

# 贵州喀斯特山区近 30a 景观格局 脆弱性时空演化研究

陆清平 赵翠薇 王杰 杨兴艳<sup>1</sup>

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 喀斯特山地生态环境保护与资源利用协同创新中心, 贵州 贵阳 550025)

**【摘要】:** 研究景观格局脆弱性, 对提高生态保护意识、促进生态文明建设有重要意义。运用景观指数和空间自相关分析方法, 探究了贵州典型喀斯特山区近 30a 的景观格局脆弱性时空演化特征。结果表明: (1) 研究区最佳分析粒度是 150m、幅度为 900m; (2) 1990~2018 年景观格局脆弱性以低和较低类型为主, 面积均占 70%以上; 转化类型主要发生在低和较低及中等脆弱度间, 且集中于海拔 800~1400m 和坡度 6°~25° 范围; (3) 1990~2018 年景观格局脆弱性存在明显的正向空间自相关关系, 其中, 高-高集聚主要在中部贵阳、西部六盘水、西南兴义、东北部思南及东南荔波县等区域, 低-低集聚区主要在北部余庆县和南部紫云县等地; (4) 国家政策和人类活动等综合作用是引起景观格局脆弱性变化的重要因素。研究区近 30a 景观格局脆弱性略有增加且空间上有分散趋势。

**【关键词】:** 喀斯特山区 景观格局脆弱性 空间自相关 贵州

**【中图分类号】:** P901 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)03-0634-13

景观格局是各种地类斑块在时空上镶嵌组合的综合产物<sup>[1,2,3]</sup>, 在生物多样性保护和维持生态系统稳定性方面承担着重要作用<sup>[4]</sup>, 景观格局相关研究有助于提高生态保护意识, 具有十分重要的意义。

景观格局脆弱性是指一定时空条件下, 景观格局受外界扰动而使其结构、功能和特性发生改变的可能性响应<sup>[5]</sup>, 直接影响区域水源涵养、水土保持等生态系统服务功能, 是衡量生态系统安全和稳定的重要指标<sup>[6]</sup>, 常用景观脆弱度来表征<sup>[7]</sup>。目前, 景观格局脆弱性研究主要关注森林管理<sup>[8,9]</sup>、矿区开发<sup>[10]</sup>、湖泊流域<sup>[11,12]</sup>、湿地<sup>[13]</sup>等领域; 研究方法多使用空间自相关<sup>[14]</sup>、移动窗口法<sup>[15]</sup>、空间统计学方法<sup>[16]</sup>等, 并结合“3S”技术进行空间可视化表达<sup>[17]</sup>; 研究区多集中于沿海平原或经济较为发达的区域, 针对生态脆弱和经济欠发达的西南喀斯特山区研究较少, 其景观格局脆弱性呈现怎样的水平? 分布特征和演化规律尚不明晰。

喀斯特山区, 生态脆弱、石漠化严重。尤其是随着工业和城镇化进程加快, 石漠化治理和退耕还林等人类活动的影响, 导致区域景观变化剧烈, 景观属性复杂程度升高, 因此, 选取贵州喀斯特地貌发育典型区域, 开展景观格局脆弱性时空演化规律研究具有重要科学实践意义, 可为喀斯特山区生态环境保护、土地优化提供基础支撑和科学参考。

**作者简介:** 陆清平(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用与规划. E-mail: 1776280435@qq.com; 赵翠薇 E-mail: zhaocuiwei@sohu.com

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划项目(41471032); 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(u1612441)

## 1 研究区概况

根据中国国家自然图集中华南喀斯特地形分布图,选取喀斯特地貌发育强烈的贵州省南部、中部及周边为研究区,面积96494.95km<sup>2</sup>,占贵州国土面积的54.76%。出露有石灰岩、白云岩以及灰岩碎屑岩互层、灰岩夹碎屑岩,是典型的喀斯特地貌分布区。

研究区海拔220~2825m,地势西高东低,起伏大,西部六盘水-纳雍地势最高,处于贵州第一阶梯,河谷深切,峰丛、漏斗、洼地等发育强烈;中部安顺-贵阳等为贵州中部高原面,处于第二阶梯带,溶蚀丘原广布,东部和东北部及南部海拔最低,为第三阶梯。属亚热带季风气候,多年平均气温为14.8℃、降水量为1200mm<sup>[18]</sup>。土壤类型以黄壤、水稻土、黄棕壤和粗骨土及紫色土为主。

研究区是贵州城镇化及经济发展水平较高区域。2018年常住人口为2465.10万人,城镇化率达53.36%(贵州省47.52%),GDP为11881.26亿元,占贵州省国民经济总收入的80.24%,三次产业比例为11.51:37.89:50.60,工业产值由1989年的39.82亿元增加至2018年的2817.33亿元,增加71倍左右(人口和经济数据由贵州省统计年鉴统计并计算获得)。境内主要地类为林地、耕地及草地,1990和2018年占比均在47.72%、28.47%和20.13%以上,建设用地从1990年426.95km<sup>2</sup>增至2018年1643.27km<sup>2</sup>,增加近4倍,水域扩大2.5倍,未利用地增加29.69%,林地和耕地略有下降,降幅为4.20%和2.97%。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源及处理

1990年土地利用数据(精度90%)来源于贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室(1:10万),参照LUCC(土地利用/土地覆盖变化)分类体系,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6类;2018年土地利用数据由landsat8遥感影像解译所得,影像来自美国地质勘探局(<https://www.usgs.gov/>)(时相为5~9月份,云量小于10%)共11景,轨道号分别是126/041-043、127/040-043、128/040-043,分辨率为30m。首先利用ENVI5.3软件对每幅影像进行辐射定标和大气校正等,然后采取二次多项式进行几何纠正,以1990年土地利用数据为底图,选取道路、桥梁和河流交叉口等同名地物30个控制点( $30 > (n+1) * (n+2) / 2$ ,  $n=2$ ,  $n$ 表示几次多项式中的次数)<sup>[19]</sup>,精度控制在0.5个像元内;然后确定一幅参照影像,将其余10幅影像进行镶嵌,重叠部分进行直方图和彩色亮度匹配,边缘进行羽化,将11幅影像无缝拼接成一幅影像;边界裁剪后获取2018年研究区影像,选择5、4、3波段进行标准假彩色合成,后进行监督分类(最大释然法)和人工目视解译,根据野外实地考察及Google高分辨率影像抽样检验,精度为91%。

