

# 基于 GIS 和分形理论的土地利用空间格局分析——以闽侯县为例

吴涟敏<sup>1</sup>, 廖善刚<sup>1,2</sup>

1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007
2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

**摘要:** 以闽侯县 1994 年、2004 年和 2015 年三期遥感影像为数据源, 在 RS、GIS 和统计分析工具的支持下, 运用分形理论研究时间序列上土地利用类型形态的复杂度与结构的稳定度, 分析土地利用空间格局的变化, 从而阐述不同土地利用类型的空间分布规律。结果表明: (1) 研究期间内闽侯县的土地利用类型形态有了很大的变化, 林地、耕地和未利用地面积大幅度减少, 建设用地面积持续增加, 水域面积变化不大; (2) 整体分形维数保持下降趋势, 从 1994 年的 1.3504 降到 2015 年的 1.3333, 说明空间格局总体向简单化、稳定化方向发展; (3) 闽侯县各主要地类的分形维数和稳定性指数变化特点存在较大差异, 耕地、林地和未利用地的分形维数持续下降, 土地利用类型形态趋向规则; 水域的分形维数先减后增, 结构趋向稳定; 建设用地的分形维数先增后减, 空间结构整体趋于稳定, 布局趋向合理化。土地利用的复杂性和稳定性受到人为因素的影响强烈, 通过对土地利用空间格局演变的研究, 可以为政府协调水土开发、区域土地合理利用以及优化土地利用结构提供支持。

**关键词:** 土地利用; 分形理论; 分形维数; 稳定性指数; 闽侯县

## Spatial pattern analysis of land use in Minhou County, Fujian Province of China on the basis of GIS and fractal theory

WU Lianmin<sup>1</sup>, LIAO Shangang<sup>1,2</sup>

1. College of Geographic Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China
2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

**Abstract: Background, aim, and scope** Fractal theory can well reveal the complexity and stability of land use pattern evolution, but so far, no one has published land use change research in Minhou County based on fractal theory. Therefore, this paper takes Minhou County of Fujian Province as the research area, basing on remote sensing and GIS technology, analyzes the land use structure and fractal dynamics in 1994, 2004 and 2015, so as to provide a basis for the reasonable land use planning of Minhou County in the future. **Materials and methods** In

收稿日期: 2018-01-23; 录用日期: 2018-04-30; 网络出版: 2018-05-18

Received Date: 2018-01-23; Accepted Date: 2018-04-30; Online first: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371145); 福建省公益类优先领域重点项目 (2018R1101)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41371145); Key Projects of Priority Areas for Public Welfare in Fujian Province (2018R1101)

通信作者: 廖善刚, E-mail: sgliao22@163.com

Corresponding Author: LIAO Shangang, E-mail: sgliao22@163.com

引用格式: 吴涟敏, 廖善刚. 2019. 基于 GIS 和分形理论的土地利用空间格局分析——以闽侯县为例 [J]. 地球环境学报, 10(2): 156–165.

Citation: Wu L M, Liao S G. 2019. Spatial pattern analysis of land use in Minhou County, Fujian Province of China on the basis of GIS and fractal theory [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(2): 156–165.

this study, three Landsat series of remote sensing images in Minhou County in 1994, 2004 and 2015 were used as data sources. The ENVI 5.1 software was used to interpret the land use types in the study area. ArcGIS 10.1 software was then used to calculate the circumference and area. Finally, the fractal formula is used to calculate the fractal dimension and stability index of land use types. **Results** The results showed that: (1) the land use types in Minhou County changed greatly during the study period, the area of forest land, cultivated land and unutilized land decreased greatly, the area of construction land continued to increase, and the area of water area changed little. (2) The overall fractal dimension keeps decreasing from 1.3504 in 1994 to 1.3333 in 2015, which shows that the spatial pattern is generally simplified and stabilized. (3) The variation characteristics of fractal dimension and stability index of the main landforms in Minhou County are quite different. The fractal dimension of cultivated land, forest land and unutilized land continued to decline, and the shape of land use tended to be regular. The fractal dimension of water area decreased first and then increased, and the structure tended to be stable. The fractal dimension of construction land increased first and then decreased, the overall spatial structure tends to be stable, the layout tends to rationalize. **Discussion** The complexity and stability of the spatial distribution of land use in different places in Minhou are influenced and interfered by human activities to a great extent. Through the study of the spatial pattern of land use change, it is feasible for the government to coordinate water and soil development, optimize land use structure to provide support. **Conclusions** The application of fractal theory in the study of urban land use spatial pattern change can well make up for the deficiency of quantitative argumentation in the past urban spatial pattern research and has high practical value. **Recommendations and perspectives** The fractal theory can quantitatively analyze the change of the spatial pattern of the soil utilization and provide a good reference for the dynamic assessment of land use in the extended urban periphery.

**Key words:** land use; fractal theory; fractal dimension; stability index; Minhou County

分形 (fractal) 概念是法国数学家曼德尔布罗特 (Mandelbrot, 1982) 于 20 世纪 70 年代正式提出的, 是没有特征长度但具有某种意义下的自相似图形和结构的总称 (Goodchild, 1980; Feder, 1988; 杨凤海等, 2016)。分形理论是能对不规则的“形”的复杂程度给出定量度量的非线性数学理论。与进行图斑数量、形状、面积及其构成等方面分析的传统欧氏几何相比, 分形理论更适合描述大自然中复杂的真实事物 (张丽等, 2008), 为开放复杂的地学系统在时间序列上进行分形特征的研究、预测提供了可能。土地利用是人类活动与自然环境双重作用的产物, 其在时间、空间上的演变均存在着不连续、间断甚至跳跃性的特点 (宋戈和王盼盼, 2017)。由于多重环境因子的共同作用, 不同土地利用类型斑块相互镶嵌并在空间上不断扩张与收缩, 其边界形态及变化特征直接反映了土地利用时空结构的内在规律及演变趋势 (李秀彬, 1996; 刘新卫等, 2004; Quan et al, 2006; 黎励等, 2014)。因此将分形理论应用于土地利用空间格局特征描述中可以得到一种更加科学的综合描述土地利用结构及其变化的定量指

