

恢复演替中草地斑块动态及尺度转换分析

辛晓平¹, 徐 斌¹, 单保庆², 李建东³, 杨允菲³

(1. 中国农科院资源区划所, 北京 100081 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室, 北京 100085 3. 东北师范大学草地研究所, 长春 130022)

摘要 研究了 9a 草地恢复演替系列中斑块边界形状和斑块面积分布动态, 并进行了尺度转换分析。獐茅斑块的边界分维数和斑块化指数最高, 羊草斑块的较低, 碱蓬斑块的斑块化指数略小于羊草斑块, 边界分维数大于羊草斑块。其他类型斑块的两种指数基本上介于獐茅斑块和羊草斑块之间。斑块化指数的年际变动滞后于斑块边界分维数。斑块边界分维数在整个试验的尺度范围内符合同一自相似规律, 斑块的面积分布格局在不同的尺度上有不同的自相似规律。

关键词 斑块边界, 斑块面积分布, 分形指数, 尺度转换

Patch dynamics and scale-transition analysis of grassland in restoration succession

XIN Xiao-Ping¹, XU Bin¹, SHAN Bao-Qing², LI Jian-Dong³, YANG Yun-Fei³ (1. Institute of Natural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China 2. SKLEAC, Eco-Environmental Research Center, Academia Sinica, Beijing 100085, China 3. Institute of Grassland, East-North Normal University, Changchun 130022, China)

Abstract Patch boundary shape and patch size distribution in 9-year restoration succession was studied scale-transition points were determined using fractal method. Both fractal dimension of patch boundary and patchiness exponent of *Aeluropus litoralis* were the highest and that of *Aneurolepidium chinense* were lower. Patchiness exponent of *Suaeda glauca* was a little lower than that of *Aneurolepidium chinense* and fractal dimension of patch boundary was higher. Dynamics of patch size distribution lag behind patch boundary shape. Fractal dimension of patch boundary has no scale-transition at all scale in this study and patch size distribution shows scale-transition which indicates different fractal characteristics at different scales.

Key words patch boundary, patch size distribution, fractal exponent, scale transition

文章编号: 1000-093X(2000)04-0000-00 中图分类号: Q149 文献标识码: A

生态学过程总是涉及时空尺度和生态学系统结构的等级特征^[1,2]。生态学系统的格局和过程以及二者之间的关系是生态学的中心问题之一^[3,4], 两者都依赖于生态系统的时空尺度。不同的尺度上存在不同的格局, 这些格局可能是由在不同尺度上起作用的过程所决定的, 而格局反过来又对过程产生影响^[5,6]。

生态学系统是最为复杂的非线性体系, 分形理论可以用简洁的手段对非线性系统的层次性和复杂性进行数量描述^[7,8]。分形几何强调尺度, 认为不随尺度变化的特征, 即自相似系数或分维数才是系统的真正特征量^[9,10]。分形在生态学中的应用研究进展很快, 在生态学格局特征和空间尺度转换的分析^[11~14]、生态空间异质性研究^[15,16]、种群和群落性状的时间序列分析^[17,18]等方面都有不少工作。由于长期的格局动态数据难以获取, 应用分形方法揭示植被格局动态与生态学过程关系的研究较少, 只有一些理论探讨^[10,19]。

本文基于松嫩平原草地群落 9a 恢复演替过程的格局监测数据, 用分形方法研究群落格局(斑块边界复杂性)和斑块面积分布动态, 及动态, 分析不同尺度上群落格局的自相似规律及其与生态学过程的关系。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 39899370)和国家基金重点资助项目(39730110)。

