

吴跃,周忠发,赵馨,等.基于遥感计算云平台高原山区植被覆盖时空演变研究:以贵州省为例[J].中国岩溶,2020,39(2):196-205.

DOI:10.11932/karst2020y16

基于遥感计算云平台高原山区植被覆盖 时空演变研究——以贵州省为例

吴跃^{1,2},周忠发^{1,2},赵馨^{1,2},但雨生^{1,2},黄登红^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵阳 550001;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001)

摘 要:为揭示喀斯特山区植被时空变化规律,选取2000—2018年间1 748景30 m分辨率Landsat—NDVI影像,结合35个气象站点数据,辅以像元二分模型、线性趋势分析及地理探测器等方法,对贵州省19年间年植被覆盖度进行定量估算,分析其植被覆盖度时空变化特征及驱动因素。结果表明:(1)贵州省中、高植被覆盖度以上的区域面积占比约63%,其中高植被覆盖度区域面积占21.16%,主要集中分布于碎屑岩地区。(2)近19年来,贵州省植被覆盖度总体缓慢趋好,年均增长速率为0.4%,严重石漠化样区多年最大植被覆盖度均值始终低于整体植被覆盖度均值。(3)研究期间贵州省植被覆盖度以轻微改善、基本不变两个等级为主,两者面积比重之和约为95.4%,退化区域主要分布在城镇周边,面积比重约为3.8%。(4)气象因素、地理区位各因子间交互作用对植被覆盖度空间格局影响大于单因子作用。综上所述,城镇面积扩展、石漠化治理工程、地理区位及气象因素等是影响植被恢复与生态环境重建的关键要素,研究植被覆盖度多年动态特征力求为相关部门的水土保持、生态环境保护及石漠化治理提供重要的基础数据及科学参考。

关键词:喀斯特山区;植被覆盖度;时空变化;Landsat—NDVI;地理探测器

中图分类号:Q948;TP393.09;TP79 文献标识码:A

文章编号:1001—4810(2020)02—0196—10 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

植被是气候对环境影响的敏感指示器^[1]。植被覆盖与气候之间的相互关系研究已成为全球变化研究的重要内容,国内外学者利用归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)与气候因子的变化机制诠释植被与气候因子间关系,其中NDVI是国际公认的表征植被变化最有效的参数之一^[2]。植被覆盖度(Fractional vegetation cover, FVC)被定义为植被叶、茎、枝在地面垂直投影面积占统计区总面积百分比,可通过遥感估算获得^[3]。植被覆盖

度动态变化从一定程度上反应气候变化的趋势,利用卫星遥感技术动态监测植被覆盖度演变是近年地球科学领域研究重点和热点^[4]。

遥感技术是全球环境变化研究中无可替代的重要手段^[5]。区域植被遥感估算方法主要有机器学习法、回归模型法及像元二分模型方法等,像元二分模型植被覆盖度遥感反演精度较高且对影像辐射校正的影响不敏感,是当前应用最广泛的像元分解模型^[6]。随着植被覆盖度遥感估算方法的发展,产生了一系列有关植被覆盖度与气象因子相关性的研究成果:穆少杰等^[7]基于MODIS—NDVI遥感数据反演了

基金项目:国家自然科学基金地区项目“喀斯特石漠化地区生态资产与区域贫困耦合机制研究”(41661088);贵州省高层次创新型人才培养计划——“百”层次人才(黔科合平台人才[2016]5674);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726-57)

第一作者简介:吴跃(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为地理信息系统与遥感。E-mail:1573996100@qq.com。

通信作者:周忠发(1969—),男,博导,教授,主要研究方向为喀斯特生态环境,GIS与遥感。E-mail:fa6897@163.com。

收稿日期:2019—04—25

2001–2010年内蒙古地区植被覆盖度空间格局变化规律,并结合同期气象数据从空间尺度和时间尺度分析植被变化与气候变化的响应机制。宋鹏飞等^[8]利用重心模型和相关系数法,分析山东省植被覆盖度变化与降雨量、温度等气候因子相关性,发现山东省植被覆盖度与气象因子无论是在月动态变化还是季节动态变化都表现出不同程度的正相关性。李辉霞等^[9]采用 Spot VEGETATION 逐旬 NDVI 数据、1:100万植被类型图及气象站资料,分析不同植被类型植被生长对气候变化的响应机制。2009年郑有飞等^[10]运用全球检测模型计算了每隔15天最大值合成的归一化差异植被指数(NDVI)数据集和贵州省气象站点提供的气候资料,分析1987–2003年贵州省植被变化状况以及NDVI与主要气候因子温度、降水的相互关系。

Google Earth Engine(简称GEE)遥感大数据云计算平台将大量的遥感数据整合起来并提供高性能的并行计算(<https://earthengine.google.com/>)。GEE可提供在线数据获取、处理、计算与分析,能力强大且稳定,并且还可以快速、批量地处理大量的数据,不受时间和空间的限制,避免了优质遥感数据获取难,数据处理繁琐等地学问题。目前,GEE研究热点包括全球植被覆盖和陆表水体变化^[11–12]、局部植被覆盖长时间序列变化^[13]、地物识别提取^[14–15]等,这些研究表明GEE的强大功能以及在分析遥感和地学问题时的巨大优势。

由王劲峰等创建的地理探测器可以定量测量某一时空现象的主要驱动因子及不同驱动因子间的交互作用^[16]。与常规的空间回归分析方法相比,地理探测器既可以探测数值型数据,也可以探测定性数据,且地理探测器具有更高的解释效率^[17],因此在生态适应性评价^[18]、人口多维贫困^[19]、土壤侵蚀^[20]、粮食产量^[21]等研究领域应用十分广泛。同时地理探测器适用于FVC空间分布研究,利用地理探测器探究气候类环境因素、非气候类环境因素和人类活动因素对FVC空间分布影响^[22]及运用FVC空间特征为指标研究沙漠化成因^[23],均能得出有意义的结论。

