

基于分形维数的煤矿区景观格局特征

——以徐州市沛北矿区为例

赵艳辉¹, 赵华¹, 徐嘉兴², 冯启言¹

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘要:以徐州市沛北矿区2000年、2004年、2008年和2012年SPOT-4/5影像为数据源,采用分形学的理论与方法,选取形状、半径、信息和间隙度4个维数综合分析了研究区景观格局复杂性、向心性、均衡性和聚簇性,从矿区和井田两个尺度研究了景观格局演变特征。结果表明:(1)2000—2012年土地利用发生了剧烈变化,耕地大量转变为水域和建设用地,水域和建设用地显著增加。(2)景观斑块趋于规整、复杂性降低;空间分布向非均衡化发展,聚集程度增加,耕地向心性增强和趋于单中心分布;水域、建设用地和未利用地向心性减弱、均衡性降低,水域空间分布趋向多中心化结构,未利用地在塌陷水域周围集中分布,建设用地空间分布的圈层结构明显。(3)井田尺度景观斑块形状更加复杂,2008年是水域空间分布的转折点,其后空间分布趋向于均匀。

关键词:景观格局; 沛北矿区; 分形维数

中图分类号:F301; P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0336-05

Spatial Evolution of Landscape Pattern of Mining Area Based on Fractal Dimension

—A Case Study of Northern Part in Pei County, Xuzhou

ZHAO Yanhui¹, ZHAO Hua¹, XU Jiaying², FENG Qiyang¹

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: The aim of this research is to study the spatial evolution of landscape pattern in Peibei coal mining area. Complexity of plaques, centrality, proportionality and cluster were selected as indicators of landscape pattern. Based on the ground of fractal theory, four fractal exponents, boundary dimension, radius dimension, information dimension and lacunarity dimension, had been explored at regional and mining-site scales by using SPOT-4/5 images in 2000, 2004, 2008 and 2012. The results show that: (1) the land cover had changed significantly during the period from 2000 to 2012; cultivated land reduced continuously while the water body and construction land expanded constantly; (2) the landscape patches became more regular, with the gradual loss of equilibrium, the increase of centrality of cultivated land resulted in a single-center distribution pattern; meanwhile, the centrality and the proportionality of the water body, construction land and unutilized land decreased in last decades, a multicenter distribution pattern of water body had formed while the unutilized land had mainly distributed around the subsidence water areas; in addition, the obvious ring structure of construction land was detected; (3) the plaque complexity is different from the whole region. Year 2008 is a turning-point for the change of spatial distribution of water body, and the homogeneous distribution gradually formed after 2008.

Keywords: mining area; landscape pattern; fractal dimension

土地利用空间格局作为地球表层系统最重要的景观标志,是一种典型的复杂非线性地理空间现象,表征了“人—地”关系在不同地域空间上的作用强度

与作用模式^[1],深入研究土地利用空间结构特征,有利于合理配置有限的土地资源^[2-3]。近年来,国内外学者在区域土地利用和景观格局变化开展了大量研

究,多采用动态度、转移矩阵和景观指数等传统方法^[4-7],可简单量化景观结构组成和空间结构特征^[8-10],但难以揭示景观格局变化内在的复杂性和变化特征;采用分形维数定量表达空间格局可有效弥补转移矩阵、景观指数等传统方法对土地利用结构信息表达的不足^[11-12]。国外学者较早的将分形理论应用于土地利用研究,如 M Batty 等^[13]运用形状维数研究了英国温斯顿市的城市土地利用结构。国内学者运用分形理论研究土地利用格局变化较晚,但已广泛应用于景观格局研究^[14],目前一般采用单一维数^[15-16],缺少综合分析。同时,分形维数多集中研究城市空间结构^[17-19],很少用于煤矿区景观格局研究。

本文应用遥感、GIS 和分形几何学等原理与方法,分析了沛北矿区 2000 年、2004 年、2008 年和 2012 年 4 个时期土地利用的形状维数、半径维数、信息维数及间隙度维数,从复杂性、向心性、均衡性及聚簇性等角度分析其景观格局的分形特征,揭示其景观格局演变过程中的非线性现象,为科学制定土地利用规划、优化配置矿区土地资源提供参考。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省徐州市沛县北部(116°41′—117°09′E,34°28′—34°59′N),包含沛县经济开发区、新城区、大屯镇、安国镇、杨屯镇和龙固镇,人口 57.5 万,面积约 367 km²,是国家商品粮基地。沛北矿区是典型的高潜水位平原煤矿区,坐落着姚桥、徐庄、孔庄、龙东、三河尖、张双楼、龙固等矿井,是华东地区最大煤炭工业基地的重要组成部分。自 1977 年以来累计开采原煤 23 亿 t。随着煤炭资源大规模开采,大面积土地塌陷,甚至形成积水区,景观格局发生剧烈变化。

