

快速城市化地区生态质量退降的自组织临界性 ——以深圳市南山区为例

赵 军¹, 曾 辉^{1,2,*}

(1. 北京大学环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院环境与城市学院, 深圳 518055)

摘要:弄清快速城市化地区生态退降过程的机制,可以为相关景观动态模型建设和调控策略选择创造有利条件。借助于自组织临界性理论和方法,在基于多时段遥感影像数据的景观分类和生态质量制图结果支持下,以深圳市南山区为例进行了快速城市化地区生态质量退降的自组织临界性研究,以期揭示城市化过程与生态质量退降过程的响应关系和生态质量退降的过程特点。结果表明,工作区内建设用地扩张过程和生态质量退降过程均具有典型的自组织临界性特点;区域生态质量退降主要是由建设用地扩张导致 3 种不同生态质量区域之间发生的 3 种主要生态质量退降过程造成的;建设用地扩张和 3 种主要生态退降过程的动态分形指数都呈现出不断增加的趋势;具有自组织临界特征的建设用地扩张过程是同样具有自组织临界性特点的各种生态质量退降过程发生和发展的主要驱动力来源。

关键词:城市化;生态退降;自组织临界性(SOC);分形;深圳市

文章编号:1000-0933(2006)11-3804-08 **中图分类号:**Q149 **文献标识码:**A

Self-organizing criticality of ecological degradation in quickly urbanizing area : A case study in Nan Shan district ,Shenzhen

ZHAO Jun¹, ZENG Hui^{1,2,*} (1. College of Environment Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. College of Environment and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3804 ~ 3811.

Abstract: Ecological degeneration induced by urban sprawl is one of the most significant components of environmental change in rapidly urbanizing area, and its spatial-temporal complexity makes it analytically challenging to conduct empirical studies. This paper presents a case study in Nan Shan district, Shenzhen, from 1988 to 2003. Motivated by the theoretical insights of self-organizing criticality(SOC) this paper has three objectives: (1) To study the relationship between the process of urban sprawl and ecological degeneration; (2) the assessment of SOC in the processes of ecological degradation process; (3) The dynamic characteristics of ecological degradation. To relate urban sprawl and ecological degradation process, the study area is subdivided into three main categories based on land use types: Forest dominant area (F), Agricultural dominant area (A) and Build-up dominant area (B). We discovered that ecological degradation is composed of three main processes: Forest dominant area converted to Agricultural dominant area (FTA), Agricultural dominant area converted to Build-up dominant area (ATB) and Forest dominant area converted to Build-up dominant area (FTB). According to the size-frequency and "Power Law" distribution, their spatial and temporal fractal characteristics were verified. The following are the main conclusions of this paper: (1) Urban sprawl and three main ecological degradation spatial and dynamic size-frequency distribution follow "Power Law", these process are all in SOC state. (2) Urban sprawl is the driving force for ecological degeneration aiming three major types of land use; their dynamic fractal indices have the same trend. (3) The increase of the dynamic fractal indices of urban sprawl and ecological degradation indicate the process

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40328002)

收稿日期:2005-09-24; **修订日期:**2006-07-20

作者简介:赵军(1981~),男,四川人,硕士生,主要从事景观生态学研究. E-mail: humanhead@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengh@szpku.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40328002)

Received date: 2005-09-24; **Accepted date:** 2006-07-20

Biography: ZHAO Jun, Master candidate, mainly engaged in landscape ecology. E-mail: humanhead@163.com

of transformation from large to small patches.

Key words: ecological degradation; urbanization; self-organized criticality(SOC); fractal; shenzhen

建设用地急剧扩张诱发不同土地利用方式之间的频繁转移,是快速城市化地区最主要的人工景观动态演化过程^[1,2]。由于该过程是以生物生产过程为主的自然和农业用地不断向人工物化生产过程为主的建设用地转移^[1,3~5],加上新增建设用地部分的生态建设工作难以补偿自然和农业用地递减带来的生态功能性损失,使得快速城市化地区生态质量逐步退降成为一种普遍现象^[6~10]。然而,尽管事实上快速城市化地区生态质量退降可以看成是建设用地扩张过程的一个伴生现象,但二者之间动力学机制联系方面的研究还没有引起太多的关注,也使得对这类区域生态质量退降过程的成因和机理解释一直停留在经验层面。

有关研究证实,快速城市化过程是一种复杂的系统行为,建设用地扩张则是一个自组织临界转变过程^[11]。这一发现为城市化过程的动力学机制分析和建模研究开辟了一条新途径。那么与之对应的生态质量退降是否也符合这一过程特点,如能证实这一点无疑将有助于清晰地揭示导致过程发生的深层次驱动机制,进而为人工调控这一过程的发生和发展提供科学依据。本研究将以深圳市南山区为例,在多时段生态质量分级数据的基础上,探讨区域生态质量退降过程的自组织临界特征,重点回答3个问题:(1)快速城市化地区建设用地扩张过程与生态质量退降过程的联系是什么?(2)生态质量退降过程是否也是一个自组织临界转变过程?(3)生态质量退降的过程特点是什么?

