

基于 Google Earth Engine 的典型峰丛洼地石漠化 时空演变与驱动因子分析

——以西畴县为例

徐红枫^{1,2}, 王妍^{1,2}, 刘云根^{1,2}, 肖羽芯^{1,2}, 黎舟^{1,2}

(1.西南林业大学, 昆明 650224; 2.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 昆明 650224)

摘 要:石漠化是岩溶地区阻碍经济可持续发展、影响生态环境的重大问题,随着近几十年石漠化治理的开展,石漠化扩张的趋势已经得到了极大遏制。以我国典型峰丛洼地地貌的云南省文山州西畴县为研究区,基于遥感云计算平台 Google Earth Engine(GEE)以 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年四期 Landsat 遥感影像为数据源,利用转移矩阵分析西畴县近 30 年石漠化动态变化,并采用地理探测器分析了西畴县石漠化形成的驱动因子。主要结论如下:(1) 30 年间西畴县石漠化演变总体呈现先小幅减少,再扩张,然后大幅减少的趋势,从时间上来看 1990—2000 年,石漠化类型转变主要是轻度和潜在石漠化向无石漠化转移,2000—2010 年石漠化类型转变主要是无石漠化向潜在和轻度石漠化转移,2010—2020 年石漠化类型转变主要是潜在、轻度和中度石漠化向无石漠化转移;从空间上来看,西畴县石漠化分布北重南轻,在石漠化治理成效上,整体都呈现好转,石漠化改善面积为 850.183 km²,在莲花塘乡西北部、新马街乡的东北部、鸡街乡和西洒镇的交界处也存在零星恶化,恶化面积为 51.715 km²。(2) 1990—2020 年 30 年间,西畴县石漠化治理取得了巨大成效,到 2020 年西畴县无石漠化土地面积已经达到 940.854 km²,共有 648.476 km²的石漠化土地转化成无石漠化土地;(3) 地理探测器分析结果表明西畴县石漠化形成的主要驱动因子为坡度和 GDP 交互作用($q=0.645$),人口密度和 GDP 交互作用($q=0.639$)这两对组合。(4) 通过编程在遥感云计算平台 Google Earth Engine(GEE)上在线获取和处理遥感数据,可以较大幅度地提高工作效率。利用云计算实现石漠化表征因子的提取,解决相关地学问题,可为后续相关研究提供强有力的技术支撑。

关键词:岩溶; 石漠化; GEE; 地理探测器; 驱动因子

中图分类号:P931.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0407-08

Analysis of the Spatial and Temporal Evolution and Driving Factors of Rocky Desertification in Typical Cluster Depression Areas in the Past 30 Years Based on Google Earth Engine

—Taking Xichou County as an Example

XU Hongfeng^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, LIU Yungen^{1,2}, XIAO Yuxin^{1,2}, LI Zhou^{1,2}

(1.Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2.Key Laboratory of Ecological Environment
Evolution and Pollution Control in Mountainous Rural Areas of Yunnan Province, Kunming 650224, China)

Abstract: Rocky desertification is a major problem that hinders sustainable economic development and affects the ecological environment in karst areas. With the development of rocky desertification control in recent decades, the trend of rocky desertification expansion has been greatly curbed. This study used China's typical peak cluster depression landforms in Xichou County, Wenshan Prefecture, Yunnan Province as the research area. Based on the remote sensing cloud computing platform Google Earth Engine (GEE) on the four phases of Landsat remote sensing image data sources in 1990, 2000, 2010, and 2020, the transfer matrix was used to analyze the dynamic changes of rocky desertification in Xichou County in the past 30 years, and geographic detectors was used to analyze the driving factors of rocky desertification in Xichou County. The main conclusions are as follows. (1) In 30 years, the overall evolution of rocky desertification in Xichou County showed

收稿日期:2021-06-07

修回日期:2021-06-27

资助项目:国家自然科学基金(31760245);云南省科技计划项目(2019FD073)

第一作者:徐红枫(1997—),男,浙江衢州人,在读硕士,主要从事水土保持研究。E-mail:861859136@qq.com

通信作者:王妍(1980—),女,河北承德人,博士,副教授,主要从事脆弱生态系统恢复研究。E-mail:wycyf@126.com

a slight decrease, then expansion, and then a significant decrease. From a temporal perspective of 1990—2000, the type of rocky desertification mainly shifted from mild and potential rocky desertification to non-rocky desertification. In the period of 2000—2010, the type of rocky desertification mainly shifted from non-rocky desertification to potential and mild rocky desertification. From 2010 to 2020, the of rocky desertification type mainly shifted from potential, light and moderate rocky desertification to non-rocky desertification. From a spatial point of view, the distribution of rocky desertification in Xichou County was more important in the north than in the south. In terms of the effectiveness of rocky desertification control, the overall improvement had been shown. The area of rocky desertification improvement is 850.183 km². There was also sporadic deteriorated land in the northwest of Lianhuatang Township, the northeast of and Xinmajie Township, and at the junction of Jujie Township and Xisa Town, with a deteriorated land area of 51.715 km². (2) From 1990 to 2020, the control of rocky desertification in Xichou County had made a great achievement. By 2020, the area of rocky desertification-free land in Xichou County had reached up to 940.854 km², and a total of 648.476 km² of rocky desertification land had been converted into no rocky desertification land. (3) Geographic detector analysis results show that the main driving factors of rocky desertification in Xichou County are the interaction between slope and GDP ($q=0.645$), and the interaction between population density and GDP ($q=0.639$). (4) Work efficiency can be greatly improved by programming on the remote sensing computing cloud platform Google Earth Engine (GEE) to acquire and process remote sensing data online. The use of cloud computing to extract the characterizing factors of rocky desertification and solve related geological problems can provide strong technical support for subsequent related research.

