

粤北岩溶区连江流域土地石漠化变化分析

汪明冲^{1,2} 张新长² 王兮之¹ 魏兴琥¹ 李辉霞¹ 梁钊雄¹

(1. 佛山科学技术学院 国土资源环境与旅游研究中心, 广东 佛山 528000;

2. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 以粤北岩溶区连江流域为研究对象, 利用 1988 年和 2013 年的 2 期 LANDSAT 遥感数据, 在 GIS 和 FRAGSTAT 景观格局分析软件支持下, 定量地分析连江流域的土地石漠化类型变化及其景观格局时空动态特征。结果表明: 25 年来各种类型石漠化土地无论是在数量、面积和空间分布特征方面都发生了十分显著的变化, 总面积减少 117.34 km² (32.76%), 斑块数增加 3246 块; 石漠化由 1988 年的重度、中度石漠化为主转变为 2013 年以中度、轻度石漠化为主。25 年来轻度石漠化土地面积增加 45.98 km² (106.41%), 具有明显增加的趋势。中度、重度和极重度石漠化土地面积均减少, 减少面积分别为 40.60 km² (27.13 %)、118.42 km² (75.35 %) 和 4.31 km² (52.60%)。连江流域石漠化土地的总体景观空间格局动态变化在程度上有所差异, 表现为景观异质性减弱, 破碎度降低, 而景观优势度增加; 景观丰富度密度 0.0013, 面积加权的平均斑块分维数在 1.0554—1.4176 之间, 处于最大域值 1—2 的下段; 景观形状指数在 43.4155—407.0628 之间; 斑块密度和边界密度的都很小, 分别处在 0.3624 个/100 hm²—11.9723 个/100 hm² 和 1.1476 m/hm²—137.0875 m/hm² 之间, 表明各类景观嵌块体的几何形状较复杂, 被分割的程度较低, 破碎化现象不明显, 空间异质化程度低, 总体多样性程度不高, 丰富度较小。

关键词: 岩溶区; 土地石漠化; 连江流域; 景观格局

Analyzed the Change of Rock Desertification in Karst Aren of Lianjiang

WANG Ming-chong^{1,2}, ZHANG Xin-chang², WANG Xi-zhi¹, WEI Xing-hu¹, LI Hui-xia¹, LIANG Zhao-xiong¹

(1. Center for Research of Territorial Resource Environment and Tourism, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Institute of Geography Science and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This article takes Karst-influenced Lianjiang Watershed in Northern Guangdong as the research object, the article have interpreted non-karst district and karst district imagery respectively, and have constructed karst district and non-karst district classification system. With GIS and FRAGSTAT landscape pattern theory, the typical Karst landscapes and spatial temporal dynamic of rock desertification land change in Lianjiang Watershed were analyzed based on translated data from remote sensing images in 1988 and 2013. The Lianjiang Watershed is divided into karst district and no-karst district based on it's geological map. With practical situation in the basin and the land use classification system, the no-karst district is divided into 9 types of landuse: cultivated land, garden plots, forest land, shrubland, grass land, construction land, water area and unused land. According to development degree of rocky desertification and whether it is occurred in the karst district or not, we divide the karst district into rocky desertification land and non-desertification. The non-desertification is divided into 5 types of landuse: cultivated land, garden plots, forest land, construction land and water area. According as the theory of ecological datum plane, we classified the rocky desertification lands into five grades as potential, light, middle, serious, and extremely serious in the rocky desertification land, graded each rocky desertification land with indexes which including rate of outcrops, form of karst physiognomy, gradient of the earth's surface, thickness of soil, coverage degree of mantle rock, degree of soil erosion, coverage rate of vegetation, plant and types of land use. The results indicate that: the area of rock desertification decreased respectively by 117.34 km² (32.76%), but the patch number increased 3246 blocks from 1988 to 2013. The main types of rock desertification have changed from serious and medium of rocky desertification to the medium and light during the 25a. During the remote sensing monitoring period, the light of rocky desertification land has obvious increasing trend, the area had been increased by 45.98 km² (106.41%). The moderate, medium, serious and extremely serious of rocky desertification lands developed in the direction of reducing, their area had been reduced by 40.60 km² (27.13 %).

基金项目: 国家自然科学基金“基于模式识别的多尺度空间数据联动更新关键技术研究(41431178)”和“基于水动力过程的粤北岩溶区不同土地利用方式对钙迁移、沉积影响机制研究(41571091)”项目资助。

118.42 km² (75.35 %) and 4.31 km² (52.60%) respectively. All kinds of landscape index were calculated at class level and landscape level. Quantitative analysis showed that the spatial pattern changes of rock desertification in Lianjiang Watershed basin is different at degree. In details, the landscape heterogeneity and fragmentation all declined, while landscape dominance increased. The Patch Richness Density (PRD) index is 0.0013, The Area-Weighted Mean Fractal Dimension Index (AWMPDF) indexes are among 1.0554 to 1.4176, and is in the lower part of maximum range (1 to 2), the Landscape Shape Indexes (LSI) indices are among 43.4155 to 407.0628, the Patch Density (PD) and Edge Density (ED) are very low, are among 0.3624 entries/100ha to 11.9723 entries/100ha, and among 1.1476 m/ha to 137.0875 m/ha. All these indices indicate the geometric shape of various landscape patches are quite complicated, the intersected degree is low relatively, the fragmentation is not obvious, the spatial heterogeneity is low, the overall diversity degree is not high and the richness is low.

Key words: karst district; rock desertification; Lianjiang watershed; landscape pattern

引言

石漠化(即石质荒漠化)是指在我国南方湿润地区,碳酸盐岩发育的喀斯特脆弱生态环境下,由于人为干扰造成植被持续退化,乃至丧失,导致水土资源流失,土地生产力下降,基岩大面积裸露于地表(或砾石堆积)而呈现类似荒漠景观的土地退化过程^[1]。地表的裸露基岩的裸露率和植被的覆盖率是表征和评价喀斯特石漠化等级程度的关键性指标。同时,石漠化又是一种动态土地退化过程,是植被、基岩、土被等多种地表覆盖要素的综合反映。目前,石漠化已成为全球性的生态问题之一,也是21世纪全球最重要的课题之一^[2-3]。我国西南地区石漠化现象尤为严重^[4],粤北岩溶山区是我国西南岩溶区的东延部分,也是我国西南岩溶区土地石漠化的重要区域之一^[5]。

景观是具有高度空间异质性的区域,它由相互作用的斑块以一定的规律组成。景观动态变化、空间格局、过程分析是景观生态学研究的核心之一^[6-7],目前仍是景观生态学中的研究热点。景观变化是景观内部各种矛盾与外部作用力相互作用的结果与表现,是景观从一种状态到另一种状态的转变过程^[8-9]。在生态学研究,流域可作为一个较理想的独立研究单元。目前以流域为对象的研究涉及物质循环、景观格局变化、水土保持,以及生态系统评价等^[10-14]。本文在粤北岩溶区选择连江流域,利用1988年和2013年的2期LANDSAT遥感数据,在GIS和FRAGSTAT景观格局分析软件支持下,定量地分析连江流域的土地石漠化类型变化及其景观格局时空动态特征。研究其喀斯特石漠化景观,以期找到石漠化发生发展的一定规律性,对石漠化的生态治理有现实意义和实用价值。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