尽管学者们对FVC长时间序列监测及其与驱动因子间相关性作了一定的研究,但多数局限于研究FVC时序变化,对其空间分布特征的影响因素研究涉及较少,或只探讨单一驱动因子对植被覆盖度的影响,而没有综合考虑驱动因子之间交互作用。本文利用GEE云平台,结合地理探测器模型,分析地理区

位、气象因素各驱动因子间交互作用对植被覆盖度年际变化及空间格局的影响机制,研究成果有助于正确认识、评价喀斯特地区植被演变过程。

1 研究区概况

贵州省简称黔,介于东经103°36′–109°35′、北纬24°37′–29°13′之间,地处中国西南喀斯特中心地区。境内地貌属高原山地,地势西高东低,具有明显的三级阶梯,海拔范围130~2990 m,平均海拔1100 m左右;气候温暖湿润,降水季节分配不均,属亚热带季风气候区。贵州省国土面积17.6167万km²,喀斯特地貌占总面积的61.9%,截至2016年底,全省喀斯特地区石漠化土地面积为24701 km²,占全省国土面积14.02%(数据来源:国家林业和草原局,<http://www.forestry.gov.cn/>)。与非石漠化地区相比,石漠化地区主要表现为植被覆盖度的下降、植被结构简单化、生物多样性减少、生态环境比较脆弱^[24],而植被对喀斯特地质环境的水循环以及土壤形成均具有重要影响^[25],亟待开展贵州植被覆盖度的相关性研究。本文研究区为贵州境内的北盘江花江河段石漠化严重的区域——花江峡谷,其对应研究区示意图中石漠化样区(图1)。

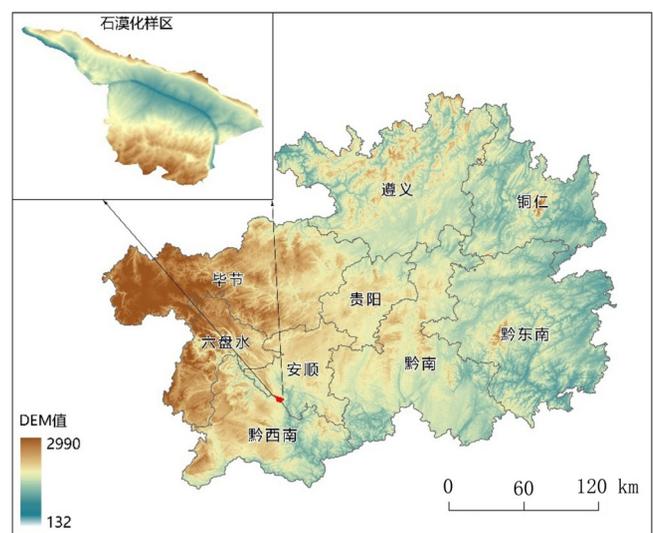


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic map of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

研究使用的遥感数据来源于GEE^[26]云平台。根据遥感卫星开始获取影像的时间在云平台中编程调

用2000–2018年间Landsat_8派生数据集LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI共276景影像, Landsat_7派生数据集LANDSAT/LE07/C01/T1_8DAY_NDVI共874景影像及Landsat_5派生数据集LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI共598景影像。为消除云雾、大气、太阳高度角等因素的影响,对每年多个时相的NDVI采用最大值合成法(Maximum value composite, MVC)获得年最大值Landsat-NDVI,随后将年最大值Landsat-NDVI叠加进行中值计算。其中2000–2012年间对应年份使用Landsat_7/5最大值合成NDVI影像叠加取中值,2013–2018年间对应年份使用Landsat_7/8最大值合成NDVI影像叠加取中值,获取最终NDVI数据。将其下载后在ENVI中进行研究区植被覆盖度计算。

气象数据为贵州省境内及其周边35个气象站点2000–2018年逐月降水量、平均气温、相对湿度、日照时数、最高气温及最低气温,来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。利用Excel数据透视表将多年气象数据进行均值计算,根据每个气象站点经纬度信息通过ArcGIS的Spatial Analyst模块对气象数据进行Kriging空间插值,重采样到与贵州省植被覆盖度多年平均值影像数据相同大小分辨率,利用贵州省行政区划图裁剪研究区2000–2018气象栅格影像,分别获取各气象数据多年平均栅格影像。

SRTM DEM数据^[27]来源于GEE云平台,在平台公共数据目录(Earth Engine Data Catalog)中ID为USGS/SRTMGL1_003,空间分辨率30 m,坡度数据由DEM计算获取。贵州省市州、县、乡镇等行政区划矢量数据来源于国家遥感中心贵州分部(贵州省遥感中心)。贵州省岩性矢量图来源于国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心。

2.2 研究方法

2.2.1 Google Earth Engine 遥感计算云平台

Google Earth Engine(简称GEE),由谷歌、卡内基梅隆大学和美国地质调查局联合开发构建,是目前世界上最先进的基于云计算的地理信息处理平台,具有全球尺度PB级地理数据在线可视化计算和科学分析处理功能^[28]。本文以Google Earth Engine地理计算云平台为支撑编程实现下述影像处理:首先利用云量计算算法筛选符合时间和空间的30 m分辨率Landsat-NDVI影像,以云量得分最低的像元重构目

标年份最小云量合成影像;随后将筛选后影像依据年份进行最大值合成;最后将匹配年份的Landsat_5/7/8最大值合成NDVI影像进行叠加计算,取中值以获取最终NDVI数据,此方法在一定程度上平滑影像,抑制影像之间条带干扰。

