

基于 GIS 和分形理论的山区土地利用空间结构研究

卢德彬^{1,2}, 禹真¹, 毛婉柳², 白彬¹

(1. 铜仁学院 经济与管理学院, 贵州 铜仁 554300; 2. 华东师范大学 地球科学学部地理科学学院, 上海 200241)

摘要:土地系统是自然环境与人文交叉最为密切的系统,成为全球环境变化研究热点之一。定量研究土地结构有利于理解土地系统的利用与变化。基于 ArcGIS 软件,以 2009 年贵州省铜仁市江口、印江和松桃县全国第二次土地利用调查 1:10 000 比例尺数据为研究基础数据,在二调分类基础上,将地类划分为建设用地、耕地、林地、草地、水域和未利用,选用景观格局指数、分形维数和稳定性指数为测量指标,对由江口县、印江县和松桃县三县组成的环梵净山旅游经济区的土地利用空间结构进行分析。研究结果表明该区域土地利用类型从景观生态尺度上是以林地为基础,耕地、建设用地、草地、未利用地为斑块镶嵌结构,并且以水体和道路为线状廊道的景观结构模式。林地景观类型在所有景观类型中占有一定的支配地位,相对于林地,其他地类斑块较破碎,且在空间上呈分散分布,景观多样性不高。土地利用空间结构的稳定性总体水平不高,生态系统具有脆弱性。

关键词:土地利用;景观生态;分形;梵净山

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0220-04

Research on the Spatial Structure of the Mountainous Land Use Based on GIS and Fractal Theory

LU Debin^{1,2}, YU Zhen¹, MAO Wanliu², BAI Bin¹

(1. School of Economics and Management, Tongren University, Tongren, Guizhou Province 554300, China; 2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Land system has become one of hot spots for the global environmental change researches, as is the closest to the natural environment and the human system cross. Quantitatively measuring the structure of land utilization is conducive to the understanding of the use and changes of land system. We used the ArcGIS software, the second national survey of land use data of 1:10 000 scale for Jiangkou County, Yinjiang County, and Songtao County in Tongren City, Guizhou Province in 2009 for the research of basic data and the second survey classification to divide classes into construction land, cultivated land, woodland, grassland, waterbody and unused land based on the landscape pattern index, fractal dimension and stability index for measuring index. We analyzed the land use spatial structure of the land around the Fanjing Mountain Tourism Economic Zone composed of Jiangkou County, Yinjiang County and Songtao County. The results show that the type of the land use in this area has a landscape structure model for woodland as matrix, cultivated land, construction land, grassland, unused land as plaque inlaid structure, and with water and road for linear corridor from the landscape ecological sense of scale. In all types of landscape patches, forest landscape types occupy the dominant position and with respect to forest land, the other classes of plaque are relatively broken, and dispersed and distributed spatially and the diversity of land scape is not high. The overall level of stability of spatial structure of land utilization is not high. And the ecological system is fragile.

