

DOI: 10.5846/stxb201906251343

文林琴, 栗忠飞. 2004—2016 年贵州省石漠化状况及动态演变特征. 生态学报, 2020, 40(17): 5928-5939.

Wen L Q, Li Z F. Evolution characteristics of rocky desertification during 2004—2016 in Guizhou Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5928-5939.

2004—2016 年贵州省石漠化状况及动态演变特征

文林琴, 栗忠飞*

西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224

摘要: 石漠化是制约我国西南地区社会、经济、生态发展的重要因素之一, 及时监测评估其演变状况, 对区域石漠化防治及生态环境建设具有重要科学意义。选取 2004—2016 年间 4 期 TM 影像, 研究贵州省域尺度上、石漠化时空演变特征和未来发展趋势。结果显示: 1) 2004—2016 年间, 贵州省 78.3% 的区域植被覆盖度上升, 平均增加了 19.1%, 达到 63.4%, 有 55.4% 的区域岩石裸露率下降; 2) 贵州省石漠化空间分布呈现从东北到西南渐次加重的特征, 西部毕节市中、重度石漠化面积占该区域面积仍达 62.0%—86.4%, 而东部黔东南州约为 18.4%—33.0%; 3) 2004—2016 年间, 贵州省石漠化状况呈现总体持续好转态势, 以轻、中度石漠化转入为主体的无石漠化面积增加了 1.1 倍, 轻度石漠化增加了 20.0% 左右, 中度和重度石漠化面积分别减少了 40.0% 左右; 4) 截止到 2016 年, 贵州省无石漠化、轻、中、重度石漠化区域分别占比约 42.0%、24.1%、23.5%、10.4%; 5) 未来 2020 年及 2024 年, 贵州省石漠化仍将持续改善, 石漠化面积占比将分别减少 8.9% 和 12.2%。过去十多年间, 贵州省石漠化状况得到基本遏制, 但局部区域仍存在高度的不稳定性, 或趋于恶化的风险, 未来在各类政策措施的支持下, 贵州省石漠化状况仍将继续好转, 但部分重度石漠化区域的治理将更为复杂而艰难。

关键词: 贵州省; 石漠化; 时空演变; 现状与趋势

Evolution characteristics of rocky desertification during 2004—2016 in Guizhou Province, China

WEN Linqin, LI Zhongfei*

College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: The rock desertification is one of the important factors restricting the development of social, economic and ecology in Southwest China. Timely monitoring and evaluation have great scientific significance for the prevention and control of regional rock desertification and the construction of the ecological environment. In this study, the TM image of four periods from 2004 to 2016 were selected for evaluating the dynamic evolution of rocky desertification in the region of Guizhou Province. The results showed: 1) The vegetation coverage Province went up in 78.3% of Guizhou, with an average of 19.1% to 63.4%, but bare rock rate decreased in 55.4% of this region between 2004 and 2006. 2) The spatial distribution of rocky desertification in Guizhou Province presents the characteristics of gradual aggravation from northeast to southwest. The areas of moderate and severe rocky desertification in Bijie City western Guizhou Province still accounted for 62.0%—86.4%, while in Qiandongnan eastern Guizhou Province, it was only 18.4%—33.0%. 3) From 2004 to 2016, the situation of rocky desertification in Guizhou Province showed a general trend of continuous improvement. The area nil-rocky desertification increased by 1.1 times, deriving from the transition of light and moderate rocky desertification mainly, The slight rocky desertification increased by around 20.0%, and the moderate and severe rocky desertification decreased by

基金项目: 国家自然科学基金 (3136012)

收稿日期: 2019-06-25; 修订日期: 2020-03-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhongfei2016@163.com

around 40.0% respectively. 4) By the end of 2016, the areas of nil-rock desertification, light rock desertification, medium and severe rock desertification in Guizhou Province accounted for about 42.0%, 24.1%, 23.5%, and 10.4% respectively. 5) In 2020 and 2024, the rock desertification would continue to be improved in Guizhou Province, and the areas of rock desertification would decrease by 8.9% and 12.2% respectively. In the past decade or more, the saturation of rock desertification in Guizhou Province has been basically contained, but there was still a high degree of instability or risk of deterioration in some regions. In the future, with the support of various policies and measures, the situation of rock desertification in Guizhou Province will continue to improve, but the controlling of some severe rocky desertification areas will be more complicated and difficult.

Key Words: Guizhou Province; rocky desertification; space-time evolvement; status and trends

石漠化是一种受人类不合理社会经济活动干扰和破坏而造成的土壤严重侵蚀、基岩大面积裸露、土地生产力严重下降、地表出现类似荒漠景观的土地退化过程^[1]。我国石漠化主要分布于贵州、云南、广西、湖南、四川、重庆、湖北和广东等 8 个省份^[2-3],其中尤以西南区域的贵州、云南为重,已经成为困扰我国西南区域生态建设的重大环境问题^[4-6]。

地处我国西南区域的贵州省,位于长江中上游与珠江上游重要水源补给区,具有十分重要的地理位置和生态区位^[7]。贵州省是世界上岩溶地貌发育最典型的地区之一,是全国石漠化分布面积最大、类型最全、形成最强烈的高原山区^[8]。贵州省严重的石漠化问题,导致区域水土流失加剧、生态系统功能退化,江河湖库泥沙淤积,严重威胁着长江、珠江等江河中下游地区的生态安全与可持续发展^[9],一直以来都是区域内研究的热点和生态环境治理的重点^[10-12]。

诸多学者针对贵州省石漠化问题开展了一系列研究,包括石漠化时空演变^[10,13-14]、动态变化及成因^[15-16]、驱动机制^[17]、生态恢复与治理^[18-19]以及监测技术及评价方法^[20-21]等。对石漠化的研究中,分析石漠化格局变化过程是认识石漠化发生、发展的前提和基础^[22]。但由于研究目的、数据来源及研究区自然环境状况等条件的差异与制约,当前针对贵州省石漠化的各类研究,总体上呈现:1)研究区多为石漠化治理试点区域、县域及地州区域等中小区域,未能体现贵州省域尺度上石漠化空间格局状况;2)研究时间序列较短,未能体现近二十多年来贵州全省石漠化治理、演变的过程及发展态势。因此,长时间序列下、贵州省域尺度的石漠化演变状态及未来趋势变化的相关研究,在当前生态文明建设背景下显得尤为迫切而重要。

本文基于 TM 遥感影像数据,以贵州全省为研究区,对贵州省 2004—2016 年间 4 个不同时段 of 石漠化演变状况,开展动态化的定量分析,揭示贵州省近些年来,在国家生态环境建设大背景下,其石漠化状态的发展演变规律及空间分布格局,与此同时,进而模拟预测其未来演变趋势。研究对未来贵州省乃至整个西南区域生态文明建设需求下的石漠化治理提供现实的科学指导依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