收稿日期: 1999-06-21, 修订日期: 1999-12-06

作者简介: 辛晓平(1970~), 女, 甘肃天水人, 副研究员。主要从事草地生态学、农业生态学及景观生态学研究。

1 实验和方法

1.1 数据来源及预处理 研究地点位于松嫩平原南部长岭种马场,地理位置 N 44°30′~44°50′,E 123°10′~124°32′,温带半湿润气候。试验区于 1989 年开始围栏封育,封育前由于过度利用土壤严重碱化且草地极度退化。土壤空间异质性造成植物群落的斑块镶嵌分布,形成十多种以 1~2 个物种占绝对优势的小斑块,不同类型群落斑块差异很明显。在围封区内有代表性的地段,设置长、宽各 100m 的固定样地进动态观测,每年 8 月调查群落空间格局并绘制群落的斑块分布图,从 1989 年到 1997 年形成一个时间系列。群落分布图用 AutoCAD 输入计算机地理信息系统,空间分辨率为 10cm×10cm。在 EIS 软件支持下^[20,21],计算样地内斑块的面积和边长。

1.2 空间格局指数计算 以 Korcak 相对斑块化指数 B 计量斑块面积分布格局^[9,10]:

$$N(a) = C \times a^{-B}$$

a 为面积大小, N 是面积大于 a 的块斑数目。 B 越大,表示植被斑块化程度越高,面积较小的斑块越多。 B 可以通过对数转换回归得到:

$$\log(N) = C_0 - B \times \log(a)$$

植被斑块化-稳定性假说认为,相对斑块化指数指示斑块面积分布的稳定性,越稳定的物种,越能长期占据生境,具有较强的竞争力。相对斑块化指数 $B = 1/2$,说明斑块分布是随机的; $B > 1/2$,说明斑块分布不稳定,随时间变化很大; $B < 1/2$ 则说明斑块分布比较稳定^[10,19]。

斑块边界分维数通过边长-面积方法获得。植被斑块的面积 A 和边长 p 之间存在如下关系:

$$p = C \times A^E = C \times A^{D/2} \quad E = D/2, \quad 0 \leq E \leq 1/2, \quad C \text{ 为常数}$$

分维数 D 表征着斑块形状的复杂程度, D 越大,斑块边界越复杂。边长-面积方法通过对数转换回归拟合 E 值,再由 $E = D/2$ 得到分维数 D ^[9,10,13]。 $\log(P) = C - E \times \log(A)$

1.3 尺度分析方法 尺度的含义包括两个方面,即粒度(Grain)和幅度(Extent)。空间粒度指最小可辨识单元的特征长度、面积或体积,幅度指对象在空间上持续的范围,具体地说,研究区域的总面积决定研究的空间幅度^[22,14]。本研究中尺度取幅度的含义,即斑块面积大小。

尺度转换分析研究群落空间格局发生改变的尺度和不同尺度的空间格局。植被是一个随机分形体,在不同植被层次存在不同的特征,这些特征在一定的尺度域内不依赖于尺度,即尺度不变性或自相似性。尺度不变性的存在为人们认识事物提供了一条捷径,在尺度区域内可以通过空间插值或其它办法对已知特征外推,了解植被在其它尺度的特征。但是,已知特征的外推限于一定的尺度范围,植被格局并非在所有尺度上符合同一个自相似规律。自相似规律发生变化的尺度即尺度转换点的存在强调了植被格局的层次性,对于认识完整的植被格局,必须进行多尺度的观察,将所有尺度上的特征联系起来,才能够对植被的结构及动态有更加完整和深入的了解。

尺度分析方法有:①从分形指数(如 B)的双对数回归图形直接观察,如果回归直线有转折点,则转折点即为尺度转换点;②进行 Durbin-Watson 检验,检测尺度转换的显著程度;③用多重分形分析和分段回归,确定尺度转换点两侧尺度上的空间格局分形规律。在研究空间格局尺度转换和不同尺度上的分形特征时,以上 3 个方法相辅相成,结合使用^[10,13,15]。

多重分形分析首先对斑块按尺度由小到大排序,然后用滚动窗口回归,即用包含固定数据点总数的“窗口”在整个数据系列上移动,针对“窗口”内的数据作回归,拟合不同尺度上的分形指数。用分形指数对相应的尺度作图,即得到多重分形图。多重分形图中,如果分形指数随尺度变化不是随机波动而有明显的跃迁,说明存在尺度转换,跃迁点即为尺度转换点。

