

矿区土地利用分形特征动态变化

李保杰^{1,2,3}, 顾和和^{1,2}, 纪亚洲^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116; 3. 江苏师范大学城市与环境学院, 徐州 221116)

摘要: 为了揭示矿区土地利用结构的时空行为和迁移状况, 以徐州城北矿区 3 期遥感数据为数据源, 利用 GIS 空间分析技术, 选取土地利用形状分维数、计盒维数、半径维数、分枝维数 4 个指标对 3 个时期 (1978 年、2000 年和 2011 年) 矿区土地利用结构的复杂程度、稳定程度、空间占比、衰减状况和相互渗透程度进行多角度分析。结果表明, 矿区土地呈现明显的分形特征, 由于煤炭资源的开采、复垦项目的实施和城市化进程的加快, 各地类的分形特征均发生了不同程度的变化: 5 种土地利用类型中, 水域和耕/园地受煤炭开采和复垦活动的扰动较大, 形状分维数和分枝维数均呈现先增加后降低的趋势, 而城镇/工矿用地受城市化进程的影响, 形状分维数持续增大, 趋于不稳定; 由于煤炭资源的开采, 占用了大量耕地, 使原本规整的耕地变得支离破碎并形成零星的塌陷积水区, 使耕/园地的计盒维数和半径维数降低, 而由于复垦项目的实施, 使得水域斑块面积增大, 使水域的计盒维数和半径维数增大; 相关分析结果表明 4 个指标中计盒维数与半径维数和形状分维数与分枝维数两两间存在较弱的相关性。综上所述, 煤炭资源的开采、矿区土地复垦和城市化是区域土地利用分形特征与结构稳定变化的主要驱动因素。

关键词: 土地利用, 地理信息系统, 结构, 分形特征, 徐州市

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.029

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0233-08

李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 矿区土地利用分形特征动态变化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 233-240.

Li Baojie, Gu Hehe, Ji Yazhou. Dynamic changes of land use fractal characteristic in mining area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 233-240. (in Chinese with English abstract)

0 引言

分形理论由美国科学家曼得尔布罗特 (B. B. Mandelbrot) 于 20 世纪 70 年代中期提出^[1], 发展到现在成为刻画自然界中一些不规则、不稳定和具有高度复杂结构现象的有力工具^[2]。1967 年 Mandelbrot 在《Science》杂志上发表了“英国的海岸线有多长? 统计自相似性和分形维数”的论文, 标志着分形概念的产生^[3]。分形指其组成部分以某种方式与整体相似的形体, 它以分维数、自相似、统计自相似性和幂函数等为工具, 研究不具有特征标度, 极不规则和高度分割但具有自相似性的复杂现象, 定量描述这种自相似的参数为分维数^[4]。分形理论作为描述复杂、非线性空间形态的有力工

具, 已被广泛应用于自然科学和社会科学等几乎所有领域, 如土壤学^[5]、地貌学^[6]、自然灾害^[7]、土地利用^[8]、环境科学^[9]、城市形态^[10]、交通^[11]等。利用分形理论对土地利用类型变化的复杂程度和稳定性进行测算, 可以弥补传统的面积周长统计方法、景观指数法等表达土地利用结构的不足^[12]。国外对土地利用分形的研究起步较早, 1985 年英国学者 M.Batty^[13]利用分形理论对城市土地利用的空间结构进行了深入的研究; 法国学者 P.Frankhauser^[14]利用半径维数对城市土地利用结构进行研究。国内对于分形理论的研究起步于 1980 年末, 到目前为止, 对土地利用分形研究呈现出多尺度、多方法和多时间段的研究局面, 多尺度主要体现在: 国家尺度^[15]、流域尺度^[8, 12], 市域尺度^[16-17]和县、镇域尺度等^[18-19]; 多方法主要体现在形状分维数、盒子维数、信息维数、半径维数^[20]等; 多时段主要体现在对不同时间尺度上土地利用分形特征变化进行研究^[21]。

综上所述, 土地分形的研究无论从研究方法上还是研究尺度上均取得了一定的成果, 但从研究尺度上看, 大多数研究主要集中在流域、城市 2 个主

收稿日期: 2013-05-10 修订日期: 2013-09-30

基金项目: 国土资源部公益基金项目资助 (2012110011); 国家自然科学基金资助项目 (41101428); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (SZBF2011-6-B35)

作者简介: 李保杰 (1979-), 男, 汉族, 江苏丰县人, 讲师, 博士, 主要从事 GIS 应用与景观生态方面的研究。徐州 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 221116。