DEM(数字高程模型)由地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载获取,分辨率为30m。

### 2.2 景观格局脆弱性指数

景观格局脆弱性指数是基于景观格局的空间分异和空间关联特性,反映景观格局的空间变化规律,赋予景观指数生态学意义的综合指数模型<sup>[5]</sup>,其值越大,则表明研究区的景观敏感程度大,脆弱性越高。参照已有研究<sup>[11]</sup>,利用景观敏感性和适应性指数构建景观脆弱性指数。其计算公式如下:

$$LVI = LSI \times (1 - LAI) \quad (1)$$

$$LSI = \sum_{i=1}^n U_i \times V_i \quad (2)$$

$$U_i = a \times FN_i + b \times FD_i + c \times DO_i \quad (3)$$

$$LAI = PRD \times SHDI \times SHEI \quad (4)$$

式(1)中：LVI 为景观脆弱性指数，LSI 是景观敏感性指数，LAI 表示景观适应性指数。式(2)中：n 表示景观类型的数量，本文中 n=6, i 为景观类型； $U_i$  和  $V_i$  分别为第 i 类景观的干扰度指数和易损度指数，结合已有土地利用易损度研究<sup>[5]</sup>，将建设用地赋值为 1，水域为 2，耕地为 3，林地为 4，草地为 5，未利用地为 6。式(3)中： $FN_i$ 、 $FD_i$ 、 $DO_i$  分别是第 i 景观的破碎度、分维数倒数及优势度<sup>[6]</sup>；a、b、c 为 3 个指数对应的权重值，参考游巍斌等<sup>[20]</sup>和时卉等<sup>[21]</sup>研究，分别赋值 0.5、0.3 和 0.2。式(4)中：PRD、SHDI 和 SHEI 表示景观斑块丰度密度、多样性及均匀性指数。式(3)和式(4)中指数均由 Fragstats4.2 景观指数软件计算获得。一定区域内，土地利用类型斑块越丰富，景观系统多样性和结构就越复杂，组分就越均衡，系统越稳定，适应能力则越强，脆弱性越低，但当土地利用类型斑块超过某范围后，景观破碎程度增加，脆弱性越高<sup>[10]</sup>。

### 2.3 空间自相关

空间自相关可检验要素及其领域属性间的分布模式。采用全局和局部 Moran' s 指数来度量景观格局脆弱性的空间自相关性。其计算公式分别是：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$I_i = \frac{(n-1)(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中：I 和  $I_i$  分别表示全局和局部 Moran' s 指数，值域[-1~1]，绝对值越大，相关性越强，脆弱性分布越集聚，反之则相关性越弱，分布稀疏，当值为 0 时，不存在自相关性，脆弱性呈随机分布，值大于 0 时，成正相关，反之为负相关；n 为栅格数； $\bar{x}$  为研究区脆弱性均值； $x_i$  和  $x_j$  为第 i、j 个栅格的属性值 ( $i \neq j$ )，其中  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ； $j=1, 2, 3, \dots, m$ ； $w_{ij}$  为权重值，当 i 与 j 相邻时， $w_{ij}=1$ ，相距较远时， $w_{ij}=0$ 。

### 2.4 地形因子分区及面积

坡度为 6°、15°、25° 等是坡度划分的重要节点，参考罗光杰等<sup>[22]</sup>和谭玮颐等<sup>[23]</sup>的研究，结合研究区地形地貌特征，将坡度和高程分别分为 6 个等级(表 1、2 和图 1、2)。

表 1 研究区坡度分级

坡度等级	分级区间	面积(km <sup>2</sup> )	面积占比(%)
------	------	----------------------	---------

平坡	$\leq 6^\circ$	12163.36	12.61
缓坡	$(6^\circ \sim 15^\circ]$	31175.98	32.31
斜坡	$(15^\circ \sim 25^\circ]$	30817.40	31.9
陡坡	$(25^\circ \sim 35^\circ]$	15512.93	16.08
急坡	$(35^\circ \sim 45^\circ]$	523.39	5.43
险坡	$>45^\circ$	1586.89	1.63

表 2 研究区高程分级

高程等级	分级区间(m)	面积(km <sup>2</sup> )	面积占比(%)
I	$\leq 500$	155741	1.61
II	$(500 \sim 800]$	12947.3	13.42
III	$(800 \sim 1100]$	30220.70	31.32
IV	$(1100 \sim 1400]$	30810.98	31.93
V	$(1400 \sim 1700]$	13204.12	13.68
VI	$>1700$	7754.30	8.04