1.2 数据来源与处理

以 2000 年、2004 年、2008 年和 2012 年 4 个时期 SPOT-4/5 影像为数据源,空间分辨率为 2.5 m,轨道号为 285/280,284/280,285/280,285/281,数据采集时间为:11 月 23 日、10 月 26 日、11 月 20 日、10 月 31 日。根据研究区地理特征和研究目的,将沛北矿区土地利用类型分为耕地、园/林地、交通用地、水域、未利用地和建设用地等六类,并将未利用地细分为沼泽地和其他未利用地,其中沼泽地指采煤塌陷形成的季节性积水区,主要覆被植物为芦苇。沼泽地和其他未利用地采用人机交互解译分类法提取,经实地验证得出 Kappa 检验值大于 85%。

2 研究方法

2.1 形状维数

形状维数最初由曼德尔布罗特^[20]在研究动物脑

褶分形结构时提出的表面积 $S(r)$ 与体积 $V(r)$ 分形关系,主要用于分析斑块形状的复杂程度^[21],表征不同地类斑块形状的复杂性和相互渗透程度。公式为:

$$\ln P(r) = \frac{D_l}{2} \ln A(r) + C \quad (1)$$

式中: $P(r)$ 为斑块图形周长; $A(r)$ 为同一斑块面积; D_l 为斑块的形状维数。

形状维数一般取值范围为 1~2。对于景观斑块而言,形状维数越大,说明斑块形状越复杂、越不规则;反之,斑块形状趋向于规整、平滑。

2.2 半径维数与信息维数

半径维数和信息维数用于分析和描述景观空间分布的向心性和均衡性,从两个角度分析景观空间分布特征。

半径维数用于描述景观格局单中心分布状况^[22],半径维数公式:

$$\ln S(r) = \ln k + D_b \ln r \quad (2)$$

式中: r 为区域半径; $S(r)$ 为半径 r 的范围内某地类斑块面积; k 为常数; D_b 为半径维数。

半径维数越大,表示某种景观面积从测算中心到四周的衰减越慢,其临界值为 2。当半径维数小于 2 时,从测算中心向周边递减;当半径维数等于 2 时,从测算中心向周边变化均匀;当半径维数大于 2 时,从测算中心向周边递增。

信息维数^[23]源自信息熵,是用于定量描述土地利用系统有序程度的一种量度。对于矿区景观格局,信息维数用于描述景观格局多中心分布状况。

$$I(\epsilon) = I_0 - D_x \ln \epsilon \quad (3)$$

式中: $I(\epsilon)$ 为某种地类的信息熵,反映土地利用的均衡程度; ϵ 为方格边长; I_0 为初始信息熵; D_x 为信息维数理论上,信息维数值区间为[0,2]。维数为 0 时,景观要素集中于一点;维数为 2 时,景观要素呈均匀分布。信息维数越大,景观要素空间分布越均衡;信息维数越小,景观要素分布越集中。

2.3 间隙度维数

间隙度指数由 Mandelbrot 于 1983 年提出,Plotnick 等将间隙度引入景观生态学,分析景观格局异质性^[24]。间隙度维数基于间隙度指数发展而来,采用双对数散点图建立网格尺度大小与间隙度指数映射关系的公式为:

$$\ln \Delta_i = \Delta_0 - D \ln R \quad (4)$$

式中: Δ_0 为初始间隙度指数; Δ_i 为间隙度指数,反映研究对象的聚集性; R 为尺度大小; D 为间隙度维数,越大表示该地类越呈现离散状态。

3 结果与分析

3.1 矿区景观格局演变特征

3.1.1 土地利用结构变化 通过 2000 年、2004 年、

2008 年和 2012 年土地利用数量变化的转移(表 1)可知:(1)耕地比重均大于 50%,是景观基质,但 12 a 间减少了 44.43 km²;2000—2008 年主要流向建设用地,2008 年后流失速率加快,主要流向水域和未利用地。(2)园/林地面积有微弱变化,转移活动不明显,少量耕地转为园/林地,而建设侵蚀了零散分布在居民点周