标 (李义玲等, 2008)。

国内有不少学者利用分形理论对土地利用空间格局进行了研究, 其内容主要涉及对土地利用分维值、土地利用结构分形研究方法、土地结构及其动态变化的分形描述、区域景观结构的分形模型和土地空间分形结构的尺度转换特征等方面的描述。张晶等 (2013) 以苏州市 1 : 10 万土地利用数据为例, 通过粒度与分维值之间的关系, 构建栅格数据分维值、推算矢量数据分维值的可能性, 并讨论其精度的影响因素; 卢德彬等 (2016) 通过对景观格局指数、土地类型分形维值和不稳定指数的计算, 揭示了铜仁市环梵净山旅游经济区的土地利用空间结构特征; 瓦哈甫·哈力克等 (2011) 基于分形理论和 RS、GIS 技术对且末绿洲土地利用的分维数进行分析, 探讨土地利用类型结构变化的分维数及与复杂性、稳定性的关系, 深入揭示研究区土地利用变化的内部机制; 彭文君和舒英格 (2018) 选取景观生态安全指数、景观接近度指数、景观类型斑块破碎度、景观类型边界破碎度、景观类型斑块优势度指数、景观分离度指数、景观脆弱度指数等 7 个景观指

数构建喀斯特山区耕地景观生态安全评价模型, 探讨喀斯特山区耕地生态环境的变化状况; 朱晓华 (2007) 根据不同尺度的慈溪市与贵州省土地利用数据, 分析了土地空间分形结构尺度转换特征。分形理论已经在地理学领域得到了广泛的应用, 为土地利用研究的创新提供了新的理论支撑与机遇 (张丽等, 2008)。

闽侯县呈月牙形拱卫省城福州, 是福州西部的“后花园”。改革开放以来, 在福州市城市化进程的推动下, 城市空间快速扩展, 对闽侯县土地利用格局的演化产生了很大的影响。但是到目前为止, 闽侯县基于分形理论的土地利用变化研究尚未见报道, 因此本文在 RS、GIS 的基础上运用分形理论对闽侯县土地利用空间格局变化进行定量分析, 以探究城市外围扩展区域的土地利用动态变化情况, 为区域土地资源的合理利用以及区域景观格局的持续发展提供参考。

## 1 区域概况

闽侯县是福建省福州市下辖县, 位于福建省东部, 闽江下游两岸 (图 1), 北纬  $25^{\circ}47'—26^{\circ}37'$ , 东经  $118^{\circ}51'—119^{\circ}25'$ , 总面积 2136 平方公里。具有南亚热带气候特征, 全县多年平均气温  $15.9—19.9^{\circ}\text{C}$ , 多年平均降水量  $1258.9—2152.6\text{ mm}$ , 河流属闽江水系, 县域内河网密布, 水资源丰富。闽侯县地形以中山为主, 兼有平原、丘陵、低山和盆地, 中山、低山共有面积 223.9 万亩; 高丘、低丘总面积为 37.84 万亩; 台地平原总面积为 58.59 万亩, 占土地总面积的 18.3%; 地貌复杂, 自然植被多为次生林。闽侯县距福州市中心 15 公里, 为福州市城市化发展的西部、西南部边缘扩展地带, 经济和社会发展深受省城福州的辐射影响, 2015 年 GDP 增至 438.73 亿元。随着经济的发展, 城市建设面积大幅扩展, 但是土地类型还是以林地、耕地为主。

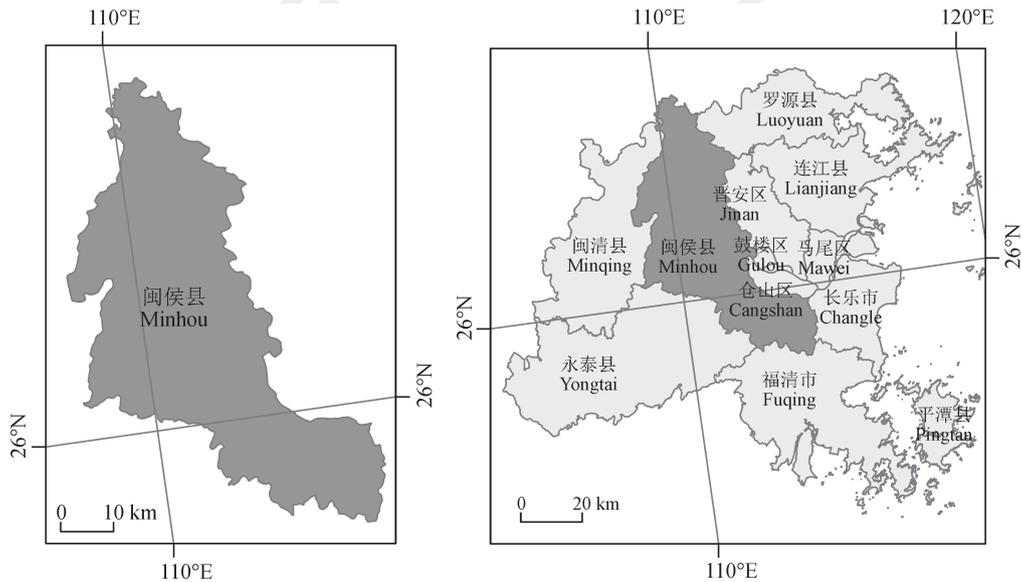


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

## 2 数据处理

本次研究以空间分辨率  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  覆盖闽侯县的 1994 年、2004 年的 Landsat5 TM 遥感影像和 2015 年的 Landsat8 OLI 遥感影像为主要数据源, 遥感影像均来自于中科院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>)。