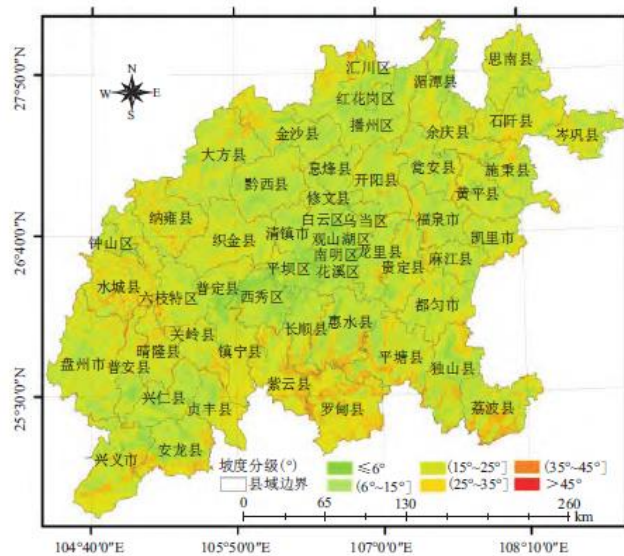


图 1 研究区坡度分布

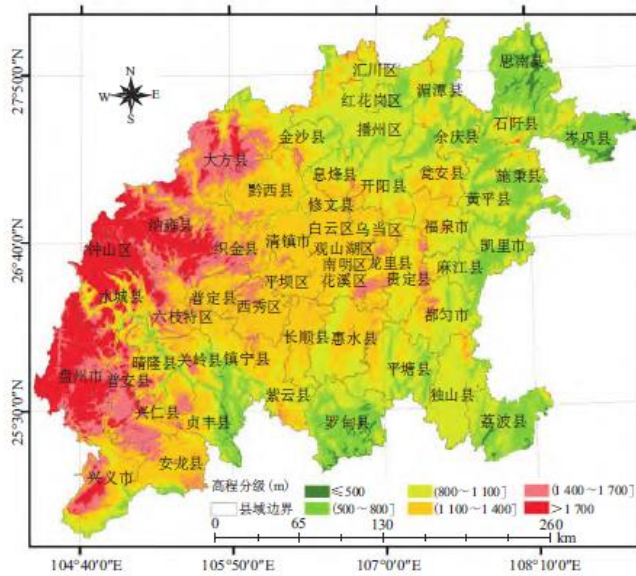


图2 高程等级分布

由表1可知,研究区以缓坡和斜坡为主,各占32.31%和31.94%,其次为陡坡和平坡,占16.08%和12.61%,急坡和险坡面积最小,共占7.06%。从图1看,平坡主要集中在贵阳市及其周围区域,黔西、兴仁及安龙也有少量分布,缓坡和斜坡分布范围最广,陡坡主要分布在研究区边缘及西部区域,急坡与险坡在罗甸和六枝特区一带面积最大。

由表2可知,研究区高程以III(800~1100m)和IV(1100~1400m)两个等级为主,共占63.25%,I等级(≤500m)面积最少,仅占1.61%。从图2看,大于1700m区域在盘州、赫章及大方等西部地区,1100~1700m集中在以贵阳为核心的中部区域,500~1100m以汇川区、福泉市、平塘县等为主,小于500m区域主要在思南、岑巩和罗甸及荔波县等边缘地带。

### 2.5 确定最佳分析粒度和分幅

已有研究在确定最佳粒度和分幅方面,常根据主观来确定,缺少一定客观性,因此,引进概率统计学,定量确定最佳粒度和分幅。(1)最佳粒度确定:在1990和2018年两期分辨率为30m的土地利用栅格数据基础上,以30m为间距,在30~300m之间运用Fragstats4.2计算10次不同粒度结果,根据变化曲线拟合程度和突变拐点确定最佳粒度<sup>[4]</sup>。

(2)最佳幅度确定:利用ArcGIS10.3生成1000个随机点,以最佳粒度为基础,1990年土地栅格为底图,在Fragstats4.2移动窗口中,以300m半径为起点,每隔300m运算一次,直至终点3000m,生成10幅景观指数图,使其与随机点相交,提取随机点景观指数平均值,采用Origin2017软件进行拟合,获取最佳分幅。

由图3可知,景观指数中,只有斑块数量(NP)和分维数倒数(FRAC\_MN)与粒度具有拐点的变化,粒度在150m之前与斑块数量(NP)呈现上下波动态势,在150m后与之呈负相关关系,与分维数倒数(FRAC\_MN)同样在150m处出现转折,其他指数与粒度变化相对平稳,未出现拐点。研究认为中等偏大粒度最能反映景观格局特征<sup>[24]</sup>,因此,选取150m为最佳分析粒度。同理,图4中,除斑块数量(NP)和分维数倒数(FRAC\_MN)外,其余指数均在幅度900m前变化较为明显,此后趋于稳定,因而以900m作为最佳分析幅度。

## 3 结果分析

### 3.1 景观脆弱性时空变化特征

为突显贵州喀斯特区景观脆弱性时空演化特征差异，对两期景观脆弱性进行等级划分。采用手动或等间距进行划分<sup>[6]</sup>，不能体现景观格局脆弱性的自然突变特征，自然断点法可使各等级的变异总和最小，利于增强景观脆弱突变特征<sup>[25]</sup>。采用自然断点法将景观格局脆弱性指数划分为 5 个等级，分别是：低脆弱度区、较低脆弱度区、中等脆弱度区、较高脆弱度区和高脆弱度区(图 5)。