Keywords: land use; landscape; fractal theory; Fanjing Mountain

山区地形复杂和气候多变,具有丰富的生物多样性的山地生态是人类食物、水、能量来源的重要场所^[1]。在我国西南山区,山地生态系统脆弱,易受人

类不合理的社会经济活动的干扰和破坏,特别是随着经济发展水平的提高和城镇化速度的加快,山区生态系统遭受人类活动的干扰加剧,最重要的体现就是土

地利用的变化。山体遭受破坏,优质耕地流失,土地利用结构的改变,正在影响山地生态系统的生物多样性、生态系统服务功能,进而改变区域气候和生态环境。关于土地利用与覆被变化的研究方兴未艾^[2-7],而土地利用的空间结构是理解土地变化重要内容之一,其体现了土地由自身条件、气候条件和社会经济条件共同决定而导致的空间异质性^[8-9]。在研究土地利用的空间异质性,分形理论提供了有力的工具^[10]。20世纪90年代以来,该理论在地貌、城镇体系、旅游空间结构和土地利用变化等地理学领域中得到广泛的应用^[11],但对土地利用变化研究大多集中在大尺度地区或采用小比例尺数据^[12-13],仅有少数学者采用1:10 000大比例尺数据对市、县域中小尺度地区的土地分形进行研究^[14-15]。随着LUCC研究的不断深入,需要针对更加多样化的研究区域,尤其要加强中观和微观尺度的研究^[16]。经过全国第一次和第二次土地调查,我国大部分地区已获得1:10 000比例尺为主的土地利用现状数据,该数据已成为土地利用规划和资源管理的基础数据,为进行中小尺度和大比例尺研究提供了数据保障。因此,本研究基于ArcGIS软件为平台和2009年第二次全国土地利用调查现状数据,以贵州省铜仁市环梵净山旅游经济区为研究区域,包括江口县、印江县和松桃县,三个行政县,数据比例尺为1:10 000,运用分形理论,通过计算景观格局指数、土地类型分形维值和不稳定指数,定量描述土地利用类型的不规则性、不稳定性、复杂性和非线性特征,分析该区域土地利用类型的复杂性、稳定性及其与分维数之间的内在关系,揭示了山区土地利用空间结构特征,目的是为该区域生态环境保护和土地资源的可持续利用提供理论依据和决策参考。

1 研究区概况

环梵净山旅游经济区包括印江土家族苗族自治县、松桃苗族自治县和江口县3个县,位于贵州省铜仁市,东临湖南省,北接重庆市,西临遵义市,南与碧江区接壤,距省会贵阳市244.48 km,介于东经108°18'0"—109°23'34",北纬27°28'21"—28°30'10"。地貌以中低山山原峡谷和低山丘陵为主,地形复杂,区域属中亚热带温暖湿润季风气候,气候宜人。水资源比较丰富,以梵净山为分水岭分为乌江水系和沅江水系,有乌江和锦江两大河流。森林资源和生物资源富集,生态环境良好,主要自然植被为常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、暖性针叶林、针阔叶混交林、竹林、灌丛和灌草丛等类型,森林覆盖率较高。核心区武陵主峰梵净山为国家级自然保护区。2014年总人口142.46万,

GDP164.39亿元,详细介绍参见文献^[17-18]。该区地形复杂,是研究土地利用分形的良好区域。

2 材料与方法

2.1 研究数据

研究数据来源铜仁市国土局2009年度江口县、印江县和松桃县全国第二次土地利用调查数据库,经过ArcGIS软件转换为SHP矢量文件,坐标系统一为Xian80坐标系,采用高斯克吕格3°分带投影方式,比例尺为1:10 000,数据符合国家要求。地类划分在全国土地利用分类标准方法的基础上,结合区域和研究的需要,将研究区域土地利用类型划分为建设用地、耕地、林地、水域、草地和未利用地6大类。

2.2 研究方法

为了科学揭示研究区域土地利用空间结构特征,选取了聚集度、优势度、蔓延度、多样性指数以及分形方法对研究区域土地利用在斑块水平、类型水平以及景观水平3个层次进行研究。

2.2.1 聚集度指数 景观聚集度,反映景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度^[19]。计算公式为:

$$AI = \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{g_i}{\max g_{ii}} \right) \cdot p_i \right] \times 100 \quad (1)$$

式中: g_i ——根据单倍法的类型*i*相邻的节点数; $\max g_{ii}$ ——基于单倍法的斑块类型*i*像元之间的最大节点数; p_i ——景观中斑块类型*i*的面积比重,单位为%。当统一类型的斑块最大化的分散时, $AI=0$,当整个景观仅由一个类型组成时, $AI=100$ 。

2.2.2 景观优势度 景观优势度采用香农均匀性指数,是测度土地利用结构中一种或少数几种土地类型占据支配地位的程度^[20],其计算公式为:

$$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^m (p_i \cdot \ln p_i)}{\ln m} \quad (2)$$