结合各卫星数据波段情况, 使 Landsat5 影像采用 542 波段组合, Landsat8 影像采用 652 波段组合进行假彩色合成。根据闽侯县缺乏草地的实际, 并参照全国土地利用现状分类标准 (GB/T 21010—2015), 对土地利用类型进行重新命名、归类, 得到耕地、林地、建设用地、未利用地和水域 5 类一级地类 (表 1)。在 ENVI 5.1 软件下, 对待

解译影像进行几何校正、辐射定标、影像裁剪等预处理。采用监督分类的支持向量机法对影像分离性 > 80% 的样本进行分类, 运用 majority 分析法做小斑块去除处理, 然后以 Google earth 和闽侯县多年土地利用现状图、地形图为参考, 对数据进行校正。最后通过混淆矩阵法对土地利用分类结果进行精度验证, 结果表明三期影像的分类精度均大于 0.85, 满足了研究精度的要求。

表 1 土地利用类型划分标准  
Tab.1 Criteria for land use types

土地类别 Land category	特征描述 Characterization
耕地 Arable land	包含旱地、灌溉水田、水浇地 Contains dry land, irrigated paddy fields, irrigated land
林地 Woodland	包含有林地、灌木林、疏林地、迹地、园地等 Contains woodland, thickets, traces, orchards, etc.
建设用地 Construction land	包含城镇用地、城镇村及工矿用地、交通运输用地等 Contains urban land, town village and mining land, land for transportation, etc.
未利用地 Unused land	包含荒草地、盐碱地、沙地、裸岩石砾地等 Contains grassland, saline, sandy, bare rocky gravel, etc.
水域 Waters	包含湖泊、水库、坑塘、滩涂等 Contains lakes, reservoirs, pit ponds, beach, etc.

### 3 研究方法

分形维数是对系统或结构的自相似特征进行表达的定量指标之一, 它是以各土地利用地类的封闭多边形斑块为计算对象, 对其核心面积大小及其边界的曲折性进行定量描述 (徐建华, 2001)。对于任何一种用地类型斑块形态, 如果以  $r$  为尺度去测量其周长  $P(r)$  和面积  $A(r)$  (傅建春, 2015), 则分形模型可表示为:

$$\ln A(r) = 2D \ln P(r) + C \quad (1)$$

式中:  $D$  表示分形维数;  $A(r)$  表示斑块面积;  $P(r)$  表示斑块周长;  $r$  表示空间测量尺度;  $C$  表示常数。本研究在计算分形维数的时候, 是直接通过

研究区域内土地利用类型系列斑块的周长、面积数据作双对数回归分析拟合, 建立形如公式 (1) 的回归模型, 得到回归系数  $2/D$ , 进而求得分形维数  $D$  的值。 $D$  的理论值范围为  $[1, 2]$ ,  $D$  值越大, 表示空间上的镶嵌结构越复杂, 地类斑块的自我相似性越弱, 形状越无规律。分形维数  $D$  还可以反映某类用地的稳定性, 当  $D=1.5$  时, 表示该类地类斑块处于一种类似于布朗运动的最不稳定状态;  $D$  值越接近 1.5, 表示该类地类斑块越不稳定。

此外利用稳定性指数  $S$ , 可以定量地描述一个地区的土地利用变化速率, 其计算公式为:

$$S = |1.5 - D| \quad (2)$$

式中:  $S$  的理论值为  $[0, 0.5]$ , 其值越大, 表示该用地类型越偏离随机状态, 越稳定; 其值越小越不稳定。 $S$  值对土地利用空间结构潜在运动趋势具有一定的指示意义。

本文采用上述公式计算闽侯县 1994 年、2004 年和 2015 年三期影像各地类的分形维数和稳定性指数。首先根据研究区各土地利用类型的周长 ( $\ln P$ )、面积 ( $\ln A$ ) 的定量关系, 在公式 (1) 的基础上进行回归分析, 求得分形维数  $D$ , 然后结合公式 (2) 求得稳定性指数  $S$ 。最后根据所得数据以及实地考察结果, 对闽侯县近 20 年的土地利用空间格局变化进行分析。

## 4 结果分析

利用 ArcGIS 10.1 软件, 精确计算出各土地利用类型的面积、周长、斑块数、平均斑块面积等参数 (表 2)。根据公式 (1), 以面积自然对数为  $Y$  轴, 周长自然对数为  $X$  轴做面积—周长散点图。利用 SPSS 19 对处理过的数据建立线性回归模型, 拟合出关于周长—面积的关系式及  $R^2$  检验值。最后, 通过此周长—面积关系式的斜率  $2/D$ , 得到分形维数  $D$  的值。由图 2—6 可见: 闽侯县各个地类的回归拟合方程的拟合效果均很好, 相关系数均达到 0.96 以上, 说明闽侯县各个地类的面积—周长存在着显著的线性相关关系, 分形维数具有一定的含义。

### 4.1 土地利用状况分析

1994—2015 年, 闽侯县的林地、耕地受人类活动影响较大, 面积上都大幅度减少, 分别减少了 7935.12  $\text{hm}^2$ 、6869.61  $\text{hm}^2$ , 但仍为全县最主要的土地类型 (表 2)。未利用地面积在研究期间持