1 工作区概况、数据准备和研究方法

1.1 研究区概况

本文工作区为深圳市南山区(不含研究时段内土地利用方式未发生显著变化的内伶仃岛和大、小铲岛区域),总面积 161km²。作为深圳市对外开放的窗口地区,自 1980's 年代中期以来,该地区建设用地面积比例以每年约 1.98 % 的速度快速递增,从 1988 的 11.99 % 迅速增长到 2003 年的 41.68 % (图 1),与此同时其他土地利用类型之间也发生了复杂的相互转化过程,为本项研究提供了一个理想的案例研究区域。

1.2 数据来源与处理

本研究基础数据源于 1988、1992、1996、2000、2003 年 5 个时段的 TM(ETM) 卫星影像数据。首先基于上述数据,在地面调查和综合前人有关研究成果的基础上^[12~14],进行了景观类型制图。分类工作利用人工监督的机助解译方法,将工作区内景观组分为建成区、开发区、林地、园地、农田、城市绿地、水体和养殖水体等八种类型(图 2),并将建成区和开发区合并后提取了建设用地分布图(图 1)。

考虑到快速城市化过程导致区域生态质量退降的主要成因是自然和农业用地类型不断减少或其生物生产能力不断降低,而 NDVI 指数作为生态系统能量捕捉能力和物质累积量的重要表征^[15],能够很好地反映人为干扰对生态系统的影响特征^[16],因而,本文采用基于上述遥感数据获取的 NDVI 指数作为区域生态质量表征参数进行相关研究。具体方法是将水库水面等无植被覆盖且在研究时段内未发生用地转移的区域裁除,剩下区域按照与地物匹配的原则分成 5 级(分别用 、 、 、 、 代表)进行 NDVI 分级制图。

NDVI 分级制图的具体方法是将各时段原始 NDVI 数据平均分为 20 级,将分级中包含像元数少于一百的低等级区间分为第 I 级(主要为无植被覆盖的各种小块裸露地表);其余部分再与景观分类图叠加,按照城市建设用地集中分布区域、农田和园地集中分布区域以及林地集中分布区域确定 、 、 级生态质量分布区间(按照各质量区间涵盖相关用地类型比重在 80 % 以上确定);最后将少量分布于丘陵和低山上部地区,生态质量最好的林地区域分成第 V 级。各年份不同生态质量分级区间的标准 NDVI 指数范围如表 1 所示,由于遥感数据成像时段不同,导致各年份分级标准有所差异,但各质量区间的核心景观组分类型保持着较好

表 1 生态质量分级标准

年份 Year					
1988	[1,3]	[4,8]	[9,11]	[12,16]	[16,20]
1992	[1,4]	[5,9]	[10,12]	[13,17]	[17,20]
1996	[1,4]	[5,9]	[10,12]	[13,17]	[17,20]
2000	[1,3]	[4,8]	[9,11]	[12,16]	[16,20]
2003	[1,3]	[5,9]	[10,12]	[13,17]	[17,20]

的一致性。利用相邻年份生态质量分级图进行比对,即可以获得生态质量退降区域分布图(图 3)。

1.3 研究方法

1.3.1 生态质量退降研究的主要范围和过程 经叠图计算,、 两类生态质量区间所占面积比重很小(合计不足全区面积的 5%),且在研究时段内基本不发生退降性的转化,因而以下着重对、 、 3 个质量区间的退降过程进行分析。由于上述 3 个生态质量区间分别代表着建设用地集中分布区域(以下简称 B)、农田和园地集中分布区域(以下简称农用地集中分布区域,简记为 A)和林地植被集中分布区域(以下简称 F),因而由这 3 个质量区间构成的生态质量退降形式只能是农田和园地集中分布区域转化为城市建设用地集中分布区域(以下简称为 ATB)、林地集中分布区域转化为城市建设用地集中分布区域(以下简称为 FTB)和林地集中分布区域转化为农田和园地集中分布区域(以下简称为 FTA)3 种形式。

1.3.2 生态质量退降自组织临界性分析方法 幂律分布是自组织临界性的判据,表现在时间上为 $1/f$ 频率,表现在空间上则为分形结构^[17,18]。本文因无法获得足够长时间的连续时间谱数据,因此在采用空间分形作为判据的同时,根据 BAK 的原始定义,选取动态过程中“雪崩”规模-频度幂律分布特性(下文简称动态分形)作为系统具有自组织临界性的另一判据^[19]。从两个方面同时证明,避免将渗透模型(percolation model)误判为自组织临界过程^[20]。