Email: liboje@126.com

要的层面上,对于中小尺度土地分形的研究相对较少,尤其是对矿区土地利用分形的研究则更少;其次从研究方法上看,对土地利用分形的研究往往采用一种方法从单一的角度对土地利用分形特征进行定量评价,缺乏对其他分形特征的大量发现与普遍度量^[22],从而使得评价的结论具有一定的片面性。因此,本文以徐州市城北矿区为例,对矿区土地利用类型的复杂程度和结构稳定度在时间上的演变规律进行探讨,以期对矿区土地复垦和生态修复提供参考。

1 研究区概况

徐州市城北矿区(116°22'~118°40'E, 33°43'~34°58'N)位于古黄河泛滥形成的冲积平原。冲积层东北薄、西北厚,平均厚度 76.0 m,区内地势较平坦,略显西北高、东西低的趋势。从地质构造上研究区位于秦岭东西向构造带的北支和新华夏第二隆起带的交汇部位,其东侧紧邻郯庐大断裂,因为本区位于几个大构造带的交汇地,故构造复杂。区内有庞庄矿、张小楼矿、夹河矿、王庄矿、柳新矿、拾屯矿等。由于煤炭资源的高强度开采导致大面积地面塌陷并形成积水区,塌陷区水深可达 5~6 m。2000 年以来徐州市政府开展大规模的塌陷地复垦工程,经过近 10 a 来的土地复垦,塌陷地的治理取

得了一定成效,治理率为 39%,在未复垦土地中,按地类划分农用地 260.20 hm²,建设用地 761.77 hm²,未利用地 85.95 hm²;按稳沉情况划分,已稳沉 229.67 hm²,未稳沉 878.26 hm²。但由于二次塌陷、治理标准低等原因仍需要再次治理的面积有 11%^[23]。

2 资料来源

文章数据源主要包括 1987 年、2000 年和 2011 年 Landsat TM 影像(轨道号: 122/36),辅以徐州市城北矿区 2000 年地形图、2011 年矿区 Quickbird 影像和 2008 年矿区地籍调查数据。其他数据包括:矿区土壤图、地质构造图和地貌数据等。在 ERDAS 9 环境下,利用 1:1 万矿区地形图对 3 期遥感影像进行精确校正,采用分类精度较高的最大似然法进行监督分类,结合相近年份的地形、地貌信息和土壤信息,综合考虑遥感影像的光谱信息和纹理特征,对训练区进行综合评价^[24]。在综合已有的土地利用分类体系和本研究需要的基础上,将矿区土地利用类型分为耕/园地、林地、城镇/工矿用地、水域和未利用地 5 种景观类型,土地利用分类结果见图 1。3 期影像分类结果的 Kappa 系数分别为 0.8765、0.8635 和 0.9071,精度满足分析的要求。

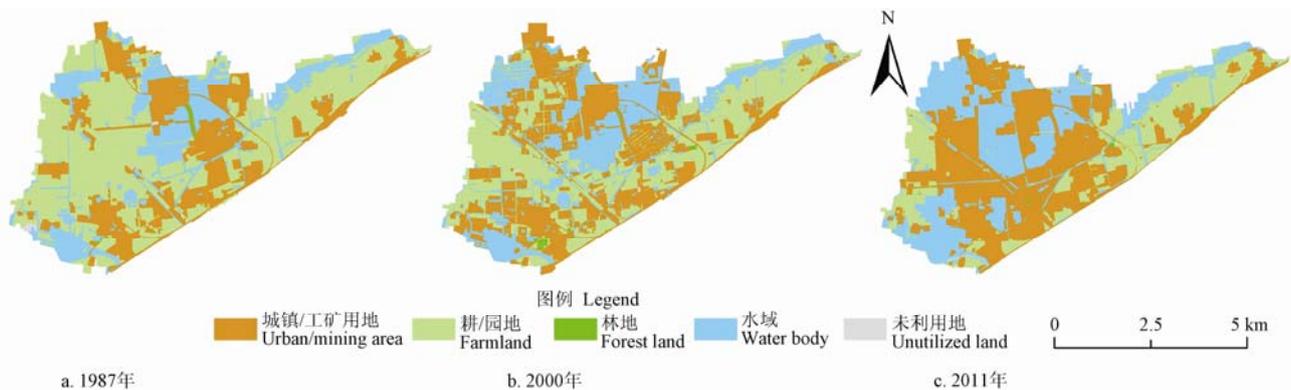


图 1 城北矿区 1987-2011 年土地利用格局

Fig.1 Spatial pattern of land use in Xuzhou northern coal mining area from 1987 to 2011