2.2.2 像元二分模型及趋势分析

像元二分模型是估算植被覆盖度最终公式,其基本原理是假设每一个像元的光谱信息由裸土和植被两部分线性混合组成,每个像元的NDVI值是纯植被部分和对应裸土部分光谱信息的加权和,根据两部分信息占该像元面积的百分比来确定权重,由此计算出来的植被覆盖地表面积比即为该像元的植被覆盖度^[29]。计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中:FVC为植被覆盖度;NDVI为混合像元归一化植被指数;NDVI_{soil}为纯裸土像元的NDVI值,理论上近似于0;NDVI_{veg}为纯植被像元的NDVI值,理论上近似于1。实际上由于植被类型、土壤湿度、气候条件等因素的干扰,不同影像的NDVI_{soil}值和NDVI_{veg}值会随时空变化发生波动,波动范围一般在-0.1~0.2。因此NDVI_{soil}和NDVI_{veg}的取值是该模型应用关键,对于两参数的具体取值,本文采取给定置信度区间的上下限阈值分别近似代表NDVI_{soil}和NDVI_{veg},有研究表明,此方法能有效减少遥感影像噪声产生的误差,被研究者广泛应用^[30–31]。研究中NDVI_{soil}和NDVI_{veg}的取值参照杨旭超^[32]植被覆盖度计算并在最终合成的NDVI影像频率统计表中选取累计频率为5%对应的NDVI像元值作为NDVI_{soil},选取累计频率为95%对应的NDVI像元值作为NDVI_{veg}。在统计过程中,当像元值小于等于零时,认为是水体,不参与统计计算。

研究采用线性回归方法计算植被覆盖度随时间的变化趋势,线性回归分析能够逐像元计算植被覆盖度年际变化的最小二乘线性回归方程的斜率,当斜率为正,表明植被覆盖度呈现增长趋势;当斜率为零,表明植被覆盖度没有变化;当斜率为负,表明植被覆盖度呈现下降趋势。以此综合反映植被年际空间格局演变趋势^[33],具体计算公式如下:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times FVC_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中:Slope为植被变化趋势;FVC_i为第i年的植被覆盖度像元值;n为监测年数(本文n=19)。

2.2.3 地理探测器

地理探测器利用GIS叠加技术与集合论提出,模型通过“探测力值 q ”识别多因子之间的交互作用对因变量的影响,从而探索各要素之间空间分异性。其基本原理是若自变量对因变量有重要的影响,则自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[34]。本文以贵州省1379个乡镇为研究单元借鉴地理探测器模型探讨影响NDVI空间异质性的驱动因子,若某驱动因子与NDVI值在空间上具有显著的一致性,则表明该因子对NDVI空间分异格局的形成具有影响,利用地理探测器 q 值大小表征这种影响的强弱。 q 值介于0到1之间, q 值越大,则驱动因子对NDVI空间分异的影响越强,反之影响越弱。地理探测力值 q 表示为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2$$

在本文中 $h=1, 2, \dots, L$ 为驱动因子的分层, N_h 和 N 分别为层 h 内和全区内的单位数; σ_h^2 和 σ^2 分别表示层 h 和全区驱动因子的方差。 SSW 和 SST 分别表示为层内方差之和以及全区总方差。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时空变化特征

3.1.1 植被覆盖度年际变化

为了揭示贵州省植被覆盖度多年动态特征,取各像元的年最大植被覆盖度作为变化指标,计算贵州省2000–2018历年平均植被覆盖度变化状况。图2所示可以看出19年间植被覆盖度均值在0.52~0.64之间变动,整个研究区内植被覆盖度随时间呈现不断上升趋势,回归直线斜率为0.0043,年均增长速率为0.4%,反映出贵州省境内植被整体恢复水平正向逐渐趋好的方向演替。作为西南石山地区石漠化分布面积最大的省^[35],石漠化面积占西南地区的31%。为了从植被的角度来评价贵州重度石漠化区植被演替方向,本文统计分析贵州境内位于关岭县以南、贞丰县以北的北盘江花江河段石漠化严重的区域——花江峡谷^[36]2000–2018年间植被覆盖变化情况(图2)。由图2可知,严重石漠化样区历年的植被覆盖度均值在0.50上下波动,且在研究期间始终低于贵州省植被覆盖度的整体水平。这是由于重度石漠

化地区基岩裸露率高、地表破碎、山高坡陡、成土速度较慢等因素导致环境中植被生长所需的水、土壤等要素结构性缺失,植被生长缓慢。尽管重度石漠化地区植被覆盖度低于研究区整体植被覆盖度,但其增长模拟线几乎与贵州省整体植被覆盖度增长模拟线持平。汇总统计了研究期间贵州省自然因数(日照时数、平均气温、降水量及相对湿度等)的历年均值并模拟其趋势线,年均气温趋势线略有上升,其余自然因素趋势线接近持平无变化,这表明重度石漠化地区植被覆盖不断趋好关键因素是石漠化治理工作取得了一定的成效。

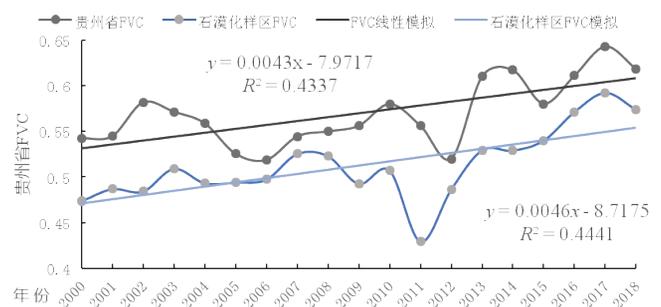


图2 贵州省植被FVC年际变化

Fig. 2 Interannual variation of vegetation FVC in Guizhou Province

上述植被覆盖度年际变化是研究区内所有像元的均值结果,为了更进一步探究贵州省植被覆盖度年际增减幅度,本文参照杨建平^[37]分别计算了2000–2003年与2015–2018年四年平均 $NDVI_x$ 和 $NDVI_y$,将 $NDVI_x$ 的图像除以 $NDVI_y$ 的图像减去 $NDVI_x$ 得到贵州省19年间 $NDVI$ 变化趋势分布图,将其可视化后如图所示:

观察2000–2003与2015–2018年最大值合成 $NDVI$ 均值可以发现, $NDVI$ 由西南到东北随着高程的降低植被覆盖呈现逐渐递增的趋势,其中城镇化区的植被最为稀少。相比2000–2003年最大值合成 $NDVI$ 均值,2015–2018年最大值合成 $NDVI$ 均值整体呈现增加趋势,但城镇化区植被显著减少,这与贵州省城镇化面积不断扩张相符。为了探明贵州省城镇化扩张导致周边植被递减的变化,本文在 $NDVI_x$ 、 $NDVI_y$ 图像上将贵州省省会贵阳放大到同一比例尺,如图3所示,图中白色区域即为城市面积扩张变化。

将年 $NDVI$ 变化幅度分布可视化显示(图4),贵州省 $NDVI$ 值增减并存,但以增加为主,涨幅在6%–10%之间, $NDVI$ 值增长可能部分来自于这些地区 $NDVI$ 初始值较小($NDVI$ 均值在0.21~0.36之间)和

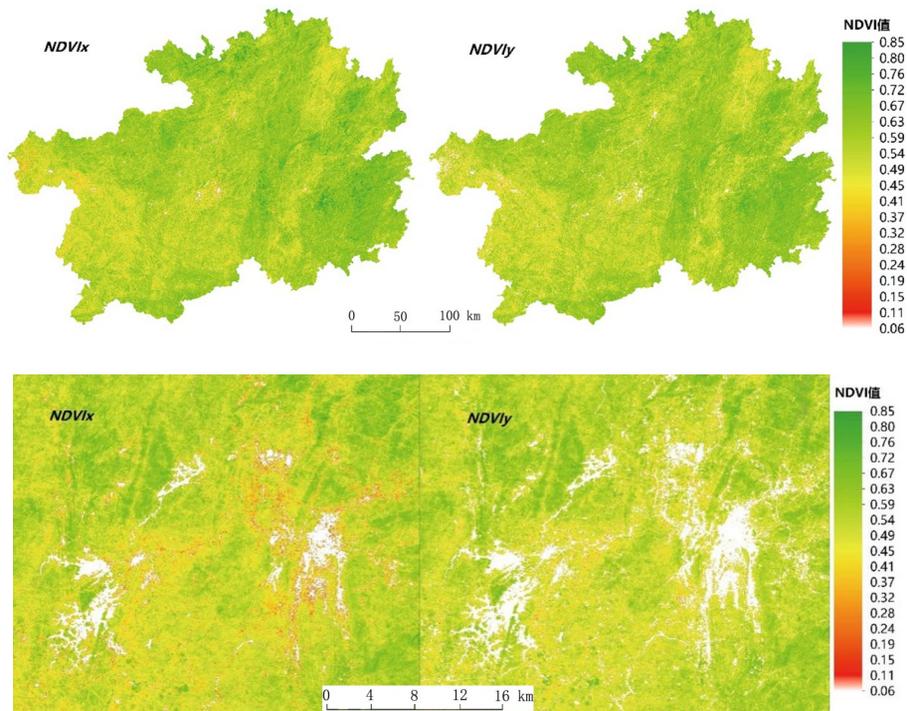


图3 贵州省2000-2003四年NDVI均值($NDVI_x$)和2015-2018四年NDVI均值($NDVI_y$)及贵阳市区域放大图

Fig. 3 $NDVI$ mean value ($NDVI_x$) in 2000-2003 and the $NDVI$ mean value($NDVI_y$) in 2015-2018 of Guizhou Province and the enlarged map of Guiyang City

贵州省石漠化治理工作取得成效的作用^[38]。黔东南腹地、黔西南东南角、铜仁中部、毕节东部、遵义贵阳黔南交界处等区域 $NDVI$ 值出现退化现象,减少幅度在5%~13%之间。其中黔东南的台江县、剑河县、雷山县部分地区减幅超过9%;遵义(遵义市、湄潭县、红花岗区)、贵阳(白云区、观山湖区、开阳县)、黔南(瓮安县、贵定县)、毕节(黔西县、金沙县)、黔西南(望谟县、册亨县)以及铜仁(印江县、江口县)等部分地区 $NDVI$ 值减幅约5%左右。

3.1.2 植被覆盖度空间差异及变化趋势

根据2000-2018年 $NDVI$ 数据计算得到历年植被覆盖度数据,将多年植被覆盖度求均值运算获取研究期间贵州省 FVC 分布,以此表征植被空间格局演变基本特征(图5)。从图5可以看出,贵州省植被覆盖度以中等、中高和高植被覆盖度为主,三者面积占比之和为88.72%(表1)。贵州省总体植被覆盖度较高,低植被覆盖和中低植被覆盖主要分布于西部地区、中部贵阳和平坝、北部红花岗区及沿河县和思南县、东部凯里市与麻江县北部。将研究区岩性图与图5进行叠加分区统计,发现中高植被覆盖度和高植被覆盖度在碎屑岩、白云岩及石灰岩地区面积占比

