地球环境学报
JEE
Journal of Earth Environment
Vol.9 No.5 | Oct. 2018
DOI: 10.7515/JEE182041
研究论文
ARTICLE

基于分形维数的长汀县土地利用动态变化

王敬哲[1]，陈志强[1,2]，陈志彪[1,2]
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：以福建省长汀县为研究区域，基于遥感和GIS技术的支持，对研究区2000年、2009年、2016年的土地利用结构及分形动态进行分析。研究表明：经过多年的治理工作，长汀县的土地覆被情况有了很大的改善，林地面积不断增加，裸地面积持续减少。各土地利用斑块形态具有明显的分形特征，2000—2009年，耕地、建设用地分维值呈增加趋势，空间形态趋于不规则；林地、裸地和水域分维值减少，空间形态趋于规则。2009—2016年，耕地、裸地和水域斑块分维值呈上升趋势，空间形态趋于不规则；而林地和建设用地斑块分维值趋于下降，空间形态趋于规则。总体上土地利用分维值仍有增大的趋向，土地斑块的稳定度趋于下降。土地利用的复杂性和稳定性受到人为因素影响强烈，合理协调人地关系，避免治理成效出现反复，仍然是水土流失区治理的关键。

关键词：土地利用；分形维数；稳定性指数；长汀

Dynamic change of land use in Changting County based on fractal dimension

WANG Jingzhe[1], CHEN Zhiqiang[1,2], CHEN Zhibiao[1,2]
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*** Taking Changting County of Fujian Province as the research area and the support of remote sensing and GIS technology, the land use structure and fractal dynamics of the study area in 2000, 2009 and 2016 were analyzed to provide the basis for future rational land use planning in Changting County. ***Materials and methods*** Based on the multi-temporal remote sensing images acquired by Landsat series satellites, this study uses ENVI 5.1 software to interpret the land use types of the study period and calculate the perimeter and area of each kind of patches. Finally, the fractal formula is used to calculate the land use types. ***Results*** The research shows that after many years of governance, the land cover in Changting County has been greatly improved, the area of forest land has been continuously increased, and the area of bare land has been continuously reduced. The fractal features of land use patches have obvious fractal characteristics. From 2000 to 2009, the fractal dimension values of cultivated land and construction land tended to increase, and the spatial

收稿日期：2018-04-08；**录用日期：**2018-07-04
Received Date: 2018-04-08; **Accepted Date:** 2018-07-04
基金项目：福建省自然科学基金项目（2017J01462）；福建省科技计划项目（2016Y0024）
Foundation Item: Fujian Natural Science Foundation (2017J01462); Fujian Science and Technology Program (2016Y0024)
通信作者：陈志强，E-mail: soiltuqiang061@163.com
Corresponding Author: CHEN Zhiqiang, E-mail: soiltuqiang061@163.com

引用格式：王敬哲，陈志强，陈志彪. 2018. 基于分形维数的长汀县土地利用动态变化 [J]. *地球环境学报*，9(5): 489−496.
Citation: Wang J Z, Chen Z Q, Chen Z B. 2018. Dynamic change of land use in Changting County based on fractal dimension [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(5): 489−496.

patterns tended to be irregular. The fractal dimension value of forest land, bare land and water area decreased and the spatial shape tended to rule. From 2009 to 2016, the fractal dimension values of cultivated land, bare land and water patch tended to increase, and their spatial forms tended to be irregular. However, the fractal dimension of forest land and construction land tended to decline, and the spatial morphology tended to be regular. In general, the fractal dimension of land use still tends to increase, and the stability of land patches tends to decline. ***Discussion*** The complexity and stability of land use is strongly influenced by man-made factors. It is still the key to harnessing the soil and water loss areas that reasonably coordinating the relationship between man and land and preventing the recurrence of governance achievements. ***Conclusions*** The use of fractal methods can better quantitatively express the morphological changes of land use. ***Recommendations and perspectives*** The fractal theory can be used to quantitatively express the dynamic changes of land use types from a new perspective and provide a well reference for the dynamic assessment of land use in soil erosion areas.