Keywords: karst; rocky desertification; GEE; geographic detector; driving factor

我国西南岩溶地区是石漠化分布最广的区域^[1],其主要地貌特征是地表起伏大、多山地^[2]、多碳酸盐岩地区,土壤层浅薄,土地贫瘠^[3]。根据《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》区划,峰丛洼地石漠化治理区是我国石漠化综合治理八大类型区之一,该区出露碳酸盐岩古老、坚硬、层厚质纯,且连片分布,水文系统具有典型的二元结构,地表水发达而地下水发育,因此缺水、少土,耕地资源匮乏,人地矛盾的冲突尤为严重^[4]。西畴县地处云南省文山壮族苗族自治州中部,位于云贵高原向广西盆地过渡的斜坡地带,是典型的峰丛洼地地区,石漠化问题一直制约着西畴县的经济、社会、环境可持续发展^[5]。30年来,西畴县持续进行石漠化治理工作,人们通过退耕还林、坡改梯、经济林营造等一系列石漠化治理工程^[6],探索出了“六子登科”、“五法治水”等石漠化综合治理模式,不仅取得良好的生态和社会效益,西畴人民在治理石漠化所产生的西畴精神也被列为云南脱贫攻坚精神的典型代表。

近些年来已经有不少学者针对石漠化信息提取及驱动因子进行了相关研究,在石漠化信息提取方面苏旺德等以 ETM, DEM 和地质岩性数据构建了南汀河石漠化^[7];罗旭玲等认为基于 NPP, NDVI、地表反照率和坡度可以较为精准地反演石漠化^[8];为了揭示石漠化的驱动因子,李阳兵等基于人机交互解译,对黔中高原后寨河地区的石漠化演变驱动因子进行了分析,得出较多坡

耕地的存在是石漠化的驱动因素^[9];王正雄等基于地理探测器对岩溶槽谷地区的石漠化驱动因素进行分析,得出岩性和土地利用、岩性和坡度的组合共同驱动岩溶槽谷地区的石漠化形成^[10]。以往的研究多使用传统的方法进行数据处理,处理效率不高,在大区域和长时间跨度的研究上局限性较大,基于云计算的可用性,本文借助 Google Earth Engine 云计算平台,以典型峰丛洼地石漠化地区西畴县作为研究区,旨在揭示其 1990—2020 年 30 年间的石漠化演变规律和驱动因子,为后续的石漠化演变及更大尺度生态恢复研究提供一定的参考和技术指导。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区概况

西畴县位于东经 104°22′—104°58′,北纬 23°06′—23°37′,其下辖有 2 个镇、7 个乡:西洒镇、兴街镇、蚌谷乡、莲花塘乡、新马街乡、柏林乡、法斗乡、董马乡、鸡街乡,总面积 1 506 km²。其中石漠山区面积达 99.9%,岩溶面积达 75.4%,境内岩溶峰丛溶蚀洼地,一般连片出现,山峦起伏,上层基岩裸露,地形封闭破碎,数百个水淹洼塘和大小不等的山间小盆地镶于丛山峦障中。且洼地多为椭圆或条形,宽数十米至数百米;溶洞、竖井、天窗等岩溶现象较为普遍。

1.2 数据源与研究方法

1.2.1 Google Earth Engine 简介 Google Earth

Engine(GEE)是谷歌旗下的云计算平台,可以快速、批量处理大量数据^[11]。GEE 上提供了 BP 数量级的公开地球观测数据,有超过 500 万张影像,200 多个公共数据集可供免费使用^[12]。GEE 的 API 接口支持 JavaScript 和 python,可以通过编程调用数值、数组、矩阵、栅格数据和图表等相关的多种模块和函数,用于实现影像预处理、图像分类、影像时间序列分析等操作。网址(<https://earthengine.google.com/>)。

1.2.2 数据源与研究方法 Landsat 陆地观测卫星具有 30 m 良好空间分辨率,且具有长的时间覆盖,所以基于 Google Earth Engine 调用长时间序列的 Landast 影像作为数据源,对西畴县 1990—2020 年近 30 年的石漠化演变进行分析。其中植被覆盖度和岩石裸露率使用了 Landsat 5/8 Surface Reflectance Tier 1 数据集,该数据集已经使用 LaSRC 进行了大气校正,道路和建筑用地的提取使用了 Landsat 5/8

Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance 数据集。坡度数据在 GEE 上基于 SRTM Digital Elevation 30 m 数据计算得到,年均降水量数据单位为 0.1 mm,人口密度数据单位为人/km²,GDP 数据单位为万元/km²,以上栅格数据均下载自中科院资源环境科学与数据中心(网址为:<http://www.resdc.cn>)。

基于 GEE 的超强计算能力,以及其提供的 BP 级免费公开遥感数据,通过 JavaScript API 编程在线调用 Landsat 5 影像 309 景和 Landsat8 影像 174 景,以云分量 20 为阈值进行影像筛选,然后去云、进行影像集的自动拼接和裁剪、对水体进行掩膜,并基于像元二分模型计算得到研究区植被覆盖度、岩石裸露率,通过计算指数和纹理特征实现道路和建筑用地的提取,最后将结果导出,下载到本地使用 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.5 进行后续处理,通过叠加制图得到了西畴县 1990—2020 年石漠化等级分布图,整体流程见图 1。