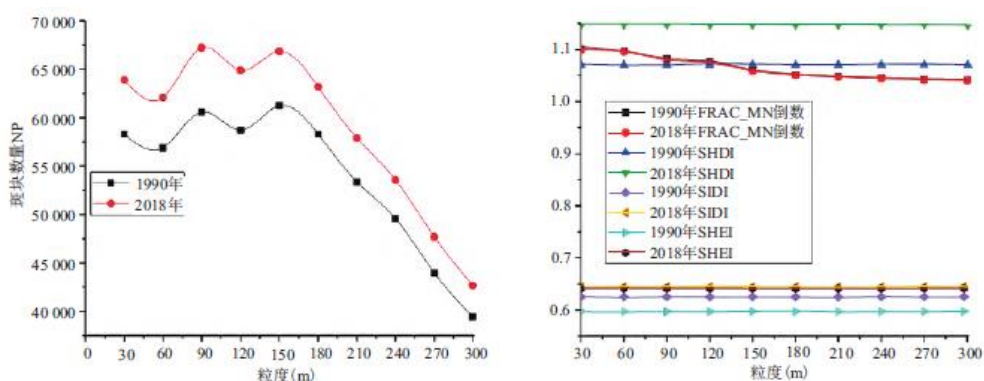


图 3 景观指数与粒度变化曲线图

注：由于 PRD 景观斑块丰度密度指数为 0, 所以未在图 3 中显示出。

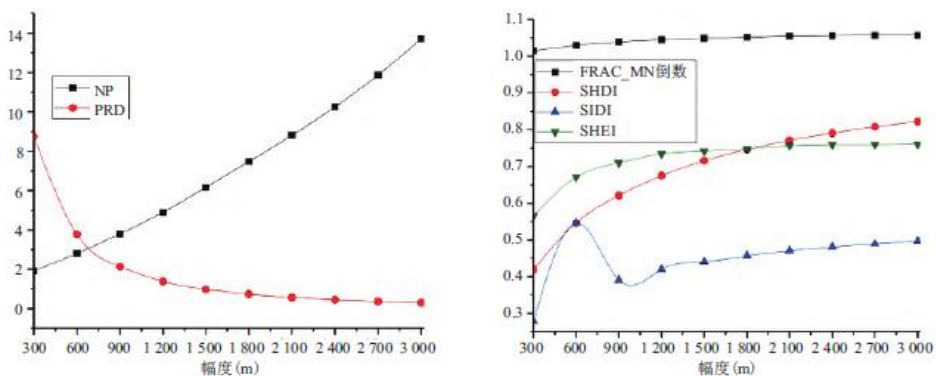


图 4 景观指数与幅度变化曲线图

图 5 可知，1990 和 2018 年，研究区景观脆弱度以低和较低为主，1990 年共占 73.13%，2018 年合计比为 71.24%，其中，低脆弱度主要集中在汇川区、湄潭县等北方地区及紫云和镇宁县等地，西部纳雍县一带有少数连片分布。28 年间低脆弱度面积略有上升，增幅为 0.70%；较低脆弱度整体减少 2.59%，减少区多分布于西北、西部及其西南区域的金沙、大方、水城和盘州市等地，东部区域也有零星分布于都匀和凯里市等地。中等和较高脆弱度面积有所上升，分别增加 0.68% 和 1.88%，高度脆弱区面积减小 0.67%，三者均是零星分布。

从图 6 和表 3 可知，研究区景观格局脆弱度变化面积共 25602.61km<sup>2</sup>，占研究区面积的 26.53%，变化较大的区域主要在中部(贵阳市辖区、龙里县和清镇市等)、北部(汇川区、红花岗区和湄潭县等)、西部(六枝特区、纳雍、普定和织金县等)、东部(福

泉和凯里市等)、西南部(兴义市和安龙县等)。脆弱度变化类型以较低脆弱度向低脆弱度(16.18%)、较低脆弱度向中等脆弱度(15.63%)、中等脆弱度向较低脆弱度(13.10%)及低脆弱度向较低脆弱度(12.47%)转变为主,中等以上脆弱度等级变化面积较小。同时,脆弱度在相邻等级间转换,如较低脆弱度转化为低脆弱度和中等脆弱度的面积占比较高(均大于15%),但转化为较高和高等级的面积较小。可见,景观格局脆弱度之间的变化是循序渐进的,具有一定的梯度变化特征。

### 3.2 景观脆弱性空间关联格局

#### 3.2.1 全局自相关

为定量描述景观格局脆弱性空间分布规律,以最佳分幅 900m 为网格大小,共划分 116062 个正方形网格单元,利用 GeoDa 软件,计算 1990 年和 2018 年研究区景观格局脆弱性指数的全局 Moran' s 指数散点图(图 7)。

由图 7 可知,1990 和 2018 年 Moran' s 指数分别是 0.314 及 0.307(通过随机化 999 次置换(蒙特卡罗)检验,两期 P 值为  $0.001 < 0.05$ , Moran' s 指数有效),均大于 0,存在着较强的正向空间自相关性,1990~2018 年全局 Moran' s 指数略有降低,表明研究区景观格局脆弱性有分散的趋势。