Key words: land use; fractal dimension; stability index; Changting

土地资源是人类生产生活重要的自然资源，在人类生产生活的影响下，土地资源时刻处于不断发展变化的过程中。土地资源的发展变化不仅表现在不同土地利用类型数量的增加与减少，同时也表现在土地利用形态、结构的变化等方面（林娜等，2013；武国胜等，2017）。分形理论的提出，最早源于美国数学家 Mandelbrot 在《Science》上发表的题为《英国的海岸线有多长？》的论文（张立峰等，2016）。自此以后，分形理论被诸多学科所应用。吕永钢和杨力（2010）通过研究血管网的分形问题为血管结构、血管病理研究探索了新的途径与方向。单立山等（2013）通过研究两种荒漠植物根系的分形特征，揭示了荒漠植物适应干旱贫瘠土壤环境的形态学原因。土地学科利用分形理论对描述复杂几何图形所具有的独特优势，逐渐将该理论应用到土地利用变化的研究中来（徐建华，2004）。传统的关于土地利用变化的研究主要采用动态度、转移矩阵、景观格局指数等数量指标，基于分形的土地利用变化研究能够弥补传统方法对于其在面积周长等结构属性统计以及景观指数、TOPSIS 等方法对土地利用结构表达的不足（刘瑞和朱道林，2010；杨凤海等，2016），从而更好地定量表达各土地利用类型的形态结构变化。

长久以来长汀县被视为南方水土流失最为严重的地区之一。自 20 世纪 40 年代起，长汀县便开展了多种形式的水土流失治理实践，但治理成效时有反复。从 2000 年开始，福建省政府将长汀县水土流失综合治理作为民办实事项目重点，斥巨资对水土流失地区持续攻坚治理，并取得很好的效果（刘永泉和钟炳林，2001；陈志彪等，2013；武国胜等，2017）。对于这一时期长汀县土地利用变化的研究，前人主要是采用植被覆盖度和转移矩阵等方法。杨婷婷等（2016）运用遥感技术提取长汀县 2000—2014 年的归一化植被指数（NDVI），对该区域植被覆盖状况的变化进行研究；林娜等（2013）运用高分辨率影像采用土地利用转移矩阵分析了长汀河田盆地区 1998—2011 年的土地利用动态变化。利用分形方法对严重水土流失区治理前后的土地利用动态变化研究较少。

本研究基于遥感和 GIS 技术，解译 2000 年、2009 年、2016 年共计 3 期的长汀县土地利用数据，首次通过分形维数和稳定性指数对长汀县水土流失综合治理项目实施以来的土地利用变化情况进行分析，以期为长汀县未来土地规划与管理工作和土地资源的可持续利用提供参考与支持。

1 研究区概况

长汀县是地处福建省西南部的内陆县（图 1），位于武夷山脉南麓，北纬 25°18′40″—26°02′05″，东经 116°00′45″—116°39′20″，南与广东近邻，西与江西接壤，是闽、粤、赣三省的边陲要冲，土地总面积为 3097.26 km²。区域内地貌类型以山地丘陵为主，占全县总面积的 71%；气候为中亚热带季风性气候，多年平均降水量为 1716.4 mm，降水年内分配呈双峰型，降水量集中，降水强度大，风向季节性变化显著，夏季盛行偏南风，冬季盛行西北风；红壤为该区内典型的土壤类型，占土地总面积的 79.8%，土层较浅薄，酸性强，保水保肥能力低；由于长期以来不合理的开发利用，植被破坏，水土流失严重，成为制约长汀县发展的关键因素（陈志