续下降, 面积占比从 1.3% 下降至 0.9%, 面积变化幅度仅次于建设用地。建设用地在 1994—2015 年面积变化幅度最大且扩展面积最大, 面积扩增了 15932.70 hm<sup>2</sup>, 从 1994 年的位列第四的土地类

型上升成为 2015 年县域内的第三大用地类型, 占据全县 9.6% 的面积。水域面积在研究期间没有显著的变化, 约占研究区面积的 3.5%, 这与欧照铿 (2014) 的研究结论一致。

表 2 不同时期闽侯县土地利用状况  
Tab.2 Land use in Minhou County in different periods

地类 Land type	年份 Year	斑块数 / 个 Fig num of pots/ea	周长 Perimeter/km	面积 Area/hm <sup>2</sup>	平均斑块面积 Average patches area/hm <sup>2</sup>	面积占比 Area ratio/%
耕地 Arable land	1994	6102	9312.00	47681.28	7.81	22.4
	2004	4344	6905.22	44878.95	10.33	21.0
	2015	4489	6261.54	40811.67	9.09	19.1
林地 Woodland	1994	2045	8242.74	150410.79	73.55	70.5
	2004	946	5014.68	148082.13	156.54	69.4
	2015	980	4383.30	142475.67	145.38	66.8
建设用地 Construction land	1994	2699	1682.94	4626.18	1.71	2.2
	2004	4296	3318.84	11649.24	2.71	5.5
	2015	3294	3582.18	20558.88	6.24	9.6
未利用地 Unused land	1994	896	633.12	2783.07	3.11	1.3
	2004	733	517.56	2356.56	3.21	1.1
	2015	1112	593.94	1899.18	1.71	0.9
水域 Waters	1994	1176	1156.80	7734.06	6.58	3.6
	2004	766	811.02	6266.61	8.18	2.9
	2015	532	700.20	7482.42	14.06	3.5
合计 Total	1994	12918	21027.60	213235.38	16.51	100.0
	2004	11085	16567.32	213233.49	19.24	100.0
	2015	10407	15521.16	213227.82	20.49	100.0

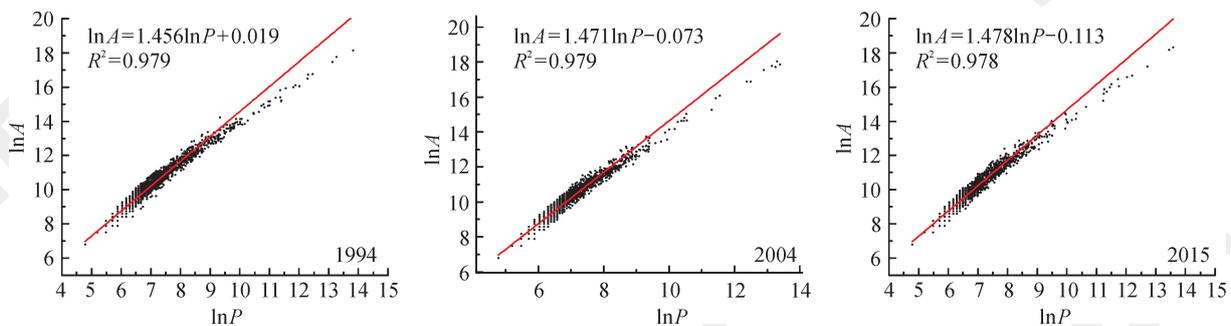


图 2 1994、2004、2015 年耕地面积—周长双对数散点图

Fig.2 Patch—area double logarithmic scatter plot of cultivated land in 1994, 2004, 2015

#### 4.2 闽侯县土地利用分形维数及稳定性动态

从 1994 年、2004 年和 2015 年闽侯县各土地利用斑块分形维数和稳定性指数看, 三个时期各土地类型的斑块形状分形特征各不相同, 总平均分形维数分别为 1.3504、1.3432 和 1.3333, 呈持续下降变化 (表 3、图 7 和图 8)。所有土地

利用类型的分形维数都小于 1.5, 稳定性指数在 0.12—0.25, 表明闽侯县内土地利用的异质性和复杂度在不断降低, 边界形状比较规则, 结构相对稳定。可见研究区土地利用类型受人为因素影响较大, 即基本上是人为参与下的土地利用类型。

1994 年、2004 年和 2015 年土地利用类型的平

均稳定性指数分别为 0.1496、0.1568 和 0.1667 (表 3)。总体上研究区的稳定性持续上升, 土地利用结构趋于稳定。但是各地类的稳定性指数差异较大, 1994 年最不稳定的地类是耕地, 最稳定的是未利用地, 稳定性指数分别为 0.1264、0.2237; 三期土地利用稳定性排序均为: 未利用地 > 林地 > 水域 > 建设用地 > 耕地。

### 4.3 各地类分形动态

#### 4.3.1 耕地

耕地面积仅次于林地, 在各地类中居第二位。市区附近的耕地在城市扩展的每个阶段都有大面积缩减, 研究期间内缩减了 6869.61 hm<sup>2</sup>。

1994—2015 年耕地的斑块数呈波动变化的趋势, 整体上收缩了 1613 个。耕地的分形维数在各地类中最大且逐年降低, 稳定性指数则呈相反变化趋势。说明耕地斑块形态趋于规则, 空间结构趋于稳定。主要原因是闽侯县土地利用呈现出明显的城镇化趋势, 耕地和林地大面积减少。同时, 大量农民涌进城市, 使得小户的农田趋于合并, 进行合作经营, 部分破碎化的耕地被整合, 使得破碎度降低。另一方面 2000 年以后, 在全国土地整治以及基本农田规范建设的政策背景下, 闽侯县为了方便大型机械农业发展, 开始对存量耕地的面积和边界进行科学化的改造和利用, 使得稳定性有所提升。