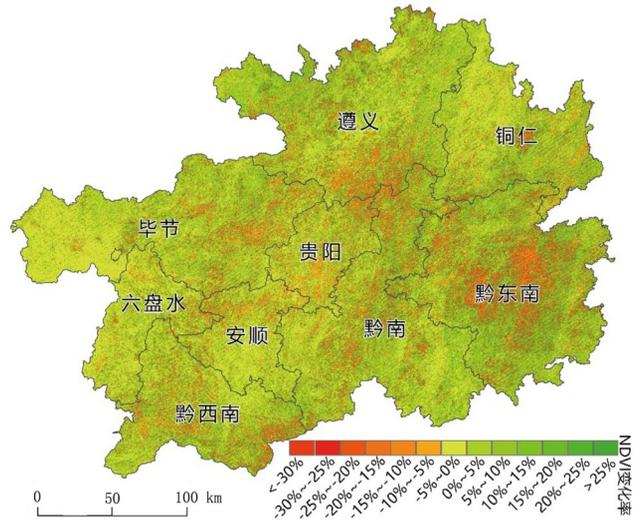


图4 $NDVI$ 变化幅度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of $NDVI$ variation amplitude

分别为27.62%、23.38%、12.03%。其中碎屑岩地区植被覆盖度均值为0.606,白云岩地区植被覆盖度均值为0.583,石灰岩地区植被覆盖度均值为0.569。综合来看,贵州省植被覆盖空间分布整体呈现为:碎屑岩>白云岩>石灰岩,此结果与徐艳芳等^[39]研究成果一致,同时也符合喀斯特高原山区植被分布一般规律。

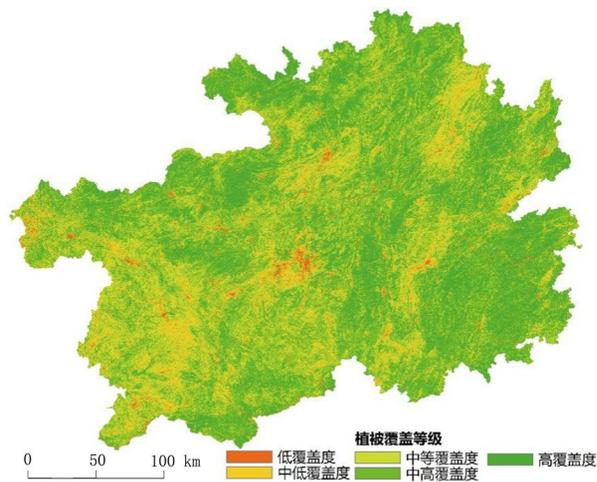


图5 2000-2018 贵州省多年平均FVC空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of multi-year average FVC in Guizhou Province from 2000-2018

表 1 2000-2018 年贵州省植被覆盖度等级面积统计

Table 1 Statistics of vegetation coverage graded area in Guizhou Province from 2000-2018

岩性	植被覆盖等级	像元数量/个	面积/km ²	比例/%
碎屑岩	低	10 923 480	971.27	0.55
	中低	46 430 645	4 128.42	2.35
	中等	151 196 895	13 443.80	7.63
	中高	289 809 870	25 768.69	14.63
	高	257 317 002	22 879.56	12.99
石灰岩	低	8 761 359	779.02	0.44
	中低	40 436 995	3 595.49	2.04
	中等	115 591 730	10 277.94	5.83
	中高	150 970 204	13 423.64	7.62
	高	87 315 864	7 763.76	4.41
白云岩	低	18 168 316	1 615.45	0.92
	中低	98 723 609	8 778.09	4.98
	中等	242 296 164	21 543.97	12.23
	中高	289 705 713	25 759.43	14.62
	高	173 629 965	15 438.46	8.76

为了研究贵州省植被覆盖度变化趋势,笔者基于像元尺度计算了植被覆盖度变化斜率,表征研究期间植被覆盖度的空间差异。根据其像元值并参照裴杰等^[40]FVC分类将变化趋势分为如图6所示5类:明显改善($Slope > 0.015$)、轻微改善($0.005 \leq Slope \leq 0.015$)、基本不变($-0.005 \leq Slope \leq 0.005$)、轻微退化($-0.015 \leq Slope \leq -0.005$)、严重退化($Slope < -0.015$)。空间格局演变的特征主要表现为:

(1)表2和图6显示,2000-2018年间贵州省植被覆盖度退化区域面积占比3.8%,主要集中在城镇周边区域;植被覆盖度基本不变区域面积占比为50.4%,空间分布比较聚集,其中非喀斯特地区表现最为明显;植被覆盖度改善区域面积占比为45.7%,分布较为分散,贵州省北部、南部以及西部均出现植被覆盖轻微改善,其中毕节威宁县、赫章县以及黔南三都县植被覆盖度改善状况最为突出。

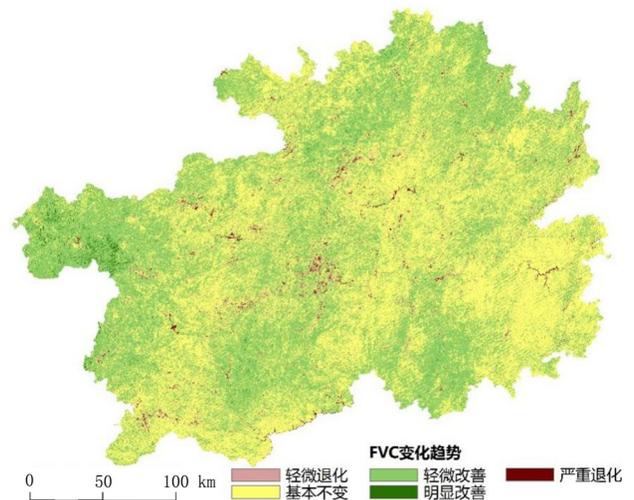


图6 贵州省年最大FVC变化趋势

Fig. 6 Annual maximum FVC change trend in Guizhou Province

表 2 2000-2018 年贵州省年最大 FVC 变化趋势

Table 2 Annual maximum FVC change trend in Guizhou Province during 2000-2018

FVC变化趋势	像元数量/个	面积/km ²	比例/%
严重退化	17 765 968	1 579.676 14	0.896 692 4
轻微退化	57 601 061	5 121.647 281	2.907 268 3
基本不变	999 144 055	88 839.742 59	50.429 276
轻微改善	893 032 726	79 404.763 62	45.073 574
明显改善	13 734 001	1 221.170 368	0.693 189 1