(1) 动态分形判断 如果某客体的标度 ρ 与标度 ρ 之上的频度 N 之间满足关系式^[19]:

$$N = C \times \rho^{-D} \quad (1)$$

则该客体具有分形结构。式(1)中: C 为待定常数, D 为分维,也即为幂律值。将(1)式进行双对数变换,可以得到:

$$D = C - \log N / \log \rho \quad (2)$$

根据(1)式和(2)式,城市化生态影响自组织临界性的动态特征揭示,就是将 ρ 定义为标度(生态质量退降斑块的规模),而将 N 定义为标度 ρ 之上的退降斑块出现的频度,通过上式(2)在双对数图上进行线性回归并检验的过程,双对数曲线的斜率的绝对值就是系统的动态分形维指数。从式(2)知,动态分形维是系统能量均衡性的度量,维数越大越均衡,即大事件发生概率越小,反之,大事件发生概率越大。

(2) 空间分形维计算(网格维数) 网格维数是空间均衡性和覆盖度的度量^[21],相同面积下维数越大,土地利用形态越均衡,反之则越集中。其数学定义如下:将研究区用一定尺寸(不妨设为 ϵ)的网格覆盖起来,计算某种空间覆盖类型(如建设用地或某生态质量区间)占据的网格数 $N(\epsilon)$,然后改变网格的尺寸 ϵ , $N(\epsilon)$ 随之改变,如该覆盖类型的空间分布具有分形特征,则可用下式定义其分维:

$$N(\epsilon) = C \times \epsilon^{-D_2} \quad (3)$$

式中, C 为待定常数。根据式(3),城市化生态影响自组织临界性的静态特征揭示,实质是生态质量分级和城市空间分布的网格维数计算和检验过程。

2 结果

2.1 主要生态质量等级区间及主要生态质量退降过程的贡献率分析

纳入本研究的 3 个主要生态质量分级区间的面积贡献度结果显示(表 2),各年度三级生态质量区间合计均占工作区总面积 96%以上,以这 3 类生态质量区间为主进行生态退降过程分析,无疑可以反映全区生态质量退降的主要趋势特点。从表 2 可以看出,II 级生态质量区间研究时段内面积增幅接近 140%,真实反映了建设用地集中分布区域的动态变化情况。与之相对应,、 级质量区间分别下降了近 20%和 50%,说明这两类区间是建设用地集中分布区域扩张的主要来源。

3 种主要退降过程(ATB、FTB、FTA)合计占各比较时段生态退降总面积贡献比率均在 90%以上(表 3),从另一个侧面说明本研究关于主要生态质量区间和主要生态退降类型选择的合理性。4 个比较时段 3 种退降过程的平均贡献率排序依次为 FTA、ATB、FTB,且 FTA 和 ATB 过程的贡献率明显高于 FTB 过程,可以说明两个问题:(1)农用地集中分布区域是建设用地集中分布区域扩张的主要来源,林地直接向建设用地转化的比重较

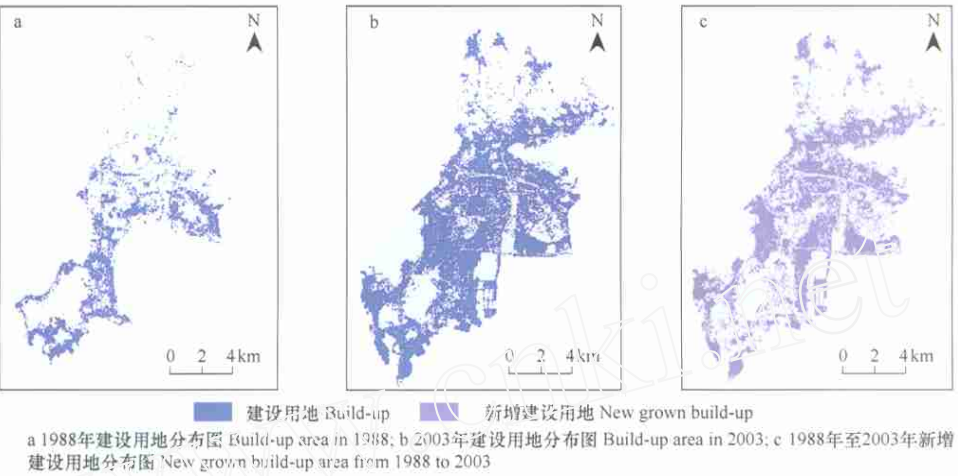


图1 南山区建设用地扩张示意图
Fig.1 Expansion of build-up area distribution in Nan Shan District from 1988 to 2003