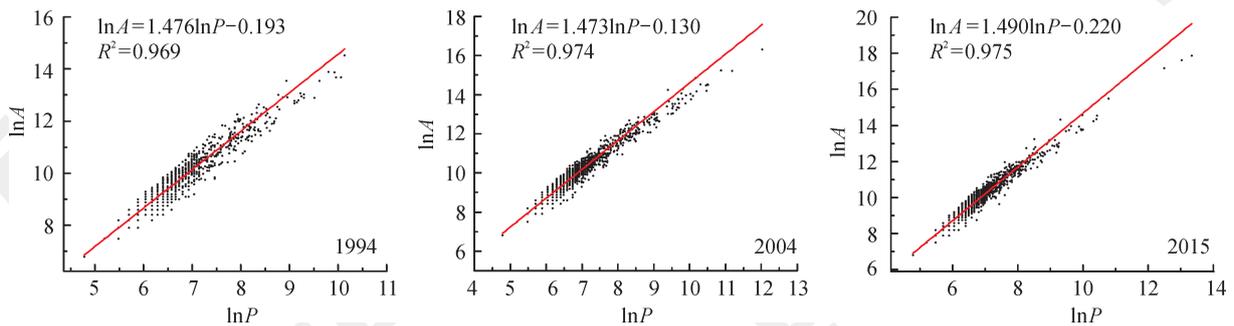


图3 1994、2004、2015年建设用地面积—周长双对数散点图

Fig.3 Patch—area double logarithmic scatter plot of construction land in 1994, 2004, 2015

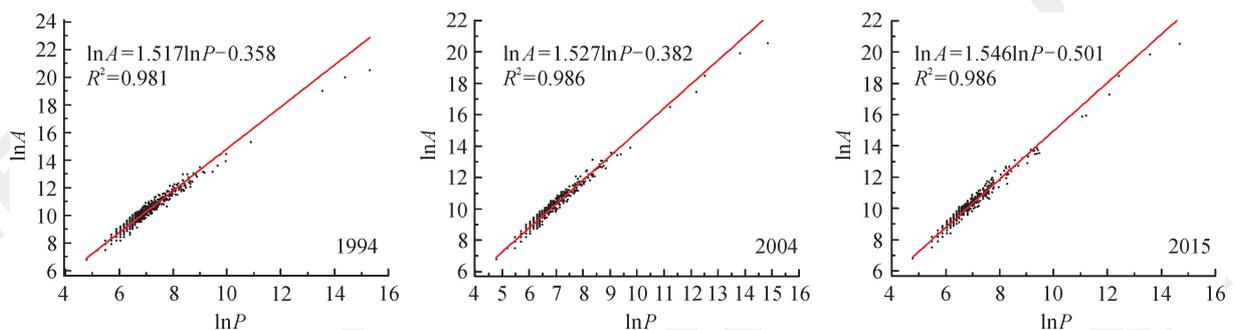


图4 1994、2004、2015年林地面积—周长双对数散点图

Fig.4 Patch—area double logarithmic scatter plot of woodland in 1994, 2004, 2015

#### 4.3.2 林地

在 1994—2015 年, 闽侯县内的林地发生了大面积的缩减, 但是林地的面积在此期间都占有总面积的 65% 以上, 是研究区内最主要的土地利用类型。林地在研究期间内分形维数持续降低, 从 1994 年的 1.3184 降到了 2015 年的 1.2937, 是分维值变化最明显的地类。这表明林地斑块形态

趋于规则, 空间结构趋于稳定。随着改革开放的不断深入, 县境内山地丘陵自然植被和人造林屡遭破坏, 大量林地转为工业用地和商业用地。虽然破坏严重, 但是林地并没有在快速的城市化进程当中衰退, 而是有所补给, 这很大程度上受益于政府退耕还林还草的政策, 政策实施后, 部分陡坡的植被得到了很好的恢复, 林地和草地连片

分布, 破碎度减少, 稳定性提高; 形状比较规则的耕地不断地转化为林地, 使得林地面积得到了补给, 边界趋于规整, 分形维数持续降低。

#### 4.3.3 建设用地

从表 2 中可以看出, 建设用地的面积变化最大且平均斑块面积在 1994 年、2004 年都是最小的, 仅有  $1.71 \text{ hm}^2$ 、 $2.71 \text{ hm}^2$ , 说明建设用地形态比较细碎, 密集的散布于整个区域, 以闽江两岸的平原及市区边缘地带为主。建设用地的分形维数值变化幅度仅次于耕地, 1994—2015 年呈波动变化的趋势, 从 1994 年的 1.3550 升高到 2004 年的 1.3578, 又在 2015 降低到 1.3423, 稳定性指数则

呈相反的趋势, 并且 2015 年稳定性水平高于 1994 年, 建设用地空间结构整体趋于稳定。从 1998 年开始, 为了满足上街大学城及其配套设施的用地需求, 先后拆迁了旗山脚下平原地区的 23 个行政村, 征地面积达到 21224 亩, 导致斑块形态趋于不规则, 空间上的镶嵌结构变得复杂。稳定性在 2004—2015 年有所提高, 主要是因为建设用地自我相似性强, 易受人类活动的影响, 其建设耗时耗力, 考虑其建设成本, 不会在短时间内拆除或改建。实际上, 随着城市化进程的推进, 城建用地布局趋向合理化, 扩建后的形态趋于规则, 所以建设用地的分形维数不会太高, 结构趋于稳定。