分段回归是确定了尺度转换点后,在每一尺度域内,应用直线回归拟合该尺度域上分形指数,对不同尺度的格局特征进行数量描述。

2 结果及分析

2.1 恢复演替中边界复杂性和面积分布动态 各类型斑块的边界分维数 D 、边长-面积指数 E 、Korcak 相对斑块化指数 B 以及残差分析结果见表 1。边界分维数和相对斑块化指数动态见图 1。

由图 1 各类型斑块边界分维数和相对斑块化指数动态可以发现,獐茅斑块的边界分维数和相对斑块化

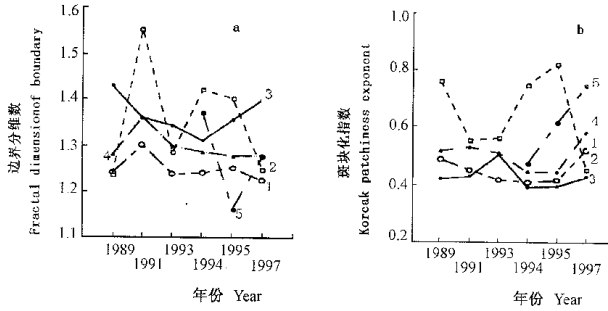


图 1 边界分维数 (a) 和相对斑块化指数 (b) 动态: 1 2 3 4 5 分别是羊草、獐茅、碱蓬、样地总体和虎尾草的动态曲线
Fig.1 Dynamic of fractal dimension of patch boundary (a) and korcak patchiness exponent (b):
1 2 3 4 5 is respectively curve of *Aneurolepidium chinense*, *Aeluropus litoralis*, *Suaeda glauca*, the whole sample and *Chloris virgata*

指数 ($>1/2$) 在整个演替过程中都比较高, 而且年际间波动很大, 说明獐茅斑块的空间分布很不稳定。
羊草的相对斑块化指数 ($<1/2$) 和边界分维数均小于獐茅。羊草是该地区顺行演替中的优势种, 有较强的竞争力和占据适宜生境的能力, 空间格局特征比较稳定。
碱蓬的相对斑块化指数与羊草相近而略小, 边界分维数大于羊草。在演替早中期 (1993 年之前), 羊草的斑块化指数趋于减小, 斑块体系变得稳定, 碱蓬则相反。这表明虽然碱蓬斑块也较稳定, 但保持机制与羊草不同。该地区适于碱蓬生长的生境较多, 易于扩散也易于被扩散力更高的物种 (如獐茅、虎尾草) 入侵, 因此, 尽管碱蓬的斑块面积分布比较稳定, 斑块位置却是变动的, 羊草则一方面通过高竞争力保持已占据的斑块, 一方面通过扩散占据新斑块。
虎尾草只在演替的较后阶段出现, 而且主要侵入碱蓬斑块, 其扩散力高, 但灭绝速率快, 属于 r -对策物种, 所以边界分维数和斑块化指数都较大, 而且年际变动大。

样地总体 (考虑所有类型的斑块) 的斑块化指数和边界分维数都介于羊草和獐茅之间。演替早期阶段, 物种扩散活跃, 不同斑块间物质交流频繁, 边界分维数和斑块化指数都大, 斑块体系不稳定。演替中期阶段, 物种扩散减少, 边界分维数和斑块化指数减小。总的来看, 斑块化指数的年际变动滞后于斑块边界分维数。
2.2 斑块边界复杂性和斑块面积分布的尺度转换分析 表 1 Durbin-Watson 检验结果表明, 整个演替过程中, 所有类型斑块的边长-面积指数残差自相关不显著, 而相对斑块化指数除獐茅外均有显著的残差自相关。说明各类型斑块的边界分维数没有尺度转换, 而斑块面积分布有显著的尺度转换。