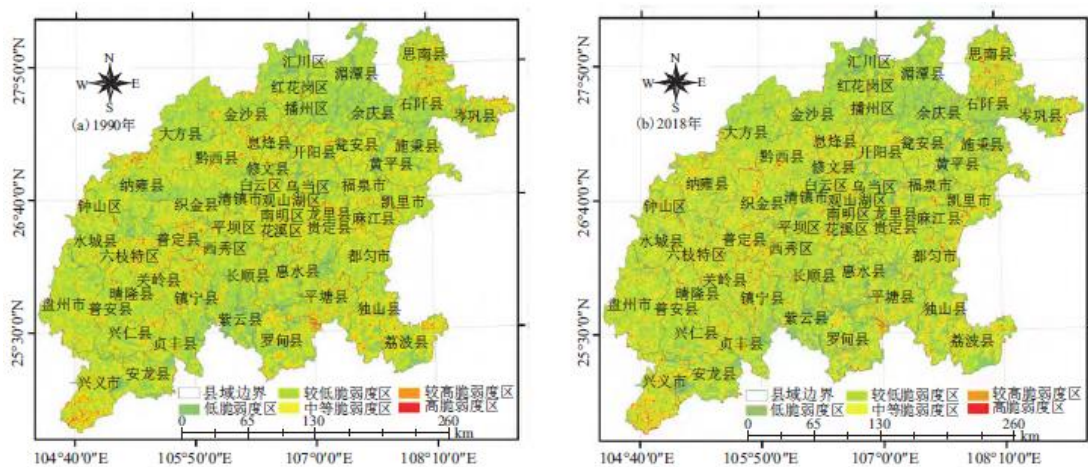


图 5 1990 和 2018 年景观脆弱性分区

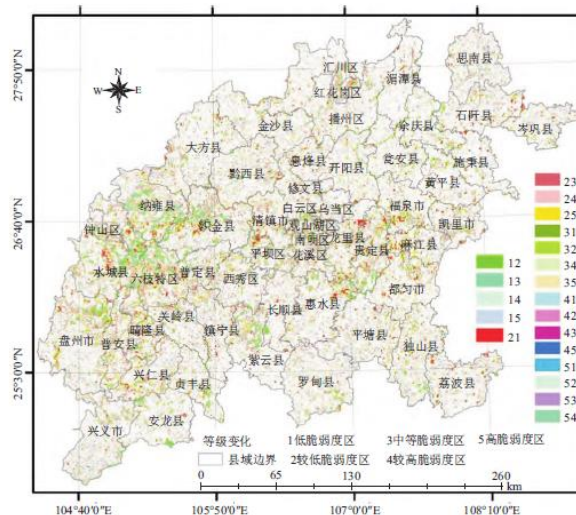


图 6 1990~2018 年景观脆弱度等级空间变化

表 3 1990~2018 年景观脆弱度面积变化

等级变化类型	变化面积 (km <sup>2</sup> )	占比 (%)	等级变化类型	变化面积 (km <sup>2</sup> )	占比 (%)
12	3191.13	12.47	34	1782.59	6.96
13	938.51	3.67	35	275.83	1.08
14	379.09	1.48	41	296.96	1.16
15	41.00	0.16	42	809.52	3.16
21	4142.57	16.18	43	1702.38	6.65
23	4000.80	15.63	45	416.12	1.63
24	1678.75	6.56	51	70.61	0.28
25	248.83	0.97	52	214.32	0.84
31	717.72	2.80	53	144.86	0.57
32	3353.69	13.10	54	1194.12	4.66

注：表中 1 代表低脆弱度，2 为较低脆弱度，3 为中等脆弱度，4 为较高脆弱度，5 为高脆弱度，其中 12 表示 1990~2018 年从低脆弱度转化为较低脆弱度，其它以此类推。

两期点位大多分布在第一和第三象限，说明空间上以高-高集聚和低-低集聚为主。

### 3.2.2 局部自相关

为揭示研究区局部脆弱性分布特征，利用局部自相关将全局 Moran' s 指数映射到较小区域上，获得研究区 LISA 集聚图。

由图 8 可知，1990 和 2018 年景观格局脆弱性高-高和低-低类型分布区域差异不大，高-高集聚区在兴义市、六枝特区中部及南部、纳雍县北部、黔西县至金沙县中部、思南和石阡县中部、独山和荔波县东部、镇宁县南部及贵阳和龙里中偏南部等区域分布较广，主要原因是耕地、林地及草地破碎化程度较高，人类活动影响，使得地类景观相互转化频率加快，脆弱性高。水城东部、纳雍和织金南部及六枝特区北部区域，发生了低-低类型向其他类型的转变，这一带煤炭资源丰富，矿产资源开发，造成草地、林地和耕地转化为建设用地，破碎程度加深，随着山区农村人口大量外出务工，耕地撂荒转为草地及林地，景观易损度上升，草地本底破碎化严重，使得低-低转变为高-高类型。

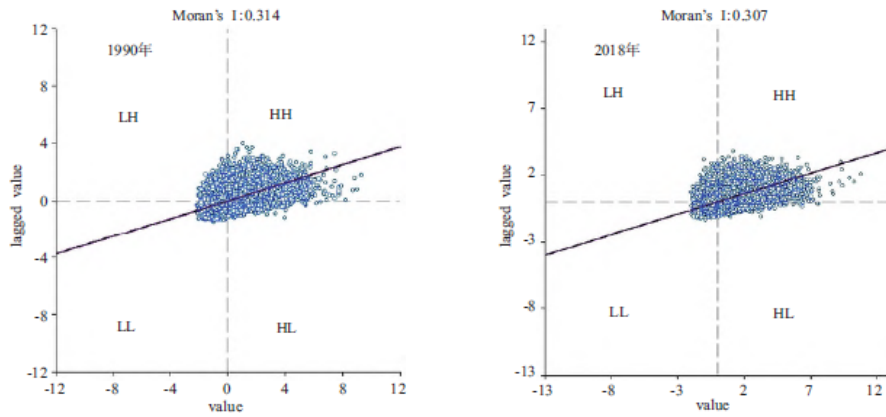


图7 1990和2018年景观脆弱性Moran's I散点图

注：HH 高值集聚，HL 高值被低值包围，LL 低值集聚，LH 低值被高值包围。

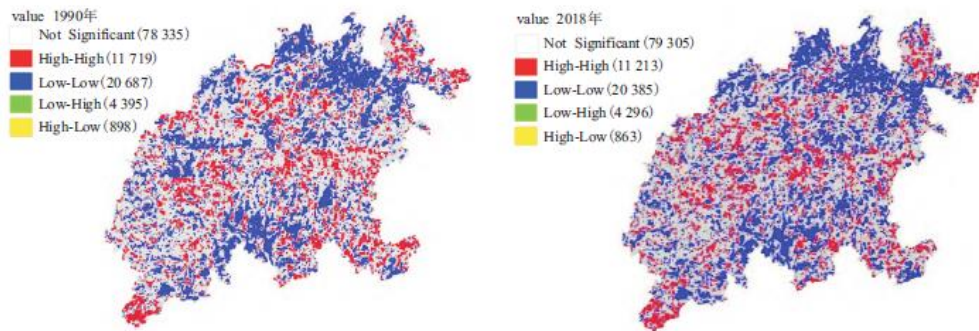


图8 1990和2018年景观格局脆弱性局部空间自相关LISA集群

脆弱性低-低类型以播州区和汇川区北部、余庆和湄潭县接壤处、紫云和长顺及惠水县南部、施秉县北部和石阡县南部等区域集聚，坡度较大区域限制了人类活动，景观变化速率较慢，林地集中连片，景观破碎程度低。在自然条件较好区域，城镇扩展迅速，连接成片，区域破碎化和敏感性减小。

### 3.3 景观脆弱度与坡度及高程等级的关系

为探究景观格局脆弱度变化与坡度和高程之间的关系，将坡度和高程等级与景观格局脆弱度变化类型进行面积统计分析。

由表4可知，1990和2018年脆弱度类型主要集中在缓坡和斜坡间，两期低脆弱度均占研究区面积的7%以上，较低脆弱度均大于13%，中等脆弱度高于5%，较高和高脆弱面积较小。缓坡和斜坡间景观格局脆弱度变化频率较高，占研究区脆弱度变化面积的63.09%，平坡和陡坡间的变化占19.63%。

表4 1990~2018年坡度和高程等级的景观脆弱度面积(km<sup>2</sup>)