式中:SHEI——优势度; m ——土地类型数目; p_i ——第*i*类土地面积占土地总面积的比重。值越大,表示土地结构受一种或少数几种土地类型支配程度越大。

2.2.3 景观分离度 分离度反映区域中同一种土地类型的不同斑块个体分布情况,在一定程度上反映了人类活动强度对景观结构的影响^[19],计算公式为:

$$DIVISION = \left[1 - \sum_{i=1}^m \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中:DIVISION——某一景观类型分离度; a_{ij} ——斑块*ij*的面积; A ——土地总面积。值越大土地类型的斑块分布越分散。

2.2.4 景观蔓延度 景观蔓延度描述景观中不同斑

块类型的团聚程度或延展趋势,是反映景观格局的最重要指数之一^[21],计算公式如下:

$$\text{CONTAG} = \left[\frac{1 + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m [p_i(g_{ik} / \sum_{k=1}^m g_{ik})]}{[\ln p_i(g_{ik} / \sum_{k=1}^m g_{ik})]} \right] \times 100 \quad (4)$$

式中:CONTAG——景观蔓延度指数; g_{ik} ——斑块类型 i 与 k 相邻斑块数目。一般来说,较大,表明景观中优势斑块类型形成了良好的连接;反之,则表明景观具有多种要素的散布格局,景观破碎化程度较高。

2.2.5 多样性指数 多样性指数是对土地利用类型丰富程度和均匀程度的综合描述^[20],计算公式为:

$$\text{SHDI} = - \sum_{i=1}^n (p_i \cdot \ln p_i) \quad (5)$$

式中:SHDI——土地利用多样性指数;值越大,表示生态景观的多样性越丰富。

2.2.6 土地利用空间结构分维数的计算 曼德尔布罗特(Mandelbrot)^[22]在研究动物脑褶分形结构时提出表面积 $s(r)$ 与体积 $V(r)$ 的分形关系:

$$s(r)^{1/D} \sim V(r)^{1/3} \quad (6)$$

式中: $s(r)$ ——表面积; $V(r)$ ——体积; r ——度量尺度; D ——分形维数,即分维值。董连科,在此公式基础上,运用物理量纲分析方法,推导得出了适用于 n 维欧氏空间的分维数公式。其中可以表达二维欧氏空间面积与周长的分维数公式为:

$$P(r)^{1/D} = k \cdot r^{1-D/D} \cdot A(r)^{1/2} \quad (7)$$

式中: $P(r)$ ——周长; $A(r)$ ——面积; k ——常数;对测量得到的一系列斑块的面积与周长做对数变换得到^[11]:

$$\ln P(r) = \frac{D}{2} \ln A(r) + C \quad (8)$$

分维数 D 值表征某种土地利用类型边界的曲折性,它的大小反映了该土地利用类型的复杂性。分维数 D 取值在 $1 \sim 2$, D 值越大,表明该土地利用类型的结构越复杂,反之亦然。当 $D = 1.5$ 时表示该土地类型处于一种类似于布朗运动的随机状态,即最不稳定状,根据此原理,徐建华等^[23]定义了土地利用稳定性指数,计算公式如下:

$$S_{sk} = |1.50 - D| \quad (9)$$

式中: S_{sk} ——土地利用类型的稳定性指数, S_{sk} 取值范围为 $0 \sim 0.5$,值越大,表明该土地利用类型越稳定,反义亦然。

3 结果与分析

3.1 土地利用类型的总体特征

在一个特定的区域中,不同的土地利用类型斑块交错分布,有机结合在一起,形成了一个土地镶嵌体^[11]。

利用 ArcGIS 软件对环梵净山旅游经济区各种土地利用类型进行统计,计算出土地斑块总数为 271 643 个,总面积为 6 705.30 km²。其中林地斑块面积最大为 3 844 km²,比重为 57.34%,其次为耕地面积为 1 927.89 km²,比重为 28.75%,第三为未利用地,面积为 688.19 km²,比重为 10.26%,第四为建设用地,面积为 156.27 km²,比重为 2.33%,草地、水域比例较小,具体见表 1。按景观生态学的基质—斑块—廊道的模式,如果某种景观要素类型在景观中出现面积最大,在空间上具有高度连续性和在景观功能上起着重要作用则可视为基础^[19]。因此,在环梵净山旅游经济区土地利用类型从景观生态尺度上来说,是以林地为基础,耕地、建设用地、草地、未利用地为斑块镶嵌结构,并且以水体和道路为线状廊道的景观结构模式。

表 1 环梵净山经济旅游区土地利用类型的总体特征

土地类型	斑块 数目/个	斑块 面积/km ²	平均斑块 面积/km ²	斑块面积 比重/%
建设用地	24247	156.27	0.02	2.33%
耕地	159360	1927.89	0.04	28.75%
林地	59455	3844.50	0.25	57.34%
草地	216	46.86	0.51	0.70%
水域	1584	41.60	0.08	0.62%
未利用地	26781	688.19	0.09	10.26%
总计	271643	6705.30	0.02	100

3.2 土地利用景观指数

根据上文计算公式,运用 Fragstats 4.2 软件计算环梵净山旅游经济区土地利用景观水平尺度的类型指数,见表 2,根据计算,土地利用聚集度指数(AI)为 82.33%,优势度指数(SHEI)为 0.59,分离度指数(DIVISION)为 0.87,蔓延度指数(CONTAG)为 53.88,多样性指数(SHDI)为 1.06。环梵净山旅游经济区林地和耕地面积占比例较大,而且斑块高度连接,使得聚集度指数和蔓延度指数表现出较高值,同时,以林地为基础的景观结构模式中,林地景观占有一定的支配地位,所以优势度指数为 0.59,景观多样性程度不高。从分离度指数值可知,在区域内虽然存在林地斑块高度连接,但是其他地类在空间上,分散分布,而且斑块破碎。

表 2 环梵净山经济旅游区土地利用景观指数

AI	SHEI	DIVISION	CONTAG	SHDI
82.33%	0.59	0.87	53.88	1.06

3.3 土地利用类型分形与稳定性

基于 ArcGIS 软件,统计出环梵净山旅游经济区不同土地利用类型斑块的周长(p)和面积(A),同时运用 Origin 软件,分别绘制出不同地类图斑的周长—面积的双对数散点图,并进行线性拟合,最后计

算得出每个地类的分维值和稳定性指数,见表 3。

从表 3 可以得出环梵净山旅游经济区的各个土地利用类型都存在分形特征,其中建设用地分维值为1.412 4,耕地为 1.426 5,林地为 1.350 4,草地为 1.325 4,水域为 1.774 6,未利用为 1.379 3。分维值最大为水域,最小为草地。这充分表明水体的空间分布结构最为复杂,而草地呈现出较为规则的空间形状,空间镶嵌结构比较简单。建设用地和耕地两者的分维值最接近随机运动状态值 1.5,说明建设用地和耕地在这 6 种土地利用类型中最不稳定,潜在的变化趋势最大。表 3 中 S_k 反映不同土地利用类型的稳定程度,其值越大,表明该土地利用类型越稳定,反之,则表明该土地利用类型稳定性越差,由表 3 可知,环梵净山旅游经济区的建设用地稳定性指数(S_k)值为 0.087 6,耕地稳定性指数值为 0.073 5,林地稳定性指数值为 0.149 6,草地稳定性指数值为 0.174 6,水域稳定性指数值为 0.274 6,未利用地稳定性指数值为 0.120 7。稳定指数值最大为水域,最小为耕地,说明水域的空间分布结构最为稳定,而耕地的空间结构最不稳定。环梵净山旅游经济区各地类稳定性指数普遍较低,表明该区域的土地利用空间结构的稳定总体水平不高,这也反映了山区生态系统的脆弱性。