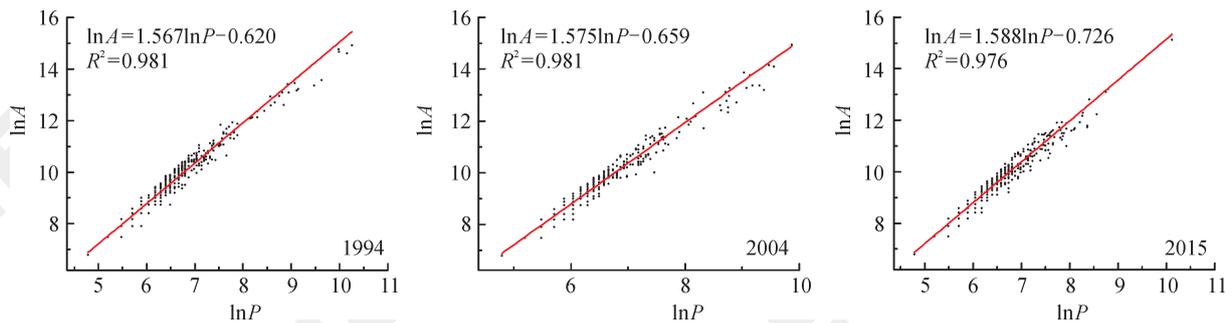


图 5 1994、2004、2015 年未利用地面积—周长双对数散点图

Fig.5 Patch—area double logarithmic scatter plot of unused land in 1994, 2004, 2015

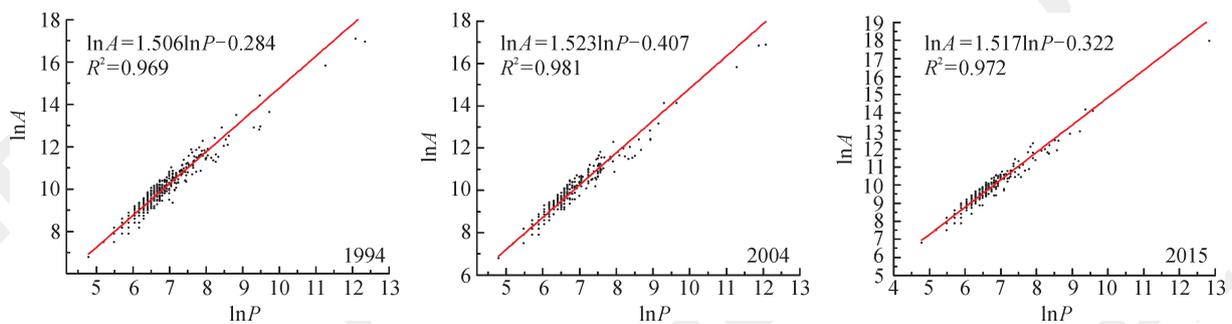


图 6 1994、2004、2015 年水域面积—周长双对数散点图

Fig.6 Patch—area double logarithmic scatter plot of water area in 1994, 2004, 2015

#### 4.3.4 未利用地

研究期间内闽侯县未利用地面积较少, 最高占地面积只有 1.3%, 且面积持续收缩, 在各地类中位列第五。整体上看未利用地的分形维数一直在各地类中保持最低, 相反的稳定性指数最高。时间序列上未利用地的分形维数持续下降, 稳定性指数则保持上升, 表明其用地斑块形态趋于规

则, 空间结构趋于稳定。随着闽侯城镇及交通用地空间的不断扩张, 未利用地不断地被开发利用转为建设用地, 受人为因素影响较大, 形态趋于规则, 空间结构趋于稳定。

#### 4.3.5 水域

闽侯县内水域面积比较稳定, 变化起伏比较小, 且在研究区内占地较少, 仅占 3.5%。

1994—2015 年水域分形维数先降低后升高, 稳定性指数呈相反趋势。1994—2004 年水域的斑块数大幅度减少, 平均斑块面积从 6.58 hm<sup>2</sup> 上升为 14.06 hm<sup>2</sup>, 表明水域用地多受人为干扰的影响, 形状规整, 故分形维数整体降低。水域的分形维数呈波动变化趋势, 一方面水域的面积变化受不

稳定的气候条件和径流补给的影响, 且水域的零星分布和闽江水系支流较多有关; 另一方面近年来闽侯县水产养殖, 农田水利设施的建设, 都使得 2004—2015 年闽侯县内水域面积逐渐升高, 斑块形态趋于不规则, 空间结构呈不断扩张的趋势。

表 3 三个时期各类土地的分形维数及稳定性指数  
Tab.3 The fractal dimension and stability index of different types of land in three periods

地类 Land type	年份 Year	模型 Model	判断系数 Judgment factor ( <i>R</i> <sup>2</sup> )	分形维数 Fractal dimension	稳定性指数 Stability index
林地 Woodland	1994	$\ln A = 1.517 \ln P - 0.358$	0.981	1.3184	0.1816
	2004	$\ln A = 1.527 \ln P - 0.382$	0.986	1.3098	0.1902
	2015	$\ln A = 1.546 \ln P - 0.501$	0.986	1.2937	0.2063
建设用地 Construction land	1994	$\ln A = 1.476 \ln P - 0.193$	0.969	1.3550	0.1450
	2004	$\ln A = 1.473 \ln P - 0.130$	0.974	1.3578	0.1422
	2015	$\ln A = 1.490 \ln P - 0.220$	0.975	1.3423	0.1577
水域 Waters	1994	$\ln A = 1.506 \ln P - 0.284$	0.969	1.3280	0.1720
	2004	$\ln A = 1.523 \ln P - 0.407$	0.981	1.3132	0.1868
	2015	$\ln A = 1.517 \ln P - 0.322$	0.972	1.3184	0.1816
未利用地 Unused land	1994	$\ln A = 1.567 \ln P - 0.620$	0.981	1.2763	0.2237
	2004	$\ln A = 1.575 \ln P - 0.659$	0.981	1.2698	0.2302
	2015	$\ln A = 1.588 \ln P - 0.726$	0.976	1.2594	0.2406
耕地 Arable land	1994	$\ln A = 1.456 \ln P + 0.019$	0.979	1.3736	0.1264
	2004	$\ln A = 1.471 \ln P - 0.073$	0.979	1.3596	0.1404
	2015	$\ln A = 1.478 \ln P - 0.113$	0.978	1.3532	0.1468
总地类 General category	1994	$\ln A = 1.481 \ln P - 0.156$	0.976	1.3504	0.1496
	2004	$\ln A = 1.489 \ln P - 0.197$	0.978	1.3432	0.1568
	2015	$\ln A = 1.500 \ln P - 0.248$	0.977	1.3333	0.1667