脆弱性等级	1990年高程	2018年高程	1990年坡度	2018年坡度

		面积	占比(%)	面积	占比(%)	面积	占比(%)	面积	占比(%)
1	低	301.57	0.31	248.07	0.26	2428.52	2.52	2494.20	2.58
	较低	593.49	0.62	545.07	0.56	5820.86	6.03	5319.85	5.51
	中等	371.76	0.39	373.60	0.39	2102.93	2.18	2209.26	2.29
	较高	198.81	0.21	273.99	0.28	983.25	1.02	1329.31	1.38
	高	76.02	0.08	100.91	0.10	333.51	0.35	316.46	0.33
2	低	3628.36	3.76	3536.74	3.67	7454.85	7.73	7751.93	8.03
	较低	5593.01	5.80	5355.54	5.55	14281.65	14.80	13374.24	13.86
	中等	2257.27	2.34	2353.15	2.44	5125.77	5.31	5313.54	5.51
	较高	1111.49	1.15	1397.33	1.45	2528.74	2.62	3130.69	3.24
	高	333.75	0.35	281.12	0.29	785.70	0.81	606.40	0.63
3	低	9428.99	9.77	10006.40	10.37	9303.72	9.64	9575.47	9.92
	较低	13036.19	13.51	12471.60	12.92	13521.14	14.01	12815.04	13.28
	中等	4712.32	4.88	4608.38	4.78	4993.36	5.17	5190.39	5.38
	较高	2322.17	2.41	2659.13	2.76	2497.99	2.59	2991.40	3.10
	高	719.30	0.75	473.47	0.49	764.56	0.79	508.37	0.53
4	低	8618.99	8.93	9006.01	9.33	5767.89	5.98	5848.01	6.06
	较低	13958.35	14.47	12809.94	13.28	6450.20	6.68	6150.33	6.37
	中等	4975.87	5.16	5277.13	5.47	2432.58	2.52	2545.62	2.64
	较高	2488.23	2.58	3143.29	3.26	1238.50	1.28	1480.98	1.53
	高	794.45	0.82	599.54	0.62	377.25	0.39	241.48	0.25
5	低	3425.92	3.55	3479.53	3.61	2222.90	2.30	2216.94	2.30
	较低	6215.83	6.44	5862.40	6.08	2069.77	2.14	1990.05	2.06
	中等	2151.93	2.23	2338.83	2.42	798.89	0.83	839.90	0.87
	较高	1082.41	1.12	1323.46	1.37	395.89	0.41	483.86	0.50
	高	338.33	0.35	210.18	0.22	122.23	0.13	78.93	0.08
6	低	2492.68	2.58	2295.46	2.38	718.65	0.74	685.69	0.71
	较低	3322.41	3.44	3163.25	3.28	575.64	0.60	558.26	0.58

中等	1226.91	1.27	1409.46	1.46	242.53	0.25	261.84	0.27
较高	558.89	0.58	775.09	0.80	117.63	0.12	156.05	0.16
高	159.25	0.17	116.89	0.12	37.85	0.04	30.47	0.03

注：表中 1 为高程 I ( $\leq 500\text{m}$ ) 和坡度平坡 ( $\leq 6^\circ$ )、2 为 II ( $500\sim 800\text{m}$ ) 和缓坡 ( $6^\circ\sim 15^\circ$ )、3 为 III ( $800\sim 1100\text{m}$ ) 和斜坡 ( $15^\circ\sim 25^\circ$ )、4 为 IV ( $1100\sim 1400\text{m}$ ) 和陡坡 ( $25^\circ\sim 35^\circ$ )、5 为 V ( $1400\sim 1700\text{m}$ ) 和急坡 ( $35^\circ\sim 45^\circ$ )、6 为 VI ( $> 1700\text{m}$ ) 和险坡 ( $> 45^\circ$ )。

1990 和 2018 年脆弱度类型主要分布在 III ( $800\sim 1100\text{m}$ ) 和 IV ( $1100\sim 1400\text{m}$ ) 间，两期低脆弱度均占研究区面积的 8% 以上，较低脆弱度高于 12%，中等脆弱度大于 4.5%，较高和高脆弱比例较小。800~1400m 区间景观格局脆弱度变化较大，占研究区变化面积的 26% 以上，其次 500~800m 和 1400~1700m 各占 12.40% 和 15.62%，均以低和较低脆弱度间相互转化及较低向中等脆弱度变化为主。

综上，坡度和高程景观脆弱度变化类型发现，景观格局脆弱分布和变化都集中在 800~1400m 和  $6^\circ\sim 25^\circ$  之间，以较低脆弱度向低脆弱度转变为主，这是因为该区域地势较为平坦，人口分布集中<sup>[26]</sup>，人口增长使得耕地和林地面积减少，建设用地扩张，零星斑块连接成片，景观破碎化减轻，景观易损度降低，增加了低脆弱的面积。

### 3.4 景观脆弱度变化与地类变化的关系

地类景观改变导致景观脆弱度变化<sup>[27]</sup>，将土地利用变化类型和景观脆弱度变化图层叠加统计发现(图 9)：(1) 景观脆弱度变化类型中，以草地转林地、林地转耕地、耕地转草地为主，其中草地转林地占各脆弱度类型面积变化的 30% 以上，林地转耕地在 16%~32% 之间，耕地转草地在 14%~29% 范围内。(2) 1990~2018 年，水域转为建设用地主要分布在较低向低、中等向较低脆弱度变化区域；建设用地转为水域则集中于高向较高、较高向中等脆弱度变化范围；未利用地转为林地、耕地和建设用地，以较低向低、中等向较低脆弱度变化区域显著。