DOI: 10.7515/JEE182041

彪等，2013）。

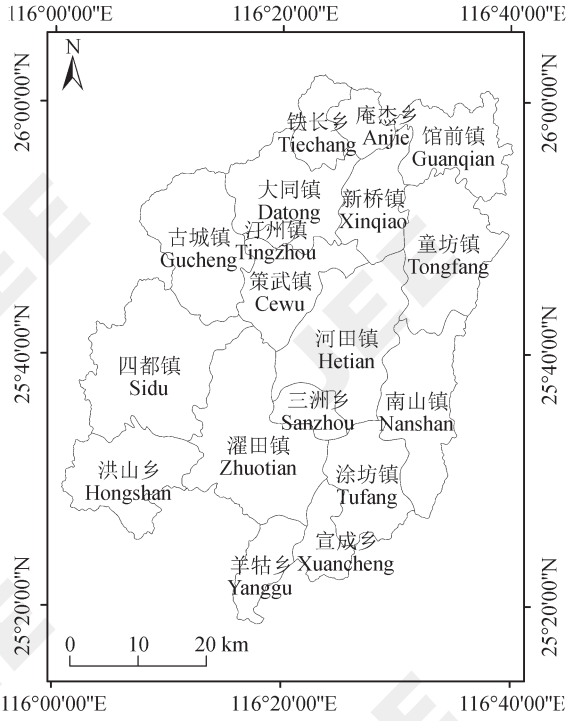

图 1　研究区示意图

Fig.1　Schematic diagram of the study area

2　数据处理与研究方法

2.1　数据处理

文章所用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），影像数据为美国 Landsat 系列卫星获取的 OLI 和 TM 数据，空间分辨率为 30 m×30 m。为研究水土流失综合治理项目实施以来长汀县土地利用变化情况并保证影像影像数据的可对比性，选取影像时间跨度从 2000 年到 2016 年，并选择季相相对一致的 3 个时间节点，影像拍摄时间分别为 2000-01-27、2009-01-11 和 2016-03-03。依据长汀县水土流失治理时所采用的主要治理模式及其土地利用的实际特点（朱鹤健等，2013），结合 Landsat 系列卫星影像数据的分辨率精度与可判读性情况（魏向辉，2016），参照全国土地调查土地分类标准（GB/T 21010—2015），对土地利用类型进行归类和重新命名，合并林地与草地并统称为林地，从而得到如下五种土地利用一级类型（表 1）。

在 ENVI 5.1 软件下，对待解译影像进行几何校正、辐射定标和影像裁剪等预处理。以监督分类方法对该区域影像进行解译。结合 Google Earth 及野外调查资料通过混淆矩阵法对解译影像进行精度校正，总体分类精度大于 88.2%，Kappa 系数大于 83.7%，达到本研究要求。

表 1　土地利用类型划分标准

Tab.1　Classification criteria of land use type

土地类别 Land category	特征描述 Characterization
耕地 Arable land	包含旱地、水田、水浇地 Contains dry land, paddy fields, irrigated land
林地 Woodland	包含有林地、灌木林、草地、疏林地、迹地、园地等 Contains woodland, thickets, grassland, traces, orchards, etc.
建设用地 Construction land	包含城镇用地、农村居民点、交通工矿用地等 Including urban land, rural settlements, transportation and mining land, etc.
裸地 Bare ground	包含沙地、裸土地、裸岩石砾地等 Contains sandy, bare land, bare rocky gravel, etc.
水域 Waters	包含河渠、湖泊、水库坑塘等 Including canals, lakes, reservoirs and ponds, etc.

2.2　研究方法

分形维数在不同的学科和领域代表着不同的含义，其计算方法和公式也各不相同（张珂等，2013）。本研究所用指标为分形维数和稳定性指数。分形维数与稳定性指数的计算方法采用 Mandelbrot（1979）提出的周长 — 面积算法，其计算公式为：

$$A=kP^{2/D} \tag{1}$$

式中：A 表示某地类斑块的面积（m²），P 为此地类斑块的周长（m），D 为此地类斑块的分形维数，k 为待定常数。将该公式以双对数曲线进行描述，即可得分形公式：

$$\ln A=2/D\ln P+C \tag{2}$$

式中：C 表示随机变量。对于任意一种地类斑块，通过计算其斑块的周长和面积即可求得对应公式中的 $\ln P$ 和 $\ln A$ 值，并建立线性回归模型，拟合出关于二者的直线方程。通过此直线方程便可知回归系数 $2/D$，进而求得分形维数 D 的值。在土地

DOI: 10.7515/JEE182041

利用分形研究中，分形维数 D 的范围一般为 1—2（Xiao et al，2014；郭晓雁等，2017）。分维值 D 的大小反映出地类斑块边界的曲折性，从而反映出地类斑块的复杂性。D 值越大，表示该类型的结构越复杂，边界趋向于不规则；D 值越小，表示该类型的结构越简单，边界趋向于规则。

分形维数 D 还可以反映出某类用地的稳定性，其中当 D=1.5 时，表示该地类斑块处于一种类似于布朗运动的随机状态，即最不稳定状态；D 值越接近 1.5，表示该地类斑块越不稳定（荣琨等，2012）。由此即可定义各地类斑块的稳定性指数，即公式 (3)：

$$SI=|1.5-D| \quad (3)$$

式中：SI 表示某地类斑块的稳定性指数，理论范围为 0—0.5。SI 值越大，表示该用地类型越偏离随机状态，越稳定；反之，则该用地类型越趋于随机，越不稳定。

本研究采用上述公式计算长汀县 2000 年、2009 年和 2016 年三期影像主要地类斑块的分形维数和稳定性指数。根据研究区不同土地利用类型的周长 — 面积数据，运用公式 (2)，建立不同时期各个地类的多元线性回归模型，求得不同时期不同地类的分形维数 D，通过所求分形维数 D 并结合公式 (3) 求得稳定性指数 SI。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