3 研究方法

3.1 形状分维数

土地利用形状分维数 D (fractal dimension) 是表征土地利用空间结构复杂程度和稳定性的指标。 D 的取值范围为 1.0~2.0, D 为 1.0 时,土地利用边界形状为圆形,斑块最规则; D 为 2.0 时,土地利用斑块最复杂,边界最不规则; D 为 1.5 时,则代表斑块处于布朗随机运动状态,越接近该值则稳定性越差。其计算公式见参考文献^[25]。对于矿区而言,如

果矿区土地利用形状分维数随时间变化而增大,则说明该区土地利用类型变得越复杂、越不规则,稳定性越差;反之,该区土地利用类型变得越简单、越规则、稳定性越高。土地利用空间形态的稳定性程度可用稳定性指数 SK 表示,其计算公式为

$$SK = |1.5 - D| \quad (1)$$

式中, SK 值越大,表示土地利用结构空间形态越稳定,反之亦然。

3.2 计盒维数

土地利用计盒维数是表征土地利用结构空间

占比和受人为干扰影响程度的指标。如果某种地类的计盒维数越大，则表明该地类的空间占据程度越大，反之亦然。计盒维数在直接表达土地利用类型空间占比的同时，也反映了区域某种土地利用类型受人为干扰的影响程度，如果计盒维数越接近 1，则表明其受人为干扰影响越强。计盒维数计算方法见相关文献^[26]。

3.3 半径维数

半径维数的概念最早由 Frankhauser^[27]等提出，后来 White 和 Engelen 将其引入城市土地利用空间结构的研究中。土地利用半径维数是表达区域某种土地利用类型的面积从测算中心 ($r=0$) 到周围衰减速度的指标。半径维数越大，表示某种土地利用类型的面积衰减越慢，反之亦然。其临界值为 2，当半径维数小于 2 时，地类面积从测算中心向周边递减；当半径维数等于 2 时，地类面积从测算中心向周边变化均匀，当半径维数大于 2 时，地类面积从测算中心向周边递增^[28]。半径维数数学定义与计算方法见相关文献^[29]。

3.4 分枝维数

土地利用分枝维数是表征研究区各地类在空

间上相互交错与渗透的复杂程度从测算中心 ($r=0$) 到周围的衰减速度的指标。对矿区土地而言，土地利用分枝维数越大，表明某种地类的相互交错程度，斑块之间的连通程度从测算中心到周围的衰减速度越慢，即该地类的空间渗透性越强，越复杂，反之亦然。分枝维数的数学定义与计算方法见相关文献^[30]。

4 结果与分析

4.1 矿区土地形状分维数特征变化

表 1 反映了徐州市城北矿区各地类的形状分维数、稳定性指数及其在 1987—2011 年间的动态变化情况。从整个矿区形状分维数的变化来看，其值呈现出先增加后降低的过程，即从 1.1251 增大至 1.2603，而后降至 1.1479；而区域稳定性指数则呈现出相反的变化趋势，由此可以看出，区域煤炭资源的开采和城市化导致区域土地利用结构变得更为复杂，由于矿区土地复垦项目的实施，使土地利用结构变得简单、有序，但是煤炭资源开采和城市化导致形状分维数的增幅要大于复垦后形状分维数的降低幅度。

表 1 1987—2011 年矿区土地利用形状分维数结果

Table 1 Results of patch shape fractal dimensions in coral mining area from 1987 to 2011

地类 Land use type	形状分维数 Fractal dimension			分维数变化率 Change rate of fractal dimension/%		分形稳定性指数 Fractal stability index		
	1987 年	2000 年	2011 年	1987—2000 年	2000—2011 年	1987 年	2000 年	2011 年
耕/园地	1.0314	1.2292	1.1034	19.18	-10.23	0.4686	0.2708	0.3966
林地	1.1097	1.1073	1.1051	-0.22	-0.20	0.3903	0.3927	0.3949
城镇/工矿用地	1.1791	1.2611	1.3967	6.95	10.75	0.3209	0.2389	0.1033
水域	1.1678	1.3376	1.2323	14.54	-7.87	0.3322	0.1624	0.2677
未利用地	1.1013	1.1021	1.0346	0.07	-6.12	0.3989	0.3979	0.4654
矿区	1.1251	1.2603	1.1479	12.02	-8.92	0.3749	0.2397	0.3521