## 4 讨论

从研究结果看，研究区景观高脆弱类型面积减少  $642.10\text{km}^2$ ，但较高和中等脆弱等级面积各增加  $1809.57\text{km}^2$  和  $656.72\text{km}^2$ ，景观脆弱性整体略有上升，说明喀斯特山区生态建设依然面临严重威胁，脆弱性上升可能导致生态系统弹性下降，使得水源涵养功能和碳储存功能等生态系统服务功能损失<sup>[28,29]</sup>。1990~2018 年研究区林地转耕地较多，在不同等级脆弱度区域变化面积比重均较高，分别占低、较低、中等、较高和高脆弱面积变化的 17.09%、31.07%、31.30%、29.05% 和 27.16%，可能会引起植物蒸散发能力和降雨截留能力降低，致使短时间内地表径流增加，山洪灾害发生的可能性上升；高程为 800~1400m 和坡度在  $6^\circ\sim 25^\circ$  区域是脆弱性变化的集中范围，此区域也是人口集中和经济活跃的黔中城市群范围，城镇建设用地面积扩展，不透水地面增加，短时间内会增强区域的汇流速度，易引起城市内涝，而海拔高于 1700m 和坡度大于  $45^\circ$  区间，景观脆弱性明显较低，由此可见，人类活动对景观格局脆弱性影响较大，同时国家战略政策和自然环境综合作用，也是导致研究区景观格局脆弱性变化的重要因素，研究区景观高脆弱性的面积有所降低，与近年来实施的退耕还林、土地整治和生态文明城市建设等密切相关。

景观格局脆弱性影响生态系统稳定性，因此，在人类活动强烈的区域应进行合理的土地利用规划，保证有充裕的生态小区域，严禁占用耕地和控制建设用地无序扩张，人类活动弱的区域要继续实施退耕还林还草，同时研究区草地和耕地破碎化较为严重，可适当增加草地面积，加大对耕地的整治力度，从而降低其景观脆弱性，改善区域生态环境，实现人与自然及经济协调发展。

## 5 结论

利用景观格局脆弱性指数和空间自相关分析，研究了喀斯特山区景观格局脆弱性时空演化规律，得到以下结论：

(1) 贵州喀斯特山区景观格局以低和较低脆弱度为主，1990 和 2018 年分别共占 73.13%和 71.24%，低脆弱度集中在汇川区、红花岗区、湄潭县等北方地区及紫云和镇宁县等地；较低脆弱度多分布于西北、西部及其西南等区域；中等和较高及高脆弱度区域零星分布，没有连片。

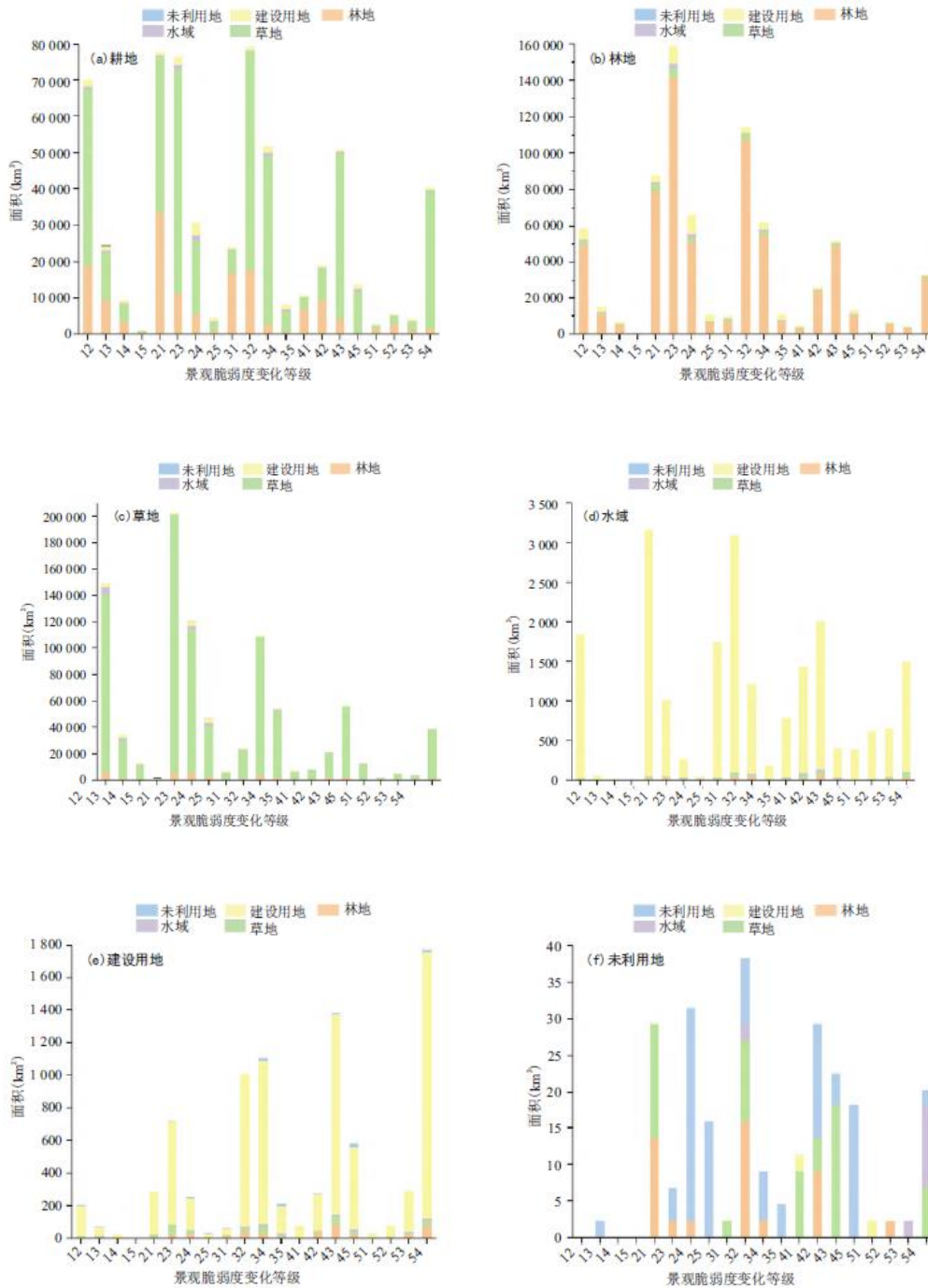


图9 地类变化与景观脆弱度变化面积

注：图中加粗为地类转出源。横坐标中 1 代表低脆弱度，2 为较低脆弱度，3 为中等脆弱度，4 为较高脆弱度，5 为高脆弱度，其中 12 表示 1990~2018 年从低脆弱度转化为较低脆弱度，其它以此类推。