边界分维数的尺度转换不显著说明不同尺度的斑块边界复杂性差异不大。植被斑块边界复杂性取决于土壤斑块的边界状况和物种的扩散强度。松嫩平原碱化草地的土壤边界形状基本上由碱性物质化学扩散决定, 不同尺度土壤斑块的边界都比较平滑。物种扩散速度和斑块植被类型密切相关, 而与斑块大小关系不明显, 因此不同尺度的相同类型斑块边界复杂性没有显著的变化。

影响斑块面积分布的因素比较复杂。土壤斑块空间构型, 干扰强度和物种扩散特征都可能影响斑块面积分布。以下对羊草、獐茅和样地总体的斑块面积分布特征进行尺度分析。

2.3 羊草斑块面积分布的尺度转换分析

2.3.1 尺度转换点的判定 图 2a 给出了 1993 年羊草斑块的双对数面积分布状况, 图中拟合直线的斜率即为 Korcak 相对斑块化指数 B 。由图可见回归直线有 2 个明显的转折点 $\ln(\text{area}) \approx 3.5$ 和 $\ln(\text{area}) \approx 5$ 的尺度。其它年份完全类似。

表 1 1989 年围封后各物种斑块化指数和边界分维数的变化情况
Table 1 Change of patchiness exponent and persistence after enclosure in 1989

	时间 Year	斑块化指数 <i>B</i> Patchiness exponent	残差分析		边长-面积 指数 <i>E</i>	残差分析		边界 分维数
			Residual analysis		Perimeter- area exponent	Residual analysis		$D = 2 \times E$
			<i>DW-d</i>	<i>SC</i>		<i>DW-d</i>	<i>SC</i>	
羊草斑块	1989	0.4896	0.445	0.600 *	0.6208	1.241	0.173	1.2416
patches	1991	0.4525	0.421	0.727 *	0.6512	1.251	0.091	1.3024
of	1993	0.4178	0.422	0.719 *	0.6197	2.022	- 0.072	1.2394
<i>Aneuro-</i>	1994	0.4111	0.405	0.634 *	0.6212	1.870	- 0.082	1.2424
<i>lepidum</i>	1995	0.4167	0.265	0.787 *	0.6286	1.478	- 0.285	1.2572
Chinese	1997	0.5236	0.419	0.793 *	0.6128	1.829	- 0.108	1.2560
獐茅斑块	1989	0.7616	0.837	0.589	0.6183	2.128	- 0.145	1.2366
Patches	1991	0.5573	0.538	0.685	0.7718	1.570	0.212	1.5436
of	1993	0.5626	0.657	0.529	0.6432	1.963	- 0.064	1.2864
<i>Aeluropus</i>	1994	0.7506	1.193	0.353	0.7115	1.729	0.131	1.4230
<i>littoralis</i>	1995	0.8236	1.080	0.438	0.7029	1.193	0.323	1.4058
	1997	0.4556	0.963	0.473	0.6254	1.512	- 0.317	1.2508
碱蓬斑块	1989	0.4214	0.181	0.864 *	0.7157	1.506	0.200	1.4314
	1991	0.4289	0.260	0.827 *	0.6808	1.254	0.283	1.3616
Patches	1993	0.5062	0.208	0.828 *	0.6726	1.485	0.208	1.3452
of	1994	0.3923	0.555	0.660 *	0.6563	1.796	- 0.478	1.3126
<i>Suaeda</i>	1995	0.3966	1.109	0.397	0.6788	1.427	- 0.311	1.3576
<i>glauca</i>	1997	0.4291	0.350	0.779 *	0.7013	1.766	- 0.132	1.4026
虎尾草斑	1989 ~ 1993							
Patches of	1994	0.4771	0.490	0.755 *	0.6863	1.832	- 0.139	1.3726
<i>Chloris</i>	1995	0.6175	0.769	0.535	0.5820	1.772	- 0.181	1.1640
<i>virgata</i>	1997	0.7484	0.356	0.882 *	0.6394	2.081	- 0.059	1.2788
	1989	0.5194	0.304	0.889 *	0.6404	10.400	0.495	1.2808
整个样地	1991	0.5315	0.276	0.894 *	0.6814	1.035	0.430	1.3628
	1993	0.5123	0.205	0.906 *	0.6504	1.319	0.275	1.3008
Whole	1994	0.4451	0.387	0.598 *	0.6438	1.848	0.000	1.2876
sample	1995	0.4478	0.270	0.684 *	0.6399	2.103	- 0.034	1.2798
	1997	0.5866	0.262	0.928 *	0.6407	2.046	- 0.049	1.2814