利用 ArcGIS 10.1 软件，精确计算出不同时期长汀县各个土地利用类型的斑块数量、周长和面积情况（表 2）。可以看出：2000—2016 年，长汀县土地利用最明显的特征是林地面积的不断上升与裸地面积的持续下降。2000—2009 年是地类斑块面积变化最剧烈的时期，耕地和裸地面积均有较大幅度的下降，建设用地和林地面积都有明显的上升。这是因为在此期间，福建省政府大力实施长汀县水土流失治理工程，并取得显著治理成效。这项工程推动了长汀退耕还林，增加了植被覆盖率，降低了裸地面积，并取得了良好的效益。建设用地面积的大幅度提高是伴随着经济的快速发展以及城镇人口的迅速增加而进行的。林地面积的增加，与耕地、裸地面积的减少有直接的关系。同时，水域面积有一定程度的增长。在 2009—2016 年，耕地、裸地面积继续保持下降，林地面积仍有较小幅度的增长，建设用地伴随着经济的持续发展仍保持上升趋势，水域面积小幅回落。

表 2 2000 年—2016 年土地利用情况变化表
Tab.2 Change of land use types from 2000 to 2016

土地类型 Land type	年份 Year	图斑数 / 个 Fig num of spots/ea	周长 /m Perimeter/m	面积 Area/ hm²	占总面积比 The total area ratio/%	平均斑块面积 Average patches area/hm²
耕地 Arable land	2000	4149	8608380	69761.52	22.53	16.814
	2009	4539	7841460	47240.64	15.25	10.408
	2016	4210	7740420	40582.08	13.10	9.639
林地 Woodland	2000	2353	7954740	235272.24	75.97	99.988
	2009	1161	7471620	256331.25	82.77	220.785
	2016	764	7012080	261900.81	84.56	342.802
建设用地 Construction land	2000	792	422100	1391.49	0.45	1.757
	2009	3321	1467240	3751.74	1.21	1.130
	2016	2384	1504080	5194.17	1.68	2.179
裸地 Bare ground	2000	1516	849540	2171.70	0.70	1.433
	2009	607	293880	832.50	0.27	1.371
	2016	532	253080	768.42	0.25	1.444
水域 Waters	2000	536	383580	1100.61	0.36	2.053
	2009	1027	568440	1547.91	0.50	1.507
	2016	428	397860	1263.60	0.41	2.952
全部土地 All land	2000	9346	18218340	309697.56	100.00	33.137
	2009	10655	17642640	309704.04	100.00	29.067
	2016	8318	16907520	309709.08	100.00	37.234

DOI: 10.7515/JEE182041

3.2　土地利用分形维数及稳定性指数变化

不同时期不同土地利用类型分形维数的变化可反映出土地利用的变化趋势，分维值增大表明相同面积土地斑块周长的增加，土地利用类型的空间镶嵌结构变得复杂；反之则相同面积土地斑块的周长变短，空间结构趋于简单（韩学锋和林广发，2007）。稳定性指数是与分形维数直接相关的一个用来表征土地利用空间行为结果的指标。这一指标的本来意义是为了说明具有某一分形维数的土地斑块在自然状态下，抵御外来干扰，维持其形态的能力（田义超和任志远，2012）。通过建立的多元线性回归模型绘制的各地类斑块的周长 — 面积双对数散点图（图 2）可以看出，每组数据都呈明显的线性相关特征，各个时期不同地类的周长 — 面积之间都具有相当明显的相关性，相关性系数都在 0.96 以上。说明各个地类的周长 — 面积关系并非偶然，同时表明分形维数 D 的计算有一定理论基础和地理学含意。

