

基于MODIS数据的云南岩溶区石漠化时空演变特征

杜鹏美, 张新月, 陈欣雨, 陈于田, 杨 婷, 丁文荣*

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2025年9月3日; 录用日期: 2025年10月17日; 发布日期: 2025年10月28日

摘 要

喀斯特地区石漠化现象是我国西南地区社会经济发展与生态环境之间的突出问题, 对于当地人们的生产生活和地区的经济发展有着巨大影响, 科学地对石漠化信息进行提取和石漠化等级的划分对于科学认识地区石漠化的时空演变及其治理有着重要的意义。本文基于MODIS数据采用2000、2005、2010、2015、2020五个时期, 选取基岩裸露率、植被覆盖度、坡度石漠化程度评价的关键指标提出五个时期的石漠化时空分布信息从时间和空间上定量、定位追究研究区石漠化的发展演变过程, 结果可为当地社会经济发展提供科学依据。

关键词

石漠化, 时空演变, MODIS数据, 云南岩溶区

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Rocky Desertification in Yunnan Karst Areas Based on MODIS Data

Pengmei Du, Xinyue Zhang, Xinyu Chen, Yutian Chen, Ting Yang, Wenrong Ding*

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: September 3, 2025; accepted: October 17, 2025; published: October 28, 2025

Abstract

The phenomenon of rocky desertification in karst areas is a prominent issue between social and

*通讯作者。

文章引用: 杜鹏美, 张新月, 陈欣雨, 陈于田, 杨婷, 丁文荣. 基于 MODIS 数据的云南岩溶区石漠化时空演变特征[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 1193-1205. DOI: 10.12677/gser.2025.145113

economic development and ecological environment in southwest China, which has a huge impact on local people's production and life as well as regional economic development. The research on rocky desertification in karst areas has long been a hot and difficult topic in academic circles. How to scientifically extract rocky desertification information and classify rocky desertification grades is of great significance for a scientific understanding of the temporal and spatial evolution of regional rocky desertification and its governance. Based on MODIS data, this paper selects five periods: 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020, and chooses key indicators for evaluating rocky desertification degree, including bedrock exposure rate, vegetation coverage, and slope. It proposes to quantitatively and positionally investigate the development and evolution process of rocky desertification in the study area from both temporal and spatial aspects based on the temporal and spatial distribution information of rocky desertification in these five periods. The results can provide a scientific basis for the local social and economic development.

Keywords

Rocky Desertification, Spatio-Temporal Evolution, MODIS Data, Yunnan Karst Area

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石漠化又称石质荒漠化,是在脆弱的岩溶地貌基础上形成的一种荒漠化生态现象。是在热带亚热带湿润地区岩溶极其发育的自然背景下,由于受到人为活动的影响,地表植被受到破坏,水土流失导致地表土壤遭到严重侵蚀,基岩裸露,砾石堆积,地表呈现类似荒漠化景观的土地退化甚至消失而岩石逐渐裸露的演变过程[1]。

而我国以云贵高原为中心的西南喀斯特地区是喀斯特分布最为集中的地区[2],也是西南石漠化分布最为集中的区域,更是西南地区的自然灾害之源、贫困之因、落后之根[3][4],根据国家林草局第3次石漠化监测结果表明:中国石漠化主要涉及8个省份,主要集中在贵州、广西和云南3个省份[5]。云南省石漠化较严重,截止2016年底石漠化面积达到23519.39 km²,占西南岩溶地区总石漠化面积的23.33%,全国排名第二,全省有56个县发生石漠化,是全国石漠化最严重的省份之一[6]。在脆弱的岩溶环境下,石漠化的发生,使区域内面临着巨大的人口压力、人地关系失衡等问题,严重影响其生态环境[7]。云南省地处我国西南边陲,是我国西南生态安全屏障,因此加快云南岩溶区石漠化的综合治理和维护好生态安全屏障迫在眉睫。