* 代表自相关显著 ;*DW-d* ,Dubibin - Waton 检验统计量 ,*SC* 残差分析的自相关系数

为了进一步确定尺度转换点 ,分别对 1989、1993、1995 年 3a 的数据进行多重分形分析 ,结果见图 2b。图中 3 条曲线变化趋势相似 :小尺度斑块化指数较小且波动小(0.2 ~ 0.4) ;在 $\ln(\text{area}) = 3.8$ (面积约 45m²) 时 ,斑块化指数剧增 ,多重分形图极陡 ,面积大于 45m² 时斑块化指数在 0.8 左右波动。

多重分形图中分形指数发生突变的尺度即为尺度转折点。综合考虑双对数面积分布图的转折点和多重分形图的突变点 ,说明至少在两个尺度上存在服从不同规律的空间格局 ,即面积大于 45m² 和面积小于 45m² 的尺度。

演替过程中 ,羊草斑块面积分布的尺度转折点基本不随年份改变 ,说明羊草面积分布格局存在的尺度不随演替进程改变。值得注意的是 ,较大尺度上羊草斑块的分布有很强的非线性 ,小于 45m² 的尺度上 ,也很接近于抛物线。其可能原因有二 :一是羊草斑块面积分布本来存在这样的非线性规律 ;另一个原因是临近正方形样地边界的斑块是被人为了隔开 ,只考虑了样地边界以内部分 ,这种取样方法可能造成相对较小的面积增多 ,从而使斑块分布格局出现非线性。但由于考虑的是样地的时间系列 ,所以不管这种格局是自然规律还是受样地限制的原因 ,对时间系列分析的影响不大——即使误差存在 ,也可以作为系统误差排除。

2.3.2 不同尺度的格局动态 为了明确不同尺度上羊草斑块面积分布格局的时间动态 ,对数据系列进行了分段回归 ,结果见表 2。分段线性回归以 $\ln(\text{area}) = 3.8$ (面积约为 45m²) 为尺度转折点。

恢复演替过程中 ,不同尺度的羊草斑块面积分布的变化趋势见图 2c。小尺度上斑块的相对斑块化指数低 ,以 1994 年为界先增大 ,后减小。大尺度上斑块面积分布动态正好相反 ,且变化幅度大于小尺度斑块。

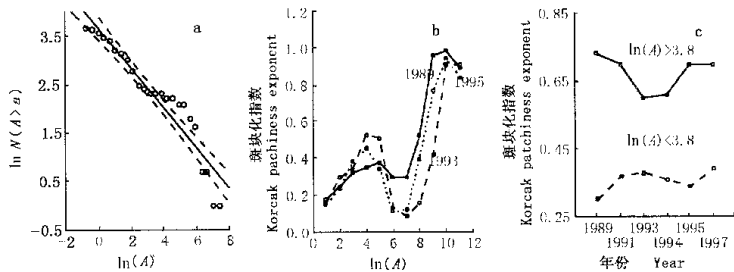


图2 羊草尺度分析结果 :a.1993 年面积大小双对数分布 ;b.1989、1993、1995 年多重分形分析结果 ;c. 不同尺度相对斑块化程度的时间动态

Fig.2 Scale-transition analysis of *Aneurolepidium chinense* ;a. Log-transformed distribution of patch size ;B. Multiscaling analysis in 1989、1993、1995 ;c. Dynamic of patchiness in different scales