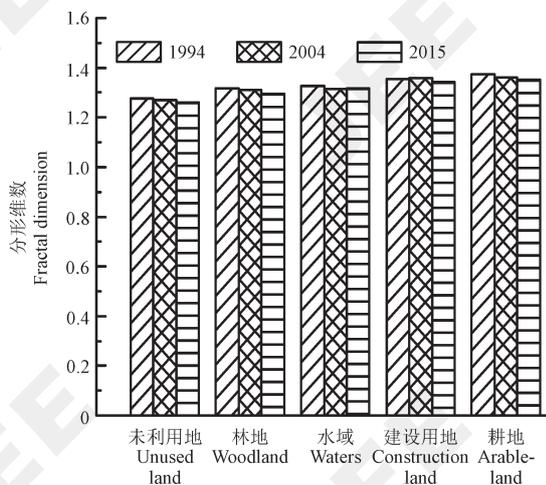


图 7 土地利用类型分形维数动态变化图

Fig.7 Dynamic change of fractal dimension of land use types

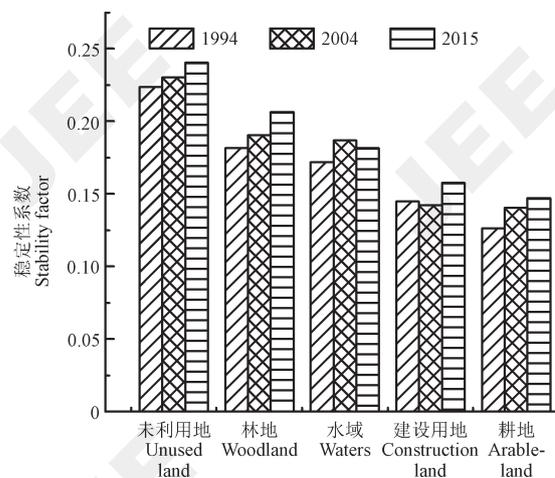


图 8 土地利用类型稳定性系数动态变化图

Fig.8 Dynamic change of stability coefficient of land use types

## 5 结论

分型理论可以很好地揭示土地利用格局演变的复杂性和稳定性特征(胡浩, 2012), 分形维数是反应边界复杂程度的指数, 其值越大, 土地斑块越复杂; 稳定性指数是反映土地利用状态的稳定程度的指标, 其值越大, 结构越稳定(郅瑞卿和刘富民, 2013)。本文在 RS 和 GIS 技术支持下, 对闽侯县 1994 年、2004 年和 2015 年三期土地利用空间格局进行分形研究, 结果表明:

(1) 从空间格局来看, 林地呈包围城市的趋势分布, 且林地和耕地一直占据总面积的主体面积。从分形维数、稳定性指数看, 各土地利用类型具有分形结构特征, 闽侯县土地利用空间格局在研究期间内变化较大, 整体的土地利用分形维数从 1994 年的 1.3504 持续降低到 2015 年的 1.3333, 说明空间格局总体向简单化方向发展, 空间结构趋于稳定。

(2) 研究期间, 各主要地类的分形维数和稳定性指数变化特点存在较大差异, 耕地、林地和未利用地的分形维数持续下降, 土地利用类型形态趋向规则, 结构趋向稳定, 并和人类活动的强度呈负相关; 水域的分形维数先减后增, 土地利用类型在空间上总体呈收缩趋势, 结构趋向稳定; 建设用地的分形维数先增后减, 土地利用类型形态总体趋向规则, 受人类影响较大, 布局趋向合理化。

(3) 闽侯县内林地、耕地分形维数变化最大, 今后发展应加强土地利用的规划引导, 不仅要贯彻退耕还林还草政策, 对分布于荒草地与林地过渡带的农用地进行退耕整治, 还要对条件适宜耕作且分布集中的农用地进行成片的整治, 以提高森林生态系统的连通度及农用地的结构稳定度。建设用地面积大幅增加, 稳定性下降, 应控制建设用地向周边耕地、林地、未利用地的无序扩张, 将发展的重心逐步转移到旧城的改造与城市更新, 促进当地土地利用朝着紧凑、集约、高效方向发展。

本文没有结合其他景观指标或者土地利用空间格局结构特征参数对土地利用空间格局变化进行对比分析, 仅利用分形维数和稳定性指数进行分析, 结果可能不够全面, 如何运用综合指标分析土地利用结构及其动态变化将是本研究后续探讨的一个重要方向。