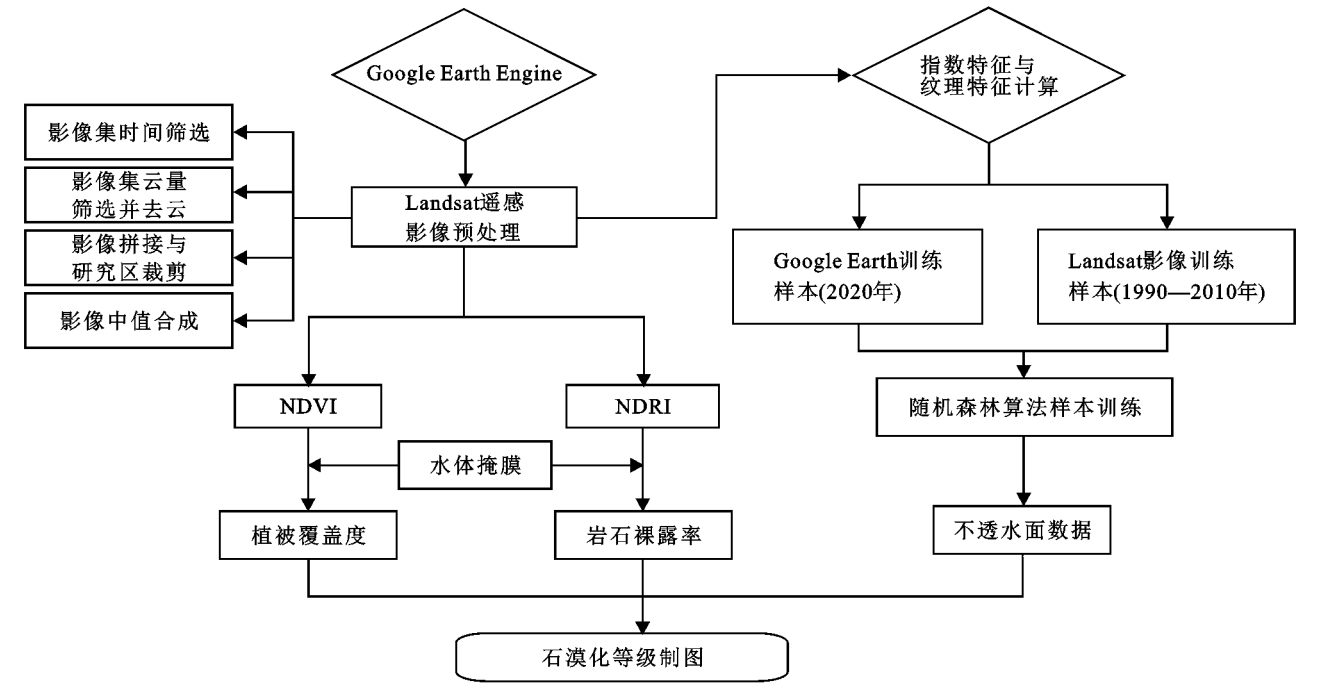


图 1 石漠化制图流程图

2 石漠化指标

2.1 植被覆盖度

(1) 归一化植被指数(NDVI)。石漠化过程往往伴随着植被的退化^[13]。归一化植被指数(NDVI)可以较好地反映地表植被状况^[14],公式为:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

式中:NDVI 为像元归一化植被指数值;NIR 为近红外波段;RED 为红光波段。

(2) 运用像元二分模型^[15]。在年度合成 NDVI 频率累积表上取频率 5%对应的 NDVI 值作为 NDVI_{min},取

累积频率为 95%的 NDVI 值作为 NDVI_{max}^[16],公式为:
$$FVC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (2)$$

2.2 岩石裸露率

(1) 归一化岩石指数(NDRI)。基于石漠化地区的地物特性,张晓伦提出用 Landsat 数据的短波红外(SWIR)与近红外(NIR)波段,计算归一化岩石指数(NDRI)提取石漠化分布结果精度高^[17]。公式为:

$$NDRI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR) \quad (3)$$

(2) 岩石裸露率(Fr)。在年度合成 NDRI 频率累积表上取频率 5%对应的 NDRI 值作为 NDRI_{min},取累积频率为 95%的 NDRI 值作为 NDRI_{max},计算公式为:

$$Fr = (NDRI - NDRI_{min}) / (NDRI_{max} - NDRI_{min}) \tag{4}$$

2.3 建筑用地与道路提取

基于 Google Earth Engine,以 Landsat 5 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance(1990 年、2000 年和 2010 年)和 Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance 为数据源(2020 年)提取西畴县不透水面(建筑用地和道路),计算归一化差异水体指数(MNDWI),来提取水体^[18],计算归一化建筑指数(NDBI)来提取部分建筑特征^[19],并运用灰度共生矩阵(GLCM)计算其他纹理特征^[20],然后选取样本点,取其中 70% 的样本点作为训练样本,使用 GEE 上的随机森林分类器进行训练,另外的 30% 样本点作为验证样本,生成混淆矩阵,并计算 Kappa 系数。样本点分成两类:第一类为不透水面,主要包括道路和建筑用地;第 2 类为透水面,主要包括植被、裸地、农用地水体等。样本点的拾取都在 GEE 平台上完成,2020 年样本的拾取基于 Google 高精度在线地图,1990 年、2000 年、2010 年样本点的拾取则是基于 Landsat5。