贵州省地处中国西南地区腹地(103°36′—109°35′E、24°37′—29°13′N),地貌类型属于中国西南喀斯特高原山地,境内地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,平均海拔在 1100 m 左右。西部高海拔区域属暖温带季风气候,中部、东部为亚热带季风气候,区内气温和降水分布差异显著,年平均降水量 682—1134 mm,年均气温 14—16 ℃,常年相对湿度在 70% 以上。

全省土壤类型复杂多样,其中黄壤面积最多,主要分布于中部区域,是全省土壤类型的主体部分。境内还广泛发育石灰土和紫色土等岩性土^[23]。

全省植被类型主要包括栽培植被、灌丛、草丛、草甸、针叶林、阔叶林和针阔叶混交林^[24],其东南部、南部、西北部植被类型以阔叶林、针阔混交林、竹林为主,而西部、西南部、东北部以灌丛、灌草丛为主^[25]。

1.2 数据来源

本文采用的遥感影像数据及 DEM 数字高程数据源于地理空间数据云共享平台 (<http://www.gscloud.cn/>)。其中 2004 年和 2008 年数据为 Landsat TM 影像数据,2012 年和 2016 年数据为 Landsat 8 的 OLI_TIRS 影像数据,数据空间分辨率均为 30 m×30 m,时间频率为 16 d。

2 研究方法

2.1 数据处理

首先对原始影像数据进行投影转换为 UTM(通用横轴墨卡托投影坐标系),采用 WGS_84 坐标系;采用信息较丰富的 TM5、4、3 和 OLI_TIRS6、5、4 三个波段进行彩色合成图像。利用 ENVI5.3 对数据进行辐射定标(Radiometric)和 FLAASH 大气校正,校正后采用三次卷积法将研究区遥感影像数据进行镶嵌,以贵州省地图为底图,进行裁剪以待信息提取。

2.2 石漠化程度等级划分

2.2.1 评价指标的选取

石漠化信息提取、空间分布研究以 GIS 技术结合遥感数据为基础^[26-30],评价指标一般根据景观特征和主要成因加以选择^[31]。植被覆盖度下降,大面积岩石裸露是石漠化最直接的景观标志^[32-35],成为石漠化研究选用最多的分级指标^[36]。也是石漠化调查、评估和等级划分的重要依据^[37]。诸多研究以及全国石漠化公报、贵州省石漠化公报等都将这两个指标列为评价指标体系^[12-13,38-39]。此外,坡度是影响石漠化变化的自然条件^[40],坡度越大,地表结构不稳定性就越强,越容易发生石漠化,是石漠化演变过程中一个非常重要的影响因素^[41],故也常被作为石漠化的分级指标^[12,42]。综上情况,本文结合当前石漠化空间遥感监测指标体系研究现状^[12-13,29-30,39],结合石漠化遥感监测指标选取的目的性、可操作性和代表性等原则^[43-44],同时,考虑影响贵州省石漠化演变的主导因素、空间尺度大小、地理环境状况等特征,最终选取植被覆盖度、岩石裸露率、坡度等 3 个指标作为本研究中石漠化空间格局演变的评价指标(表 1)。

2.2.2 石漠化等级的划分

对于较大区域的石漠化监测研究,常采用 3—4 级的划分方法^[37]。国家林业局制定《岩溶地区石漠化监测技术规定》(2011 年修订),将石漠化划分为轻、中、强和极强度 4 个等级,也有学者将石漠化划分为分为重、中、轻度和无石漠化 4 个等级^[12,45]。也有研究依据岩石裸露率和植被覆盖度指标,划分出无石漠化或潜在石漠化,及强度或极强度石漠化等^[38-39,42]。指标的阈值主要根据空间尺度、分级目标以及遥感影像的解译方法等因素确定^[46]。本文基于数据可得性、主要研究目等,综合前人研究成果等^[47-49],将石漠化等级划分为为无石漠化、轻度、中度和重度石漠化 4 个等级(表 1)。

表 1 喀斯特石漠化等级分级标准

Table 1 Classification standard of rocky desertification

程度 Degree	坡度/(°) Slope	植被覆盖度/% Forest coverage rate	岩石裸露率/% Area of bare rock
无石漠化 Nil rock desertification	≤15	>65	≤30
轻度石漠化 Slight rock desertification	>15	50—65	>30
中度石漠化 Medium rock desertification	>25	25—50	>50
重度石漠化 Severe rock desertification	>35	< 25	>70

2.3 各指标信息提取

2.3.1 坡度提取

选取 DEM 数据(<http://www.gscloud.cn/>),利用 ENVI 5.3 软件经融合裁剪、投影转换并转成 Tif 格式,得到研究区 DEM,然后利用 ArcGIS 10.4 软件 Spatial Analyst Tools 工具箱中 Surface 工具集,进行 Slope 坡度

计算^[50]。

2.3.2 植被覆盖度提取

运用 Gutman 像元二分模型^[51],以归一化差值植被指数(NDVI)估算植被覆盖度的模型为基础,参照李苗苗等^[52]所改进的归一化植被指数(NDVI)定量估算植被覆盖度的模型,进行植被覆盖度(FVc)估算。其表达式为:

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

式中 NIR 和 RED 分别为近红外波段与红光波段。

$$FVc = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

其中,NDVI_{soil}为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值,NDVI_{veg}则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值,即纯植被像元的 NDVI 值。研究中 NDVI_{veg}与 NDVI_{soil}取值分别为图像中置信度为 95%置信区间内的最大值与最小值。

2.3.3 岩石裸露率提取

在 NDVI 估算植被覆盖度的基础上,参照张晓伦^[44]归一化岩石指数(NDRI)估算岩石裸露率(Fr)。其表达式为:

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

式中,SWIR 和 NIR 分别为短波红外与近红外波段。

$$Fr = (NDRI - NDRI_{rock}) / (NDRI_{rock} - NDRI_n) \quad (4)$$

式中,NDRI_{rock}为完全岩石覆盖区域 NDRI 值,NDRI_n为完全非岩石覆盖时像元的 NDRI 值。研究中 NDRI_{rock}与 NDRI_n取值分别为图像中置信度为 95%的置信区间内的最大值与最小值。

2.3.4 实测数据的获取

选择贵州省石漠化等级分布较全的黔西南州为野外抽样调查区域,于 2018 年 8 月中旬,在该区域内进行空间抽样调查共计 36 个样地,记录样地经纬度、石漠化程度、植被类型、植被覆盖度、岩石裸露率等指标。