## 参考文献

- 傅建春, 李 钢, 赵 华. 2015. 基于分形理论的徐州市城镇体系规模结构及空间分布研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 29(10): 25–30. [Fu J C, Li G, Zhao H. 2015. Scale structure and spatial distribution of urban systems based on fractal theory in Xuzhou [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 29(10): 25–30.]
- 胡 浩, 王士君, 南 颖, 等. 2012. 基于生态敏感性分析的环境友好型土地利用空间结构探析 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 44(3): 142–148. [Hu H, Wang S J, Nan Y, et al. 2012. Environment-friendly land-use spatial structure based on ecological sensitivity analysis [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 44(3): 142–148.]
- 黎 励, 毛蒋兴, 陆汝成. 2014. 边境地区土地利用时空格局的分形动态研究——以广西崇左市为例 [J]. *水土保持研究*, 21(5): 204–209. [Li L, Mao J X, Lu R C. 2014. Fractal dynamic research on spatiotemporal pattern of land use in border area — a case study of Chongzuo City, Guangxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 21(5): 204–209.]
- 李秀彬. 1996. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向 [J]. *地理学报*, 51(6): 553–558. [Li X B. 1996. A review of the international researches on land use/land cover change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 51(6): 553–558.]
- 李义玲, 乔 木, 杨小林, 等. 2008. 干旱区典型流域近 30 年土地利用/土地覆被变化的分形特征分析——以玛纳斯河流域为例 [J]. *干旱区地理*, 31(1): 75–81. [Li Y L, Qiao M, Yang X L, et al. 2008. Fractal characteristics of land use and land cover change in a watershed of arid zone in last 30 years: a case of the Manas River watershed [J]. *Arid Land Geography*, 31(1): 75–81.]
- 刘新卫, 陈百明, 史学正. 2004. 国内 LUCC 研究进展综述 [J]. *土壤*, 36(2): 132–135. [Liu X W, Chen B M, Shi X Z. 2004. A review of the research on land use and land cover change in China [J]. *Soils*, 36(2): 132–135.]
- 卢德彬, 禹 真, 毛婉柳, 等. 2016. 基于 GIS 和分形理论的山区土地利用空间结构研究 [J]. *水土保持研究*, 23(2): 220–223. [Lu D B, Yu Z, Mao W L, et al. 2016. Research on the spatial structure of the mountainous land use based on GIS and fractal theory [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(2): 220–223.]
- 欧照铿. 2014. Markov 约束下 ANN-CA 模型构建与闽侯

- 县土地利用模拟研究 [D]. 福州: 福建农林大学. [Ou Z K. 2014. Study on modeling and simulating of land use based on ANN-CA model under the constraints of Markov in Minhou County [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University.]
- 彭文君, 舒英格. 2018. 喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程 [J]. *生态学报*, 38(3): 852–865. [Peng W J, Shu Y G. 2018. Analysis of landscape ecological security and cultivated land evolution in the karst mountain area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 852–865.]
- 鄢瑞卿, 刘富民. 2013. 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*, 20(2): 217–222. [Qie R Q, Liu F M. 2013. Study on changes in landscape pattern of land use based on fractal theory — a case study of Zhenlai Town of Zhenlai County [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 20(2): 217–222.]
- 宋戈, 王盼盼. 2017. 松嫩高平原县域土地利用空间格局地形梯度特征分析——以巴彦县为例 [J]. *地理科学*, 37(8): 1218–1225. [Song G, Wang P P. 2017. Spatial pattern of land use along the terrain gradient of county in Songnen High Plain: a case study of Bayan County [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 37(8): 1218–1225.]
- 瓦哈甫·哈力克, 杨玲, 布佐热, 等. 2011. 基于分形理论的车尔臣河流域中下游土地利用动态变化 [J]. *干旱区资源与环境*, 25(9): 6–12. [Wahap-Halik, Yang L, Buzore, et al. 2011. The land use change of the middle and lower reaches of Qerchen River based on fractal theory [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(9): 6–12.]
- 徐建华, 艾南山, 金炯, 等. 2001. 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*, 18(1): 35–39. [Xu J H, Ai N S, Jin J, et al. 2001. A fractal study on the mosaic structure of the landscape of northwest China — taking the drainage area of Heihe River as an example [J]. *Arid Zone Research*, 18(1): 35–39.]
- 杨凤海, 程光大, 王盼盼, 等. 2016. 基于分形的宁安市土地利用变化及驱动力研究 [J]. *水土保持研究*, 23(2): 280–286. [Yang F H, Cheng G D, Wang P P, et al. 2016. Study on land use change and its driving forces in Ning'an City based on fractal theory [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(2): 280–286.]
- 张晶, 濮励杰, 朱明, 等. 2013. 矢量和栅格数据土地利用结构分维值比较——以苏州为例 [J]. *地理科学进展*, 32(6): 932–939. [Zhang J, Pu L J, Zhu M, et al. 2013. Comparison of land-use structure fractal dimension based on vector and raster data: a case study of Suzhou City [J]. *Progress in Geography*, 32(6): 932–939.]
- 张丽, 杨庆媛, 冯应斌. 2008. 基于分形理论的区域土地利用类型探讨——以重庆市沙坪坝区为例 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 30(8): 137–141. [Zhang L, Yang Q Y, Feng Y B. 2008. Discussion of regional land use types based on fractal theory — a case study of Shapingba District in Chongqing City [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 30(8): 137–141.]
- 朱晓华, 李加林, 杨秀春, 等. 2007. 土地空间分形结构的尺度转换特征 [J]. *地理科学*, 27(1): 58–62. [Zhu X H, Li J L, Yang X C, et al. 2007. Scaling character of spatial structure of land use [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 27(1): 58–62.]
- Feder J. 1988. *Fractals* [M]. New York and London: Plenum Press: 11–20.
- Goodchild M F. 1980. Fractals and the accuracy of geographical measures [J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 12(2): 85–98.
- Mandelbrot B B. 1982. *The fractal geometry of nature* [M]. New York: W H Freeman.
- Quan B, Chen J F, Qiu H L, et al. 2006. Spatial-temporal pattern and driving forces of land use changes in Xiamen [J]. *Pedosphere*, 16(4): 477–488.