从各景观类型的形状分维数变化来看，1987 年区域土地形状分维数的大小依次为：城镇/工矿用地 > 水域 > 林地 > 未利用地 > 耕/园地，城镇/工矿用地的形状分维数最大为 1.1791，耕/园地最小为 1.0314；2000 年区域景观类型形状分维数大小依次为：水域 > 城镇/工矿用地 > 耕/园地 > 林地 > 未利用地，其中：水域的形状分维数最大，为 1.3376；未利用地的形状分维数最小，为 1.1021；2011 年复垦项目实施后形状分维数的大小依次为：城镇/工矿用地 > 水域 > 林地 > 耕/园地 > 未利用地，其中：城镇/工矿用地的分维数最大，为 1.3967；未利用地形状分维数最小，为 1.0346。

从矿区各景观类型形状分维数的变化来看，不同的景观类型随着煤炭资源的开采、复垦和城市化呈现出不同的变化趋势。呈现逐年增加的景观类型为城镇/工矿用地，1987—2000 年和 2000—2011 年

分别增加了 6.95% 和 10.75%，主要是由于区域城乡一体化进程的加快和交通基础设施的不断完善，使得城镇/工矿用地的形状变得更为复杂。除林地外，其余的景观类型均呈现先增加后减少的趋势，其中耕/园地和水域变化较大，1987—2000 年分别增加了 19.18%、14.54%，2000—2011 年分别降低了 10.23%、7.87%。由此可以看出，煤炭资源的开采和区域土地复垦对耕/园地和水域这两种景观类型的形状分维数影响最大。

4.2 矿区土地计盒维数特征变化

由表 2 计算结果可知，1987 年城北矿区土地利用计盒维数大小顺序为：耕/园地 > 城镇/工矿用地 > 水域 > 未利用地 > 林地；复垦项目实施前（2000 年）土地利用结构计盒维数的大小顺序为：城镇/工矿用地 > 水域 > 耕/园地 > 未利用地 > 林地；复垦项目实施后（2011 年）研究区各土地利用类型的计

盒维数大小排序为：水域>城镇/工矿用地>耕/园地>未利用地>林地。由于研究区内的景观类型主要为耕/园地、城镇/工矿用地和水域，上述景观类型面积较大且交叉分割，其他景观类型散布其间，因此上述景观类型的计盒维数比林地和未利用要高，普遍在 1.3 左右。

表 2 1987—2011 年矿区土地利用斑块计盒维数结果
Table 2 Results of box dimension in coral mining area from 1987 to 2011

地类 Land use type	计盒维数 Box dimension			计盒维数变化率 Change rate of box dimension/%	
	1987 年	2000 年	2011 年	1987—2000 年	2000—2011 年
耕/园地	1.4728	1.3808	1.3267	-6.25	-3.92
林地	1.2261	1.2014	1.1463	-2.01	-4.59
城镇/工矿 用地	1.3076	1.4403	1.6235	10.15	12.72
水域	1.2671	1.4334	1.7128	13.12	19.49
未利用地	1.2561	1.2436	1.2356	-1.00	-0.64

从各景观类型计盒维数的变化来看，水域的计盒维数变化最大，2 个时段分别增加了 13.12% 和 19.49%，分析其原因主要是由于煤炭资源的大规模开采，使得地表塌陷，形成复杂形态的坑塘水面，同时占用了大量的耕/园地，使得耕/园地计盒维数降低，由于复垦项目的实施，通过深挖垫浅，使得支离破碎的塌陷积水区成为人工湖、水产养殖区等，水域等斑块的面积增大，计盒维数有所提高。其次是城镇/工矿用地，2 个时段分别增加了 10.15% 和 12.72%，主要是由于近年来徐州城市化进程的加快，使得城镇/工矿用地呈现出“摊大饼”和“多点扩张”的模式，导致其面积增大，同时在复垦项目实施的同时，构建了大量的交通廊道，使得城镇/工矿用地的计盒维数持续增加。

4.3 矿区土地半径维数特征变化

本研究选取研究区几何中心为半径维数的测算中心（下同），0.5 km 为半径进行半径维数的测算，结果见表 3，以探究各景观类型在区域内部的聚散特征。由表 3 可知，3 个时段各景观类型的半径维数大小均为：耕/园地>水域>城镇/工矿用地>林地>未利用地，各景观类型的半径维数均小于 2，说明该区的土地利用斑块密度均呈现出由测算中心向外围区域逐渐衰减的趋势，且呈现出较为明显的圈层结构，城镇/工矿用地大都集中在研究区的中部，水域和耕/园地在其外围区域，林地和未利用的空间分布相对均匀，散落分布在研究区。

从矿区土地利用半径维数的变化来看：呈现逐渐增加的景观类型有城镇/工矿用地和水域，则表明上述景观类型的面积呈现出从测算中心逐年扩展的趋势，主要由于近年来徐州市振兴老工业基地项