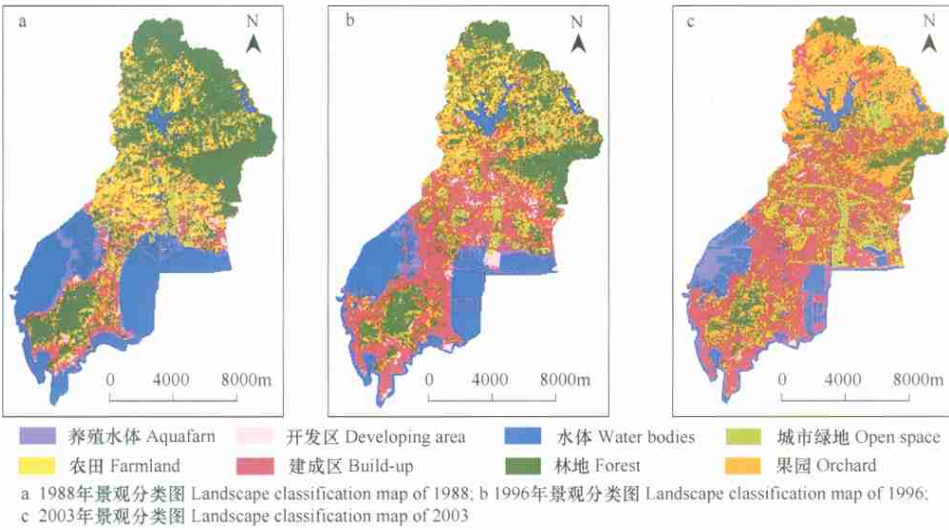


图2 南山区1988、1996、2003年景观格局图
Fig.2 Landscape patterns of Nan Shan district in 1988,1996,and 2003

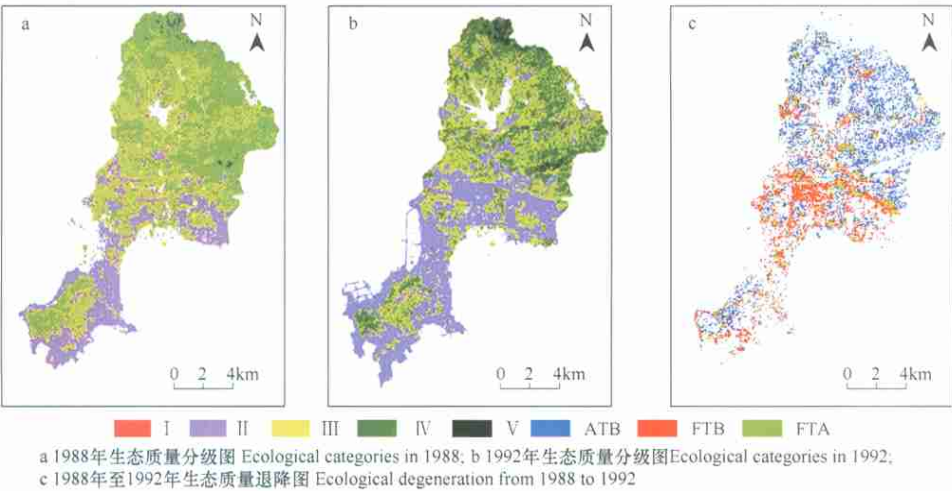


图3 南山区1988~1992年生态质量退降图
Fig.3 Ecological quality digression of Nan Shan district from 1988 to 1992

小;(2)建设用地扩张导致农用地大量减少,而强劲的农业发展需求又导致林地大量向农用地转化,导致 FTA 过程成为工作区生态质量退降的主要过程。

表 2 1988~2003 年南山地区主要生态质量区间的面积贡献度指数

Table 2 Area proportion of primary ecological categories in Nan Shan district from 1988 to 2003 (%)

生态等级 Ecological categories	1988	1992	1996	2000	2003
	20.27	37.19	44.63	45.94	48.21
	32.37	32.19	27.41	28.62	26.63
	46.50	26.76	25.85	24.10	23.71

表 3 主要生态质量退降类型的贡献率

Table 3 Contribution ratio of main ecological degeneration styles (%)

退降类型 Degeneration styles	1988 ~ 1992	1992 ~ 1996	1996 ~ 2000	2000 ~ 2003
ATB	35.99	38.68	34.86	44.82
FTB	13.54	14.24	15.11	12.46
FTA	49.78	37.78	42.84	39.90

2.2 城市建设用地扩张过程的自组织临界性分析

2.2.1 空间分形特性分析 以下仅以 1992~1996 年两个相邻时段为例,详细介绍城市建设用地的空间分形维和动态分形指数的计算过程。利用不同尺度网格覆盖 1996 年建设用地分布图,统计得到的网格尺度-含建设用地网格数量关系如图 4(a)所示,对图 4(a)的结果进行双对数回归分析结果如图 4(b)所示。上述结果显示,南山区 1996 年建设用地空间分布表现出完美的分形结构,其网格分维数为 1.5546。对其余 4 个年份进行同样分析,各年份南山区建设用地空间分布都表现出明显的分形结构,并且分形维呈匀速上升趋势(图 5)。