连江流域是广东省典型的岩溶流域,位于广东省西北部,是北江最大支流,又称小北江。地理坐标112°10′—113°18′ E, 24°09′—25°07′ N(见图1)。



图1 连江流域区位

研究区气候类型属亚热带季风湿润气候,年平均气温在19—20℃之间,7月气温最高,多年平均达29℃;多年平均降雨量为1770 mm,年内分配不均,主要集中在4—6月。流域地形自西北向东南延伸,北部的石坑崆是广东省最高峰,海拔1902 m。连江流域水系呈羽状,流域总面积达10061 km²。流域内石灰岩地形显著,石灰岩区约占流域面积的40%,溶洞、裂隙等喀斯特地貌发育。植物种类众多,主要有针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、混交林、竹林、灌木林和灌草丛。土壤类型以红壤及由碳酸盐岩溶蚀残余物发育而

成的石灰岩土为主^[15-17]。

1.2 数据源与处理方法

1.2.1 数据来源

考虑到遥感影像传感器的延续性,以及经过研究区上空所成像的质量,本研究选用了 1988 年 12 月 6 日、25 日的两景 Landsat5 TM 遥感影像,2013 年 11 月 29 日、12 月 22 日的 Landsat8 OLI 遥感影像(空间分辨率为 30 m),数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(地理空间数据 <http://www.gscloud.cn>)。

连江流域数字高程模型(DEM)数据(空间分辨率为 30 m),2006 年的流域 TM 影像数据和土地分类解译矢量图,流域地质图、1:5 万地形图、林地调查和石漠化区调查等相关数据。

1.2.2 数据预处理

利用遥感软件 ENVI 对流域影像进行几何校正、投影变换,结合野外调查及地形图,并将其作为参考,将 2 期影像重采样,像元大小为 30 m × 30 m。利用 GIS 软件对 DEM 数据提取流域边界,将边界数据对拼好的影像剪裁获取流域影像。利用 GIS 软件对流域地质图进行数字化获得矢量化的流域岩溶区和非岩溶区边界,将边界数据对影像裁剪获得流域岩溶区影像和

非岩溶区影像。

1.2.3 影像解译

根据经验,R、G、B 分量分别为 TM5、TM4、TM3 (OLI6、OLI5、OLI4)合成的假彩色图像,植被显示为绿色,水域为蓝色,与人类所看见的真实颜色接近,用此波段组合显示,有利于图像判读,以及训练样区的选取。本研究在连江流域典型的石漠化区域英德市岩背塘边村大木岭和阳山县东山乡石成村选取不同等级的石漠化样地(具体如表 1 所示),建立石漠化分级的综合景观特征。

结合表 1 中样地综合景观特征,并以 2006 年经过几何精校正的 TM 图像作以及经过解译精度验证过的 2006 年连江流域土地利用矢量图作为参考,熟悉各类地物在图像中的颜色、形状、分布特征,建立了判读流域土地类型和石漠化土地等级的解译标志如表 2 所示。具体土地利用解译标志分类过程主要采取目视解译的方法。经对解译好的 2013 年的矢量图,通过在石漠化严重的重点地区随机抽取 300 个图斑,结合地质图、地形图和 GPS 定位技术,对各种土地覆被类型、地质条件和不同程度的土地石漠化进行比对分析,得出解译判读正确率达到了 90%以上。

表 1 研究区石漠化土地分级样地及其景观特征

| 编号 | 经纬度 | 海拔 (m) | 具体位置 | 细节描述 | 土壤厚度 (cm) | 岩石裸露度 (%) | 植被类型 | 优势种类 |
|----|---------------------------|-----------|----------|-------|--------------|--------------|---------|------------------------------|
| 1 | 24°19.634' 112°47.307' | 504 | 岩背塘边村大木岭 | 重度 H | 11.72 | 52.75 | 稀疏灌草丛 | 红背山麻杆,类芦,扭黄茅,白茅,野菊花,全缘火棘,欐木等 |
| 2 | 24°19.64' 112°47.31' | 500 | 岩背塘边村大木岭 | 重度 H | 5.56 | 55.33 | 稀疏灌草丛 | 红背山麻杆,类芦,构树,白茅,藤构,悬钩子等 |
| 3 | 24°19.206' 112°47.549' | 550 | 岩背塘边村大木岭 | 极重度 E | — | 98.4 | 裸岩间零星草丛 | 蜈蚣草,构树,波缘冷水花等 |
| 4 | 24°19.595' 112°47.640' | 575 | 岩背塘边村大木岭 | 轻度 L | 15.1 | 11.25 | 稀灌草坡 | 类芦,芒草,刚莠竹,龙须藤,火棘,欐木等 |
| 5 | 24°19.624' 112°47.593' | 558 | 岩背塘边村大木岭 | 中度 M | 13.5 | 28.87 | 藤刺灌丛 | 野古草,龙须藤,类芦,单叶铁线莲,刺楸,野鸡尾,野桐等 |
| 6 | 24°18.546' 112°42.400' | 516 | 东山乡石成村 | 重度 H | 9.9 | 70.0 | 稀疏刺灌草丛 | 圆叶乌桕,雀梅藤,龙须藤,巴豆,类芦等 |
| 7 | 24°18.546' 112°42.406' | 509 | 东山乡石成村 | 中度 M | 9.33 | 28.5 | 稀灌草丛 | 盐肤木,野桐,拔契,青藤,巴豆,芒草,类芦等 |
| 8 | 24°18.519' 112°42.44' | 511 | 东山乡石成村 | 轻度 L | 8.06 | 21.23 | 稀灌草坡 | 花椒,构树,野古草,鸡矢藤,火棘等 |