围的园/林地。(3)交通用地稳步增长,主要源于对耕地、建设用地的占用。(4)水域面积飞速增长,2012 年水域面积为 2000 年的 1.42 倍,主要是采煤塌陷积水区。(5)未利用地面积略有增加,其主要转变为水域、耕地和建设用地,面积增加来源于采煤塌陷形成的沼泽地。(6)建设用地增加显著,主要来源于耕地、园/林地。

表 1 2000—2012 年土地利用变化

景观类型	2000 年		2004 年		2008 年		2012 年	
	面积/km ²	比重/%	面积/km ²	比重/%	面积/km ²	比重/%	面积/km ²	比重/%
耕地	228.71	62.17	215.91	58.69	203.26	55.25	184.26	50.09
园/林地	8.35	2.27	7.88	2.14	8.15	2.21	8.22	2.23
交通用地	9.11	2.48	10.58	2.88	11.83	3.22	12.92	3.51
水域	48.01	13.05	52.23	14.20	55.99	15.22	68.25	18.55
未利用地	5.56	1.51	6.64	1.80	8.65	2.35	9.04	2.46
建设用地	68.15	18.52	74.65	20.29	80.01	21.75	85.20	23.16

3.1.2 矿区景观斑块分形特征 根据形状维数计算结果(表 2),不同景观斑块形状维数发生了明显变化。从整体上看,形状维数普遍减小,且 2008—2012 年显著减少,说明研究区景观斑块趋于规整,复杂度降低。耕地、未利用地和建设用地的形状维数较小,

明显低于其他地类,说明这三种地类斑块形状相对简单、规整。交通用地和水域的形状维数较高,表明其斑块形状较复杂,相互间渗透程度高,主要是由于交通用地和水域斑块以条带状为主,在空间上相互交错,曲折程度最复杂。

表 2 土地利用分形维数

分维数	年份	耕地	园/林地	交通用地	水域	未利用地	建设用地
形状维数	2000	1.152	1.281	1.762	1.676	1.140	1.160
	2004	1.181	1.282	1.753	1.656	1.222	1.163
	2008	1.170	1.271	1.756	1.686	1.168	1.158
	2012	1.131	1.267	1.773	1.654	1.110	1.152
半径维数	2000	1.879	2.322	2.000	1.968	2.881	2.429
	2004	1.853	2.422	1.985	1.955	2.730	2.464
	2008	1.815	2.329	2.038	2.147	2.872	2.489
	2012	1.745	2.336	2.020	2.291	2.933	2.556
信息维数	2000	1.863	1.599	1.781	1.722	1.133	1.775
	2004	1.786	1.536	1.704	1.658	1.360	1.701
	2008	1.766	1.545	1.682	1.604	1.232	1.683
	2012	1.722	1.523	1.638	1.574	1.135	1.648
间隙度维数	2000	1.882	1.756	1.913	1.924	1.808	1.876
	2004	1.820	1.653	1.735	1.792	1.704	1.787
	2008	1.767	1.667	1.725	1.670	1.634	1.783
	2012	1.787	1.656	1.740	1.628	1.566	1.736

3.1.3 矿区景观空间分布分形特征 以研究区几何中心为圆心,探究不同地类的景观空间分布向心性。结果表明:2000 年、2004 年半径维数大小为:未利用地>建设用地>园/林地>交通用地>水域>耕地;2008 年、2012 年半径维数大小为:未利用地>建设用地>园/林地>水域>交通用地>耕地。未利用地、建设用地和园/林地半径维数均大于 2,说明这三种地类在空间分布上呈现从中心向四周逐渐增加。耕地半径维数最小且小于 2,向心性增强,说明其空间分布呈现由中心向外围逐渐减少的态势,趋于单中心分布;交通用地半径维数

约等于 2,表明交通用地空间分布最为均匀。从半径维数变化看,水域、未利用地和建设用地半径维数增加,且水域和未利用地变化幅度较大,水域和建设用地整体呈增加趋势且逐渐远离 2,表明水域空间分布由均匀分布向测算中心集中转变,建设用地空间分布圈层结构越来越明显。主要是近 10 a 矿区开采逐渐形成多个大面积塌陷积水区,水域向心性减弱。

同时,土地利用信息维数普遍降低,说明景观空间分布向非均衡化发展,主要是煤炭开采和城乡建设导致地类在空间上相对集中。2000 年信息维数普遍较高,主

要是耕地、建设用地、水域等地类面积比例较为协调,空间分布较均匀;2012 年水域和建设用地面积显著增加,耕地大幅度减少,空间分布均趋于集中。采煤塌陷形成多个孤立积水区,水域空间分布向多中心化结构发展(图 1)。城乡建设加快,建设用地向周边蔓延使建设用地斑块面积增大,导致信息维数降低。同时,塌陷积水打断了交通线路,交通用地信息维数降低。