国际上关于喀斯特石漠化的研究开始于20世纪80年代,国外岩溶区主要集中分布于欧洲东南部、北美东部,石漠化研究与区域内石漠化问题的严重程度有一定关系。在欧洲东南部和北美东部岩溶区域,人地关系较协调,人类活动对岩溶环境的影响较弱,石漠化问题不突出,因此关于石漠化问题的研究较少。对于岩溶地区的研究国家主要包括土耳其[3]、意大利[4]等,研究内容主要包括岩溶碳酸盐的地质和形态对地下水质的影响、土地利用对岩溶区生态的影响、喀斯特地区的可持续土地利用规划和岩溶区水资源利用[8]主要侧重于区域内生态、岩溶地质和水文方面,更偏向于对岩溶自然环境的研究,全球关于岩溶地区石漠化问题的研究,主要集中在我国的西南岩溶地区。

国内对岩溶石漠化的研究时间与国外基本同步,始于20世纪80年代末,石漠化问题开始逐步得到学者的关注,石漠化的研究处于起步阶段,研究内容还停留在定性和理论基础阶段。21世纪开始,随着

我国石漠化不断扩张,关于岩溶石漠化问题的研究得到重视,大量学者展开对岩溶地区石漠化的研究。随着科技的进步,石漠化研究的方法和技术也有了很大的提高,目前石漠化信息的提取主要以 3S 技术为主,利用低、中、高分辨率的遥感影像对不同研究尺度的石漠化信息进行提取。在石漠化的遥感监测方面,主要有目视解译、监督分类、基于知识的模型构建、面向对象分类法和综合分析法等。

2. 研究目的及意义

云南省地处西南边陲,是我国西南生态安全屏障,但石漠化位居全国第二,成为云南严重的生态环境问题,严重阻碍了石漠化地区社会经济发展。因此,对云南省岩溶区石漠化进行长时序的时空演变特征分析,定量揭示自然因子和人类活动对研究区石漠化发展的影响机制,是云南省石漠化治理措施制定的重要依据和基础。

作为石漠化严重的省份,云南 2008 年开始被纳入石漠化治理区域,有 12 个县被纳入治理试点县,2011 年在此基础上增加了 23 个石漠化综合治理重点县,2012 年又新增 30 个重点治理县,综合治理重点县达到 65 个[8]。云南省根据国家石漠化治理安排,在全省典型区域开展石漠化综合治理,实施多个治理项目工程,完成了石漠化一期和二期治理工程,取得显著成效,大部分地区石漠化得到控制,但局部地区仍在恶化。石漠化治理目前仍然局限于点状或现状分布,治理方法不够完善[9]。因此,对云南省岩溶区石漠化的演变特征及驱动因子进行长时序的研究分析,评估现行石漠化治理措施的合理性,是制定科学有效的石漠化治理措施的重要基础和依据。

本文通过相关文献阅读和资料的整理,选取 2000、2005、2010、2015、2020 五个时期来进行云南省石漠化时空演变特征的分析,通过利用遥感数据提取石漠化信息的基础上,从时间和空间上定量、定位追踪云南省滇西、滇西北、滇东北、滇中、滇东南五个岩溶片区石漠化的发展演化过程,分析其演化机理及驱动因子。了解不同阶段石漠化的演变方式及各类型石漠化的转移方向、明确石漠化演变的剧烈程度。可以直观的看出现行石漠化治理措施的治理效果,为后期的石漠化治理措施提供科学的依据。做好云南省岩溶区石漠化的生态环境修复,是保护好我国西南生态安全屏障的重要一步,也是加快云南省脱贫致富和促进边境地区民族团结的重要举措。