表 2 研究区土地利用/覆被解译标志

| 土地利用类型 | 影像颜色 | 影像特征 | 地学相关分析标志 |
|--------|---------------------|----------------|---|
| 耕地 | 浅红、淡红、红泛白、浅绿 | 规则块状、条带状或零星分布 | 地形平坦、海拔低的平原地区,河流两岸河床低地,池塘、水库附近,临近居民点 |
| 林地 | 绿色、嫩绿色、绿色偏黄、深绿色、暗绿色 | 规则或不规则,连片分布 | 山区、河谷两岸的竹林、丘陵、房屋附近风水林 |
| 灌丛 | 黄绿色、绿色偏红 | 规则或不规则、块状或连片分布 | 海拔较高的高山区森林线的上线、草地线的下线,临近居民点受人类活动影响大的丘陵、耕地附近 |
| 草地 | 暗红色、黄绿色 | 不规则,连片分布 | 高海拔山地或位于高山灌丛以上,季节性受水淹的水域 |
| 园地 | 青色 | 规则块状,连片分布 | 地形略有起伏、相对海拔略高的地区 |
| 建设用地 | 浅蓝色 | 不规则形、块状、点状、线状 | 河谷地带,河流沿岸附近, |
| 水域 | 蓝色、深蓝色、蓝黑色 | 规则块状或线状 | 低洼地或海拔低的沟谷 |
| 未利用土地 | 红黑色 | 不规则块状 | 分布在低地或耕地附近 |
| 潜在石漠化 | 浅绿色、黄色、白色 | 规则,连片分布 | 受人类活动影响较小的地区 |
| 轻度石漠化 | 黄绿色、红绿色 | 不规则,斑状或小片状分布 | 受人类活动影响较大地区 |
| 中度石漠化 | 浅红绿色、红灰色 | 不规则,斑状分布 | 深受人类活动影响 |
| 重度石漠化 | 紫绿色 | 不规则,斑状分布 | 深受人类活动影响 |
| 极重度石漠化 | 紫红色 | 不规则,小斑状分布 | 深受人类活动影响 |

表 3 研究区土地利用/覆被分类系统

| 一级类 first classes | 二级类 second classes |
|---------------------------|--|
| 岩溶区 karst district | 极重度石漠化 extremely serious rocky desertification |
| | 重度石漠化 serious rocky desertification |
| | 中度石漠化 middle rocky desertification |
| | 轻度石漠化 light rocky desertification |
| | 潜在石漠化 potential of rocky desertification |
| | 耕地 cultivated land |
| | 园地 garden plots |
| 非岩溶区 no-karst district | 林地 forest land |
| | 耕地 cultivated land |
| | 园地 garden plots |
| | 林地 forest land |
| | 灌丛 shrubland |
| | 草地 grass land |
| | 建设用地 construction land |
| 水域 water area | |
| | 未利用土地 unused land |

2 研究方法

2.1 分类体系构建

基于连江流域地质类型图,将连江流域分为非岩溶区和岩溶区。参照土地利用分类体系并结合流域实际

情况,非岩溶区分为 8 种土地利用类型:耕地、园地、林地、灌丛、草地、建设用地、水域及未利用土地;岩溶区根据土地石漠化的综合景观特征,将石漠化土地分为潜在、轻度、中度、重度和极重度石漠化 5 级^[18-19];以及耕地、园地、林地、建设用地、水域。划分为分类体系如

表3所示。

2.2 地利用/覆被变化分析

基于卫星遥感数据进行土地利用/覆盖变化格局与过程的定量研究,目前已有一些比较成熟的方法^[20]。利用土地利用/覆被变化幅度和土地利用/覆被转移矩阵两个指标来揭示土地利用变化的基本特征和空间变化格局^[21],方法如下:

(1)土地利用/覆被变化量,公式如下:

$$\Delta U = U_b - U_a \quad (1)$$

式中, U_a 、 U_b 分别表示研究期初与研究期末某种土地利用/覆被类型的数量; ΔU 表示土地利用/覆被类型面积变化量。

(2)土地利用/覆被转移矩阵,它是进行土地利用/覆被类型间相互转化的数量及方向特征定量研究的主要方法,能够具体的反映土地利用变化的结构特征和各类型之间的转移方向^[22-23],能定量的获取各类间的变化量特征。

2.3 景观格局变化分析

建立分类体系后,分别利用 ArcGIS9.3 和 Fragstats3.3 进行统计和景观特征分析。景观类型水平(class level)选择面积/周长/密度类指数(Area/

Perimeter/Density metrics): 斑块类型面积(CA—Total Class Area)、斑块类型面积所占景观面积百分比(PLAND—Percentage of Landscape)、斑块数量(NP—Number of Patches)、斑块密度(PD—Patch Density)、边缘密度(ED—Edge Density),形状类指数(Shape metrics):景观形状指数(LSI—Landscape Shape Index)、面积加权的平均斑块分维数(AWMPDF—Area-Weighted Mean Fractal Dimension Index);景观水平(landscape level)选择面积/周长/密度类指数(Area/Perimeter/Density metrics):景观面积(TA—Total Landscape Area)、最大斑块指数(LPI—Largest Patch Index)、斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、平均斑块面积(MPS—Mean Patch Size)、边缘密度(ED),形状类指数(Shape metrics):景观形状指数(LSI)、面积加权的平均斑块分维数(AWMPDF),蔓延度类指数(Contagion metrics):蔓延度指数(CONTAG—Contagion Index),多样性指数(Diversity metrics):斑块丰富度(PRD—Patch Richness Density)、香农多样性指数(SHDI—Shannon's Diversity Index)、香农均匀度指数(SHEI—Shannon's Evenness Index)共6类19个指标,具体计算方法及生态学意义参见FRAGSTATS 3.3使用说明书和参考文献