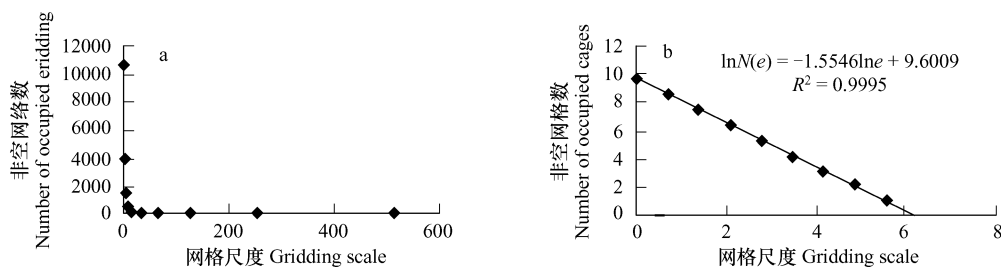


图 4 南山区 1992 年建成区分形分析

Fig. 4 Fractal analysis for the built-up area of Nanshan District of 1992

2.2.2 动态分形特性分析 将南山区 1992 年和 1996 年建设用地分布图进行叠图代数计算,得到 1992~1996 年期间的新增建设用地分布图。对 1992~1996 年期间新增建设用地进行斑块规模—频数统计(图 6(a)),然后在双对数坐标系下进行线性回归(图 6(b)),显示 1992~1996 年南山区新增建设用地同样表现出良好的分形特性,其动态分形维为 0.9434。对其他时段的类似分析表明,所有时段南山区的城市扩张过程都表现出动态分形结构(图 7),动态分维数持续增长,但 1992 年以后两个时段的增幅明显减小。

2.3 生态质量空间演化的自组织临界性分析

2.3.1 空间分形特性分析 利用与建设用地空间分形维分析相同的方法对南山区主要生态质量等级区间分析发现,其空间分布都表现出分形结构,但不同生态质量类型区的年际变化情形有较大差别(图 8(a))。Ⅰ级生态质量区间(建设用地集中分布区)空间分形维年际变化趋势呈单调上升,但 1996 年以后增幅减缓;Ⅱ级生态质量区间(农用地集中分布区)空间分形维在 1988~1992 年期间基本未发生变化,1992~1996 年期间显著减少,但此后又缓慢上升;Ⅲ级生态质量区间(林地集中分布区)1988~1992 年期间显著减少,此后一直在 1.45 左右波动。

2.3.2 动态分形特征分析 通过相邻时段生态质量分级图进行叠图代数计算后得到不同比较时段主要生态

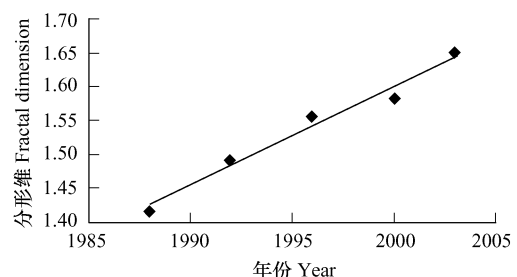


图 5 1988~2003 年南山地区城市用地空间分形维

Fig. 5 Fractal dimensions of build-up area in Nan Shan district from 1988 to 2003

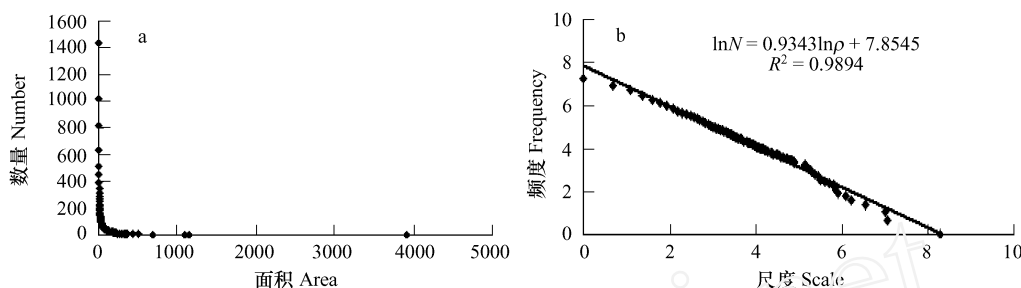


图6 南山区1992~1996年建成区动态分形分析

Fig. 6 Dynamic fractal analysis of the built-up area of Nanshan District from 1992 to 1996

质量退降类型的空间分布图,利用与建成区动态分形指数计算相同的方法分析发现,南山区研究时段内3种主要生态质量退降过程都表现出明显的动态分形特征,其动态分形指数研究时段内均不断增加,但增长方式有显著差别8(b)。从8(b)可以看出,ATB演化方式的动态分形指数与建成区动态演化方式基本相同;FTB演化形式2000~2003年期间的动态分形指数增长幅度显著高于前3个比较时段;而FTA转化方式的动态分形指数1996年以后两个比较时段的增长幅度显著高于1996年以前的两个比较时段。