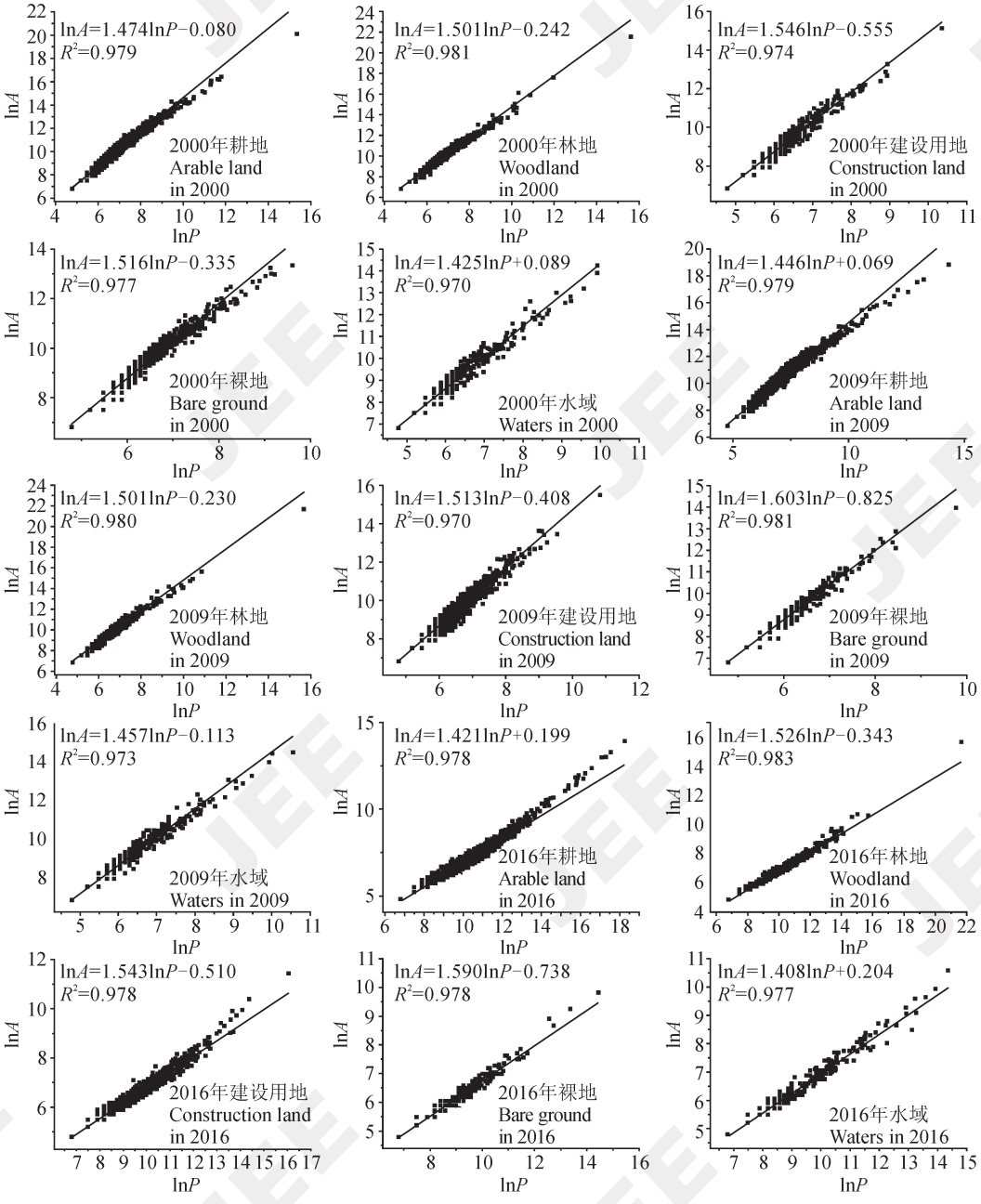

图 2　各土地利用类型斑块周长—面积双对数散点图

Fig.2　The perimeter of each land use type patch—area double log scatter plot

DOI: 10.7515/JEE182041

由表 3 可以看出，在这 3 个不同的时期，各土地利用类型的分形维数和稳定性指数在不断变化，说明土地利用边界形态处于不断变化之中。在这 3 个不同的研究时期全部土地的分形维数始终保持上升趋势，土地利用的分形维数经历自 2000—2009 年分维值缓慢上升到 2009—2016 年分维值快速上升的变化过程。在这 3 个不同的研究时期全部土地的稳定性指数始终保持着下降的趋势，土地的稳定性由 2000 年的 0.158 下降至 2009 年的 0.154，2016 年继续下降达到 0.135。

表 3　3 个时期各类土地的分形维数和稳定性指数

Tab.3　Three periods of various kinds of fractal dimension and stability index of the land use types

土地类型 Land type	年份 Year	模型 Model	R^2	分形维数 Fractal dimension	稳定性指数 Stability index
耕地 Arable land	2000	$\ln A=1.474\ln P-0.080$	0.979	1.357	0.143
	2009	$\ln A=1.446\ln P+0.069$	0.979	1.383	0.117
	2016	$\ln A=1.421\ln P+0.199$	0.978	1.407	0.093
林地 Woodland	2000	$\ln A=1.501\ln P-0.242$	0.981	1.333	0.167
	2009	$\ln A=1.501\ln P-0.230$	0.980	1.332	0.168
	2016	$\ln A=1.526\ln P-0.343$	0.983	1.311	0.189
建设用地 Construction land	2000	$\ln A=1.546\ln P-0.555$	0.974	1.293	0.207
	2009	$\ln A=1.513\ln P-0.408$	0.970	1.322	0.178
	2016	$\ln A=1.543\ln P-0.510$	0.978	1.296	0.204
裸地 Bare ground	2000	$\ln A=1.516\ln P-0.335$	0.977	1.319	0.181
	2009	$\ln A=1.603\ln P-0.825$	0.981	1.248	0.252
	2016	$\ln A=1.590\ln P-0.738$	0.978	1.258	0.242
水域 Waters	2000	$\ln A=1.425\ln P+0.089$	0.970	1.404	0.096
	2009	$\ln A=1.457\ln P-0.113$	0.973	1.373	0.127
	2016	$\ln A=1.408\ln P+0.204$	0.977	1.421	0.079
全部土地 All land	2000	$\ln A=1.490\ln P-0.188$	0.978	1.342	0.158
	2009	$\ln A=1.486\ln P-0.203$	0.976	1.346	0.154
	2016	$\ln A=1.465\ln P-0.052$	0.977	1.365	0.135