2.3.5 石漠化动态度与未来预测分析

为定量分析贵州省石漠化动态变化区域差异和预测未来变化趋势,本文引用单一土地利用类型动态度来研究单一等级石漠化动态度,利用综合石漠化动态度表示各石漠化类型总的变化幅度与速度^[10],同时利用 ArcGIS 对 4 期石漠化数据进行融合和叠加,得到石漠化转移矩阵,定量解释各石漠化类型间转移特征,运用马尔科夫模型^[53-54],通过马尔科夫过程转移概率,预测 2020 年和 2024 年贵州省石漠化演变趋势。

(1)单一等级石漠化动态度计算公式:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中, K 为研究时段内某一石漠化类型动态度; U_a 和 U_b 分别为研究期初及研究期末该类石漠化类型的数量; T 为研究时段长。

(2)综合石漠化动态度计算公式:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (|U_{ai} - U_{bi}|)}{S} \times \frac{1}{T} \quad (6)$$

式中, K 为综合石漠化动态度; U_{ai} 为研究区域内第 i 类石漠化类型在研究起始年的统计面积; U_{bi} 为研究区内第 i 类石漠化类型在研究终止年的统计面积; S 为研究区总的国土面积; T 为研究年数; n 为石漠化类型数。

3 结果

3.1 贵州省植被覆盖度时空格局分析

3.1.1 植被覆盖度精度检验

图 1 显示,实测的植被覆盖度与遥感解译的植被覆盖度,两者相关性系数 R²达到 0.87,精度良好。

3.1.2 贵州省植被覆盖度时空变化特征

贵州省植被覆盖度各时期总体上均呈现从东南向西北递减的趋势,西北部毕节市平均植被盖度仅为 23.2%—49.1%,而东南部黔东南州达到 64.8%—75.6% (图 2)。

2004—2016 年间,贵州省植被覆盖度总体呈持续上升趋势(图 2),全省平均植被覆盖度从 44.3% 增加到 63.4%;尤其是 2004 年到 2008 年间,贵州西部毕节市、安顺市、六盘水市和黔西南州等地出现显著增高趋势,分别从 23.2%—36.9% 增加到了 46.4%—59.3%。2008—2012 年间,西南部的黔西南州和西部的六盘水市植被盖度平均下降了 9.6% 和 11.5%。2012—2016 年间,贵州全省平均植被覆盖度从 57.3% 增加到 63.4%,但毕节市地区仍呈 3.1% 的局部下降趋势(图 2)。

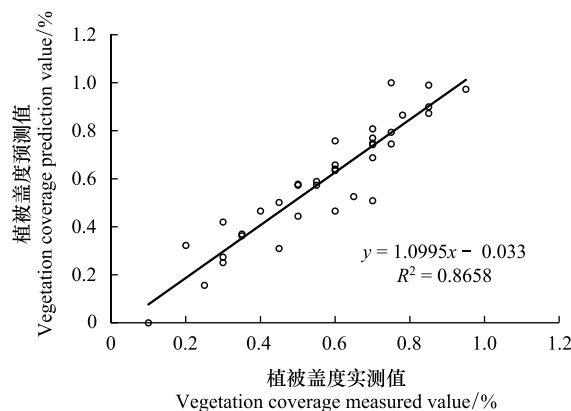


图 1 植被覆盖度预测值与实测值的回归关系

Fig. 1 Regression relationship between vegetation coverage prediction value and measured value