小尺度上斑块化指数增大 ,表明小尺度上较小的斑块数目相对增多 ;大尺度上斑块化指数减小 ,说明大尺度上较小的斑块数目相对减少。对这两个结论的共同解释是演替过程中 ,羊草斑块面积分布的主要变化之一是中等尺度斑块合并 ,数目减少 ,纯粹由斑块扩散引起的格局变化比斑块合并的影响要小。放牧加剧草地群落的斑块化过程 ,引起草地景观破碎化。所以 ,最小尺度的斑块往往承受了较大强度的牲畜践踏、机械切割 ,斑块下土壤受到的恶劣影响较大 ,与其它同类斑块的隔离度增大 ,恢复演替过程中 ,小尺度上斑块的生长、合并都较慢。最大尺度的斑块在多年放牧后仍然保持较大面积 ,往往在土壤或植被成分方面有比较特殊的原因 ,而且数量很少 ,在演替过程中变化也较小。

表 2 羊草斑块分布的分段回归

Table 2 Piecewise regression for fitting patchness exponent of *Anurolepidium chinense*

时间 (年) Year	斑块尺度和数目 Patch size and number $\ln(a)$	线性回归 Linear reguession : $\ln N(\text{area} > a) = C_1 - B_1 * \ln(a)$				
		C_i	B_1	adj R^2	DW-d	SC
1989	< 3.8 (35)	3.66	0.30	0.98	0.8	0.57
	> 3.8 (12)	5.28	0.73	0.88	1.0	0.36
1991	< 3.8 (33)	3.53	0.37	0.98	0.71	0.64
	> 3.8 (11)	4.97	0.70	0.91	1.09	0.42
1993	< 3.8 (31)	3.56	0.38	0.94	0.65	0.67
	> 3.8 (10)	4.66	0.60	0.81	0.59	0.70
1994	< 3.8 (30)	3.56	0.36	0.95	0.65	0.68
	> 3.8 (11)	4.75	0.61	0.93	0.64	0.58
1995	< 3.8 (29)	3.53	0.34	0.97	0.66	0.73
	> 3.8 (12)	5.19	0.70	0.85	0.51	0.76
1997	< 3.8 (41)	3.91	0.39	0.96	2.05	-0.1
	> 3.8 (12)	5.07	0.70	0.94	0.91	0.55

adj R^2 是校正的回归相关指数 ;D W - d ' SC 同表 1

2.4 獐茅斑块面积分布的尺度分析 表 1 中 ,獐茅斑块的相对斑块化指数 B 的残差自相关不显著 ,由于数据点小于 15 时 Durbin-Watson d 检验不适用 ,不能据此得出有意义的结论。图 3 中 ,1989、1993、1995 年獐茅斑块的双对数面积分布图有明显的转折点 ,说明存在尺度转换。多重分形分析结果见图 3d。

不同演替阶段 ,獐茅斑块空间格局的尺度转折点不同 ,恢复演替开始时 ,草地严重退化 ,獐茅斑块数目少 ,面积小 ,格局发生改变的尺度转折点也小 ,约为 1 ~ 1.4m²。随着草地恢复 ,斑块数目及大小都增加 ,尺度

转折点发生移动,约为 4m^2 左右。恢复演替后期,由于羊草等其它物种的侵入,獐茅斑块数目、面积又减少,但其尺度转折点可能略大于放牧退化后的格局。该结论说明,象獐茅这样对正向、逆向的条件波动都敏感的物种,在放牧演替和恢复演替中,空间格局的某些参数可能发生相似的变化,例如斑块数目、面积减少,整个尺度范围内斑块化程度增大,但是存在格局的尺度可能不同,尺度转折点的差异在一定程度上反映了斑块分布格局的变化有不同的生态学原因。