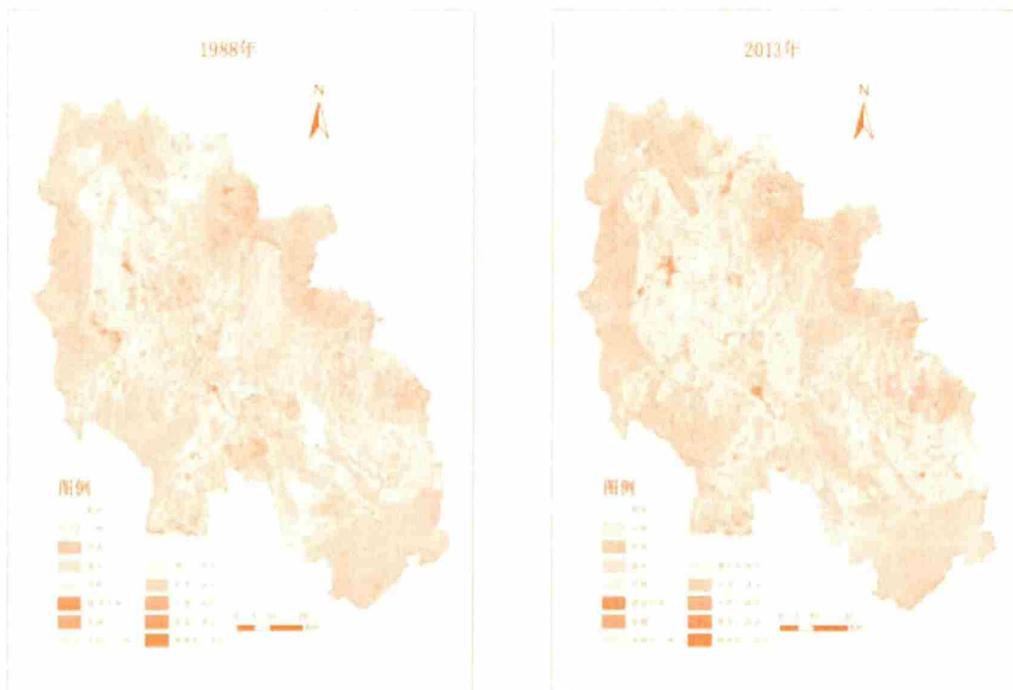


图2 连江流域1988年与2013年土地利用/覆盖空间分布

献^[24]。

3 结果与分析

3.1 景观面积变化率

在 ArcMap9.0 空间分析模块中进行逻辑运算,得到 2 个时间段景观面积变化图(图 2)和变化表(表 3)。

从图 2 中的 1988 年和 2013 年两期土地利用图和表 4 分析可以得出:这两期的主要土地利用类型是潜在石漠化、林地、耕地和灌丛,这 4 类土地利用类型的面积从 1988 年的 8938.73 km² 增加到 2013 年的 9051.601 km²,分别占其两期总面积的比例为 88.38%和 89.81%。从 1988 年到 2013 年连江流域的土地利用已经发生了显著的变化,林地面积增加最多达 943.10 km²,增加了 28.78%;园地增加比率最大达 264.02%,面积增加 48.61 km²。建设用地和水域面积有所增加,分

别为 210.17 km² 和 13.16 km², 百分比分别为 118.42% 和 22.25%。相反,耕地、灌丛、草地和未利用土地面积减少,分别为 154.59 km²、718.78 km²、46.97 km² 和 255.47 km²,百分比分别为 13.64%、39.33%、16.73 %和 90.97 %。石漠化的面积从 1988 年的 358.20 km² 到 2013 年的 240.86 km²,减少了 117.34 km²(32.76%)。石漠化的类型 25 年来已经从 1988 年的以重度和中度石漠化为主转变为 2013 年的以中度和轻度石漠化为主,在遥感监测的这段时期,轻度石漠化面积有明显的增加趋势,面积增加了 45.98 km²(106.41%),潜在石漠化增加了 43.15 km²(1.60%);同时,中度、重度和极重度石漠化土地面积呈现相反的趋势,分别减少 40.60 km²(27.13%)、118.42km²(75.35%)和 4.31 km²(52.60%)。

图 3 反映连江流域土地利用/覆被在监测时段内的空间变化情况,结合高程数据、相关资料得出:耕地在整个流域呈现减小的趋势;林地主要分布在非岩溶

表 4 连江流域 1988 年和 2013 年土地利用/覆被变化

| | | 1988 年 | | | | 2013 年 | | | | 1988—2013 | |
|------|--------|----------------------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|--------------------|--------|
| | | 面积(km ²) | 面积(%) | 面积(%) | 面积(%) | 面积(km ²) | 面积(%) | 面积(%) | 面积(%) | 面积变化 | |
| | | | | | | | | | | (km ²) | (%) |
| 岩溶区 | 极重度石漠化 | 8.19 | 0.27 | 0.21 | 0.08 | 3.88 | 0.13 | 0.10 | 0.04 | -4.31 | -52.60 |
| | 重度石漠化 | 157.15 | 5.14 | 3.97 | 1.55 | 38.73 | 1.30 | 0.99 | 0.38 | -118.42 | -75.35 |
| | 中度石漠化 | 149.65 | 4.89 | 3.78 | 1.48 | 109.05 | 3.65 | 2.78 | 1.08 | -40.60 | -27.13 |
| | 轻度石漠化 | 43.21 | 1.41 | 1.09 | 0.43 | 89.19 | 2.99 | 2.27 | 0.88 | 45.98 | 106.41 |
| | 潜在石漠化 | 2700.21 | 88.29 | 68.19 | 26.70 | 2743.36 | 91.93 | 69.90 | 27.22 | 43.15 | 1.60 |
| | 小计 | 3058.41 | 100.00 | 77.24 | 30.24 | 2984.21 | 100.00 | 76.04 | 29.61 | -74.20 | -2.43 |
| 非岩溶区 | 耕地 | 447.98 | 49.71 | 11.31 | 4.43 | 353.28 | 37.57 | 9.00 | 3.51 | -94.70 | -21.14 |
| | 园地 | 4.63 | 0.51 | 0.12 | 0.05 | 5.17 | 0.55 | 0.13 | 0.05 | 0.54 | 11.62 |
| | 林地 | 396.88 | 44.04 | 10.02 | 3.92 | 512.56 | 54.51 | 13.06 | 5.09 | 115.68 | 29.15 |
| | 建设用地 | 40.94 | 4.54 | 1.03 | 0.40 | 58.19 | 6.19 | 1.48 | 0.58 | 17.25 | 42.14 |
| | 水域 | 10.73 | 1.19 | 0.27 | 0.11 | 11.16 | 1.19 | 0.28 | 0.11 | 0.43 | 3.97 |
| | 小计 | 901.16 | 100.00 | 22.76 | 8.91 | 940.35 | 100.00 | 23.96 | 9.33 | 39.19 | 4.35 |
| | 小计 | 3959.58 | — | 100.00 | 39.15 | 3924.57 | — | 100.00 | 38.94 | — | — |
| 非岩溶区 | 耕地 | 685.60 | — | 11.14 | 6.78 | 625.71 | — | 10.17 | 6.21 | -59.89 | -8.74 |
| | 园地 | 13.78 | — | 0.22 | 0.14 | 61.85 | — | 1.01 | 0.61 | 48.07 | 348.82 |
| | 林地 | 2880.60 | — | 46.81 | 28.48 | 3708.02 | — | 60.25 | 36.79 | 827.42 | 28.72 |
| | 灌丛 | 1827.46 | — | 29.70 | 18.07 | 1108.68 | — | 18.02 | 11.00 | -718.78 | -39.33 |
| | 草地 | 280.68 | — | 4.56 | 2.78 | 233.71 | — | 3.80 | 2.32 | -46.97 | -16.73 |
| | 建设用地 | 136.54 | — | 2.22 | 1.35 | 329.46 | — | 5.35 | 3.27 | 192.92 | 141.29 |
| | 水域 | 48.41 | — | 0.79 | 0.48 | 61.15 | — | 0.99 | 0.61 | 12.74 | 26.31 |
| | 未利用土地 | 280.83 | — | 4.56 | 2.78 | 25.36 | — | 0.41 | 0.25 | -255.47 | -90.97 |
| | 小计 | 6153.90 | — | 100.00 | 60.85 | 6153.93 | — | 100.00 | 61.06 | — | — |
| | 总计 | — | — | — | 100.00 | — | — | — | 100.00 | — | — |