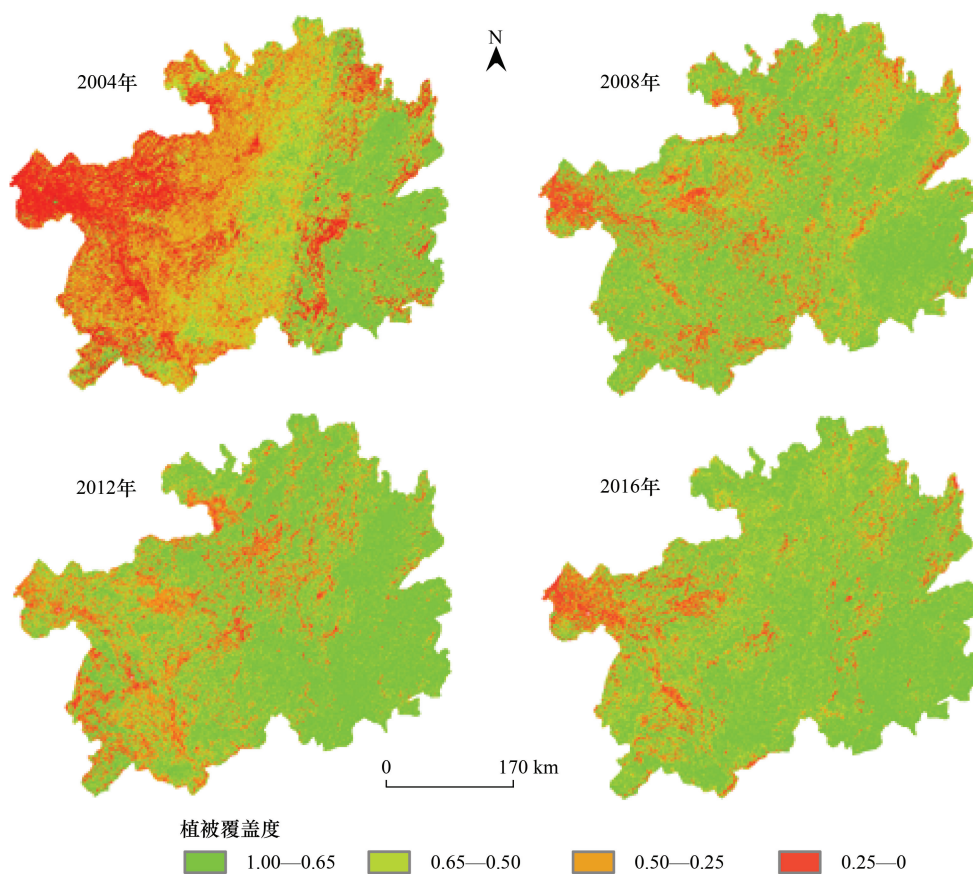


图 2 贵州省植被覆盖度空间分布

Fig. 2 Distribution of vegetation coverage in Guizhou Province

3.2 贵州省岩石裸露率时空变化特征

贵州省岩石裸露率各个时期同样呈现西高东低的特征,西部毕节市平均岩石裸露率高达 65.1%—65.6%,而东部黔东南州仅为 30.1%—40.5% (图 3)。

2004—2016 年间,贵州省岩石裸露总体呈下降趋势,全省平均岩石裸露从 53.4% 下降到了 49.7%。

2008 年到 2012 年,西北毕节市呈上升趋势。2012—2016 年间,全省平均岩石裸露率下降了 2.4%。

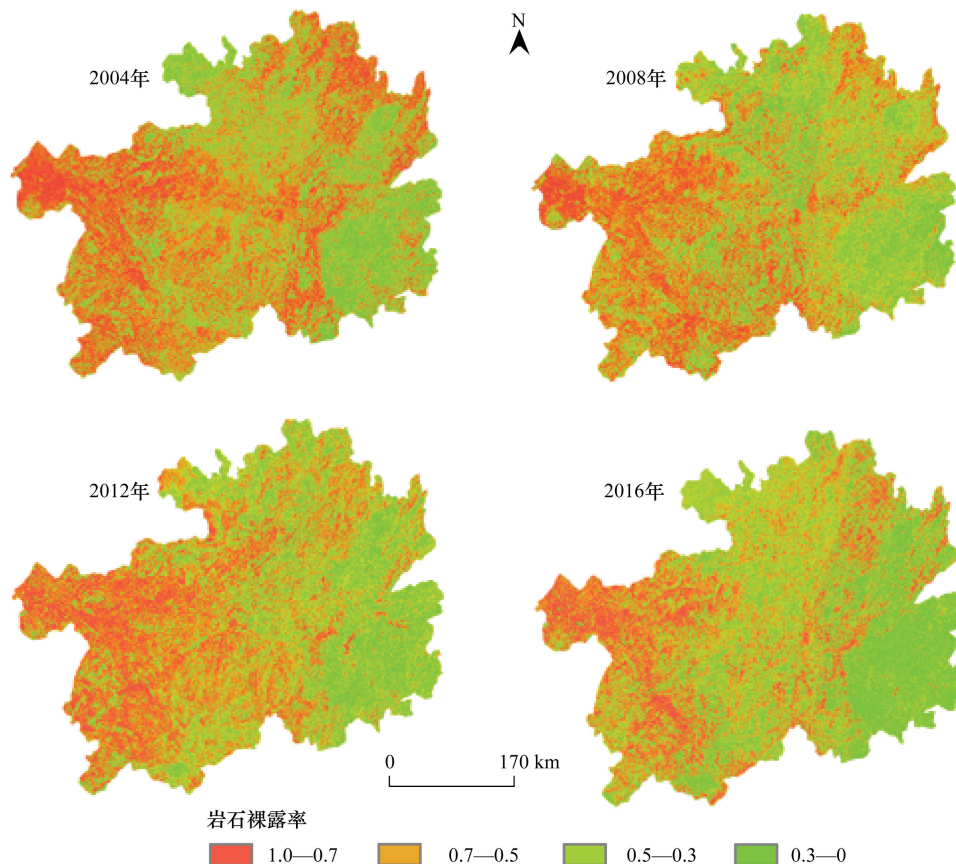


图3 贵州省岩石裸露率空间分布

Fig.3 Distribution of rocky exposure rate in Guizhou Province

3.3 贵州省石漠化时空演变特征

3.3.1 贵州省石漠化空间分布格局

贵州省石漠化状况在空间分布上呈现出西部重、东部轻的特征(图4)。4个时期中,西北部毕节市中度以上石漠化面积占该区域的62.0%—86.4%,东南部黔东南州仅为18.4%—33.0%(图4)。

贵州石漠化的主要分布区域是毕节市、黔南州、黔西南州、六盘水市和安顺市等5个地州市,4个时期中,其石漠化面积分别占区域国土面积的46.2%、40.8%、41.2%和35.7%,而无石漠化分布较多的为铜仁市和黔东南州,石漠化面积分别占区域国土面积的16.3%、18.3%、13.6%和11.6%(图4)。

3.3.2 贵州省石漠化时间演变特征

2004—2016年间,贵州省石漠化面积占比从81.7%下降到61.4%,其中,中、重度石漠化面积从61.4%下降到了38.1%(表2)。从绝对面积看,12年间,无石漠化面积从32176.4 km²增加至67893.9 km²;重度石漠化区域从34011.9 km²下降至20407.0 km²,截止到2016年,贵州省石漠化面积仍有108161.9 km²。从单一等级动态度看,无石漠化动态度一直呈正值变化,面积持续增加,而中度和重度石漠化则呈相反的变化特征(表2)。

2004—2008年和2012—2016年2个时段,是贵州省石漠化显著好转时期,无石漠化面积分别增加了40.1%和30.1%,动态度分别为10.0%和7.5%;重度石漠化面积分别减少了20.4%和10.7%,动态度分别为-5.1%和-2.7%。值得注意的是,2012—2016年间的中度石漠化减少较为显著,年均减少3873.6 km²,动态度为-6.4%。2008—2012年间,总体上也呈改善状态,无石漠化面积增加了1780.8 km²,动态度为4.0%,轻度、中度和重度石漠化年均分别减少176.8 km²、544.8 km²和1055.6 km²(表2)。