(2)贵州省植被覆盖度变化趋势以轻微改善、基本不变为主,两者面积占比之和约为95.4%。结合图5考虑,贵州省大部分区域植被覆盖度处于中高覆盖等级,全省植被覆盖度均值为0.59,极少部分地区植被覆盖度出现退化现象,说明贵州省植被覆盖度总体趋势稳定。

3.2 植被生长对气候变化的响应

使用地理探测器中风险探测器将各气象因素及地理区位调节至最适分级(表3),进而利用地理探测器探测植被覆盖度和地理区位、气象因素在空间分异上的深层次联系。综合考虑地理区位、气象因素对贵州省植被覆盖度空间分异的影响,本文选取数字高程(a_1)、坡度(a_2)、平均相对湿度(a_3)、日照时数(a_4)、平均气温(a_5)、降水量(a_6)、最高气温(a_7)、最低气温(a_8)共计8个驱动因子。经地理探测器计算后,

各因子对植被覆盖变化的贡献率如表3所示,各因子贡献率大小顺序为 $a_4 > a_2 > a_6 > a_3 > a_5 > a_1 > a_7 > a_8$,整体 q 值比较小,说明单个驱动因子对研究区植被覆盖度的空间分布解释能力较弱。通过比较 q 值、 p -value值较高的因子进行筛选, a_4 、 a_2 的 q 较大,说明其对植被覆盖度空间分布的解释力强,而 a_6 对应的 p -value值高达0.98,即其产生作用的可能性较大,就单驱动因子而言,日照时数、坡度、降雨量对植被覆盖度空间分异起主导作用,对应的 q 值分别是0.4652、0.3455、0.2410。

表3 地理探测器指标选择

Table 3 Choice of geographical detector indicators

驱动因子	数据获取途径	单位	分级	q 值	p -value
a_1 数字高程数据	Google Earth Engine 云平台	米/m	29	0.140 6	0.120 9
a_2 坡度数据	ArcGIS坡度分析,栅格统计	度/ $^{\circ}$	32	0.345 5	0.312 5
a_3 平均相对湿度	ArcGIS空间插值,Excel函数统计	百分比/%	23	0.168 5	0.164 6
a_4 日照时数	ArcGIS空间插值,Excel函数统计	时/h	27	0.437 1	0.465 2
a_5 平均气温	ArcGIS空间插值,Excel函数统计	摄氏度/ $^{\circ}\text{C}$	33	0.158 4	0.100 5
a_6 降水量	ArcGIS空间插值,Excel函数统计	毫米/mm	19	0.241 0	0.981 4
a_7 最高气温	ArcGIS空间插值,Excel函数统计	摄氏度/ $^{\circ}\text{C}$	16	0.061 8	0.168 9
a_8 最低气温	ArcGIS空间插值,Excel函数统计	摄氏度/ $^{\circ}\text{C}$	21	0.050 7	0.037 2

地理探测器中的交互探测器测度了驱动因子间的交互作用,如表4可知,交互探测器探测两因子间交互作用对植被覆盖度空间分异的影响要大于单因子作用产生的影响。

分析结果显示,驱动因子间交互作用形成贵州省植被覆盖度特定的空间格局。植被覆盖度在空间分布上受多种因素的综合影响,利用地理探测器的交互探测发现两因子的交互作用要大于单因子作用。其中 $a_1 \cap a_2$ 、 $a_1 \cap a_4$ 、 $a_2 \cap a_3$ 、 $a_2 \cap a_4$ 、 $a_2 \cap a_5$ 、 $a_4 \cap a_7$ 的影响力 q 值均大于0.5,而 $a_3 \cap a_8$ 的影响力 q 值最小,为0.2175,影响力 q 值最大是 $a_2 \cap a_4$ 为0.6254,表明研究区内坡度和日照时数交互作用对植被覆盖度的影响最大——高原山区复杂地形和日照的变化形成特殊山地地形气候是影响植被生长的主要因素。日照时数表征着某一地区接受太阳光照射时间的长短,是重要的气候资源,也是影响山区植被分布的重要原因之一;不同坡度产生的土壤侵蚀情况及水分聚集、分布具有明显差异,对植被生长影响也不同。在贵州“天无三日晴,地无三尺平”的自然地理特征下日照和坡度对植被生长的影响尤为突出。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于遥感计算云平台通过影像最小云量合成法重构贵州2000–2018年间Landsat-NDVI数据,能有效解决多云多雨地区高质量光学影像获取困难及海量遥感影像存储计算地学问题。以Landsat-NDVI数据为基础,系统分析地理区位、气象因素等各驱动因子间交互作用对植被覆盖度年际演化与空间格局的影响机制,得出如下结论:

(1)2000–2018年间贵州省植被覆盖度增减并存,总体呈现不断上升趋势,涨幅在6%~10%,植被恢复状况缓慢趋好,其年均增长率为0.4%,19年间植被覆盖度均值波动范围是0.52~0.64。严重石漠化样区历年植被覆盖度始终低于研究区整体植被覆盖度,但两者线性回归趋势线近似持平,线性模拟斜率依次为0.004 6、0.004 3, R^2 依次为0.444 1、0.433 7,表明贵州省石漠化治理工程取得了一定的成效。

(2)贵州省大部分区域属于中等、中高及高植被覆盖度,三者面积占比之和约为88.72%。通过将研究区植被覆盖等级图与贵州省岩性图叠加对比,发

表 4 植被覆盖度空间分异性影响因子之间的交互作用

Table 4 Interaction between spatial differentiation influence factors of vegetation coverage