3.1.4 矿区景观空间形态分形特征 间隙度维数表达矿区景观格局聚簇性,维数越小表示该空间形态聚簇性越强。通过 2000 年、2004 年、2008 年和 2012 年 4 个时期矿区土地利用的全局间隙度指数(网格尺度变化范围为 0.5~10 km)计算,运用双对数散点图获得间隙度维数,结果表明:(1) 2012 年间隙度维数普遍小于 2000 年,说明景观格局聚集程度增加。(2) 耕地和交通用地间隙度维数较大,先减少后增加,但整体上呈现减少趋势,说明斑块间隙差异先减小后增大,且聚簇性增强。(3) 未利用地和水域间隙度维数显著减小,聚簇性增强,空间上呈大规模聚集状态。主要是塌陷形成的水域多极迅速扩张,且在塌陷水域周围集中分布着未利用地。(4) 建设用地间隙度维数

持续减小,聚集程度增加,主要是新城区建设。

3.2 井田景观格局演变特征

在矿区景观格局演变分析基础上,计算井田内 2000 年、2004 年、2008 年和 2012 年 4 个时期的形状维数、半径维数、信息维数和间隙度维数,获取土地利用分形维数(表 3)。结果表明:(1) 井田形状维数与矿区形状维数整体变化相似,但略高于矿区,尤其是耕地、水域和建设用地明显高于矿区,说明景观斑块更为复杂,斑块间渗透性强。(2) 水域半径维数较高,2000—2008 年持续增加,而 2008—2012 年减小,说明水域空间分布的向心性先减弱后增强。耕地和未利用地半径维数明显小于矿区,向心性较强。(3) 井田信息维数普遍较小,均衡性较低,说明景观空间分布更加集中;但水域信息维数略微增长,表现出中心间融合态势,特别是 2012 年龙东煤矿和三河尖煤矿的塌陷水域融合趋势明显(图 1)。(4) 水域间隙度维数较小,但呈增长趋势,说明其聚集程度较高,但随着水域“分散化”多极扩展,空间分布趋于离散,尤其在 2008—2012 年增加明显,说明 2008 年是水域空间分布的转折点,向心性增加、离散化加剧,趋于均匀分布。