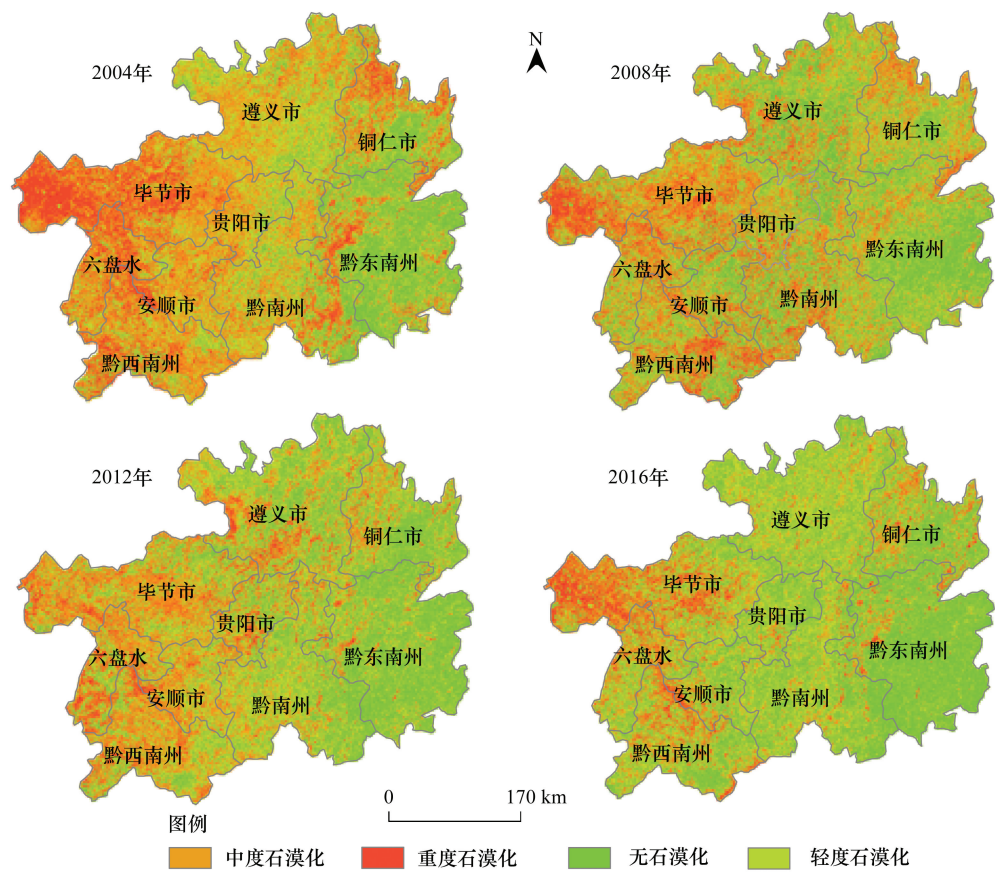


图 4 贵州省石漠化空间分布

Fig.4 Distribution of rocky desertification in Guizhou Province

2004—2008 年,2008—2012 年,2012—2016 年 3 个时段的综合石漠化动态度分别为 5.2%,2.2%,5.1%, 呈先减小后增大的趋势,石漠化总面积持续减少。2008—2012 年时段变化面积最小,动态度最低,其他两个 时段面积变化相当,变化速度较快(表 3)。

表 2 贵州省 2004—2016 年不同类型石漠化动态度

Table 2 Dynamic degree of different types of rocky desertification of Guizhou province from 2004 to 2016										
类型 Type	面积 Area/km ²				2004—2008		2008—2012		2012—2016	
	2004	2008	2012	2016	变化面积 Area of change/km ²	动态度 Dynamic degree	变化面积 Area of change/km ²	动态度 Dynamic degree	变化面积 Area of change/km ²	动态度 Dynamic degree
I	32176.4	44169.8	52192.8	67893.9	12893.3	10.0%	7123.1	4.0%	15701.1	7.5%
II	35740.4	41399.8	40692.7	42896.4	5659.3	4.0%	-707.1	-0.4%	2203.7	1.4%
III	74127.8	62833.5	60354.5	44860	-11594.3	-3.9%	-2179	-0.9%	-15494.5	-6.4%
IV	34011.9	27068.2	22846	20407	-6943.7	-5.1%	-4222.2	-3.9%	-2439	-2.7%

I :无石漠化 Nil rock desertification; II :轻度石漠化 Slight rock desertification; III :中度石漠化 Medium rock desertification; IV :重度石漠化 Severe rock desertification

表 3 贵州省 2004—2016 年石漠化综合动态度

Table 3 Integrated the dynamic degree of rocky desertification of Guizhou province from 2004 to 2016					
2004—2008 年		2008—2012 年		2012—2016 年	
变化面积 Area of change/km ²	动态度 Dynamic degree	变化面积 Area of change/km ²	动态度 Dynamic degree	变化面积 Area of change/km ²	动态度 Dynamic degree
37090.6	5.20%	14231.3	2.0%	35838.3	5.1%

3.4 贵州省 2004—2016 年石漠化转移过程

2004—2008 年时段,轻、中度石漠化向无石漠化分别转化了 16048.1 km²和 15455.0 km²;重度石漠化在贵州省安顺市、黔西南州及遵义市增加较多,主要贡献是中度石漠化,贡献了 8557.7 km²(图 5)。

2008—2012 年时段,石漠化改善主体仍然是轻、中度,分别转化 13714.3 km²和 27938.2 km²;重度石漠化增加的部分有 56.3%来源于中度石漠化,集中在毕节市和六盘水区域(图 5)。

2012—2016 年时段,轻、中度石漠化分别向无石漠化转化 16374.3 km²和 15735.7 km²,主要分布于贵阳市、安顺市和黔南州(图 5)。

2004—2016 年的 12 年间,无石漠化主要向轻、中度分别转化 4833.6 km²和 3346.2 km²,而石漠化状况改善的主体也是轻、中度,分别转化 16855.3 km²和 22996.0 km²;中、重度石漠化的转入和转出面积分别为 31613.9 km²和 74486.9 km²,比值为 42.4%,其中,中度石漠化增加的主要贡献是轻度和重度石漠化,分别贡献 6193.1 km²和 12012.2 km²,由轻度向中度石漠化转移恶化的区域主要出现在毕节市、黔西南州及遵义市的西北部(图 5d)。

近 12 年间,贵州省无石漠化面积净增加 35717.4 km²,增速为 2976.5 km²/a,无石漠化转入和转出速率分别为 3743.6 km²/a 和 767.1 km²/a;中度以上石漠化的转入和转出速率分别为 2634.5 km²/a 和 56207.2 km²/a。从各石漠化等级的转入和转出速率看,轻度和中度石漠化转化较为活跃,而重度石漠化和无石漠化较为稳定(图 5)。