C	A+B	结果	交互作用
$a_1 \cap a_2 = 0.5438$	$a_1(0.1406) + a_2(0.3455)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_1 \cap a_3 = 0.4546$	$a_1(0.1406) + a_3(0.1685)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_1 \cap a_4 = 0.5089$	$a_1(0.1406) + a_4(0.4371)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_1 \cap a_5 = 0.4225$	$a_1(0.1406) + a_5(0.1584)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_1 \cap a_6 = 0.3888$	$a_1(0.1406) + a_6(0.2410)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_1 \cap a_7 = 0.2804$	$a_1(0.1406) + a_7(0.0618)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_1 \cap a_8 = 0.3510$	$a_1(0.1406) + a_8(0.0507)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_2 \cap a_3 = 0.5416$	$a_2(0.3455) + a_3(0.1685)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_2 \cap a_4 = 0.6254$	$a_2(0.3455) + a_4(0.4371)$	$C > \text{Max}(A+B)$	双因子增强
$a_2 \cap a_5 = 0.5411$	$a_2(0.3455) + a_5(0.1584)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_2 \cap a_6 = 0.4485$	$a_2(0.3455) + a_6(0.2410)$	$C > \text{Max}(A+B)$	双因子增强
$a_2 \cap a_7 = 0.4237$	$a_2(0.3455) + a_7(0.0618)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_2 \cap a_8 = 0.4358$	$a_2(0.3455) + a_8(0.0507)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_3 \cap a_4 = 0.4385$	$a_3(0.1685) + a_4(0.4371)$	$C > \text{Max}(A+B)$	双因子增强
$a_3 \cap a_5 = 0.4651$	$a_3(0.1685) + a_5(0.1584)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_3 \cap a_6 = 0.4189$	$a_3(0.1685) + a_6(0.2410)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_3 \cap a_7 = 0.3624$	$a_3(0.1685) + a_7(0.0618)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_3 \cap a_8 = 0.3770$	$a_3(0.1685) + a_8(0.0507)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_4 \cap a_5 = 0.4867$	$a_4(0.4371) + a_5(0.1584)$	$C > \text{Max}(A+B)$	双因子增强
$a_4 \cap a_6 = 0.4170$	$a_4(0.4371) + a_6(0.2410)$	$C > \text{Max}(A+B)$	双因子增强
$a_4 \cap a_7 = 0.5149$	$a_4(0.4371) + a_7(0.0618)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_4 \cap a_8 = 0.4950$	$a_4(0.4371) + a_8(0.0507)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_5 \cap a_6 = 0.4159$	$a_5(0.1584) + a_6(0.2410)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_5 \cap a_7 = 0.3060$	$a_5(0.1584) + a_7(0.0618)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_5 \cap a_8 = 0.2175$	$a_5(0.1584) + a_8(0.0507)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_6 \cap a_7 = 0.3474$	$a_6(0.2410) + a_7(0.0618)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_6 \cap a_8 = 0.3281$	$a_6(0.2410) + a_8(0.0507)$	$C > A+B$	非线性增强
$a_7 \cap a_8 = 0.2464$	$a_7(0.0618) + a_8(0.0507)$	$C > A+B$	非线性增强

现中高、高植被覆盖度等级区域集中分布于碎屑岩(非喀斯特)地区,贵州省不同岩性植被覆盖等级从高到低分布规律为碎屑岩>白云岩>石灰岩。

(3)利用植被覆盖度变化斜率从像元尺度揭示贵州省19年间植被覆盖度变化趋势,将变化趋势分为明显改善、轻微改善、基本不变、轻微退化、严重退化五个类别。分析结果显示:研究区像元级植被覆盖演变趋势以轻微改善与基本不变为主,两者面积占比之和为95.4%。而植被退化区域面积占比约为3.8%,主要集中在城镇周边,这与贵州省城镇化面积不断扩张这一事实基本相符。

(4)地理探测器探测结果表明:就单因子而言,对植被覆盖度影响强度的关键因子由高到低的顺序为日照时数>坡度>降水量>平均相对湿度>平均

气温>高程;而多因子间交互作用对植被覆盖度的影响大于单因子作用,其中日照时数与坡度之间的交互作用对植被覆盖度影响最大,探测力值 q 为0.6254。鉴于此,贵州省植被覆盖度特定的空间格局与驱动因子间交互作用、紧密相关。

4.2 讨论

研究表明,2000-2018年间贵州省植被覆盖度处于中高覆盖度且缓慢趋好,气象因素间的交互作用对植被覆盖度的影响要大于单因素作用,综合地理探测器的计算结果,日照时数对贵州省植被覆盖度的影响强度大于其他气象因素。本文分析了贵州省19年间植被年际变化、覆盖强度、空间格局等,其成果可对后续贵州石漠化监测治理工作提供重要的基

础数据及科学参考。但植被覆盖度不仅受地理位置,气象因素等影响,还与人类活动紧密相关,由于笔者研究期间收集贵州省人类活动基础数据资料不足,没有系统地分析植被生长与人类活动的响应,这部分内容可作为后续工作的研究方向。