综上所述,土地利用类型的分维值和稳定性指数反映了土地利用类型的空间分布状态,环梵净山旅游经济区受到地形因子的限制,图斑较破碎。随着经济发展水平的提高,城乡建设用地需求增加,规划尚未得到人们足够的重视,建设用地扩张较不合理,处在农村居民点和城镇周边的耕地遭受侵占,使得建设用地和耕地空间结构更加复杂,同时也趋于不稳定状态。林地在该区域中起到基质的作用,总体上形状较为简单,但由于地形复杂,景观相互交错,也表现出低稳定状态,易受到人类活动的干扰。水域用地的空间形态虽然不规则,但较少开发,稳定性较高。草地和未利用地在该区域属较难开发的土地,受人类活动干扰较少,空间形状较为规则,但受整体生态系统的影响,稳定性指数值也较低。因此,在区域经济发展过程中,要注意生态系统脆弱性,避免引发生态问题。

表 3 不同土地利用斑块周长—面积双对数线性拟合方程、分维值及稳定性指数

地类名称	方程式	R^2	D	S_k
建设用地	$y=1.416x-0.006$	0.914	1.4124	0.0876
耕地	$y=1.402x-0.051$	0.922	1.4265	0.0735
林地	$y=1.481x-0.463$	0.940	1.3504	0.1496
草地	$y=1.509x-0.423$	0.993	1.3254	0.1746
水域	$y=1.127x-0.462$	0.089	1.7746	0.2746
未利用地	$y=1.45x-0.266$	0.919	1.3793	0.1207

4 结 论

(1) 环梵净山旅游经济区各土地利用类型都具有分形特征,各土地利用类型分维数 D 值为 1.325 4~1.774 6。

(2) 环梵净山旅游经济区建设用地和耕地受人类活动影响最大,但受地形因素的影响,土地利用形态没有林地、草地和未利用简单,而且稳定性较差。

(3) 环梵净山旅游经济区各地类稳定性指数普遍较低,说明土地利用空间结构的稳定性总体水平不高,这也反映了山区生态系统的脆弱性。经过上述分析,科学揭示了土地利用类型空间结构的复杂程度和不规则程度,为该区土地利用决策提供了一定的理论依据和决策参考,但本研究仅仅对该区域 2009 年的土地利用现状数据进行分形描述,缺乏长时间序列的土地利用分形演变特征的分析。随着土地利用现状调查数据的增多,在今后的研究中,可做长时间序列分形分析以及空间演变规律的研究,从而为该区域提供更为有益的理论 and 实践参考。

参考文献:

[1] Tovar C, Seijmonsbergen A C, Duivenvoorden J F. Monitoring land use and land cover change in mountain regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes[J]. Landscape and Urban Planning, 2013,112:40-49.

[2] Li Y, Zhu X, Sun X, et al. Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: a case study of Lianyungang, China[J]. Landscape and urban Planning, 2010,94(3):218-227.

[3] Yu W, Zang S, Wu C, et al. Analyzing and modeling land use land cover change (LUCC) in the Daqing City, China[J]. Applied Geography, 2011,31(2):600-608.

[4] Aldwaik S Z, Pontius R G. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition[J]. Landscape and Urban Planning, 2012,106(1):103-114.

[5] Zhao R, Chen Y, Shi P, et al. Land use and land cover change and driving mechanism in the arid inland river basin: a case study of Tarim River, Xinjiang, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013,68(2):591-604.

[6] Wang J, Chen Y, Shao X, et al. Land-use changes and policy dimension driving forces in China: present, trend and future[J]. Land Use Policy, 2012,29(4):737-749.

[7] Klein I, Gessner U, Kuenzer C. Regional land cover mapping and change detection in Central Asia using MODIS time-series [J]. Applied Geography, 2012,35(1):219-234.