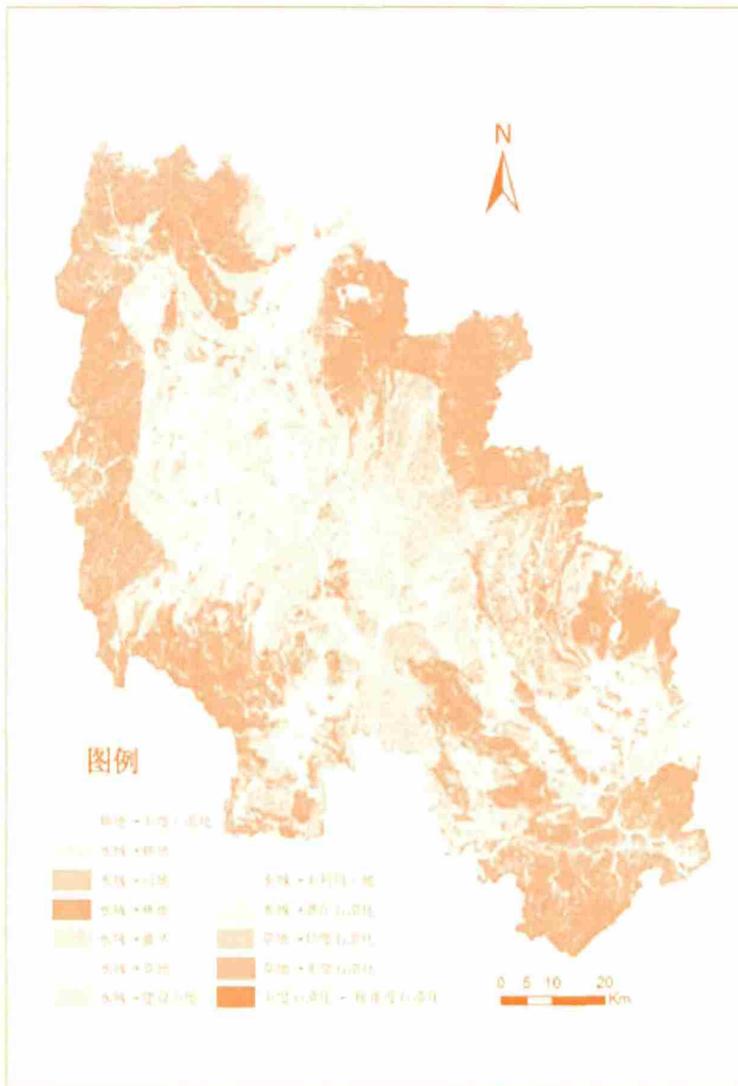


图 3 连江流域 1988—2013 年主要土地利用/覆被变化

区的海拔较高的山地和自然保护区；各等级石漠化主要零星分布在连江流域中游，石漠化面积同比减少区主要分布在东山乡、岩背镇、青莲镇、青坑镇及小江镇等地。

3.2 土地利用/覆被的时空变化分析

3.2.1 连江流域的土地利用/覆被转移矩阵分析

图 3 反映连江流域 1988—2013 年主要土地利用/覆被类型的空间变化和类间转化。从表 5 转移矩阵中可以得出：耕地保持不变面积 534.58 km²，总面积降 1.74%，面积减少源于主要转化为建设用地 (106.97 km²)，其他主要为潜在石漠化及灌丛；园地面积上升 0.60%，增加的园地主要来自灌丛与耕地；林地有 2581.25 km² 保持不变，相比增加 9.31%，这主要来自灌

丛和潜在石漠化；灌丛面积减少 5.00%，流失的面积主要转化为林地；草地总面积降 1.11%，主要转化为林地和灌丛；建设用地上升 0.76%，主要来自耕地、未利用土地及潜在石漠化区的转变；水域增加 14.10 km²，主要是由耕地、林地、建设用地及灌丛转变来的；未利用土地减少 2.32%，流失的面积主要转变为灌丛、林地与耕地；潜在石漠化有 2005.21 km² 保持不变，总面积变化不大，但类间相互转化明显；各等级石漠化面积保持不变比例较小，均在 12% 以内，反映了各等级石漠化稳定性较差的情况。

3.2.2 非岩溶区土地利用/覆被转移矩阵

根据表 6 得：25 年来连江流域非岩溶区耕地面积有 335.94 km² 保持不变，面积同比下降 0.91%，减少的

表5 连江流域1988—2013年土地利用/覆被转移矩阵

| 类型 | 耕地 | 园地 | 林地 | 灌丛 | 草地 | 建设用地 | 水域 | 未利用 | 潜在 | 轻度 | 中度 | 重度 | 极重度 | 1988(%) |
|---------|--------|-------|---------|--------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|------|---------|
| 耕地 | 515.54 | 6.62 | 69.59 | 132.82 | 14.91 | 160.42 | 9.50 | 4.49 | 218.35 | 1.31 | 6.08 | 0.56 | 0.32 | 11.30 |
| 园地 | 8.74 | 0.29 | 1.76 | 1.60 | 0.08 | 1.04 | 0.13 | 0.01 | 2.64 | 0.06 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.16 |
| 林地 | 71.06 | 17.28 | 2548.29 | 300.09 | 65.04 | 23.51 | 6.00 | 2.21 | 246.31 | 4.84 | 5.50 | 1.64 | 0.13 | 32.61 |
| 灌丛 | 106.50 | 32.17 | 1076.98 | 491.83 | 63.71 | 41.42 | 6.85 | 5.66 | 5.80 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 18.13 |
| 草地 | 5.32 | 1.18 | 133.85 | 60.98 | 63.82 | 1.95 | 1.35 | 0.15 | 0.31 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.66 |
| 建设用地 | 46.95 | 0.49 | 4.75 | 15.62 | 0.73 | 78.22 | 7.02 | 0.33 | 18.74 | 0.00 | 0.11 | 0.03 | 0.03 | 1.71 |
| 水域 | 5.28 | 0.15 | 1.47 | 3.28 | 0.76 | 10.94 | 34.23 | 0.03 | 3.83 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.59 |
| 未利用土地 | 64.15 | 1.21 | 44.75 | 83.95 | 13.85 | 44.21 | 3.46 | 12.14 | 1.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.66 |
| 潜在石漠化 | 133.12 | 4.19 | 330.02 | 0.74 | 5.12 | 20.11 | 3.23 | 0.00 | 2031.00 | 75.22 | 61.95 | 23.15 | 1.54 | 26.64 |
| 轻度石漠化 | 1.90 | 0.01 | 3.82 | 0.01 | 0.04 | 0.13 | 0.01 | 0.00 | 30.21 | 0.98 | 5.05 | 0.78 | 0.04 | 0.43 |
| 中度石漠化 | 19.18 | 0.05 | 5.42 | 0.02 | 0.13 | 1.26 | 0.09 | 0.00 | 102.95 | 2.27 | 14.18 | 2.40 | 0.73 | 1.47 |
| 重度石漠化 | 1.62 | 0.02 | 16.81 | 0.03 | 0.20 | 0.58 | 0.04 | 0.00 | 113.92 | 1.22 | 13.05 | 8.32 | 0.59 | 1.55 |
| 极重度石漠化 | 0.14 | 0.00 | 0.70 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.43 | 0.13 | 1.16 | 0.52 | 0.04 | 0.08 |
| 2013(%) | 9.70 | 0.63 | 41.98 | 10.81 | 2.26 | 3.80 | 0.71 | 0.25 | 27.54 | 0.85 | 1.06 | 0.37 | 0.03 | 100.00 |