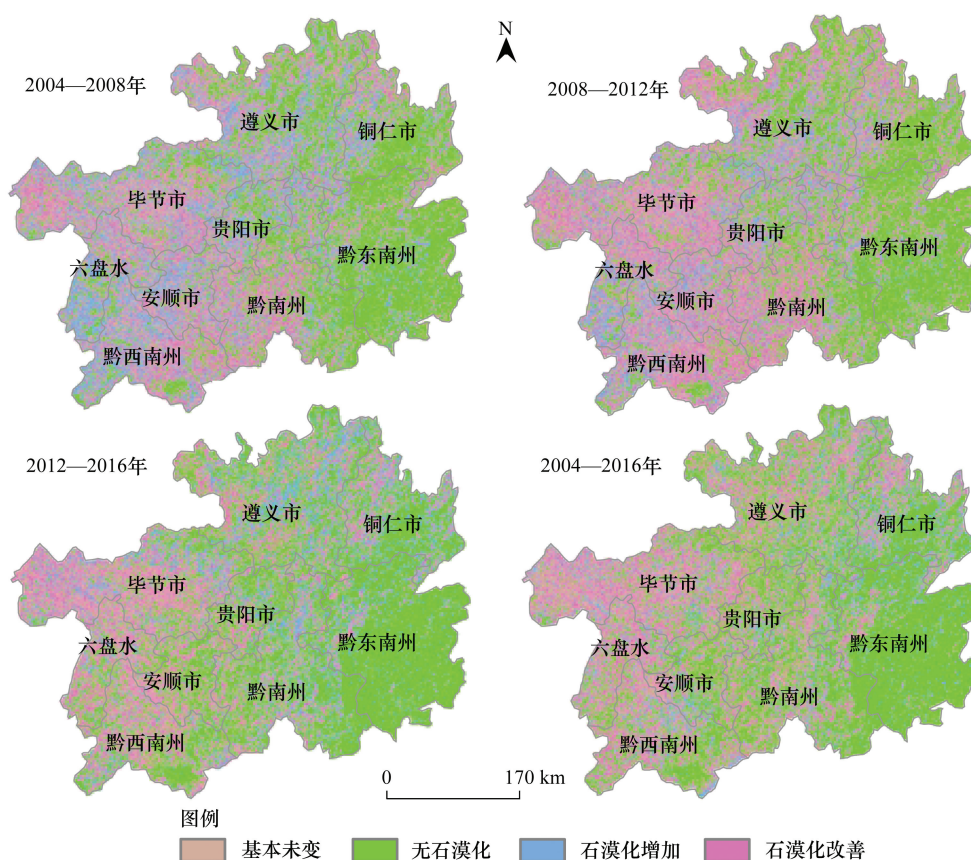


图 5 石漠化空间转化

Fig.5 Spatial transformation map of rocky desertification

3.5 贵州省石漠化状况预测

表 4 显示,到 2020 年,贵州省无石漠化面积将从 2016 年的 67893.9 km²上升到 73915.8 km²,石漠化面积

将减少 6023.4 km²,达 8.9%,其中中度石漠化面积减少最多,达 7.6%。到 2024 年,无石漠化面积将增加到 76155.4 km²,将增加 12.2%,石漠化面积将减少 8263.0 km²,中度和重度石漠化减少较多,分别下降 10.0%和 15.3%。

表 4 贵州省 2020 年和 2024 年石漠化类型预测结果

年份 Years	I		II		III		IV	
	面积	比重	面积	比重	面积	比重	面积	比重
	Area/km ²	Proportion	Area/km ²	Proportion	Area/km ²	Proportion	Area/km ²	Proportion
2020	73915.8	42.0%	42446.7	24.1%	41459.6	23.6%	18232.2	10.4%
2024	76155.4	43.3%	42231.2	24.0%	40375.8	22.9%	17291.9	9.8%

I : 无石漠化 Nil rock desertification; II : 轻度石漠化 Slight rock desertification; III : 中度石漠化 Medium rock desertification; IV : 重度石漠化 Severe rock desertification

4 讨论

4.1 贵州省石漠化空间分布格局

植被覆盖度是评价石漠化的关键指标,与石漠化等级呈现负向关系^[55]。本研究中,贵州省植被覆盖度与石漠化空间分布格局基本一致(图 2、图 4),相关学者基于 MODIS-NDVI 数据的研究也呈现出基本一致的结果^[56-58]。贵州省黔东南区域,少数民族聚集,人类活动相对较少,自然植被相对优越^[59],西北部毕节市和六盘水市区域,地处贵州典型岩溶山区,岩石裸露碎裂、岩溶发育强烈^[16],植被覆盖度相对较低。贵州中部的安顺、贵阳及北部的遵义等区域,由于城市快速发展、人口密集,人类活动影响相对强烈,致使其植被覆盖也相对较低^[56]。

岩石裸露是石漠化最直观的表现,岩石裸露率的高低与石漠化程度呈正相关关系,本研究显示贵州省岩石裸露率总体呈现西高东低的特征(图 3)。贵州省地势西高东低,西部多中山区,多岩溶峡谷发育,地表物质不稳定,土被破碎,长期冲刷再加上人为因素破坏极易造成基岩裸露,中、东部海拔相对较低,为中、低山区,坡度相对较缓,地表物质相对稳定^[60]。本研究也相应显示,植被覆盖度相对较高的东部和北部地区岩石裸露率低、西部地区岩石裸露率较高(图 2,图 3)。由此可见,生态建设中,提高区域植被盖度、降低岩石裸露率,是石漠化防治首要任务。

石漠化的分布与发展不仅与植被盖度、岩石裸露率直接相关,还受坡度、岩性、人口和社会经济发展水平等关键驱动因子的影响^[61-62]。人口密集程度和经济发展状况密切相关,本研究及相关研究^[42]所呈现的贵州省石漠化空间分布呈西部重、东部轻、南部重、北部轻的空间格局,显著受到驱动因素的影响。贵州省碳酸盐岩空间分布为南部富石灰岩、北部富白云岩,受岩性制约的地貌形态也具南部多峰丛洼地、北部多丘丛的分布特征^[63],同时也形成与地形坡度特征相应的石漠化分布特征^[55]。此外,贵州省人口分布同样呈现西部地区较东部密集的特征,经济密度相对较高^[64],人口密集、频繁的农业活动对生态环境及土地利用负担加重,加之西北部密集分布的矿产资源,导致西北部经济密度明显高于东南部^[65],所有这些均加剧了相应区域的石漠化发展。

4.2 2004—2016 年间贵州省石漠化演变特征

本研究显示,2004—2016 年间,贵州省植被覆盖度持续增加,达到了 63.4%,岩石裸露率持续下降(图 2,图 3)。相关研究也显示 2004—2008 年间,甚至到 2016 年间,贵州全省植被覆盖度呈现持续增加趋势^[58]。相应地,贵州省 2004—2016 年间石漠化程度持续下降,尤其是 2004—2008 年间,其下降程度最为显著(图 5)。根据石漠化公报^[2-3]显示,2005—2011 年和 2011—2016 年贵州省石漠化面积分别减少 8.8%和 18.3%。本研究中,贵州省石漠化面积在 2004—2012 年和 2012—2016 年分别下降 13.9%和 14.5%,与全国石漠化公报基本一致。

近年来,相关研究均显示了贵州石漠化好转的趋势,诸如贵州晴隆县^[10]、贵州省普定县^[11]、贵州省花江、朗溪、后寨河、王家寨、花江等 5 个典型岩溶山地^[49],乃至贵州全省^[42]等区域。究其原因,一方面,近年来,贵州省结合国务院批复的《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》以及《贵州省水利建设生态建设石漠化治理综合规划石漠化综合治理专项规划(2011—2020)》等,把水利建设与生态建设、石漠化综合治理,三位一体结合起来科学规划,加快实施石漠化综合治理、退耕还林、长江和珠江防护林等工程,促进了石漠化综合治理,使石漠化扩展趋势得以遏制。另一方面,自 2008 年以来,国家启动石漠化综合治理试点工作,贵州省 55 个县列为第一批试点县,2011 年,贵州 78 个石漠化县全部纳入国家石漠化综合治理实施范围,石漠化治理步伐进一步加快^[3]。本研究结果直接显示出 2004—2016 年石漠化程度显著好转的演变特征(图 4、表 2)。相关政策措施对石漠化的治理起到了显著效应,但贵州省局部区域内石漠化仍继续恶化(图 5)、生态环境依然十分脆弱,石漠化防治形势依然严峻。