Kappa 系数通常用于一致性检验,也可以用于衡量分类的精度,Kappa 系数越大,分类精度越高。公式如下:

$$k = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \tag{5}$$

式中: p_o 是每一类正确分类的样本数量之和除以总样本数,也就是总体分类精度; p_e 代表偶然一致性,通常 Kappa 系数在 0~0.200 代表极低的一致性,

0.210~0.400 代表一般的一致性,0.400~0.600 代表中等的一致性,0.610~0.800 代表较高的一致性,0.810~1 代表几乎完全一致。

不透水面提取结果如下:1990—2020 年四期不透水面提取的总体精度分别为 0.816,0.860,0.865,0.982,Kappa 系数分别为 0.627,0.707,0.730,0.963。1990 年、2000 年、2010 年三期提取精度在 0.62~0.80 之间,2020 年的提取精度在 0.963 四期提取结果一致性较高,基本可以满足研究需要。

2.4 水体掩膜

归一化植被指数范围在-1 至 1 之间,通常地表云、雪以及水体覆盖时,近红外波段的反射率低于红波段的反射率,所以 NDVI 值为负数,所以在 GEE 上计算植被覆盖度和岩石裸露率时对 NDVI 小于 0 的部分进行掩膜,从而达到剔除水体的目的。

在参考前人标准^[21]的基础上,将石漠化划分为无、潜在、轻度、中度、重度和极重度石漠化 6 个等级,并剔除了水体、道路和建设用地,得到了 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年总共四期的石漠化等级分布图(图 2)。在 Google Earth Pro 上验证解译精度,然后制作混淆矩阵,并计算 Kappa 系数,2020 年使用的验证影像来源为 Google Earth 高精度影像,1990 年、2000 年、2010 年使用的影像数据源为 Landsat 5。四期石漠化等级分布图的总体精度分别为 0.715,0.735,0.778,0.895,Kappa 系数分别为 0.681,0.671,0.745,0.721。1990—2020 年四期石漠化等级分布图精度均在 0.610~0.800,一致性较高。

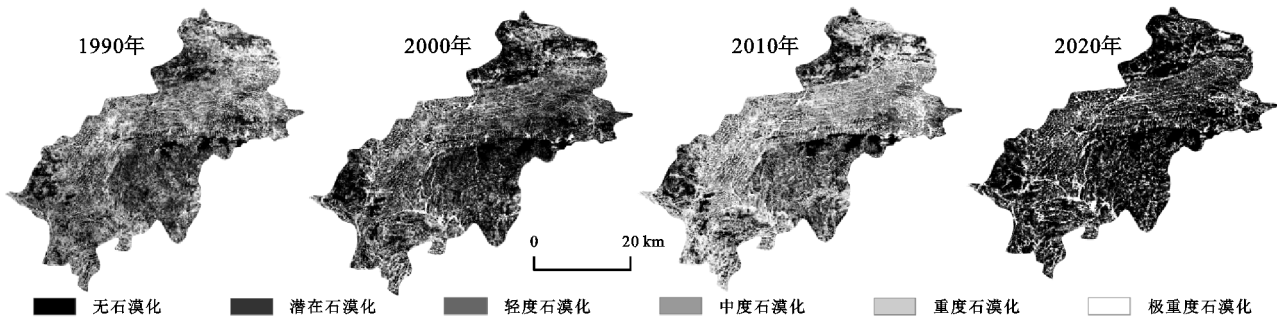


图 2 1990—2020 年石漠化等级分布

3 结果与分析

3.1 石漠化时间变化特征

由图 3 可知,第一阶段 1990—2000 年的 10 年间各级石漠化面积都有一定减少,无石漠化土地增加明显,增加了 19.349%;在第二阶段 2000—2010 年,2010 年石漠化分布情况相较 2000 年又有所恶化,无石漠化土地面积减少明显,减少了 22.874%,重度石漠化面积增加了 8.940%;在第三阶段,2010—2020

年期间,西畴县的无石漠化地面积上升明显,较 2010 年面积增加了 46.015%,潜在、轻度、中度、重度石漠化土地面积较 2010 年显著减少。

3.2 石漠化转移矩阵

转移概率矩阵是指客观事物从一个状态转移到另一个状态,可以清晰表示不同时期同一区域石漠化类型相互转换的数量化关系^[22]。为分析不同等级石漠化相互之间的转化关系,利用 ArcGIS 10.5 构建西畴县石漠化转移矩阵,在 Origin 2021 作图得到石漠化转移图(图 4)。

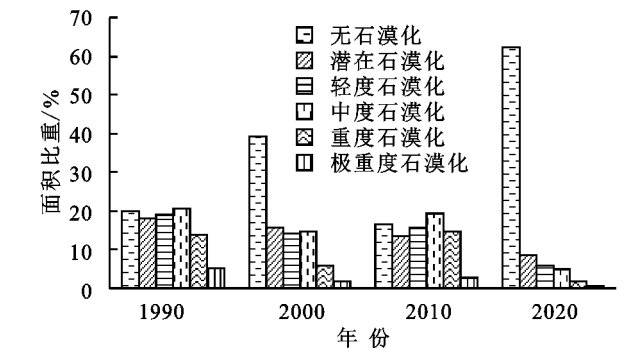


图 3 1990—2020 年各级石漠化面积比重

从图 4 可以看出:(1) 1990—2000 年西畴县的潜在石漠化转向无石漠化转变最显著,面积 160.809 km²;其次,变化较大的是轻度石漠化转换成无石漠化面积 84.767 km²;其余类型之间的转换面积相对较小,总体来说石漠化都在呈好转趋势。(2) 2000—2010 年,

