差,更新状况却差异较大,其它三类型大体接近,唯草类-兴安落叶松林较差。总体平均,计盒维数1.692,关联维数1.626,兴安落叶松种群于兴安落叶松林内生长状况较好;信息维数1.317,个体聚集性较低,更新状况一般。

表2 不同森林类型中兴安落叶松种群格局的分形维数

Table 2 Fractal dimension of *Larix gmelini* population in different forest types

森林类型 Forest type	计盒维数 Box dimension	信息维数 Information dimension	关联维数 Correlation dimension
兴安落叶松林 <i>Larix</i> forest	1.692	1.317	1.626
杜鹃-兴安落叶松林 <i>Rhododendron-Larix</i> forest	1.705	1.321	1.746
越桔-兴安落叶松林 <i>Vaccinium-Larix</i> forest	1.829	1.480	1.550
杜香-兴安落叶松林 <i>Ledum-Larix</i> forest	1.513	1.373	1.468
草类-兴安落叶松林 <i>Grass-Larix</i> forest	1.720	1.093	1.740
兴安落叶松-白桦林 <i>Larix-Betula</i> forest	1.371	1.065	1.434
兴安落叶松人工林 <i>Larix</i> plantation	1.868	0.745	1.762

1)同354页半线下注。

一般说来个体平均相关强,分布均匀,且空间占据强,则格局强度低(关联维数和计盒维数较高,信息维数较低,如杜鹃-兴安落叶松林和草类-兴安落叶松林);个体空间平均相关弱,分布不均匀,且空间占据程度高,则格局强度高(关联维数低和计盒维数高,信息维数较高,如越桔-兴安落叶松林);个体空间平均相关低,分布不均匀,空间占据程度低,则格局强度亦较高(关联维数和计盒维数低,信息维数高,如杜香-兴安落叶松林)。可见3个分形维数相辅相成,互相影响,只有综合运用、整体分析才能全面揭示种群格局特征。

3.2 各森林类型兴安落叶松种群格局分形特征比较

采用单一分形维数解释种群格局的各项特征毕竟不全面,因为它们仅从不同侧面揭示了种群的格局特征。为了完整解释不同森林植被类型中兴安落叶松种群的空间整体特征,根据表2绘制了分形维数谱(图3)。两类天然林中兴安落叶松种群格局的分形维数谱的曲折度相似,但兴安落叶松林的绝对数值均高于兴安落叶松-白桦林,而人工林的分形维数谱曲折度较高,更加证实了前述分析结果。不同类型兴安落叶松种群格局具有不同形式的分形维数谱,揭示出不同森林类型中种群个体空间分布形式的差异,通过比较可以对各类型中兴安落叶松种群格局的分形特征有一个完整认识。

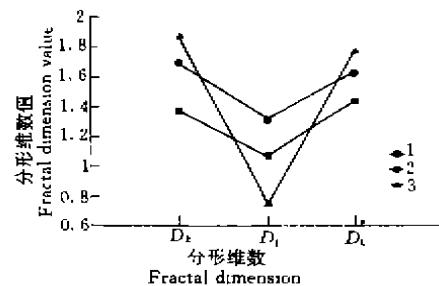


图3 各森林类型中兴安落叶松种群格局分形维数的比较

Fig. 3 Comparison of fractal dimension of *Larix* populations in different forest types

4 结论

- 1) 种群格局关联维数能够揭示个体空间关联的尺度变化程度。
- 2) 各类兴安落叶松林中,兴安落叶松种群格局具有较高的关联维数(接近2),个体空间关联程度较高,是建群种和优势种。其次序为杜鹃-兴安落叶松林(1.746) > 草类-兴安落叶松林(1.740) > 越桔-兴安落叶松(1.550) > 杜香-兴安落叶松林(1.468)。
- 3) 兴安落叶松-白桦林中兴安落叶松种群格局的关联维数较小(<1.512, 远离2),个体间竞争较弱,呈星散分布,总体上兴安落叶松种群于此类型中处于劣势伴生地位。
- 4) 通过将各天然森林类型与兴安落叶松人工林的比较显示,个体空间相关程度由高至低的次序为兴安落叶松人工林(1.762) > 兴安落叶松天然林(1.626) > 兴安落叶松-白桦林(1.434),揭示出兴安落叶松种群在不同森林类型中的地位和作用的差异。
- 5) 分形维数谱将不同森林类型中兴安落叶松种群的空间结构特征明确区分开来。

参考文献

- 1 Turner M G, Landscape ecology: the effect of pattern on process, *Ann. Rev. Ecol. Sys.*, 1989, **20**: 171~197
- 2 Milne B T, Lessons from applying fractal models to landscape patterns, In: Turner M G and Gardner R H (Eds), *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, Springer-Verlag, NY, 1991
- 3 Falconer K, 曾文曲等译, 分形几何——数学基础及其应用, 沈阳: 东北工学院出版社, 1991
- 4 高安秀树, 沈步明等译, 分数维, 北京: 地震出版社, 1989