表6 连江流域非岩溶区土地利用/覆被1988—2013年转移矩阵

| 类型 | 耕地 | 园地 | 林地 | 灌丛 | 草地 | 建设用地 | 水域 | 未利用 | 1988(%) |
|---------|--------|-------|---------|--------|-------|--------|-------|-------|---------|
| 耕地 | 335.94 | 6.27 | 49.66 | 131.06 | 13.41 | 135.09 | 7.60 | 4.40 | 11.13 |
| 园地 | 8.09 | 0.35 | 2.00 | 2.08 | 0.08 | 1.02 | 0.13 | 0.01 | 0.22 |
| 林地 | 59.59 | 16.92 | 2406.20 | 299.23 | 63.66 | 23.25 | 5.84 | 2.21 | 46.86 |
| 灌丛 | 105.47 | 31.90 | 1078.41 | 487.53 | 63.55 | 41.63 | 6.79 | 5.68 | 29.66 |
| 草地 | 5.82 | 1.27 | 141.76 | 63.51 | 63.81 | 2.29 | 1.42 | 0.18 | 4.56 |
| 建设用地 | 41.74 | 0.51 | 3.07 | 16.63 | 0.61 | 66.90 | 6.30 | 0.47 | 2.22 |
| 水域 | 4.37 | 0.13 | 1.18 | 3.21 | 0.64 | 9.85 | 28.93 | 0.03 | 0.79 |
| 未利用土地 | 66.59 | 1.32 | 48.70 | 86.66 | 14.24 | 45.89 | 3.79 | 12.04 | 4.55 |
| 2013(%) | 10.22 | 0.96 | 60.78 | 17.75 | 3.58 | 5.31 | 0.99 | 0.41 | 100.00 |

耕地主要转化为建设用地和灌丛；园地面积比例有所上升，主要来自灌丛和林地；林地面积保持不变量为2406.20 km²，相比上升13.92%，增加的林地主要由灌丛和草地转化；建设用地面积同比上升3.09%，增加的面积主要由耕地、未利用土地以及灌丛转化而来；水域面积有所增加，但来源广泛；未利用土地面积减少源于转化为灌丛、耕地和林地。

3.2.3 岩溶区土地利用/覆被转移矩阵

根据表7可得：25年来连江流域岩溶区耕地面积保持不变量为172.06 km²，相比下降2.42%，主要转化为潜在石漠化；园地和林地面积分别增加4.82%和2.85%，两者都是主要来自潜在石漠化的转变；建设用地和水域面积略增，主要来自耕地和潜在石漠化的转变；轻度石漠化的面积相比上升1.10%，主要来自潜在石漠化；重度石漠化面积变小，流失的面积主要转化为

潜在石漠化；中度和极重度石漠化面积均减小，主要转化为潜在石漠化。

3.3 景观格局变化分析

3.3.1 类型水平上的格局变化

研究区同时期各景观类型的总面积和面积比例均显示出林地和潜在石漠化占据景观中的优势地位（表8），景观特征变化不大，只是各用地类型的面积随时间变化呈现不同程度的增减，见本文3.1中所述：25年来建设用地面积增加，耕地、未利用土地减少，这说明该地区随着人口增加，导致建设用地侵占了一部分耕地，同时导致未利用土地的持续减少。25年来极重度、重度和中度石漠化面积减少很快，同时轻度石漠化面积增加了1倍多，这说明这个石漠化景观恢复和改善明显。整个石漠化的面积已经有所减少，同时，林地、园地和水域面积都增加，这表明整个连江流域景观的生态

表 7 连江流域岩溶区土地利用/覆被 1988—2013 年转移矩阵

| 类型 | 耕地 | 园地 | 林地 | 建设用地 | 水域 | 潜在 | 轻度 | 中度 | 重度 | 极重度 | 1988(%) |
|---------|--------|------|--------|-------|------|---------|-------|-------|-------|------|---------|
| 耕地 | 172.06 | 0.36 | 20.95 | 22.46 | 1.80 | 216.77 | 1.31 | 6.07 | 0.56 | 0.32 | 11.26 |
| 园地 | 1.05 | 0.03 | 0.55 | 0.15 | 0.01 | 2.62 | 0.06 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.12 |
| 林地 | 10.74 | 0.31 | 125.77 | 0.48 | 0.13 | 244.02 | 4.84 | 5.49 | 1.64 | 0.13 | 10.01 |
| 建设用地 | 6.81 | 0.01 | 1.98 | 11.60 | 0.94 | 18.61 | 0.01 | 0.11 | 0.03 | 0.03 | 1.02 |
| 水域 | 0.65 | 0.00 | 0.37 | 0.90 | 4.83 | 3.79 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.27 |
| 潜在石漠化 | 132.93 | 4.15 | 329.11 | 20.03 | 3.23 | 2031.08 | 75.23 | 61.94 | 23.15 | 1.54 | 68.26 |
| 轻度石漠化 | 1.90 | 0.01 | 3.82 | 0.13 | 0.01 | 30.22 | 0.99 | 5.05 | 0.78 | 0.04 | 1.09 |
| 中度石漠化 | 19.17 | 0.05 | 5.41 | 1.26 | 0.09 | 102.96 | 2.27 | 14.18 | 2.40 | 0.73 | 3.78 |
| 重度石漠化 | 1.62 | 0.02 | 16.78 | 0.57 | 0.03 | 113.97 | 1.21 | 13.07 | 8.32 | 0.59 | 3.97 |
| 极重度石漠化 | 0.14 | 0.00 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | 5.44 | 0.13 | 1.15 | 0.52 | 0.04 | 0.21 |
| 2013(%) | 8.83 | 4.94 | 12.86 | 1.47 | 0.28 | 70.48 | 2.19 | 2.73 | 0.95 | 0.09 | 100.00 |