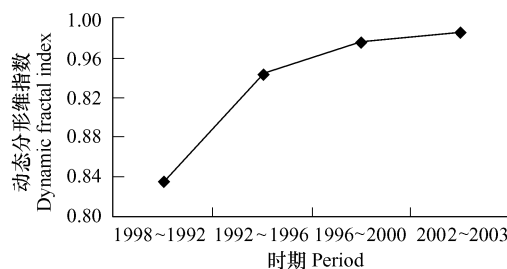


图7 1988~2003年南山区各时段建设用地扩张动态分形指数

Fig. 7 Dynamic fractal indices of urban expansion in Nan Shan district of each period between 1988 and 2003

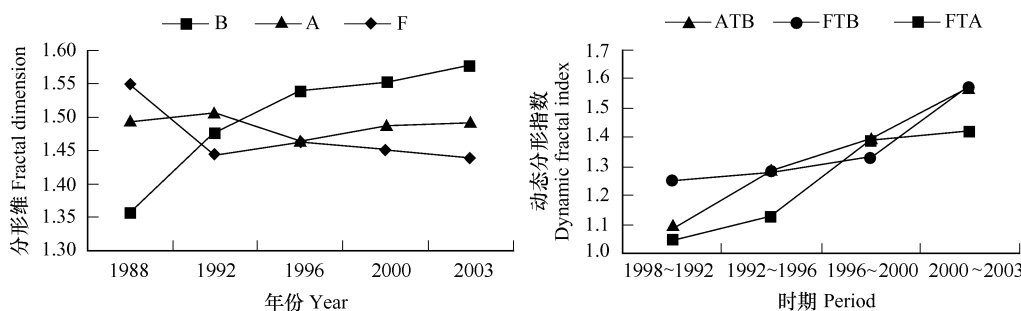


图8 1988~2003年南山区主要生态质量分级空间分形分析

Fig. 8 Fractal analysis of primary ecological categories in Nan Shan district from 1988 to 2003

3 讨论

3.1 工作区内生态质量退降过程的形态解析 主要生态质量分级区间和主演生态质量退降过程鉴别研究给工作区内生态质量退降过程的形态解析创造了有利条件,表2和表3说明,建设用地扩张和商品农业经营需求等人为景观改造作用是工作区内土地利用方式发生转移,并引起区域生态质量退降的主要原因^[3,4]。从不同生态质量区间的动态变化上看,在建设用地集中分布区域显著扩张的同时,农用地集中分布区域的面积变化幅度显著小于林地集中分布区域,说明快速城市化过程中工作区内仍有较强的农业经营需求。与农用地集中分布区域相比,林地集中分布区域的生态效益由于在研究时段内没有得到足够重视,导致面积比重下降幅度较大。

然而,从主要生态质量退降过程看,农用地集中分布区由于靠近城市建设用地集中分布区,且其非农建设开发条件要显著好于林地集中分布区,导致ATB过程对区域生态质量退降的贡献率明显高于FTB过程。不

过,在强劲的农业经营需求的推动下,农用地集中分布区尽管大量被建设用地扩张所蚕食,但又通过向林地分布区域扩张获得有效补充,导致Ⅲ类生态质量空间始终维持较小面积比重变化,同时使得 FTA 过程成为工作区生态质量退降中贡献率最大的过程。由此看来,南山区城市化过程的生态质量退降的总体形态可以归纳为由建设用地扩张驱动的,Ⅰ、Ⅱ级生态质量空间依次向外扩张以及Ⅲ级生态质量区间不断收缩的结果,这一过程显然可以归纳为一种抽象的同心圆扩张模式^[3]。

3.2 建设用地扩张的自组织临界性分析 南山区建设用地扩张过程同时表现出空间分形和动态分形结构,说明工作区内的城市化过程与其他地区研究结果相同,也是自组织临界过程^[22]。建设用地空间分形结构判别的网格分维数主要反映建设用地总量和空间均衡性变化情况,研究时段内南山区建设用地的空间分形维呈单调线性上升,表明在社会经济发展需求的强劲刺激下,非农建设用地扩张一直保持着较高的速度,在面积比重不断上升的同时,空间分布的均衡性也不断增强。正是两方面共同作用的结果,使研究时段内建设用地的空间分形维数呈现不断增长的态势。