4.3 贵州省石漠化等级转换及未来演变态势

石漠化的演变并不是一蹴而就的,而是一个复杂而循序渐进的过程。本研究显示,在石漠化转换过程中,全省石漠化转入类型集中在无石漠化和轻度石漠化这两大类中(图 5)。相关研究也显示出,石漠化的转化以高等级向低等级转化为主,而低等级向高等级的转化面积越来越少的特征^[42]。无石漠化和重度石漠化相对稳定,一方面体现贵州石漠化治理与防护取得一定成效,另一方面也反应出重度石漠化在治理过程中的难度。

基于马尔科夫转移矩阵模型预测显示(表 5),到 2020 年及 2024 年,贵州省石漠化状况将持续好转。由于预测值是以现有的石漠化综合治理为基础,随着治理年限的延续,石漠化综合治理成效会越来越显著,石漠化改善状况应比预测结果更为显著。但是,随着各治理措施的推进,余留区域的石漠化立地条件越来越差,治理成本越来越高,治理难度将越来越大^[3]。为加快石漠化改善进程,实现 2035 年和 2050 年生态文明建设目标,在初步遏制石漠化发展后,仍需大力实施以植被恢复为重点的生态工程,结合国务院批复的《贵州省水利建设生态建设石漠化治理综合规划(2011—2020)》明确的目标,提高工程投资标准,加大投资力度,优化结构,全面加快石漠化治理步伐,持续跟踪监测石漠化的动态变化。

快速准确地监测石漠化状况是石漠化治理的关键,传统的石漠化调查方法周期很长,难以达到监测目标,而遥感技术具备大范围、综合性、动态性观测能力和宏观、快捷、经济以及信息综合等优势^[66],是石漠化遥感信息提取不可或缺的手段。本研究结果证明该方法适用于贵州全省大尺度时空范围内石漠化状况的提取和分析,是该研究领域内,采用多种影像特征及多源数据进行石漠化遥感信息提取的科学而必要的补充,有助于对贵州省石漠化状况进行实时监测和管理。但在研究中分级指标及指标阈值不具有统一性,量化困难,对影像处理、提取技术等仍需进一步提高。

5 结论

(1)贵州省石漠化空间格局呈西重、东轻的分布特征,其中尤以毕节市、黔南州、黔西南州、六盘水市和安顺市等区域为重,一方面与其区域地质地貌相关,另一方面也表现出相关区域密集的人类活动及相对活跃的社会经济活动对石漠化演变的驱动作用。

(2)截止 2016 年,贵州省植被覆盖度呈现持续增加,石漠化面积呈现持续减少的演变趋势,近十多年来,贵州省石漠化状况已经得到遏制,石漠化治理工程取得显著成效,但局部区域诸如毕节市、黔西南州等石漠化分布较多的区域仍存在高度的不稳定性,或趋于恶化的态势,尤其是重度石漠化区域,其治理尤为复杂而艰难。

(3)预测显示的到 2020 年及 2024 年贵州省石漠化将继续保持改善的态势,表明贵州省石漠化治理的相关政策措施将继续发挥重要作用,但所显示出改善速度较慢的特征,也表明石漠化防治形势的严峻性,当地政府应结合当前发展背景,统筹山水林田湖草一体化系统,在继续推进各项重点工程的同时,应切实提高石漠化区域的生态环境自然修复能力。

致谢:西南林业大学黎铭钰、王兴永、叶纬平参与野外样地调查、遥感影像数据前期处理工作,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [2] 我国岩溶地区石漠化状况公报. 中国自然资源报, 2019-01-09(5).
- [3] 贵州省石漠化状况公报. 贵州日报, 2012-06-27(10).
- [4] Parise M, Waele J, Gutierrez F. Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst. Environmental Geology, 2009, 58(2): 235-237.
- [5] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.
- [6] 张红玉, 杨勇, 李勇. 西南喀斯特石漠化区域生态系统退化与恢复探讨. 生态科学, 2015, 34(4): 169-174, 179-179.
- [7] 但新球, 贺东北, 吴协保, 吴照柏, 李梦先, 屠志方, 但维宇. 中国岩溶地区生态特征与石漠化危害探讨. 中南林业调查规划, 2018, 37(1): 62-66.
- [8] 刘彦随, 邓旭升, 胡业翠. 广西喀斯特山区土地石漠化与扶贫开发探析. 山地学报, 2006, 24(2): 228-233.
- [9] 杜鹰. 岩溶地区石漠化综合治理的探索与实践. 中国产业, 2011, (7): 16-19.
- [10] 史迎春, 舒英格. 喀斯特石漠化时空变化特征及驱动因子分析——以贵州晴隆县为例. 林业资源管理, 2017, (1): 135-143, 152-152.
- [11] 习慧鹏, 王世杰, 白晓永, 唐红, 吴路华, 陈飞, 肖建勇, 王明明, 李汇文, 操玥, 陈欢, 冉晨, 罗旭玲. 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. 生态学报, 2018, 38(24): 8919-8933.
- [12] 许玉凤, 黄敏, 潘网生, 张永雷, 姚兴, 孙连群. 贵州黔南州石漠化格局变化特征. 生态科学, 2018, 37(4): 105-113.
- [13] 杨青, 杨广斌, 戴丽, 赵青松, 罗毓融. 喀斯特地区石漠化与土壤类型的空间相关分析——以贵州省为例. 中国岩溶, 2019, 38(1): 80-87.
- [14] 魏小岛, 周忠发, 王媛媛. 基于格网 GIS 的喀斯特生态安全研究——以贵州花江石漠化综合治理示范区为例. 山地学报, 2012, 30(6): 681-687.
- [15] 郑翀. 贵州省大方地区石漠化现状及成因分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [16] 吴照柏, 但新球, 吴协保, 屠志方, 李梦先. 岩溶地区石漠化土地动态变化与原因分析. 中南林业调查规划, 2013, 32(2): 62-66.
- [17] 张殿发, 王世杰, 周德全, 李瑞玲. 土地石漠化的生态地质环境背景及其驱动机制——以贵州省喀斯特山区为例. 农村生态环境, 2002, 18(1): 6-10.
- [18] 宋明. 金沙县石漠化现状及治理模式研究. 乡村科技, 2018, (24): 113-114.
- [19] 唐红昆, 杨俊丽. 马街镇石漠化现状及综合治理对策. 绿色科技, 2015, (2): 25-27.
- [20] 张依依, 陈起伟. 典型示范区石漠化治理工程生态效益监测研究——以毕节撒拉溪、关岭花江示范区为例. 乐山师范学院学报, 2018, 33(8): 58-67, 84-84.
- [21] 李松, 罗绪强. 基于多时相遥感的喀斯特石漠化监测研究. 中国农学通报, 2015, 31(11): 262-267.
- [22] 左太安, 刁承泰, 苏维词, 孙秀峰, 官冬杰. 毕节试验区石漠化时空演变过程和演变特征. 生态学报, 2014, 34(23): 7067-7077.
- [23] 秦松, 范成五, 孙锐锋. 贵州土壤资源的特点、问题及利用对策. 贵州农业科学, 2009, 37(5): 94-98.
- [24] 王志伟, 王茜, 李世歌, 王普昶, 刘秀峰, 谢彩云, 史健宗, 吴佳海, 王小利, 陆瑞霞, 莫本田. 贵州喀斯特近 30 年植被生长特征分析. 草业科学, 2016, 33(11): 2180-2188.
- [25] 马士彬, 安裕伦, 杨广斌, 张勇荣. 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. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1106-1114.
- [26] 岳跃民, 张兵, 王克林, 李儒, 刘波, 张明阳. 石漠化遥感评价因子提取研究. 遥感学报, 2011, 15(4): 722-736.
- [27] 张兴菊, 兰安军, 王琦. 喀斯特石漠化演变过程中土地利用变化——以贵州省关岭县为例. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 26-34.
- [28] 张蕊娇, 张超, 陆双飞, 钟恩主. 滇东典型岩溶地区石漠化时空演变特征研究. 林业资源管理, 2019, (2): 99-108.
- [29] 赵磊磊, 陈俊松, 程燕芳, 朱仕荣, 周建洪, 唐芳林, 蓝芙宁. 云南红河州石漠化演变特征及影响因素分析. 中国水土保持, 2019, (7): 40-44.
- [30] 王明明, 王世杰, 白晓永, 李世杰, 李汇文, 操玥, 习慧鹏. 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. 生态学报, 2019, 39(16): 6083-6097.
- [31] 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题. 中国岩溶, 2005, 24(3): 192-195.
- [32] 李丽, 童立强, 李小慧. 基于植被覆盖度的石漠化遥感信息提取方法研究. 国土资源遥感, 2010(2): 59-62.
- [33] Camacho-De Coca F, Garcia-Haro F J, Gilbert M A, Meliá J. Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(17): 3451-3476.
- [34] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Plaza A, Guanter L, Moreno J, Martínez P. Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area. Sensors, 2009, 9(2): 768-793.
- [35] 杨苏新, 张霞, 帅通, 林卉. 基于混合像元分解的喀斯特石漠化地物丰度估测. 遥感技术与应用, 2014, 29(5): 823-832.