(2) 脆弱度变化类型以较低向低脆弱度和较低向中等脆弱度为主，占脆弱性变化面积的 16.18% 和 15.63%，其次为中等和低脆弱度向较低脆弱度，占 13.10% 和 12.47%，较高和高等脆弱度面积变化最小，景观格局脆弱性整体略有上升。

(3) 1990 和 2018 年全球 Moran' s 指数大于 0.3，略有降低，存在明显的正向空间自相关性，脆弱性格局有分散趋势。高-高类型主要在中部贵阳、西部六盘水、西南兴义、东北部思南及东南荔波县等区域，低-低类型主要在北部余庆县和南部紫云县等地。

(4) 景观脆弱性变化多集中于高程为 800~1400m 和坡度是  $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$  的区域。

(5) 国家战略政策、自然环境及人类活动等综合作用是导致研究区景观格局脆弱性变化的重要因素。

#### 参考文献:

- [1] 陈颀, 林毅伟, 朱志鹏, 等. 基于 RS 和 GIS 的莆田市土地利用景观格局变化分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 279-286.
- [2] 孔凡亭, 郗敏, 李悦, 等. 基于 RS 和 GIS 技术的湿地景观格局变化研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 941-946.
- [3] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 等. 近 20 多年来石羊河流域景观格局演变特征[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 156-161.
- [4] 付扬军, 师学义, 和娟. 汾河流域景观格局脆弱性时空分异特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 197-202.
- [5] 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 247-257.
- [6] 徐燕, 孙小银, 张大智, 等. 1980-2015 年南四湖流域景观格局及其脆弱性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 635-642.
- [7] 田鹏, 李加林, 姜忆湄, 等. 海湾景观生态脆弱性及其对人类活动的响应——以东海区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1463-1474.
- [8] NITSCHKE C R, INNES J L. Integrating climate change into forest management in South-Central British Columbia: An assessment of landscape vulnerability and development of a climate-smart framework[J]. Forest Ecology and Management, 2008(256): 313-327.
- [9] ARETANO R, SEMERARO T, PERTROSILLO I. et al. Mapping ecological vulnerability to fire for effective conservation management of natural protected areas[J]. Ecological Modelling, 2015(295): 163-175.
- [10] 钱大文, 颜长珍, 修丽娜. 高寒草甸矿区土地覆被变化及景观格局脆弱性响应——以青藏高原木里矿区为例[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 670-678.

- 
- [11]张月, 张飞, 王娟, 等. 干旱区艾比湖流域典型区域景观格局脆弱性时空格局变化研究[J]. 灾害学, 2016, 31(3):222-229.
- [12]孙鸿超, 张正. 吉林省松花江流域景观格局脆弱性变化及其驱动力[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4):1005-1014.
- [13]梁佳欣, 李新举. 南四湖湿地景观格局脆弱度的时空分异特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2):626-634.
- [14]贺佳, 张莹. 陕西省生态环境景观格局脆弱性及空间关联研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(5):146-149.
- [15]董雅雯, 余济云, 陈冬洋, 等. 基于景观格局及生态敏感性的三亚市景观脆弱度研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4):103-108.
- [16]张玉娟, 曲建光, 李丹, 等. 松花江流域(哈尔滨段)景观格局脆弱性变化及空间关联格局分析[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(6):105-110.
- [17]赫晓慧, 李紫薇, 郭恒亮, 等. 河南省黄河沿岸景观格局动态变化及脆弱度分析[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(1):97-102.
- [18]马士彬, 安裕伦, 杨广斌, 等. 喀斯特地区不同植被类型 NDVI 变化及驱动因素分析——以贵州为例[J]. 生态环境学报, 2016, 25(7):1106-1114.
- [19]刘志丽, 陈曦. 基于 ERDAS IMAGING 软件的 TM 影像几何精校正方法初探——以塔里木河流域为例[J]. 干旱区地理, 2001(4):353-358.
- [20]游巍斌, 何东进, 巫丽芸, 等. 武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律[J]. 生态学报, 2011, 31(21):6317-6327.
- [21]时卉, 杨兆萍, 韩芳, 等. 新疆天池景区生态安全度时空分异特征与驱动机制[J]. 地理科学进展, 2013, 32(3):475-485.
- [22]罗光杰, 王世杰, 李阳兵, 等. 岩溶地区坡耕地时空动态变化及其生态服务功能评估[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11):233-243.
- [23]谭玮颐, 周忠发, 朱昌丽, 等. 喀斯特山区地形起伏度及其对水土流失敏感性的影响——以贵州省荔波县为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6):77-83.
- [24]郭琳, 宋戈, 张远景, 等. 基于最佳分析粒度的巴彥县土地利用景观空间格局分析[J]. 资源科学, 2013, 35(10):2052-2060.
- [25]魏小芳, 赵宇鸾, 朱昌丽, 等. 岩溶山地城市建设用地扩展的地形梯度特征——以贵阳市为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(1):22-29.
- [26]李旭东, 张善余. 贵州喀斯特高原人口分布与自然环境定量研究[J]. 人口学刊, 2006(3):49-54.
- [27]任志远, 张晗. 银川盆地土地利用变化对景观格局脆弱性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1):243-249.

---

[28]张立平, 张世文, 叶回春, 等. 露天煤矿区土地损毁与复垦景观指数分析[J]. 资源科学, 2014, 36(1):55-64.

[29]TAKEHIRO S, TAKUYA F, YUICHI I, et al. Perspectives for ecosystem management based on ecosystem resilience and ecological thresholds against multiple and stochastic disturbances[J]. Ecological Indicators, 2015(57):395-408.