表 8 1988—2013 年研究区类型水平上的指数比较

| 景观要素 | 1988 | | | | | | | 2013 | | | | | | |
|------|-------------|---------|-------|---------|----------|--------|----------|-------------|---------|-------|---------|----------|--------|----------|
| | CA | PLAND | NP | PD | ED | AWMPDF | LSI | CA | PLAND | NP | PD | ED | AWMPDF | LSI |
| ESRD | 819.3600 | 0.2069 | 2790 | 0.7046 | 1.8974 | 1.0814 | 65.8953 | 388.1700 | 0.0989 | 2337 | 0.5955 | 0.9987 | 1.0551 | 50.1818 |
| SRD | 15715.0800 | 3.9689 | 28147 | 7.1086 | 29.2170 | 1.1293 | 232.5837 | 3873.1500 | 0.9869 | 15844 | 4.0371 | 8.7734 | 1.0886 | 142.3373 |
| MRD | 14965.6500 | 3.7796 | 22781 | 5.7534 | 24.7159 | 1.1450 | 201.4473 | 10905.4800 | 2.7788 | 28620 | 7.2925 | 20.4944 | 1.1227 | 197.5280 |
| LRD | 4321.5300 | 1.0914 | 12102 | 3.0564 | 9.3466 | 1.0926 | 141.3098 | 8919.0000 | 2.2726 | 22265 | 5.6732 | 15.6154 | 1.1121 | 165.3381 |
| PORD | 270022.5900 | 68.1948 | 14578 | 3.6817 | 137.0875 | 1.4176 | 273.2872 | 274335.5700 | 69.9021 | 12902 | 3.2875 | 106.4262 | 1.3937 | 220.1383 |
| CL | 44797.0500 | 11.3136 | 28167 | 7.1136 | 43.6033 | 1.2198 | 211.7188 | 35328.1500 | 9.0018 | 29018 | 7.3939 | 33.1999 | 1.1786 | 196.0989 |
| GP | 463.2300 | 0.1170 | 2557 | 0.6458 | 1.1476 | 1.0554 | 53.8403 | 516.7800 | 0.1317 | 2501 | 0.6373 | 1.1138 | 1.0614 | 52.6579 |
| FL | 39686.9400 | 10.0230 | 45812 | 11.5699 | 55.8202 | 1.1824 | 283.6817 | 51255.6300 | 13.0602 | 46875 | 11.9440 | 52.9275 | 1.1720 | 248.6947 |
| CTL | 4093.4700 | 1.0338 | 8751 | 2.2101 | 6.8638 | 1.1360 | 110.6347 | 5819.1300 | 1.4827 | 9829 | 2.5045 | 7.8093 | 1.1317 | 111.1827 |
| WA | 1073.0700 | 0.2710 | 1435 | 0.3624 | 1.3761 | 1.1307 | 43.4155 | 1115.5500 | 0.2842 | 1143 | 0.2912 | 1.1598 | 1.1348 | 38.0000 |
| 小计 | 395957.9700 | 100.00 | — | — | — | — | — | 392456.6100 | 100.00 | — | — | — | — | — |
| CL | 68559.6600 | 11.1409 | 26889 | 4.3694 | 34.5405 | 1.2853 | 209.7772 | 62570.7000 | 10.1676 | 30459 | 4.9495 | 36.1068 | 1.2644 | 228.2164 |
| GP | 1377.9000 | 0.2239 | 4275 | 0.6947 | 1.7121 | 1.0943 | 71.0887 | 6184.8000 | 1.0050 | 15282 | 2.4833 | 6.8031 | 1.1047 | 134.9981 |
| FL | 288060.0300 | 46.8094 | 41072 | 6.6741 | 84.6826 | 1.3572 | 248.7603 | 370802.1600 | 60.2545 | 23486 | 3.8164 | 63.1923 | 1.3682 | 166.5271 |
| SL | 182745.7200 | 29.6959 | 73676 | 11.9723 | 110.1559 | 1.2997 | 407.0628 | 110867.5800 | 18.0157 | 85015 | 13.8147 | 84.6566 | 1.2379 | 400.0410 |
| GL | 28068.0300 | 4.5610 | 35947 | 5.8413 | 22.1007 | 1.2045 | 207.2856 | 23371.2900 | 3.7978 | 36861 | 5.9898 | 19.3643 | 1.1774 | 207.2373 |
| CTL | 13654.2600 | 2.2188 | 21180 | 3.4417 | 13.6326 | 1.1801 | 181.8244 | 32946.2100 | 5.3537 | 31962 | 5.1938 | 25.2670 | 1.2346 | 218.2973 |
| WA | 4841.2800 | 0.7867 | 2899 | 0.4711 | 2.5609 | 1.2381 | 57.9289 | 6114.5100 | 0.9936 | 2703 | 0.4392 | 2.5819 | 1.2346 | 51.6782 |
| UL | 28082.7900 | 4.5634 | 43873 | 7.1293 | 29.2354 | 1.1846 | 273.8623 | 2535.8400 | 0.4121 | 4862 | 0.7901 | 2.5965 | 1.1856 | 79.7708 |
| 小计 | 615389.6700 | 100.00 | — | — | — | — | — | 615393.0900 | 100.00 | — | — | — | — | — |

注:ESRD 代表 极重度石漠化,SRD 代表 重度石漠化,MRD 代表 中度石漠化,LRD 代表 轻度石漠化,PORD 代表 潜在石漠化,CL 代表 耕地,GP 代表 园地,FL 代表 林地,SL 代表 灌丛,GL 代表 草地,CTL 代表 建设用地,WA 代表 水域,UL 代表 未利用土地。

表 9 1988—2013 年研究区景观水平上的指数比较

| 年/类型 | TA | NP | PD | ED | LSI | LPI | MPS | AWMPDF | CONTAG | SHDI | SHEI | PRD |
|--------|--------------|--------|---------|----------|----------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 1988 | 1011248.2800 | 298108 | 29.4792 | 144.8837 | 366.5025 | 8.6029 | 3.3922 | 1.3280 | 50.9155 | 1.7333 | 0.7749 | 0.0013 |
| 2013 | 1003445.3700 | 315645 | 31.4561 | 101.5018 | 278.5541 | 14.3047 | 3.1790 | 1.3092 | 57.2716 | 1.5789 | 0.6758 | 0.0013 |
| 1988K | 395957.9700 | 167120 | 42.2065 | 155.5377 | 260.8208 | 21.9713 | 2.3693 | 1.3416 | 59.3168 | 1.1233 | 0.4878 | 0.0010 |
| 2013K | 392456.6100 | 171334 | 43.6568 | 124.2584 | 229.3505 | 30.2611 | 2.2906 | 1.3230 | 62.7204 | 1.0587 | 0.4598 | 0.0025 |
| 1988FK | 615389.6700 | 249811 | 40.5940 | 149.3103 | 307.7172 | 11.7151 | 2.4634 | 1.3118 | 49.1881 | 1.3784 | 0.6628 | 0.0008 |
| 2013FK | 615393.0900 | 230630 | 37.4769 | 120.2838 | 250.7747 | 23.1404 | 2.6683 | 1.3150 | 55.1720 | 1.2421 | 0.5973 | 0.0013 |