目的实施，城市化进程的加快，使得城镇用地呈现向周边地区蔓延的趋势，使得半径维数逐年增大；其次，由于复垦项目的实施，原本零星、分散的工矿用地、坑塘等被复垦为景观湿地、人工湖等，使得水域的面积增大，从而导致其分半径维数逐年增大；由于城镇工矿用、水体等面积的增加，使得耕/园地的数量逐年减少，从而导致耕/园地的半径维数逐年降低，2 个时段分别降低了 6.52% 和 7.42%。

表 3 1987—2011 年矿区土地利用半径维数计算结果
Table 3 Results of radial dimension in coral mining area from 1987 to 2011

地类 Land use type	半径维数 Radius dimension			半径维数变化率 Change rate of radius dimension/%	
	1987 年	2000 年	2011 年	1987—2000 年	2000—2011 年
耕/园地	1.7364	1.6231	1.5027	-6.52	-7.42
林地	1.2431	1.2302	1.2062	-1.04	-1.95
城镇/工矿 用地	1.2516	1.2912	1.3716	3.16	6.23
水域	1.3484	1.3963	1.4316	3.55	2.53
未利用地	0.6123	0.5442	0.4357	-11.12	-19.94

注：以 0.5 km 为半径进行半径维数测算，研究区几何中心为半径维数测算中心。

Note: Radial dimension was calculated with 0.5 km as radius and the geometric center of the study area as the calculation center.

4.4 矿区土地分枝维数特征变化

由表 4 可以看出：1987 年土地利用分枝维数的大小顺序为，城镇/工矿用地>耕/园地>林地>水域>未利用地；2000 年分枝维数的大小顺序为城镇/工矿用地>水域>耕/园地>林地>未利用地；矿区土地复垦实施后（2011 年）各景观分枝维数的大小顺序为：城镇/工矿用地>耕/园地>水域>林地>未利用地，3 个时期土地利用分枝维数较大的均为城镇/工矿用地和耕/园地。由上述排序可以看出，由于煤炭资源的开采、土地复垦和城市化，区域各种土地利用类型的分枝维数差异较大，城镇/工矿用地分枝维数最大，表明该土地利用类型斑块密度较大，较破碎，斑块之间的连通程度最高；未利用地分枝维数最小，说明未利用地的斑块密度较小。

表 4 1987—2011 年矿区土地利用分枝维数结果
Table 4 Results of dendrite dimension in coral mining area from 1987 to 2011

地类 Land use type	分枝维数 Dendrite dimension			分枝维数变化率 Change rate of dendrite dimension /%	
	1987 年	2000 年	2011 年	1987—2000 年	2000—2011 年
耕/园地	1.0486	1.1064	1.0237	5.51	-7.47
林地	1.0393	0.9261	0.7641	-10.89	-17.49
城镇/工矿 用地	1.5073	1.5377	1.6726	2.02	8.77
水域	0.9734	1.1743	0.8137	20.64	-30.71
未利用地	0.7226	0.8154	0.7017	12.84	-13.94

从土地利用分枝维数的变化来看城镇/工矿用地的分枝维数呈现持续增加的趋势, 2 个时段分别增加了 2.02% 和 8.77%; 而水域和耕/园地的分枝维数呈现出先增加后减少的趋势, 由此可以看出, 煤炭资源的开采和矿区土地复垦对上述 2 种土地利用类型的扰动最大。由于城乡统筹、城乡一体化的发展, 城镇/工矿用地的分枝维数仍呈现增加的趋势, 未利用地和林地则呈现出持续减少的趋势, 主要是由于近年来实施的土地开发综合整治, 使得区内未利用地、灌木林地逐年减少所致。

4.5 形状分维数、计盒维数、半径维数、分枝维数之间的关系

为了研究形状分维数、计盒维数、半径维数和分枝维数 4 个模型在描述土地利用分形特征之间的相关关系, 本研究利用 SPSS 对 4 个模型之间的相关性进行分析。首先将 3 个不同时期各土地利用类型的形状分维数、计盒维数、半径维数和分枝维数之间的相关系数进行计算, 然后将三个时期的相关系数取平均, 得到 4 个分形模型之间的相关系数表 (表 4)。

表 5 四个分形模型之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficient among four fractal features models

项目 Item	形状分维数 Fractal dimension	计盒维数 Box dimension	半径维数 Radius dimension	分枝维数 Dendrite dimension
形状分维数	—	0.480	0.475	0.574
计盒维数	0.480	—	0.538	0.360
半径维数	0.475	0.538	—	0.386
分枝维数	0.574	0.360	0.386	—