无石漠化转变为潜在石漠化变化最显著,面积 144.746 km²;无石漠化转变为轻度石漠化的面积次之,有 115.608 km²;除此之外,潜在和轻度石漠化向中度石漠化转化面积较大分别为 72.322 km²,75.303 km²,同时也有较大面积的中度石漠化向重度石漠化转化,有 79.321 km²。(3) 2010—2020 年主要趋势为潜在、轻度和中度石漠化转变为无石漠化石,面积分别为 186.49 km²,195.916 km²,186.985 km²;同时也有 66.168 km²重度漠化转化为无石漠化;(4) 1990—2020 年潜在、轻度、中度、重度、极重度石漠化均有向无石漠化转变,无石漠化面积增加总计 648.476 km²,截至 2020 年西畴县无石漠化土地面积共计 940.854 km²;修复难度较大的极重度石漠化也得到了很好的修复,向重度、中度、轻度及潜在石漠化转变,其中有 20.208 km²转变为无石漠化。

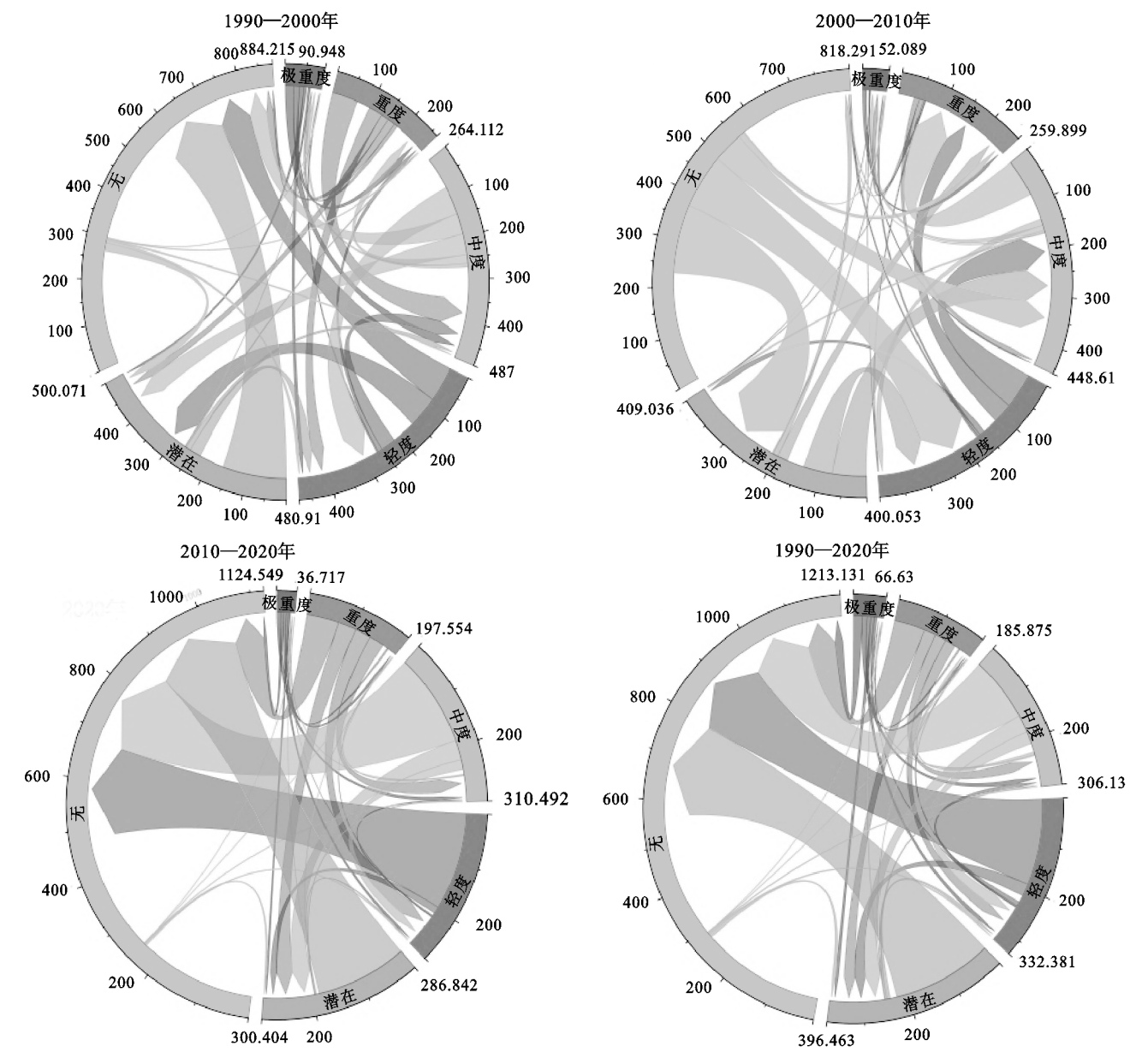
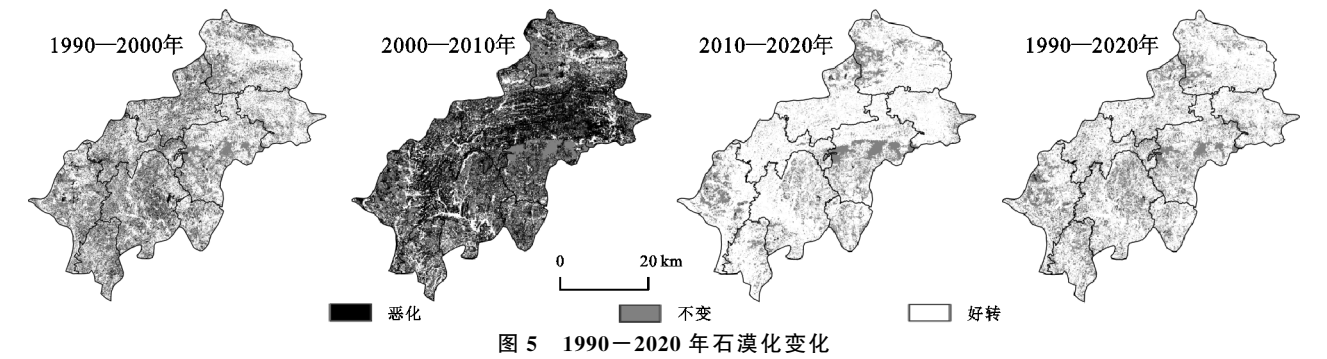