- [7] Müller M, Alewell C, Hagedorn F. Effective retention of litter-derived dissolved organic carbon in organic layers [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1066-1074.
- [8] Mikhailova E A, Bryant R B, DeGloria S D, et al. Modelling soil organic matter dynamics after conversion of native grassland to long-term continuous fallow using the Century model [J]. *Ecol. Modelling*, 2000, 132(3): 247-257.
- [9] Huang Y H, Li Y L, Xiao Y, et al. Controls of litter quality on the carbon sink in soils through partitioning the products of decomposing litter in a forest succession series in South China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1170-1177.
- [10] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 52-60.
- [11] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under *Shorea robusta* in lateritic region [J]. *Indian Journal of Forestry*, 1995, 18(2): 144-152.
- [12] Wright A L, Hons F M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 141-147.
- [13] 杨奇勇, 杨劲松. 不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 100-104.
- [14] 王淑英, 路苹, 王建立, 等. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮空间变异特征: 以北京市平谷区为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4957-4964.
- [15] 王库. 基于地理权重回归模型的土壤有机质空间预测[J]. *土壤通报*, 2013, 44(1): 21-28.
- [16] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 15-22.
- [17] 刘世梁, 刘琦, 王聪, 等. 基于地理加权回归的漫湾库区景观破碎化及影响因子分析[J]. *地理科学*, 2014, 32(7): 856-862.
- [18] 李艳红, 姜黎, 佟林. 新疆艾比湖流域生态环境空间分异特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11): 59-62.
- [19] 吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 585-589.
- [20] 张辉国, 王合玲. 艾比湖流域土壤有机质垂直空间变异特征[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 77-81.
- [21] 陈蜀江, 侯平, 李文华, 等. 新疆艾比湖湿地自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006.

(上接第 223 页)

- [8] Fan X, Ma Z, Yang Q, et al. Land use/land cover changes and regional climate over the Loess Plateau during 2001—2009. Part I: observational evidence[J]. *Climatic Change*, 2015, 129(3/4): 427-440.
- [9] 曾辉, 邵楠, 郭庆华. 珠江三角洲东部常平地区景观异质性研究[J]. *地理学报*, 1999, 54(3): 255-262.
- [10] 田义超, 任志远. 基于分形理论的黄土丘陵区土地利用研究: 以延安市宝塔区为例[J]. *地域研究与开发*, 2011, 30(6): 121-125.
- [11] 张荣天. 宁镇扬丘陵区土地利用空间结构的分形研究: 以镇江市为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 98-10.
- [12] 李昭阳, 汤洁, 孙平安, 等. 松嫩平原西南部土地利用动态变化的分形研究[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(2): 250-258.
- [13] 杨洋, 毕如田. 黄土高原典型地貌类型的土地利用分形特征[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(1): 101-104.
- [14] 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(2): 283-290.
- [15] 郅瑞卿, 刘富民. 基于分形理论的土地利用景观格局变化研究: 以镇赉县镇赉镇为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(2): 217-222.
- [16] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. CLUE-S 模型对村镇土地利用变化的模拟与精度评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(2): 174-180.
- [17] 杨海龙, 李迪强, 朵海瑞, 等. 梵净山国家级自然保护区植被分布与黔金丝猴生境选择[J]. *林业科学研究*, 2010(3): 393-398.
- [18] 邱雪超. 山岳型旅游景区创新性产品开发研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2011.
- [19] 姚慧. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [20] 岳文泽, 金炯. 西北半干旱区城郊土地利用结构与分形模型研究: 以兰州市西固区为例[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 249-256.
- [21] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 251-256.
- [22] Mandelbrot B B, Wheeler J A. The Fractal Geometry of Nature[J]. *American Journal of Physics*, 1983, 51(3): 286-287.
- [23] 徐建华, 艾南山. 西北干旱区景观要素镶嵌结构的分形研究: 以黑河流域为例[J]. *干旱区研究*, 2001, 18(1): 35-39.