由表 5 可以看出, 4 个模型在表达区域分形特征时均存在正相关关系, 但相关系数均小于 0.6, 表明上述模型之间的相关性较弱, 相对而言, 计盒维数和半径维数、形状分维数和分枝维数之间的相关系数高于其他模型之间的相关性, 相关系数分别为 0.538 和 0.574。分析其原因, 计盒维数和半径维数均从不同地类的空间占比对土地的分形特征进行分析, 但是二者的计算方法有所差异, 计盒维数是从研究区的左下角为测算起点, 以方形为测算单元进行测算, 而半径维数以研究区几何中心为测算中心, 0.5 km 为半径测算半径与各地类面积之间的双对数关系来确定各地类的空间占比, 因此, 计盒维数与半径维数虽然具有一定的相关性, 但相关系数较小。形状分维数和分枝维数均通过计算某种地类面积与周长的关系来确定斑块的复杂程度, 形状分维数通过某种地类斑块的面积与周长之间的双对数关系来确定的

形状分维数的大小, 而分枝维数以研究区几何中心为测算中心, 0.5 km 为半径拟合测算半径与各地类周长之间的双对数关系来确定斑块的复杂程度, 二者具有一定的相似性。结果表明, 形状分维数、计盒维数、半径维数和分枝维数是几种性质不同功能各异的分形维数, 四者表征意义不同, 因此, 不能等价更不可以相互替代。

5 结 论

1) 本研究以分形理论为基础, 选取形状分维数、计盒维数、半径维数和分枝维数等 4 个指标从不同的角度对矿区土地利用结构的分形特征进行研究, 结果表明: 煤炭资源的开采、土地开发复垦和城市化是导致区域土地分形特征发生变化的主要驱动力。

2) 耕/园地、水域和未利用地的形状分维数呈现出先增加后降低的趋势, 主要是由于煤炭资源的开采使得耕地和水域变得支离破碎, 由于土地复垦的实施, 通过深挖垫浅使得耕地和水域斑块的面积增大, 形状更规则; 由于城市化进程的加快和交通基础设施的不断完善使得城镇/工矿用地的分形维数持续增加。

3) 城镇/工矿用地和水域的计盒维数呈现出持续增加的趋势, 主要由于城乡一体化进程的加快和复垦项目的实施, 使得上述地类的空间占比逐渐增加; 由于土地开发和整治项目的实施使得林地和未利用的空间占比逐渐减少。

4) 由于城镇/工矿用地和水域均呈现出“摊大饼”的扩张模式, 使得上述地类的半径维数均大于其他地类且呈现出逐渐增长的趋势, 而由于上述地类的扩张, “蚕食”了部分耕地、林地等, 使得其他地类的半径维数降低。

5) 城镇/工矿用地的分枝维数呈现持续增加的趋势且增幅最大, 主要由于城镇/工矿用的增加和交通基础设施的完善, 使得该地类与其他地类的交叉程度增大所致; 水域和耕/园地的分枝维数呈现出先增加后减少的趋势。