参考文献

- [1] 沈斌,房世波,余卫国. NDVI与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异[J]. 遥感学报, 2016, 20(3): 481-490.
- [2] 崔林丽,史军,杨引明,等. 中国东部植被NDVI对气温和降水的旬响应特征[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 850-860.
- [3] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. Remote sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [4] ZHU W B, JIA S F, LU A F, et al. Analyzing and modeling the coverage of vegetation in the Qaidam Basin of China: The role of spatial autocorrelation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(2): 346-358.
- [5] 冯筠,高峰,孙成权. 遥感技术在全球变化研究中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2001(04): 237-241.
- [6] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004(04): 153-159.
- [7] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001-2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [8] 宋鹏飞,季民,刘泽群,等. 山东省植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J/OL]. 测绘科学, 2020(3): 1-8.
- [9] 李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [10] 郑有飞,刘宏举,吴荣军,等. 贵州省NDVI变化及其与主要气候因子的相关性[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 12-17.
- [11] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change[J]. science, 2013, 342(6160): 850-853.
- [12] Donchyts G, Baart F, Winsemius H, et al. Earth's surface water change over the past 30 years[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(9): 810.
- [13] 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.
- [14] 陈黔,李晓松,修晓敏,等. 基于Google Earth Engine与机器学习的大尺度30m分辨率沙地灌木覆盖度估算[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4056-4069.
- [15] 刘凯,彭力恒,李想,等. 基于Google Earth Engine的红树林年际变化监测研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 731-739.
- [16] 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.
- [17] Shrestha A, Luo W. Analysis of Groundwater Nitrate Contamination in the Central Valley: Comparison of the Geodetector Method, Principal Component Analysis and Geographically Weighted Regression[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(10): 297.
- [18] 廖颖,王心源,周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767-778.
- [19] 文琦,施琳娜,马彩虹,等. 黄土高原村域多维贫困空间异质性研究:以宁夏彭阳县为例[J]. 地理学报, 2018, 73(10): 1850-1864.
- [20] 王欢,高江波,侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1674-1686.
- [21] 叶妍君,齐清文,姜莉莉,等. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析[J]. 地理研究, 2018, 37(1): 171-182.
- [22] 裴志林,杨勤科,王春梅,等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 546-555.
- [23] Du Z, Xu X, Zhang H, et al. Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk[J]. PloS one, 2016, 11(3): e0151331.
- [24] 蓝安军. 喀斯特石漠化过程. 漠化特征与人地矛盾分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2002(1): 40-45.
- [25] 陈文媛. 黄土高原沟壑区植被类型对土壤团聚体及入渗特征的影响[D]. 西北农林科技大学, 2017.
- [26] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.
- [27] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The shuttle radar topography mission[J]. Reviews of geophysics, 2007, 45(2).
- [28] 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.
- [29] 李登科,范建忠,王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2896-2903.
- [30] 李钰澈,贾坤,魏香琴,等. 中国北方地区植被覆盖度遥感估算及其变化分析[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 112-117.
- [31] 吴云,曾源,赵炎,等. 基于MODIS数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学, 2010, 32(7): 1417-1424.
- [32] 杨旭超,张军,李杰,等. 呈贡区近30年植被覆盖度时空变化特征与土地利用驱动[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 232-238.
- [33] 宋怡,马明国. 基于GIMMS AVHRR NDVI数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J]. 遥感学报, 2008(03): 499-505.
- [34] 庞毓雯,黄雨馨,俞立鹏,等. 基于MODIS数据的神农架大九湖泥炭藓沼泽植被指数变化研究[J/OL]. 生态学报, 2019(13): 1-10.
- [35] CAO J H, YUAN D X, TONG L Q et al. An Overview of Karst Eco-

- system in Southwest China: Current State and Future Management *Journal of Resources and Ecology*, 2015,6 (4): 247-256.
- [36] 陈圣子,周忠发,闫利会.基于网格GIS的喀斯特石漠化治理过程中生态系统健康变化诊断:以贵州花江示范区为例[J].中国岩溶,2015,34(3):266-273.
- [37] 杨建平,丁永建,陈仁升.长江黄河源区高寒植被变化的NDVI记录[J].地理学报,2005(03):467-478.
- [38] 弘扬“板贵精神”再创石漠化治理佳绩[J].贵州省人民政府公报,2011(07):2.
- [39] 徐艳芳,王克林,祁向坤,等.基于TM影像的白云岩与石灰岩上喀斯特植被时空变化差异研究[J].生态学报,2016,36(1):180-189.
- [40] 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.

Spatiotemporal variation of vegetation coverage in plateau mountainous areas based on remote sensing cloud computing platform: A case study of Guizhou Province

WU Yue^{1,2}, ZHOU Zhongfa^{1,2}, ZHAO Xin^{1,2}, DAN Yusheng^{1,2}, HUANG Denghong^{1,2}

(1. School of Karst Science / School of Geography and Environment, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract The purpose of this work is to reveal the spatio-temporal variation of vegetation in karst mountainous areas. We choose the Landsat-NDVI images of 1748 scenes with 30 m resolution during 2000—2018, combined with data from 35 meteorological stations and the pixel dichotomy model, linear trend analysis and geographic detectors to quantitatively estimate the annual vegetation coverage in Guizhou Province in the past 19 years. The spatial and temporal variation and driving forces of vegetation coverage were analyzed. The results show that, (1) the areas of medium-high vegetation coverage account for 63% and the area of high vegetation coverage accounts for 21.16%, which is mainly concentrated in the clastic areas. On the whole, the amount of vegetation coverage is of such an order: clastic rock > dolomite > limestone. (2) In the past 19 years, the vegetation coverage in Guizhou Province has shown slight improvement, with an average annual growth rate of 0.4%. The multi-year average value of maximum vegetation coverage in severe rocky desertification areas is constantly lower than the general vegetation coverage. (3) During the study period, the overall change of vegetation coverage in Guizhou Province was stable, dominated by slight improvement and basically no-change, the sum of which accounts for about 95.4% of the total area. The degraded areas are mainly distributed in periphery of cities and towns, accounting for about 3.8% of the total area. (4) The interaction between meteorological and geographical factors has greater impact on the spatial pattern of vegetation coverage than that of single factor. In summary, the key factors affecting vegetation restoration and ecological environment reconstruction include urban area expansion, rocky desertification control project, geographical location and meteorological factors. The study of multi-year dynamic characteristics of vegetation coverage aims to provide important basic data and scientific reference for water and soil conservation, ecological environment protection decision-making, ecological restoration (rocky desertification control) and sustainable management of relevant departments.

Key words karst mountainous areas, vegetation coverage, spatiotemporal variation, Landsat-NDVI, geographic detector

(编辑 张玲)