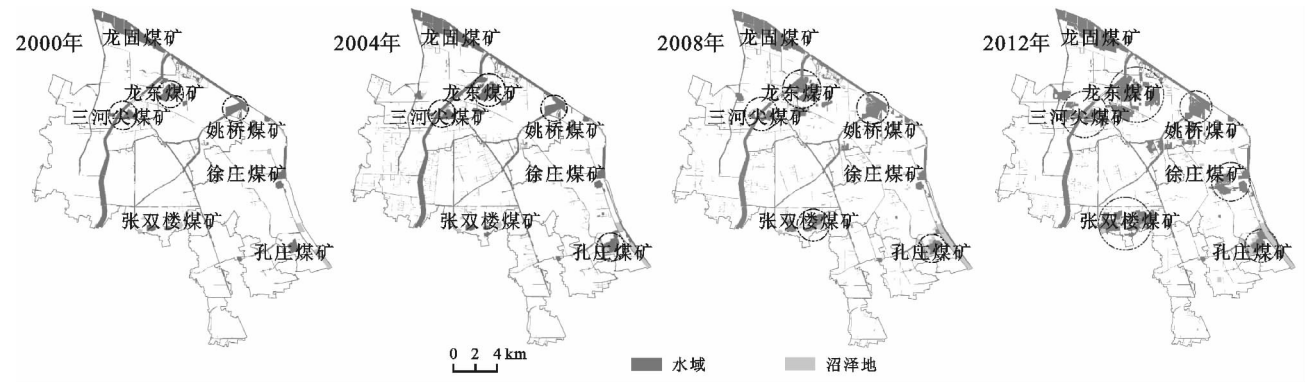


图 1 沛北矿区 2000—2012 水域空间变化

表 3 井田土地利用分形维数

分维数	年份	耕地	园/林地	交通用地	水域	未利用地	建设用地
形状维数	2000	1.273	1.470	1.847	1.727	1.156	1.215
	2004	1.300	1.342	1.890	1.705	1.248	1.230
	2008	1.289	1.354	1.873	1.726	1.195	1.226
	2012	1.182	1.328	1.736	1.694	1.109	1.175
半径维数	2000	1.763	2.174	1.816	2.225	1.652	2.302
	2004	1.758	2.256	1.767	2.242	1.509	2.303
	2008	1.668	2.214	1.849	2.508	1.644	2.307
	2012	1.534	2.282	1.870	2.400	1.662	2.318
信息维数	2000	1.574	1.308	1.494	1.346	1.047	1.440
	2004	1.574	1.307	1.506	1.375	1.119	1.443
	2008	1.567	1.337	1.511	1.365	1.085	1.442
	2012	1.531	1.328	1.500	1.394	1.031	1.440
间隙度维数	2000	1.622	1.724	1.474	1.222	1.673	1.511
	2004	1.620	1.593	1.593	1.297	1.608	1.493
	2008	1.628	1.615	1.544	1.328	1.437	1.506
	2012	1.589	1.612	1.558	1.467	1.540	1.513

4 结论

(1) 矿区土地利用发生剧烈变化:耕地受到煤炭开采沉陷和城镇化占用影响,主要转为水域和建设用地;水域面积因采煤塌陷积水显著增加。

(2) 矿区景观格局变化明显:斑块形状维数普遍减小,斑块趋于规整、复杂性降低,特别是水域斑块复杂性较高。信息维数和间隙度维数不同程度减小,景观空间分布向非均衡化发展、聚集程度增加。耕地半径维数增加,表明其向心性增加。水域、建设用地和未利用地半径维数减小,其空间分布向心性减弱,水域空间趋向多中心化结构,建设用地空间圈层结构明显。

(3) 矿区和井田尺度的景观格局变化特征不同,井田尺度景观斑块形状更加复杂,水域、建设用地和未利用地表现尤其明显。在井田尺度上,2008年是水域空间分布演变的转折点,表明了煤炭开采是水域空间分布扩展的主要驱动力。

参考文献:

- [1] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [2] Zhu X H, Cai Y L. Fractal analysis of land use in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(6): 671-677.
- [3] 吴浩,李岩,史文中,等. 遗传算法支持下土地利用空间分形特征尺度域的识别[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1822-1830.
- [4] Hubacek K, Van Den, Bergh J. Changing concepts of land in economy theory: From single to multidisciplinary approaches[J]. *Ecological Economics*, 2006, 56(1): 5-27.
- [5] 王永丽,于君宝,董洪芳,等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 717-724.
- [6] 杨依天,郑度,张雪芹,等. 1980—2010年和田绿洲土地利用变化空间耦合及其环境效应[J]. 地理学报, 2013, 68(6): 813-824.
- [7] 年雁云,王晓利,陈璐. 1930—2010年额济纳三角洲土地利用景观格局变化[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 777-785.
- [8] 齐杨,郭建国,李建龙,等. 中国东西部中小城市景观格局及其驱动力[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 275-285.
- [9] 陈利项,刘继生. 城市形态分维测算和分析的若干问题[J]. 人文地理, 2007, 22(3): 98-103.
- [10] Briske D D, Bestelmeyer B T, Stringham T K, et al. Recommendations for Development of Resilience-Based State-and-Transition Models[J]. *Rangeland Ecol-Manage*, 2008, 6(1): 359-387.
- [11] 陈利项,孙然好,刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [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.
- [13] Batty M, Longley P A, Fotheringham A S. Urban growth and form: scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation[J]. *Environment and Planning A*, 1989, 21(11): 1447-1472.
- [14] 李艳丽,杨华,亢新刚,等. 长白山云冷杉针阔混交林天然更新空间分布格局及其异质性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 311-317.
- [15] 曾忠平,裴韬,彭兰霞. 武汉南湖湖区土地利用结构信息熵与湖泊形态变化分形分析[J]. 资源科学, 2008, 30(7): 1061-1067.
- [16] 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.
- [17] 秦耀辰,刘凯. 分形理论在地理学中的应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(3): 426-436.
- [18] 冯健. 杭州城市形态和土地利用结构的时空演化[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 343-353.
- [19] 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.
- [20] Mandelbrot B B. *Fractal: Form, Chance and dimension* [M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [21] 王新生,刘纪远,庄大方,等. 中国特大城市空间形态变化的时空特征[J]. 地理学报, 2005, 60(3): 392-400.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 车前进,段学军,郭垚,等. 长江三角洲地区城镇空间扩展特征及机制[J]. 地理学报, 2011, 66(4): 446-456.