应该注意的是,由于固定样地内獐茅斑块数量太少,以上只给出趋势性结论。而且当面积稍大时,已经不能算分形集, B 值超出了标准分形中的上限 1.0,因此不同尺度下的格局特征也不准确。

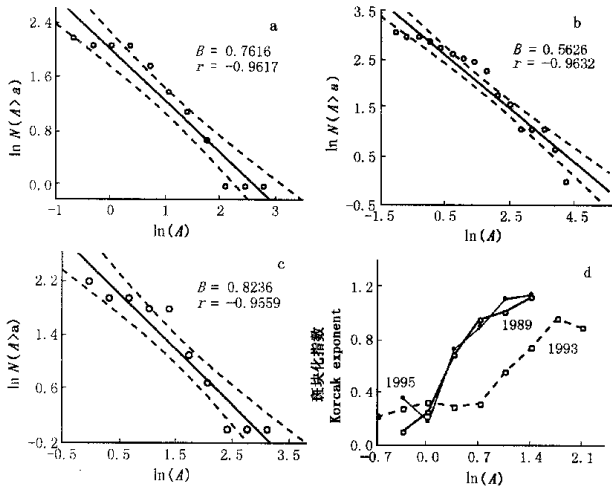


图 3 獐茅尺度分析结果 a、b、c 分别是 1989、1993、1995 年面积双对数分布, d 是 1989、1993、1995 年的多重分形图

Fig.3 Scale-transition analysis of *Aeluropus litoralis*. a、b、c is respectively log-transformed distribution of patch size in 1989, 1993, 1995. d is multiscaling analysis in 1989, 1993, 1995.

2.5 整个样地斑块面积分布的尺度分析 以上对恢复演替中羊草草甸优势种羊草、次优势种獐茅的斑块面积分布格局进行了尺度转换分析。但羊草草甸由于土壤镶嵌分布,植被极度斑块化,斑块类型很多,优势种的面积分布格局分析能完全代表整体样地的景观格局特征,所以对样地内所有斑块的面积分布格局进行尺度转换分析。图 4a 是 1991 年整个样地的斑块双对数面积分布图。图 4b 给出了多重分形图,结果表明存在三个尺度域:样地总体面积分布小于 3m^2 ($\ln(a) \leq 1$),介于 $3 \sim 245\text{m}^2$ ($1 < \ln(a) \leq 5.5$),和大于 245m^2 ($\ln(a) > 5.5$)。3 个尺度上面积分布动态见图 4c。

小尺度上,斑块化指数演替初期略有升高而后降低。小尺度上斑块化程度本来较低,随恢复演替,小尺度上斑块的斑块化程度进一步降低。中尺度上斑块化指数基本保持不变。最大尺度上斑块化程度在恢复演替过程中始终在增大。

总之,在恢复演替过程中,斑块的面积大小趋于均匀,最大和最小的斑块数目都减少,处于中间尺度的斑块增多。值得注意的是,最大尺度上,斑块化指数超过了 1,这说明该尺度上的斑块集合已超出无标度区域,由于没有足够的技术支持(斑块的面积差异不够大,或数目太少),已经不能算作分形体,一些分形集中成立的关系如 $B \leq 1$ 不再适用。

空间格局之所以存在尺度转换,是由于许多生态学过程例如干扰作用、土壤环境的影响、物种的生态学行为等都和尺度有关,在一定的空间尺度上起作用。本文中,大、小尺度上格局的变化都基于物种的扩散及