图 4 1990—2020 年石漠化转移图

3.3 石漠化空间演变分析

为探究西畴县近 30 年石漠化空间演变格局,将石漠化等级降低的区域视为好转,石漠化等级提升的区域视为恶化,石漠化等级未发生变化的区域视为不变(图 5)。总的来看,1990—2020 年西畴县的石漠化有 51.715 km²发生恶化,有 850.183 km²石漠化土地发生好转,在空间上整体都呈现好转,也有少部分土地呈现恶化,主要分布在在莲花塘乡西北部、新马街乡的东北部,鸡街乡和西洒镇的交界处也存在部分零星的



3.4 贡献因子获取与分析

地理探测器(GeoDetector)是由王劲峰团队开发的地理探测器软件^[23]。其理论核心是通过空间异质性来探测因变量与自变量之空间分布格局的一致性,据此度量因变量对自变量的解释度即 q 值。 q 的值为 $[0,1]$,值越大,说明这个因子对 Y 值的解释力越强。其模型:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}$$
$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad SST = N \sigma^2 \quad (6)$$

为分析西畴县石漠化驱动因子,分别选取了西畴县 2010 年坡度、年均降水量、人口密度、GDP 作为自变量^[10]。在 ArcGIS 10.5 上将 4 个变量栅格采用自然间断法重分类成 6 类,然后用 500 m 网格点对石漠化类型分布栅格与变量栅格进行采样提取。

从单因子探测结果来看 GDP(0.626)>年均降水(0.577)>人口密度(0.056)>坡度(0.022),多因子交互探测如表 1 所示,坡度和 GDP 的交互作用下,对石漠化的影响最大($q=0.645$),GDP 和人口密度对石漠化形成的影响则次之($q=0.639$)。

表 1 多因子交互探测结果				
驱动因子	坡度	年均降水	人口密度	GDP
坡度	0.022			
年均降水	0.600	0.577		
人口密度	0.091	0.607	0.057	
GDP	0.645	0.629	0.639	0.626

恶化土地。其中 1990—2000 年西畴县的东北部石漠化改善较大,包括鸡街乡、董马乡和法斗乡,西南部存在恶化,尤其是兴街镇和新马街乡,还有蚌谷乡和莲花塘乡交界处;2000—2010 年北部和西部大面积石漠化土地都存在不同程度的恶化,尤其是董马乡、西洒镇、蚌谷乡以及法斗乡北部;2010—2020 年西畴县石漠化总体是发生改善,尤其是西洒镇、蚌谷乡和兴街镇,蚌谷长箐片区、兴街江龙片区、罗汉冲片区、三光片区等石漠化综合治理示范区的设立治理效果十分显著。

4 讨论与结论

4.1 讨论

Google Earth Engine(GEE)存储有长时间序列的多源遥感数据,且计算能力强大,随着近几年云计算的兴起,越来越多的学者开始使用 GEE 云计算平台开展相关研究。张滔等^[11]基于 GEE 对京津冀地区 2001—2015 年植被变化与城镇扩张的关系进行研究实现了数据的快速处理;裴杰等^[24]利用 GEE 计算长时间序列的 Landsat-NDVI 对南洞地下河流域 1988—2016 年 29 年的植被覆盖度变化进行了监测研究;陈黔等^[25]基于 GEE 与机器学习对毛乌素沙地灌木覆盖度进行估算,有效、快速地区分了灌木并对其植被覆盖度进行估算。在岩溶地区的大尺度石漠化监测方面,GEE 可以解决数据收集困难、数据预处理复杂和效率低下的问题,与传统的石漠化遥感信息提取相比,利用 GEE 云计算平台提取石漠化表征因子,只需要通过代码的编写,就能进行大尺度遥感数据的批量处理与计算,使得在相同数量级数据处理下效率得到大幅提升,GEE 势必成为实现大尺度石漠化监测的有效工具。