区域土地利用分形特征的变化是由自然因素和人为因素综合作用的结果, 借助不同的分形指数从不同的角度研究土地利用结构的空问变化, 为定量分析土地利用的合理性和科学性提供了一个新的研究方法。其评价结果为矿区的土地复垦提供理论依据, 同时也为其他同类矿区土地复垦的生态评价提供个案, 相关部门应制定和完善矿区土地复垦相关技术规程, 从而实现矿区可持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] Mandelbrot B B. Fractal: Forms, Chance and Dimension[M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [2] 陆华, 朱晓华. 分形理论及其在城市地理学中的应用和展望[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1999, 22(2): 106—112.
Lu Hua, Zhu Xiaohua. Applications and prospect of fractal theory in Urban Geography[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 1999, 22(2): 106—112. (in Chinese with English abstract)
- [3] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3775): 636—638.
- [4] 董连科. 分形理论及应用[M]. 沈阳: 辽宁科学出版社, 1991.
- [5] 王展, 张玉龙, 虞娜, 等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 83—88.
Wang Zhan, Zhang Yulong, Yu Na, et al. Effects of freezing-thawing on characteristics and fractal dimension of soil microaggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 83—88. (in Chinese with English abstract)
- [6] 高义, 苏奋振, 周成虎, 等. 基于分形的中国大陆海岸线尺度效应研究[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 331—339.
Gao Yi, Su Fenzhen, Zhou Chenghu, et al. Scale effects of China mainland coastline based on Fractal Theory[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 331—339. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王威, 田杰, 王志涛, 等. 城市综合承灾能力评价的分形模型[J]. 中国安全科学学报. 2011, 21(5): 171—176.
Wang Wei, Tian Jie, Wang Zhitao, et al. Fractal model for evaluating urban comprehensive disaster-carrying capability[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(5): 171—176. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郭碧云, 王光谦, 傅旭东, 等. 黄河中游清涧河流域土地利用空间结构和分形模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 223—228.
Guo Biyun, Wang Guangqian, Fu Xudong, et al. Spatial structure and fractal model of land use in Qingjian river basin of middle Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 223—228. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈辉, 厉青, 杨一鹏, 等. 基于分形模型的城市空气质量评价方法研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 954—960.
Chen Hui, Li Qing, Yang Yipeng, et al. Research on the method for city air quality assessment based on fractal model[J]. China Environmental Science, 2012, 32(5): 954—960. (in Chinese with English abstract)
- [10] 焦世泰, 王世金. 基于分形理论的城市区域空间结构优化研究: 以兰州—白银城市区域为例[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2011, 47(3): 103—109.
Jiao Shitai, Wang Shijin. Optimization research of urban areas space structure based on fractal theory: A case study of Lanzhou and Baiyin urban areas[J]. Journal of Northwest Normal University: Natural Science, 2011, 47(3): 103—109. (in Chinese with English abstract)
- [11] 沈惊宏, 陆玉麒, 兰小机. 基于分形理论的公路交通网络与区域经济发展关系的研究[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 658—665.
Shen Jinghong, Lu Yuqi, Lan Xiaoji. Relationship between the road network and regional economic development based on the fractal theory[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6): 658—665. (in Chinese with English abstract)
- [12] 叶长盛, 董玉祥. 珠江三角洲土地利用分形特征及其影响机制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 330—335.
Ye Changsheng, Dong Yuxiang. Fractal analysis of land use in Zhujiang River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(4): 330—335. (in Chinese with English abstract)
- [13] Batty M. The morphology of urban land use[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1988, 15(4): 461—488.
- [14] Pierre Frankhauser. Fractality of Urban Structures [M]. Paris: Anthropos, 1994.
- [15] 朱晓华, 蔡运龙. 中国土地利用空间分形结构及其机制[J]. 地理科学, 2005, 25(6): 671—677.
Zhu Xiaohua, Cai Yunlong. Fractal analysis of land use in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(6): 671—677. (in Chinese with English abstract)
- [16] 贾文臣, 贾香云, 李福印, 等. 威海市土地利用分形特征动态变化[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 194—198.
Jia Wenchen, Jia Xiangyun, Li Fuyin, et al. Dynamic changes of land use fractal characteristic in Weihai, China[J]. Progress in Geography, 2009, 28(2): 194—198. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵亚敏, 田国行, 何瑞珍. 基于 RS 和 GIS 的开封市土地覆盖分形[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1218—1222.
Zhao Yamin, Tian Guohang, He Ruizhen. Fractal of land cover in Kaifeng City based on RS and GIS[J]. Chinese