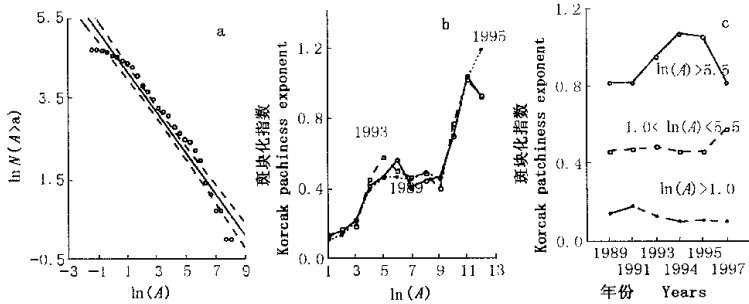


图4 整个样地尺度分析结果:a.1993年面积大小双对数分布;b.1989、1993、1995年多重分形分析结果;c.不同尺度相对斑块化程度的时间动态

Fig.4 Scale-transition analysis of the whole sample:a. Log-transformed distribution of patch size;b. multiscaling analysis in 1989、1993、1995;c. Dynamic of patchiness in different scales

斑块生长,但在小尺度起主导作用的生态学过程可能是土壤条件的限制,决定较大尺度空间格局的重要生态学过程则可能是干扰的强度和有无。

参考文献

- [1] 邬建国,等.生态学中的格局与尺度——可塑性面积单元问题.见:李博主编.现代生态学讲座.北京:中国科学技术出版社,1992.1~9.
- [2] 伍业钢,李哈滨.景观生态学的理论发展.见:刘建国主编.当代生态学博论.北京:中国科学技术出版社,1992.
- [3] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, **73**: 1943~1967.
- [4] 肖笃宁,布仁仓,李秀珍,等.生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, **17**(5): 453~461.
- [5] Forman r t t and Gordron M. Patches and structural components for a landscape ecology. *Bioscience*, 1981, **31**: 733~739.
- [6] 邬建国,李百炼,伍业钢,等.缓块性和缓块动态. *生态学杂志*, 1992, **11**(5): 28~37.
- [7] Bradbury R H, Reichlet R E, Reen D G. Fractals in ecology: method and interpretation. *Marine Ecol Prog*, 1984, **14**: 295~296.
- [8] Sugihara G, May R. Application of fractals in ecology. *Trends Ecol Evol*, 1990, **5**: 79~86.
- [9] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman, San Francisco, 1982.
- [10] Hastings M H, George S. Fractals. Oxford University Press, 1993.
- [11] Palmer M W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. *Vegetatio*, 1988, **75**: 91~102.
- [12] Krummel J R, Gradner R H, Sugihara G, O'Neil R V. Landscape patterns in a disturbed environment. *Oikos*, 1987, **48**: 321~324.
- [13] 辛晓平,高琼,李宜垠,等.放牧和水淹干扰对松嫩平原碱化草地空间格局影响的分形分析. *植物学报*, 1999, **19**(3): 307~313.
- [14] Meltzer M I, Hastings H M. The use of fractals to assess the ecological impact of increased cattle population: case study from the Runde Communal Land Zimbabwe. *Journal of Applied Ecology*, 1992, **29**: 635~646.
- [15] 祖元刚,马克明,张喜军,等.植被空间异质性的分形分析方法. *生态学报*, 1997, **17**: 333~337.
- [16] Legendre P And Legendre P. Numerical Ecology 2nd. The Netherlands, 1998.
- [17] Auerbach M, Shmida A. Spatial scale and the determinants of plant species richness. *Trends in evolution and ecology*, 1987, **2**(8): 238~242.
- [18] Milne B T. Measuring the fractal dimension of landscapes. *Appl Math Comput*, 1988, **27**: 67.
- [19] Hastings H M. Time scales, persistence and patchiness. *Biosystem*, 1982, **5**: 281~289.
- [20] 张新时.信息生态学——生态学的新分支. *生物信息科学*, 1990, **2**(3): 6~9.
- [21] 杨奠安,杨正宇,等.生态信息系统(EIS).见:中国地理信息协会主编.第二次地理信息学会议报告论文集. Beijing, 1996. P259~264.
- [22] Almo Farina. Principles and Methods in Landscape Ecology. Great Britain at the University Press, Cambridge, 1998.