3. 研究区概况与数据

3.1. 研究区概况

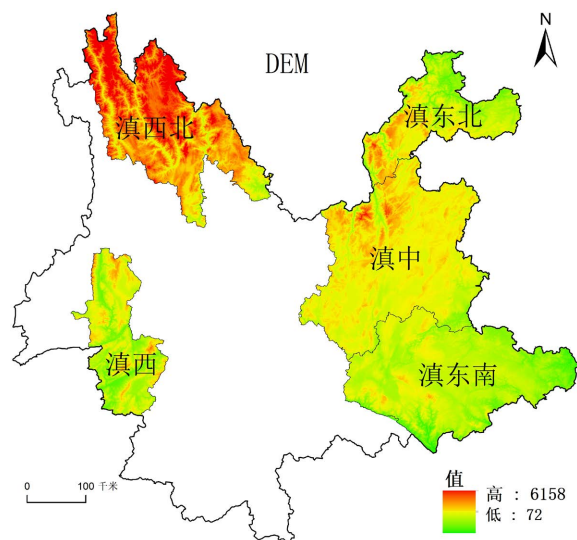
3.1.1. 地理位置

云南省位于中国西南地区,介于东经 97°31′~106°11′,北纬 21°8′~29°15′之间,全省总土地面积为 39.41 × 104 km²,东部与广西壮族自治区、贵州省相邻,北部与四川省、西藏自治区相连接,云南省边境线较长,有 25 个边境县,从东到西与云南省相邻的国家依次为越南、老挝、缅甸。全省岩溶面积达 11.10 × 104 km², 占总土地面积的 28.17%, 在全省 129 个县(市区)中,有 118 个分布着石漠化土地,是全国石漠化做严重的省份之一,石漠化主要集中分布于滇东北岩溶区、滇中岩溶区、滇东南岩溶区、滇西岩溶区和滇西北岩溶区。

3.1.2. 地形地貌

云南省地势整体上北部高南部低,以元江谷地和云岭山脉的南端宽谷为界,分为东、西部两个地形区,东部为滇中、滇东高原,是云贵高原的组成部分,地形起伏较缓和,岩溶地貌发育广泛。西部为横断山区,处于青藏高原东南缘和横断山区南部,由于亚欧板块和印度洋板块的碰撞和挤压,高山峡谷相间,地形复杂多样,地势险峻。云南平均海拔为 2000 m 左右,最高点位于西北部的梅里雪山主峰卡瓦格博峰,

海拔 6740 m，最低点位于南部的红河和南溪河交汇处，海拔为 76.4 m，相对落差较大，全省 84%的土地为山地。在岩溶石漠化分区中，滇东北岩溶区处于四川盆地 向云贵高原过度的地带，属于典型的山地构造地形，山高谷深，为滇东北岩溶峡谷石漠化区。滇中岩溶区是云南岩溶高原的主体，主要地貌为中山山原盆地地貌，断陷盆地发育，为滇中岩溶断陷盆地石漠化区[10]。滇东南岩溶区为云南高原的东南缘，主要地貌特征为峰丛盆(洼)谷地组合形态，为滇东南峰丛洼地石漠化区。滇西岩溶区属于横断山脉南延部分，为滇西岩溶山地石漠化区。滇西北岩溶区位于青藏高原东南侧，是横断山脉切割山地峡谷区的高山峡谷亚区，为滇西北中高山石漠化区[11] (图 1)。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2016) 1600 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Elevation map of the study area
图 1. 研究区高程图

3.1.3. 水文气候

云南境内水资源丰富，全省有高原湖泊 40 多个，河流众多。气候类型属于亚热带高原季风气候，气候垂直变化明显，年均降水量约为 750~1750 mm，全省平均气温最热月均气温在 19~22℃之间，最冷月均气温在 6~8℃之间。滇东北、滇中、滇东南、滇西和滇西北岩溶区的对年平均降水量分别是 702.00 mm、914.60 mm、1100.90 mm、971.10 mm 和 793.20 mm，滇西北和滇东北属于半湿润区，滇西、滇中和滇东南属于湿润区[12]。

Table 1. Administrative division of karst zoning
表 1. 岩溶分区行政区划

岩溶分区	行政区划
滇东北岩溶区	昭通市
滇中岩溶区	昆明市、曲靖市、玉溪市(红塔区、江川县、澄江县、通海县、华宁县、易门县)
滇东南岩溶区	文山壮族苗族自治州、红河哈尼族彝族自治州(个旧市、开远市、蒙自市、弥勒市、屏边县、建水县、泸西县、河口县)
滇西岩溶区	保山市(隆阳区、龙陵县、施甸县)、临沧市(永德县、镇康县、耿马县、沧源县)
滇西北岩溶区	迪庆藏族自治州、丽江市(古城区、玉龙县、华坪县、宁蒗县)、大理白族自治州(鹤庆县)