经过近 30 年的石漠化治理,2020 年西畴县的无石漠化土地面积已经达到总面积的 62.474%,石漠化治理取得了很大成效。1990—2000 年的 10 年间,石漠化得到了一定的治理但是成效并不明显,可能的原因是石漠化治理虽然已经开展,但是由于缺乏统一的规划和资金,所以成效甚微。2000—2010 年,石漠化情况有所恶化,此时西畴县进入了经济发展的新阶段,峰丛洼地大量耕地转化成建筑用地^[26],人们为谋

求更多的生存空间,任意开采开荒,破坏林草植被,加剧了石漠化形成;后 10 年时间(2010—2020 年),西畴石漠化治理成效显著,这和政府的规划有很大的关系,西畴县一期石漠化综合治理工程(2011—2014 年),对磨合、三光、长箐 3 个小流域实施了封山育林、植树造林、坡改梯等措施,2016 年制定《西畴县全面深化生态文明体制改革实施方案》,并相继实施了蚌谷长箐片区、兴街江龙、罗汉冲、三光片区等石漠化综合治理工程,探索出了“六子登科”、“五法治水”的石漠化综合治理模式。鉴于植物措施是巩固土壤、减少水土流失的有效措施^[27],后续应当继续推进石漠化治理工程,并加大对植树造林与经济林营造的扶持力度,在治理石漠化的同时增加人民的收入。

在驱动因子方面 GDP($q=0.626$)和年均降水($q=0.577$)对西畴石漠化的形成贡献较大,GDP 的贡献度最高,说明经济的发展对自然资源的影响较大,如果不能处理好经济发展与生态保护的关系,极易加剧石漠化的进程;其次是降水,其决定了植被生长的条件,尤其是西畴县属于典型的峰丛洼地,极度缺水,降水对植被的生长尤为重要。坡度对西畴县石漠化形成的贡献并不大($q=0.022$),但坡度与 GDP 交互作用下对石漠化的影响最大($q=0.645$),通常情况下,在适合人类活动的坡度范围内,坡度越陡,人类的活动越容易造成水土流失^[28];人口密度和 GDP 的交互作用对石漠化的形成影响则次之($q=0.639$),一般人口密度越大、GDP 越高,经济活动越频繁,越容易造成植被破坏与水土流失,形成石漠化。

4.2 结论

(1) 从时间上来看 1990—2020 年西畴县石漠化演变的总体趋势是先小幅减少,再扩张,然后大幅减少。1990—2000 年石漠化转移的主要方向是潜在石漠化和轻度石漠化向无石漠化转移;2000—2010 年,石漠转移方向是无石漠化向潜在和轻度石漠化转移;2010—2020 年潜在、轻度和中度石漠化向无石漠化石转移最显著。从空间上来看西畴县石漠化分布北重南轻,在石漠化治理成效上,经过近 30 年的治理西畴石漠化整体都呈现好转,石漠化改善面积为 850.183 km²,尤其是西洒镇、蚌谷乡和兴街镇,蚌谷长箐片区、兴街江龙片区、罗汉冲片区、三光片区等石漠化综合治理示范区治理效果十分显著。在莲花塘乡西北部、新马街乡的东北部、鸡街乡和西洒镇的交界处也存在零星恶化,恶化面积为 51.715 km²。

(2) 截至 2020 年,西畴县无石漠化土地面积已经达 940.854 km²,占西畴县总面积的 62.474%,无石漠化面积增加总计 648.476 km²。说明西畴县的石漠化治理工作较为成功,西畴县人民因地制宜探索出的“六子登科”、“五法治水”等石漠化综合治理模式效果明显。

(3) 地理探测器的结果显示年均降水量($q=0.626$)和 GDP($q=0.577$)是驱动西畴县石漠化形成的主要驱动因子,多因子交互探测结果显示坡度和 GDP 交互作用($q=0.645$),人口密度和 GDP 交互作用($q=0.639$)这两对组合共同驱动石漠化形成。

(4) 鉴于 Google Earth Engine(GEE)云计算平台提供的 BP 级海量遥感数据和强大的计算能力,本研究利用 GEE 进行石漠化表征因子的快速提取,分析西畴县 1990—2020 年石漠化的动态变化及驱动因子,旨在利用 GEE 快速地实现大尺度地学问题分析,为后续大尺度的石漠化遥感制图提供有力的技术支持。

参考文献:

- [1] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in southwest China: Impacts, Causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014,132(3):1-12.
- [2] 曹伟超,陶和平,孔博,等.利用最佳地形特征空间进行地貌形态自动识别:以西南地区为例[J].武汉大学学报:信息科学版,2011,36(11):1376-1380.
- [3] 钱庆欢,王世杰,白晓永,等.基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究[J].地理学报,2018,73(11):2135-2149.
- [4] 张殿发,欧阳自远,王世杰.中国西南喀斯特地区人口、资源、环境与可持续发展[J].中国人口·资源与环境,2001,11(1):77-81.
- [5] 王宇,张华,张贵,等.云南省石漠化调查及治理综述[J].中国岩溶,2016,35(5):486-496.
- [6] 马国璇,周忠发,朱昌丽,等.石漠化地区农户生计资本与生计策略的关系:以贵州省关岭贞丰花江石漠化综合示范区为例[J].水土保持通报,2020,40(2):305-313.
- [7] 苏旺德,史正涛,刘钢.基于 RS 和 GIS 的南汀河流域石漠化评价[J].中国岩溶,2016,35(5):594-601.
- [8] 罗旭玲,王世杰,白晓永,等.西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J].生态学报,2021,41(2):680-693.
- [9] 李阳兵,罗光杰,程安云,等.黔中高原面石漠化演变典型案例研究:以普定后寨河地区为例[J].地理研究,2013,32(5):828-838.
- [10] 王正雄,蒋勇军,张远喆,等.基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J].地理学报,2019,74(5):191-205.
- [11] 张滔,唐宏.基于 Google Earth Engine 的京津冀 2001—2015 年植被覆盖变化与城镇扩张研究[J].遥感技术与应用,2018,33(4):593-599.
- [12] Liu X, Hu G, Chen Y, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform[J]. Remote Sensing of Environment, 2018,209:227-239.
- [13] 刘拓.中国岩溶石漠化:现状,成因与防治[M].北京:中国林业出版社,2009.
- [14] 宗加权,白淑英,冯朝阳,等.基于连续时间序列 NDVI