- [36] 张文源,王百田. 贵州喀斯特石漠化分类分级探讨. 南京林业大学学报:自然科学版, 2015, 39(2): 148-154.
- [37] 王宇,张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因. 地球科学进展, 2003, 18(6): 933-938.
- [38] 宋同清,彭晚霞,杜虎,王克林,曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [39] 姚永慧,索南东主,张俊瑶,胡宇凡,寇志翔. 2010—2015 年贵州省关岭县石漠化时空演变及人类活动影响因素. 地理科学进展, 2019, 38(11): 1759-1769.
- [40] 王昆. 典型喀斯特地区石漠化演变关键因子阈值研究与预警分析[D]. 贵阳:贵州师范大学, 2016.
- [41] 曹建华,袁道先,章程,蒋忠诚. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.
- [42] 王培彬,安裕伦. 2000—2010 年贵州喀斯特地区石漠化时空特征分析. 贵州师范大学学报, 2014, 32(3): 10-15, 46-46.
- [43] 皇甫江云. 西南岩溶地区草地石漠化动态监测与评价研究——以贵州省晴隆县为例[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- [44] 张晓伦,甘淑. 基于 NDRI 像元二分模型的石漠化信息提取研究. 新技术新工艺, 2014, (1): 72-75.
- [45] 陈华宣,王君华. 基于 TM 数据的西南岩溶区石漠化调查研究. 气象研究与应用, 2010, 31(3): 41-43.
- [46] 姚远. 喀斯特石漠化遥感信息提取方法综述. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(12): 64-67.
- [47] 杨奇勇,蒋忠诚,马祖陆,罗为群,尹辉,喻琦雯,李文军. 基于地统计学和遥感的岩溶区石漠化空间变异特征. 农业工程学报, 2012, 28(4): 243-247.
- [48] 胡业翠,方玉东,刘彦随. 广西喀斯特山区贫困化综合评价及空间分布特征. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 192-197.
- [49] 李阳兵,李珊珊,徐倩,罗光杰. 西南岩溶山地石漠化近 50 年演变——基于 5 个地点的案例研究. 生态学报, 2019, 39(22): 8526-8538.
- [50] 李刚,鄂文峰,张红红,谭琳. ArcGIS 环境下基于 DEM 的信息提取及应用. 吉林地质, 2010, 29(4): 163-167.
- [51] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [52] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [53] Rabiner L R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(2): 257-286.
- [54] 赛莉莉,王涛,陈坤,曲奕桦,何福红. 2000—2010 年威海城市土地利用变化及马尔科夫预测. 鲁东大学学报:自然科学版, 2016, 32(2): 162-167.
- [55] 李瑞玲,王世杰,熊康宁,李凤全. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨——以贵州省为例. 热带地理, 2004, 24(2): 145-149.
- [56] 李威,李月臣,唐道娟,张军龙,唐付平. 基于 MODIS-NDVI 的贵州省 2001—2010 年植被覆盖变化分析及分异特征. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2015, 32(4): 146-151.
- [57] 田鹏举,徐丹丹,丁立国,陈娟. 基于 MODIS-NDVI 贵州省 2005—2014 年植被时空变化特征分析. 贵州气象, 2017, 41(2): 8-13.
- [58] 蔡娅娅,谭伟. 贵州省 2001—2015 年植被覆盖 NDVI 时空演变及其对 SPEI 的响应. 农业工程, 2019, 9(3): 30-39.
- [59] 陆艺. 黔东南州城镇体系结构优化研究[D]. 贵阳:贵州师范大学, 2009.
- [60] 王晓帆,许尔琪,张红旗,张全景. 贵州土地石漠化变化及社会经济活动的影响分析. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1908-1918.
- [61] 王正雄,蒋勇军,张远瞩,段世辉,刘九缠,曾泽,曾思博. 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. 地理学报, 2019, 74(5): 1025-1039.
- [62] 杜文鹏,闫慧敏,甄霖,胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [63] Wang S J, Li R L, Sun C X, Zhang D F, Li F Q, Zhou D Q, Xiong K N, Zhou Z F. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, PR China: phenomena and mechanisms. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 123-131.
- [64] 罗雅雪,周秋文,肖永琴. 基于地层地形条件的贵州省人口空间分布及变化. 贵州科学, 2018, 36(4): 50-55.
- [65] 龙剑,朱海宁,曹邦宇. 基于标准差椭圆模型的贵州省经济密度空间差异分析. 当代经济, 2014, (13): 114-117.
- [66] 夏学齐,田庆久,杜凤兰. 石漠化程度遥感信息提取方法研究. 遥感学报, 2006, 10(4): 469-474.