从不同土地利用类型分形维数变化情况来看，对不同时期不同地类的分形维数进行排序可得到：2000 年时，水域 > 耕地 > 林地 > 裸地 > 建设用地；到 2009 年时，耕地 > 水域 > 林地 > 建设用地 > 裸地；再到 2016 年，水域 > 耕地 > 林地 > 建设用地 > 裸地。不同时期不同地类稳定性指数排序情况则表现出与分形维数排序相反的趋势。总的来说，2000 年、2009 年和 2016 年这 3 个不同时期，分形维数较大的是耕地和水域，较小的是裸地和建设用地；稳定性指数情况相反。究其原因，长汀县地处山区，土地不平整，农民利用地形地势，布置农田，加之福建省雨水丰沛，河网密布，水利设施密集，从而造成长汀的农田和水域斑块形态破碎，具有较大的分形维数，较小的稳定性指数。裸地和建设用地分形维数较低则是由于经过常年不间断的治理，地表裸露的土地多半是自然环境极度脆弱，植被侵入难度大或受人为干扰强烈的地区，而且由于地理条件的限制，人类生产及建设活动所使用的地理空间相对固定连片，因而分形维数相对较低，稳定性较高。

从 3 个不同时期相同土地利用类型的分形维数的变化情况来看，耕地的分形维数在 2000 年、2009 年和 2016 年分别是 1.357、1.383 和 1.407，呈现不断上升的趋势；而其稳定性指数分别为 0.143、0.117 和 0.093，呈现不断下降的趋势。这表明耕地结构正在不断地趋于破碎，这是由于长汀县发展早期耕地资源通常是较为平整，靠近便于为人类利用的优质土地资源，但是随着社会经济的发展和城镇建设对优质土地资源的需求（龚文荣等，2013），平整连片的耕地往往优先被转化为生产建设用地，但是又因农民对农业生产性土地的需要以及国家对土地利用占补平衡的要求，在山岭沟谷地区开发破碎土地以补充失去的优质耕地资源，从而导致耕地的日趋破碎化。

林地的分形维数呈不断下降，稳定性指数表现

DOI: 10.7515/JEE182041

出不断上升的趋势。这与近年来长汀县对育林保林、退耕还林工作的重视，以及建设生态长汀的战略具有直接的关系。随着人工林木的不断栽植，使得县域内林木密度及郁闭度不断提高，进而稳定性指数呈现不断增长趋势。

建设用地的分形维数经历了从 2000 年的 1.293 到 2009 年的 1.322 再到 2016 年的 1.296，呈先增长后下降的变化过程。稳定性指数则表现出先下降后增长的变化趋势。这是因为 2000 年开始，长汀县发展受人口、经济及环境条件的限制，建设用地通常在地势较为平缓的近河谷地，受长期经济滞后的影响，向外扩散的能力弱，稳定性较强。在 2000—2009 年，是我国城镇化快速发展的阶段，大量的建设项目和工程扩展着城镇的边界范围，但是合理的布局与规划并未受到足够的重视，从而导致在此期间长汀县建设用地分形维数的增高。2009—2016 年，经济发展更加注重质量的提高，城市规划和城建治理受到重视，建设用地趋向合理化，在此阶段建设用地的拓展更有计划性，因而形态更规整，结构趋向简单。

裸地的分形维数在 2000—2009 年大幅下降，从 2000 年的 1.319 到 2009 年的 1.248，稳定性指数表现出上升趋势，从 2000 年的 0.181 到 2009 年的 0.252。这与长汀县实施水土流失治理工程有很大关系。自 2000 年起，长汀县采用“大封禁，小治理”的办法开展水土流失治理工程，使得大量破碎分散的裸地转为林地（陈志彪等，2013）。2009—2016 年，裸地的分形维数继续上升，由 2009 年的 1.248 小幅回升至 2016 年的 1.258，稳定性指数则由升转降，从 2009 年的 0.252 至 2016 年的 0.242。一方面，为了经济发展，人类对土地的不合理利用再次加剧了裸地形态的复杂性；另一方面，当地的生态脆弱性导致水土流失地区治理成效反复，也成为裸地分形维数增加而稳定性指数下降的一个重要因素。