恢复是比较明显的。

景观斑块数中,1988年的林地最高,灌丛、耕地次之,与面积、面积百分比结合分析,可知灌丛和耕地较林地更分散。形状指数灌丛最高,林地、耕地、潜在石漠化次之,这与研究区地处喀斯特地区,山地、洼地众多有关,导致用地形状不规则。极重度石漠化、水域形状指数较小,是由斑块面积小、分布更加分散所致。斑块密度林地最高,灌丛、耕地次之,极重度石漠化、水域反而最小,这表明面积较小的极重度石漠化、水域镶嵌分布在占据主导地位的灌丛、耕地基质中。AWMPDF指数值范围为1.0554—1.4176,处于最大值区间(1—2)的下半部分,LSI指数值范围为43.4155—407.0628,PD指数和ED指数值较低,其所处区间分别为0.3624个/100 hm²—11.9723个/100 hm²和1.1476 m/hm²—137.0875 m/hm²;表明各类景观嵌块体的几何形状较复杂,被分割的程度较低,破碎化现象不明显,空间异质化程度低,总体多样性程度不高,丰富度较小。

3.3.1 景观水平上的格局变化

在景观格局分析软件Fragstats3.3中,计算研究区各时段景观水平上的格局指数(表9)。斑块平均大小面积(MPS)用来对比不同景观的聚集或破碎程度,值越高,说明景观越聚集。25年年间其值变化不是很大,1988年为3.3922,2013年为3.1790,反映出25年来经济增长带动了更强烈的人类干扰,引起比较大的景观变化。面积加权的平均斑块分维数(AWMPDF)主要用以描述一定尺度上斑块边界形状的复杂程度,值越低,斑块形状越有规律,斑块受干扰程度越大。1988—2013年,研究区面积加权的平均斑块分维数减小(表8),表明在经济增长的同时,人类干扰也在加大,使得斑块形状简单化。

蔓延度指数(CONTAG)反映景观中不同组分的聚集程度,其值大说明景观由少数聚集的大斑块组成,其值小说明景观由许多分散的小斑块组成。1988—2013年,研究区景观蔓延度指数处于中等(表9),表明少数大斑块团聚(主要是林地、潜在石漠化斑块)和多数小斑块分散(主要是未利用地、极重度和重度石漠化斑块)的现象并存,但团聚程度不高;而研究时段内该指

数呈缓慢增加趋势,说明景观受少数大斑块控制的程度随着时间的推移而有所增加。景观多样性指数反映了景观组分的多少和各景观组分所占比例的差异,其值越大,景观内各组分所占比例越均匀。研究时段内,景观多样性指数在减小(表9),说明各景观要素所占比例的差异有所增加。

4 结论

本文以粤北岩溶区连江流域为研究对象,文中按照岩溶区和非岩溶区单独分类,建立了岩溶区和非岩溶区的分类体系。根据岩溶区的土地是否发生石漠化以及其发育程度,分为石漠化区和非石漠化区。依据岩石裸露率、植被土壤覆盖率、土壤厚度及土地利用等并结合流域的地表状况,石漠化区划分为轻度、中度、重度和极重度石漠化4级。结论如下:

(1)25年来各种类型石漠化土地无论是在数量、面积和空间分布特征方面都发生了十分显著的变化,总面积减少117.34 km²,比例为32.76%,斑块数增加了3246块;石漠化由1988年的重度、中度石漠化为主转变为2013年以中度、轻度石漠化为主。

(2)25年来轻度石漠化土地面积增加45.98 km²(106.41%),具有明显增加的趋势。中度、重度和极重度石漠化土地面积均减少,减少面积分别为40.60 km²(27.13%)、118.42 km²(75.35%)和4.31 km²(52.60%),减少的面积主要转变为潜在石漠化土地。这符合2005年的广东省岩溶区石漠化监测报告。

(3)连江流域石漠化土地的总体景观空间格局动态变化在程度上有所差异,表现为景观异质性减弱,破碎度降低,而景观优势度增加;景观丰富度密度为0.0013,面积加权的平均斑块分维数在1.0554—1.4176之间,处于最大域值1—2的下段;景观形状指数在43.4155—407.0628之间;斑块密度和边界密度的都很小,分别处在0.3624个/100 hm²—11.9723个/100 hm²和1.1476 m/hm²—137.0875 m/hm²,表明各类景观嵌块体的几何形状较复杂,被分割的程度较低,破碎化现象不明显,空间异质化程度低,总体多样性程度不高,丰富度较小。从1988年到2013年本文中所有指数的变化表明连江流

域的景观格局已经呈现良好的发展趋势。

参考文献(References):

- [1] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 石漠化的概念及其内涵[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 88-89.
- [2] JOHNSON MS, BRADSHAW AD. Ecological principles for the restoration of disturbed and degraded lands[J]. Applied Biology, 1979(4): 141-200.
- [3] PICKETT STA, PARKER VT. Avoiding the old pit-falls: opportunities in a new discipline[J]. Restoration Ecology, 1994(2): 75-79.
- [4] 梁亮, 刘志霄, 张代贵, 等. 喀斯特地区石漠化治理的理论模式探讨[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 595.
- [5] 广东省地质调查院. 粤北岩溶石山区地下水勘查与生态环境地质调查评价报告[R]. 2002, 1-10.
- [6] 王仰麟. 农业景观格局与过程研究进展[J]. 环境科学进展, 1998, 6(2): 29-34.
- [7] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析[J]. 生态学报, 1995, 15(2): 113-120.
- [8] 王宪礼, 胡远满, 布仁仓. 辽河三角洲湿地的景观变化分析[J]. 地理科学, 1996, 6(3): 260-265.
- [9] 张明. 榆林地区脆弱生态环境的景观格局与演化研究[J]. 地理研究, 2000, 19(1): 30-36.
- [10] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州喀斯特地区河流的研究—碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 394-406.
- [11] 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 404-414.
- [12] 刘明, 王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化及其驱动力[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1317-1324.
- [13] 张富, 余新晓, 陈丽华. 小流域水土保持植物措施对位配置研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 195-198.
- [14] 李春晖, 郑小康, 崔崑, 等. 衡水湖流域生态系统健康评价[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 565-573.
- [15] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 1020.
- [16] 王兮之, 梁钊雄. 基于 MODIS-NDVI 的连江流域植被覆盖及空间格局变化分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 60-61.
- [17] 邹鸣. 连江流域水文特性分析[J]. 广东水利水电, 2005, 6: 74-75.
- [18] 李森, 董玉祥, 王金华. 土地石漠化概念与分级问题再探讨[J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 279-284.
- [19] 王金华, 李森, 李辉霞, 等. 石漠化土地分级指征及其遥感影像特征分析—以粤北岩溶山区为例[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 766-767.
- [20] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究—基于卫星遥感数据[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 229-239.
- [21] 任斐鹏, 江源, 熊兴, 等. 东江流域近 20 年土地利用变化的时空特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 143-152.
- [22] 刘瑞, 朱道林. 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, 2010, 32(8): 1545-1549.
- [23] 段增强, 张凤荣, 孔祥斌. 土地利用变化信息挖掘方法及其应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 63-66.
- [24] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 等. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 123-134.

第一作者简介:汪明冲(1980—),男,佛山科学技术学院讲师,在读博士。主要研究方向为环境遥感与GIS应用。