- 数据的中国生态状况时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(1):136-142.
- [15] 陈晋,陈云浩,何春阳,等.基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J].遥感学报,2001(6):416-422,481.
- [16] 王明明,王世杰,白晓永,等.典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J].生态学报,2019,39(16):6083-6097.
- [17] 张晓伦,甘淑.基于 NDRI 像元二分模型的石漠化信息提取研究[J].新技术新工艺,2014(1):72-75.
- [18] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):79-85.
- [19] 查勇,倪绍祥,杨山.一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J].遥感学报,2003(1):37-40,82.
- [20] 刘玉芳,刘定生.利用纹理特征提取城市用地信息方法探索[J].测绘科学,2005(4):46-47.
- [21] 熊康宁.喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- [22] 习慧鹏,王世杰,白晓永,等.西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征:以贵州省普定县为例[J].生态学报,2018,38(24):8919-8933.
- [23] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [24] 裴杰,牛铮,王力,等.基于 Google Earth Engine 云平台的植被覆盖度变化长时间序列遥感监测[J].中国岩溶,2018,37(4):608-616.
- [25] 陈黔,李晓松,修晓敏,等.基于 Google Earth Engine 与机器学习的大尺度 30 m 分辨率沙地灌木覆盖度估算[J].生态学报,2019,39(11):4056-4069.
- [26] 尹林江,周忠发,朱昌丽,等.喀斯特石漠化及土地利用变化的地貌分异特征:以贵州省关岭贞丰花江石漠化综合示范区为例[J].水土保持通报,2020,40(2):43-52.
- [27] 陈进豪,范弢,户红红.滇东海峰岩溶盆地石漠化坡地土壤机械组成和有机碳的变化特征[J].水土保持通报,2020,40(5):39-45.
- [28] 陈金珂,蒲俊兵,李建鸿,等.典型岩溶流域不同坡度等级下的土壤侵蚀与石漠化分布特征耦合分析[J].水土保持研究,2020,27(5):1-9.

(上接第 399 页)

- [33] Gao Y, Jia J J, Lu Yao, et al. Determining dominating control mechanisms of inland water carbon cycling processes and associated gross primary productivity on regional and global scales[J]. Earth-Science Reviews, 2021,213:103497.
- [34] 张继平,刘春兰,郝海广,等.基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J].生态环境学报,2015,24(1):8-13.
- [35] Li C, Sun G, Cohen E, et al. Modeling the impacts of urbanization on watershed-scale gross primary productivity and tradeoffs with water yield across the conterminous United States[J]. Journal of Hydrology, 2020,583:124581.

(上接第 406 页)

- [12] 李玉恒,刘彦随.中国城乡发展转型中资源与环境问题解析[J].经济地理,2013,33(1):61-65.
- [13] 刘彦随.中国东部沿海地区乡村转型发展与新农村建设[J].地理学报,2007,62(6):563-570.
- [14] 王秋兵,郑刘平,边振兴,等.沈北新区潜在土地利用冲突识别及其应用[J].农业工程学报,2012,28(15):185-192.
- [15] 彭佳捷,周国华,唐承丽,等.基于生态安全的快速城市化地区空间冲突测度:以长株潭城市群为例[J].自然资源学报,2012,27(9):1507-1519.
- [16] 王检萍,余敦,卢一乾,等.基于“三生”适宜性的县域土地利用冲突识别与分析[J].自然资源学报,2021,36(5):1238-1251.
- [17] 代亚强,陈伟强,高涵,等.基于用地倾向性评价的农村潜在土地利用冲突识别研究:以西峡县东坪村为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2410-2418.
- [18] 黄安,许月卿,卢龙辉,等.“生产—生活—生态”空间识别与优化研究进展[J].地理科学进展,2020,39(3):503-518.
- [19] 杨远琴,任平,洪步庭.基于生态安全的三峡库区重庆段土地利用冲突识别[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):322-332.
- [20] 蒙古军,江颂,拉巴卓玛,等.基于景观格局的黑河中游土地利用冲突时空分析[J].地理科学,2020,40(9):1553-1562.
- [21] 廖李红,戴文远,陈娟,等.平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J].资源科学,2017,39(10):1823-1833.
- [22] 刘贵利,严奉天,许顺才,等.城市发展中内外空间冲突与协调的战略选择:以石家庄市为例[J].地理研究,2006,25(4):701-709.
- [23] 裴彬,潘韬.土地利用系统动态变化模拟研究进展[J].地理科学进展,2010,29(9):1060-1066.
- [24] 周国华,彭佳捷.空间冲突的演变特征及影响效应:以长株潭城市群为例[J].地理科学进展,2012,31(6):717-723.