水域的分形维数及稳定性指数变化情况与裸地相似，分形维数从 2000 年的 1.404 下降到 2009 年的 1.373，再由 2009 年的 1.373 小幅回升至 2016 年的 1.421。稳定性指数则与分形维数呈相反趋势，从 2000 年的 0.096 上升至 2009 年的 0.127，再由 2009 年的 0.127 下降至 2016 年的 0.079。但水域的变化较为复杂，有待进一步研究。

4　结论

本文基于分形理论对长汀县 2000 年、2009 年和 2016 年 3 个时期的土地利用情况、分形维数 *D* 和稳定性指数 SI 及其动态变化进行了有效探索，结果表明：

（1）长汀县土地利用覆被状况通过最近 16 年的治理总体趋于良好，林地面积持续增加，大面积成片分布的裸地得到有效治理，裸地斑块更加破碎，趋于零星分布，由于自然条件的限制和人类活动的干扰，依然存在土地退化、水土流失的风险。

（2）长汀县土地利用具有明显的分形特征。耕地的分形维数持续上升，林地的分形维数持续下降，建设用地表现出先上升后下降的变化趋势，裸地和水域的分形维数则呈现大幅下降后稍有上升的变化趋势，稳定性指数的变化则呈现与分形维数相反的态势。16 年以来，虽然经过大规模人工治理，长汀县整体分形维数仍具有上升的趋势，结构的稳定度持续下降，对区域未来可持续发展构成影响。

（3）土地利用的复杂性和稳定性受到人为因素影响强烈。在人类活动对环境影响不断增强的背景下，长汀县土地利用的复杂性具有明显提高的趋势；人类对水土流失区的主动治理行为，又大幅度提高了土地利用的稳定性。特别是对裸地的治理上，在人类积极主动的干预下，裸地的稳定性有明显的提升。而占该区域土地利用比重最大的林地，分布广泛且集中连片，多集中于低山丘陵地区，禁封育林的政策使得林地受人类活动影响小，复杂性和稳定性波动较小。合理规范人类活动，对不合理的土地利用行为加以约束和限制，对保证当地的生态环境安全和人地关系的协调发展都具有重要的意义。

致谢：感谢中科院计算机网络信息中心地理空间数据云平台提供 Landsat 卫星影像数据。

参考文献

陈志彪，陈志强，岳　辉. 2013. 花岗岩红壤侵蚀区水土保持综合研究：以福建省长汀朱溪小流域为例 [M]. 北京：科学出版社：19–32. [Chen Z B, Chen Z Q, Yue H. 2013. Comprehensive study on soil and water conservation in granite red soil erosion area: A case study of Zhuxi watershed, Changting, Fujian province [M]. Beijing: Science Press: 19–32.]

龚文荣，苏文键，陈碧芬. 2013. 土地资源对粮食生产能力影响的实证分析 —— 基于福建省长汀县的调研 [J]. *绿色科技*，(9): 29–32. [Gong W R, Su W J, Chen B F. 2013. An empirical analysis of the impact of land resources on grain production capacity—Based on the survey of Changting County, Fujian Province [J]. *Journal of Green Science and*

Technology, (9): 29－32.]

郭晓雁 , 李春蕾 , 张玉虎 , 等 . 2017. 1995—2015 年三峡库区土地利用变化分形研究 [J]. *安徽农业科学* , 45(8): 207–211. [Guo X Y, Li C L, Zhang Y H, et al. 2017. Fractal analysis of land use change in Three Gorges Reservoir Area during 1995—2015 [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 45(8): 207–211.]

韩学锋 , 林广发 . 2007. 基于遥感和分形理论的土地利用结构研究 —— 以厦门市翔安区为例 [J]. *资源与人居环境* , (2): 51–53. [Han X F, Lin G F. 2007. Research on land use structure based on remote sensing and fractal theory—a case study of Xiang'an District, Xiamen [J]. *Resources and Habitant Environment*, (2): 51–53.]

林　娜 , 徐涵秋 , 何　慧 . 2013. 南方红壤水土流失区土地利用动态变化 —— 以长汀河田盆地区为例 [J]. *生态学报* , 33(10): 2983–2991. [Lin N, Xu H Q, He H. 2013. Land use changes in a reddish soil erosion region of southern China: Hetian Basin, County Changting [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(10): 2983–2991.]