- Journal of Ecology, 2006, 25(10): 1218—1222. (in Chinese with English abstract)
- [18] 阿如早, 杨持, 同丽嘎. 基于分形理论的沙漠化土地空间结构: 以内蒙古多伦县为例[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 283—290.
- Aruhan, Yang Chi, Tongliga. Spatial structure of desertified land based on fractal theory: Taking Duolun County, Inner Mongolia as an example[J]. Geographical Research, 2010, 29(2): 283—290. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王鹏, 张家其, 田亚平. 基于分形理论的土地利用时空变化特征分析: 以常宁市松柏镇为例[J]. 国土与自然资源研究, 2011(1): 39—41.
- Wang Peng, Zhang Jiaqi, Tian Yaping. Landscape pattern change research of land use in based on fractal Theory: A case study of the Songbai town of Changning City[J]. Territory and Natural Resources Study, 2011(1): 39—41. (in Chinese with English abstract)
- [20] 沈中原, 李占斌, 武金慧, 等. 基于 GIS 的流域土地利用/土地覆被分形特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 63—67.
- Shen Zhongyuan, Li Zhanbin, Wu Jinhui, et al. Fractal characteristics of regional land use/land cover based on GIS technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张珂, 赵耀龙, 付迎春, 等. 滇池流域 1974 年至 2008 年土地利用的分形动态[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 232—239.
- Zhang Ke, Zhao Yaolong, Fu Yingchun, et al. Fractal dimension dynamics and land use in the Lake Dianchi Watershed from 1974 to 2008[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 232—239. (in Chinese with English abstract)
- [22] 董士伟, 李宪海, 李红, 等. 基于多尺度分形特征的 ETM+影像耕地提取[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 213—218.
- Dong Shiwei, Li Xianhai, Li Hong, et al. Extraction of cultivated land using ETM+ image based on multiscale fractal signature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 213—218. (in Chinese with English abstract)
- [23] 侯湖平, 张绍良, 闫艳, 等. 基于 RS, GIS 的徐州城北矿区生态景观修复研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 504—510.
- Hou Huping, Zhang Shaoliang, Yan Yan, et al. Landscape change analysis of reclamation land in opencast coal mine based on 3S technology[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(4): 504—510. (in Chinese with English abstract)
- [24] 毕如田, 白中科, 李华. 基 3S 技术的大型露天矿区复垦地景观变化分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1157—1161.
- Bi Rutian, Bai Zhongke, Li Hua. Landscape change analysis of reclamation land in opencast coal mine based on 3S technology[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1157—1161. (in Chinese with English abstract)
- [25] 余世孝, 郭添. 山东泰山地区景观结构变化及其分形分析[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 129—135.
- Yu Shixiao, Guo Luo. Landscape structures and fractal analyses of Taishan Mountain, Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 129—135. (in Chinese with English abstract)
- [26] 林志奎, 晏路明. 基于 GIS 和盒计数法的景观类型分形研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(1): 9—14.
- Lin Zhilei, Yan Luming. The fractal research on landscape types based on GIS and the box-counting method[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2009, 4(1): 9—14. (in Chinese with English abstract)
- [27] Frankhouser P. Aspects of fractal structure urbaines [J]. Geographical Area, 1990, 19(1): 45—69.
- [28] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns[J]. Environment and Planning A, 1993, 25(8): 1175—1199.
- [29] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法[J]. 地理研究, 1999, 18(2): 171—178.
- Liu Jisheng, Chen Yanguang. Fractal dimensions of spatial structure of an urban system and the methods of their determination[J]. Geographical Research, 1999, 18(2): 171—178. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 基于 GIS 的徐州市城乡交通基础设施通达性研究[J]. 人文地理, 2012(6): 76—80.
- Li Baojie, Gu Hehe, Ji Yazhou. A study on accessibility of transportation infrastructure in urban and rural area of Xuzhou based on GIS[J]. Human Geography, 2012(6): 76—80. (in Chinese with English abstract)

Dynamic changes of land use fractal characteristic in mining area

Li Baojie^{1,2,3}, Gu Hehe^{1,2}, Ji Yazhou^{1,2,3}

(1. Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of National Administration of Surveying Mapping and Geoinformation, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. College of Urban and Environmental Science, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: With the rapid development of economy and society, a series of ecological and environmental problems (e.g., land damage, surface subsidence, stagnant water and soil pollution) became increasingly serious in some mining area such as Xuzhou, Jiangsu province. In addition, resources shortage also becomes more and more severely. The land reclamation and ecological reconstruction might act as an important resolution in solving human-land conflict and improving ecological environment. However, the land use structures, and hence the fractal feature of land, are becoming more and more affected due to coal mining, land reclamation and urbanization. In order to reveal the spatial behavior and the dynamics of land use in the northern coal mining area in Xuzhou, three scenes of Landsat images were collected in the years of 1987, 2000 and 2011. Four fractal exponents (the patch shape fractal dimension, box-counting dimension, radius dimension and ramification dimension) were analyzed from several aspects. The complexity, stability, space occupation ratio, attenuation and mutual penetration were investigated by using GIS. The analysis results indicate that fractal features of land use are obviously in the coal mining area in Xuzhou city. On the other hand, the fractal features of different kinds of land use type have changed in the process of coal mining, land reclamation and urbanization. To be specific, both the patch shape, fractal dimension and the ramification dimension show the increasing trend firstly, and then decreasing, which is influenced by coal exploitation and land reclamation. The patch shape fractal dimension has been increasing and tends to be unstable, which is affected by the urban land development in the urban and mining areas; The box-counting dimension and the radius dimension in farmlands showed an increasing trend owing to fragmented landform and sporadic subsidence area due to the coal exploitation. Additionally, the box-counting dimension and the radius dimension of the water area showed an increasing trend because of the increasing of the water patches' area in the process of the land reclamation in coal mining area; In summary, the land reclamation and urbanization are the main driving factors of both the fractal features changing and structure stability in northern coal mining area in Xuzhou. It is therefore necessary to strengthen the reconstruction of ecological environment, improve the technical regulation for mine reclamation and establish ecological restoration strategy for achieving the sustainable development in some traditional coal mining areas.

Key words: land use, geography information system, structure, fractal characteristic, Xuzhou city

(责任编辑: 张俊芳)