不过,动态分形指数分析结果显示,不同比较时段内建设用地增长的形式发生了显著变化。动态分形指数主要对发生变化部分斑块规模谱分布较为敏感。如果建设用地扩张部分以相对集中的大斑块扩张为主的话,动态分形指数相对较小,反之则相对较大。南山区建设用地扩张的动态分形指数在 1988~1992 年期间还比较小,到 1992~1996 年比较时段迅速增加,此后的两个比较时段仍呈缓慢上升态势(图 7)。通过这一动态分形指数变化情况可以初步揭示工作区建设用地扩张的以下过程特点:(1) 1988~1992 年期间由于建成区比重较小,建设用地扩张主要围绕原来城镇中心区集中向外围扩张,规划约束较强,新增建设用地部分的大斑块数量较多,导致动态分形指数相对较低;(2) 1992~1996 年期间由于受当时政策环境影响,非农建设用地开发出现了一次罕见的加速过程,建设范围极大地突破了各种规划约束,同时由于村镇一级行政单元主导的小型开发区遍地开花,造成建设用地动态分形指数在这一时段急剧增加;(3) 1996 年之后南山区可供开发的后备用地资源逐步趋于紧张,以往主要集中在地势相对平缓地区的建设用地开发活动逐步向自然限制条件较强区域发展^[23],这些区域受海拔、坡度等条件限制,新增建设用地规模多表现为相对较小的斑块,导致这期间虽然新增建设用地数量逐步降低,但动态分形指数仍呈现缓慢上升的趋势。

3.3 生态质量退降的自组织临界性分析 不同时段生态质量区间的空间分维分析和主要生态质量退降过程的动态分形指数计算结果充分证明,南山区的生态质量退降过程与城市扩张过程一样,也具有典型的自组织临界性特点。但是,由于 3 种不同生态质量类型区域面积比重和空间分布特征的变化情况彼此差异显著,导致其空间分形维数的年际变化情况表现出明显不同的时序变化特征。

在城市扩张过程中,随着建设用地分布重心逐步向城市中心区聚集,Ⅰ级生态质量区间从原来相对分散的均衡分布逐步连绵成片,呈现出明显的不均衡分布特点。正是这种均衡性的改变,导致Ⅰ级生态质量空间的分形维数虽然由于区域面积比重的上升而不断增加,但其增幅显著小于建设用地空间分形维数的增长速度(图 5);与Ⅱ级生态质量空间变化情形相反,农用地集中分布区域和林地集中分布区域在面积比重不断降低的同时,由于对一些边际土地的利用(主要用于农业目的或植树造林等),导致其区域尺度的分布均匀性反倒有所增加。所以,研究时段内农用地类型尽管有所减少,但Ⅱ级生态质量区间的空间分形维数一直保持相对稳定。与此类似林地面积比重虽然持续降低,Ⅲ级生态质量区间除 1988~1992 年期间空间分形维数显著减少外,其余年份也基本维持稳定(图 8(a))。

主要生态质量退降过程的动态分形指数分析结果证明,所有转化过程都表现出从最初以较大斑块的集中转化向后期以小型斑块的分散转化为主的过程特点,三类转化过程的动态分形指数均呈现不断增加的变化趋势(图 8(b))。ATB 过程各比较时段呈现出几乎均匀的增长态势,显示出农业用地向建设用地转化的形式逐步趋向于分散和小型化;FTB 过程的动态分形指数一直处于较高水平,2000~2003 比较时段与前一时段相比有较迅速增加,表明地形约束对林地直接转化为建设用地的限制作用更加明显;FTA 转化过程的前两个时段与后两个时段相比有较大幅度增加,也就是说 1996 年以后林地向农用地的转化开始呈现出相对零散和小型

化的趋势,这显然也是林地所在区域环境条件约束影响的结果。

4 城市化过程与生态质量退降过程的响应关系总结

上述研究结果充分证明,城市化地区建设用地扩张过程和生态质量退降过程均具有典型的自组织临界性特点。从成因上看,区域生态质量退降主要是由于建设用地扩张导致 3 种不同生态质量区域之间发生的 3 种主要生态质量退降过程造成的。尽管由于 3 种不同生态质量区域的环境条件、在建设用地扩张过程中所扮演的角色及其动态变化的过程特征差异,导致不同生态质量类型区的空间分形维数变化与建设用地的空间分形维数年际变化趋势有所不同,但其动态变化过程却表现出相同的特点,建设用地扩张和 3 种主要生态退降过程的动态分形指数都呈现出不断增加的趋势,即都从最初相对集中大斑块增长或转移为主向后期以分散的小斑块增长或转化形式演变。由此可以基本断定,工作区具有自组织临界特征的建设用地扩张过程,是同样具有自组织临界性特点的各种生态质量退降过程发生和发展的主要驱动力来源。这一结论显然可以为今后建立能够反映这种结构性特点的景观动态机制模型创造有利的条件。

References:

- [1] Zeng H, Jiang Z Y. Landscape structure of Longhua area in Shenzhen City during fast urbanization process: Structure and heterogeneity analysis of urban construction area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 567 ~ 572.
- [2] Zhang J T, Pickett S. Effects of urbanization on forest vegetation, soils and landscape. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 654 ~ 658.
- [3] Chen L D, Fu B J. Analysis of impact of human activity on landscape structure in Yellow River delta. *Acta Ecologica Sinica* 1996, 16(4): 337 ~ 344.
- [4] Forman R T T, Godron M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [5] Xiao D N, Zhao Y, Sun Z W, et al. Study on the variation of landscape pattern in the west suburbs of Shenyang. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1990, 1(1): 75 ~ 84.
- [6] Zeng H, Guo Q H. Auto-correlation Analysis of Landscape Pattern for a Fast Urbanization Area — A Case Study of Longhua Area, Shenzhen City. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, 6(36): 824 ~ 831.
- [7] Kent M, Stevens R A, Zhang L. Urban plant ecology patterns and processes: a case study of the flora of the city of Plymouth, Devon, UK. *Journal of Biogeography*, 1999, 26: 1281 ~ 1298.
- [8] Zhu W X, Wu J G et al. Urban ecology: An ecological field facing new challenges. In: Wu J G, Han X G et al. eds. *Lectures in modern ecology (II): from basic science to environmental issues*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2002.
- [9] Liu J, Linderman M, Ouyang Z, et al. Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. *Science*, 2001, 292: 98 ~ 101.
- [10] An L, Liu J, Ouyang Z, et al. Simulating demographic and socioeconomic processes on household level and implications for giant panda habitats. *Ecological Modeling*, 2001, 140: 31 ~ 49.
- [11] Chen Y. Urbanization as phase transition and self-organized critical process. *Geography Research*, 2004, 23(3): 301 ~ 311.
- [12] Shi P J, Chen J. Landuse Change Mechanism in Shenzhen City. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 55(2): 151 ~ 160.
- [13] Shi P J, Pan Y Z. Land use/cover change and environmental security in Shenzhen region. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 293 ~ 299.
- [14] Zeng H, Kong N N. Landscape pattern analysis based on boundary characteristics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 81 ~ 86.
- [15] Song Y C. *Vegetation ecology*. Shanghai: East China Normal University Publishing House, 2001.
- [16] Song Y C, You W. *Urban ecology*. Shanghai: East China Normal University Publishing House, 2000.
- [17] Bak P, Tang C. A forest-fire model and some thoughts on turbulence. *Phys Lett A*, 1990, 147: 197 ~ 300.
- [18] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys Rev A*, 1988, 38: 364 ~ 374.
- [19] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of $1/f$ noise. *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 381 ~ 384.
- [20] Tainaka K, Itoh Y. Apparent self-organized criticality. *Physics Letters A*, 1996, 220: 58 ~ 62.
- [21] Luo H L, Chen Y G. On the methods of characterizing urban land-use form using fractal dimension. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2002, 34(4): 107 ~ 113.
- [22] Batty M, Longley P A. *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. London: Academic Press, 1994.
- [23] Zeng H, Guo Q H. Spatial analysis of artificial landscape transform in Feng Gang Town, Dongguan city. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 298 ~ 303.

参考文献:

- [1] 曾辉, 江子瀛. 深圳市龙华地区快速城市化过程中的景观结构研究——城市建设用地结构及异质性特征分析. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 567 ~ 572.
- [2] 张金屯, Pickett S. 城市化对森林植被、土壤和景观的影响. *生态学报*, 1999, 19(5): 654 ~ 658.
- [3] 陈利顶, 傅伯杰. 黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响分析. *生态学报*, 1996, 16(4): 337 ~ 344.
- [6] 曾辉, 江子瀛. 快速城市化景观格局的空间自相关特征分析——以深圳市龙华地区为例. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, 6(36): 824 ~ 831.
- [8] 朱伟兴, 邬建国, 张利权. 城市生态学: 一个面临新挑战的生态学领域. 见: 邬建国, 韩兴国, 黄建辉主编. *现代生态学讲座(二): 基础研究与环境问题*. 北京: 中国科学技术出版社, 2002, 220 ~ 229.
- [11] 陈彦光. 城市化: 相变与自组织临界性. *地理研究*, 2004, 23(3): 301 ~ 311.
- [12] 史培军, 陈晋. 深圳市土地利用变化机制分析. *地理学报*, 2005, 55(2): 151 ~ 160.
- [13] 史培军, 潘耀忠. 深圳市土地利用/覆盖变化与生态环境安全分析. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 293 ~ 299.
- [14] 曾辉, 孔宁宁. 基于边界特征的景观格局分析. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 81 ~ 86.
- [15] 宋永昌. *植被生态学*. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [16] 宋永昌, 由文辉, 王祥荣. *城市生态学*. 上海: 华东师范大学出版社, 2000.
- [21] 罗宏宇, 陈彦光. 城市土地利用形态的分维刻画方法探讨. *东北师范大学学报(自然科学版)*, 2002, 34(4): 107 ~ 113.
- [23] 曾辉, 郭庆华. 东莞市凤岗镇景观人工改造活动的空间分析. *生态学报*, 1999, 19(2): 298 ~ 303.