刘　瑞 , 朱道林 . 2010. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨 [J]. *资源科学* , 32(8): 1544–1550. [Liu R, Zhu D L. 2010. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix [J]. *Resources Science*, 32(8): 1544–1550.]

刘永泉 , 钟炳林 . 2001. 长汀县 "十五" 期间水土保持工作的思考 [J]. *福建水土保持* , 13(2): 15–19. [Liu Y Q, Zhong B L. 2001. Review on soil and water conservation in Changting County during the "Tenth Five-Year Plan" period [J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 13(2): 15–19.]

吕永钢 , 杨　力 . 2010. 血管网分形研究进展 [J]. *化工学报* , 61(12): 3051－3058. [Lü Y G, Yang L. 2010. Research progress of fractals in vascular networks [J]. *CIESC Journal*, 61(12): 3051－3058.]

荣　琨 , 陈　莹 , 李学平 , 等 . 2012. 晋江西溪流域土地利用结构变化的分形研究 [J]. *水土保持通报* , 32(4): 126–129. [Rong K, Chen Y, Li X P, et al. 2012. Fractal analysis on landuse stucture in Xixi watershed of Jinjiang Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32(4): 126–129.]

单立山 , 李　毅 , 任　伟 , 等 . 2013. 河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征 [J]. *应用生态学报* , 24(1): 25–31. [Shan L S, Li Y, Ren W, et al. 2013. Root architecture of two desert plants in central Hexi Corridor of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(1): 25–31.]

田义超 , 任志远 . 2012. 基于分维模型的土地利用变化研究 —— 以延安市宝塔区为例 [J]. *干旱区资源与环境* , 26(7): 184–189. [Tian Y C, Ren Z Y. 2012. Land use change of Baota county, Yan'an City based on fractal dimension model [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(7): 184–189.]

魏向辉 . 2016. 基于分形理论的遥感影像土地利用分类研究 [D]. 北京 : 中国地质大学 (北京). [Wei X H. 2016. Research of remote sensing image in land use classification based on the fractal theory [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]

武国胜 , 林惠花 , 曾宏达 . 2017. 用 RS 和 GIS 技术评价福建省长汀县土壤保持功能对生态系统变化的响应 [J]. *生态学报* , 37(1): 321–330. [Wu G S, Lin H H, Zeng H D. 2017. Responses of soil conservation function to ecosystem changes: an assessment based on RS and GIS in Changting County [J] . *Acta Ecologica Sinica*, 37(1): 321–330.]

徐建华 . 2004. 现代地理学中的数学方法 [M]. 北京 : 高等教育出版社 : 392–417. [Xu J H. 2004. Mathematical methods in modern geography [M]. Beijing: Higher Education Press: 392–417.]

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.]

杨婷婷 , 郭福涛 , 王文辉 , 等 . 2016. 福建长汀红壤区植被覆盖度变化趋势分析 [J]. *森林与环境学报* , 36(1): 15–21. [Yang T T, Guo F T, Wang W H, et al. 2016. Dynamics of vegetation coverage in the red soil area of Changting, Fujian, China [J]. *Journal of Forest and Environment*, 36(1): 15–21.]

张　珂 , 赵耀龙 , 付迎春 , 等 . 2013. 滇池流域 1974 年至 2008 年土地利用的分形动态 [J]. *资源科学* , 35(1): 232–239. [Zhang K, Zhao Y L, Fu Y C, et al. 2013. Fractal dimension dynamics and land use in the Lake Dianchi watershed from 1974 to 2008 [J]. *Resources Science*, 35(1): 232–239.]

张立峰 , 闫浩文 , 张斌才 , 等 . 2016. 兰州新区土地利用分形特征 [J]. *测绘科学* , 41(12): 130－135. [Zhang L F, Yan H W, Zhang B C, et al. 2016. Fractal characteristics of land use in Lanzhou New Area [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 41(12): 130－135.]

朱鹤健 , 陈志彪 , 林惠花 , 等 . 2013. 长汀水土保持研究 [M]. 北京 : 科学出版社 : 48–59. [Zhu H J, Chen Z B, Lin H H, et al. 2013. Research of soil and water conservation in Changting [M]. Beijing: Science Press: 48–59.]

Mandelbrot B B. 1979. Fractals: Form, chance and dimension [M]. San Francisco: W. H. Freeman.

Xiao L, Xue S, Liu G B, et al. 2014. Fractal features of soil profiles under different land use patterns on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 6(5): 550－560.

DOI: 10.7515/JEE182041