云南省共辖 16 个州市岩溶区内人口及经济占比较高，人类活动频繁，涉及区域广，岩溶分区行政区如表 1。

3.2. 数据及处理

本研究通过中科院资源环境科学与数据中心调用中国年度 NDVI 1KM 数据集估算 FVC，云南省 DEM90 米数据，通过调取空间分辨率为 500 米的 MOD09A1 遥感影像数据计算基岩裸露率，空间分辨率为 500 米的 MCD12Q1 土地利用数据，云南省水体分布数据和社会经济数据详见表 2。

Table 2. Main data sources
表 2. 主要数据来源

数据类型	时间	数据来源	网址
NDVI	2000~2020 年	中科院资源环境科学与数据中心	https://www.resdc.cn/
MOD09A1	2000~2020 年	GEE	https://zhuanlan.zhihu.com/p/643863110
DEM		中科院资源环境科学与数据中心	https://www.resdc.cn/
MCD12Q1	2001~2020 年	美国地质勘探局	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/
人均 GDP 和第一生产总值	2000~2020 年	云南省统计年鉴	http://stats.yn.gov.cn/

4. 研究方法

4.1. 漠化指标提取

石漠化程度等级的划分是石漠化信息提取研究的基础，对石漠化进行程度等级划分不仅可以帮助我们更加直观清晰的了解石漠化的严重程度，还能够依此对不同等级石漠化预防和治理提供更加具体和科学的参考。对于石漠化等级划分由于研究区域尺度、地理状况的差异，石漠化等级划分和划分标准的选取也有所不同，目前未有统一的分级标准。国家林业局颁发的《岩溶地区石漠化监测技术规定》(2011 年修订)根据基岩裸露度、植被覆盖度和土地利用类型将岩溶土地是否石漠化分为轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化、极强度石漠化四个等级[13]。也有其他学者将石漠化程度等级划分为无明显石漠化、轻度石漠化、中度及重度石漠化。此外也有学者依据基岩裸露度和植被覆盖度等指标将石漠化划分为无石漠化、潜在、强度和极强度石漠化[14]-[16]。根据不同的研究尺度石漠化等级可以划分为 3~4 级[17]或 5~6 级等等。因此，参照前人的分类标准和结合研究区的特征，选取基岩裸露率、植被覆盖度、坡度三个作为主要的提取指标，土地利用类型作为辅助数据来进行石漠化信息的提出及等级划分，分类标准如下表 3。

Table 3. Classification standards for rocky desertification
表 3. 漠化分类标准

石漠化类型	植被覆盖度	基岩裸露率	坡度
无石漠化	0.7~1	<0.3	0~5
轻度石漠化	0.5~0.7	0.3~0.5	5~15
中度石漠化	0.3~0.5	0.5~0.7	15~25
重度石漠化	0.1~0.3	0.7~0.9	25~35
极重度石漠化	0~0.1	>0.9	>35

4.2. 植被覆盖度

植被指数(Vegetation Index)又称为光谱植被指数,可以很好的评估植被的覆盖状况,其中归一化植被指数(NDVI)被广泛应用来进行遥感影像的植被覆盖研究。其原理主要是根据在多光谱数据中,红光波段(RED)和近红外波段(NIR)的反射率不同,从而可以通过光谱的不同的反射率来观察植被的生长及覆盖状况,在遥感影像中,NDVI 等于近红外波段的值与红光波段的反射值之差比上两者之和,其计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

FVC 是指植被(包括叶、茎、枝)在地面垂直投影面积占统计区总面积的百分比。岳跃民等已验证植被指数对于提取石漠化信息的有效性,故本文选用归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)估算 FVC,并以李苗苗在像元二分法基础上研究的 VFC 提取方法建立模型。由于岩溶地区土被分布浅薄且不连续,在提取 FVC 时可以暂不考虑土壤的影响[16]。本文假设研究区可近似取 $FVC_{max} = 100\%$, $FVC_{min} = 0$,则 FVC 的计算公式如下

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} + NDVI_{soil}}$$

式中 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 分别表示研究区完全被植被覆盖区域的 NDVI 值和完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值。由于影响 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 一般会取一定置信度范围内的最大和最小值。根据置信区间 2%~98%,使用 ENVI 软件查看不同时期 NDVI 直方图,获取不同时期 NDVI 最大和最小值。将每年的 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 代入公式,可估算出其研究区对应年份的 FVC 如图 2。

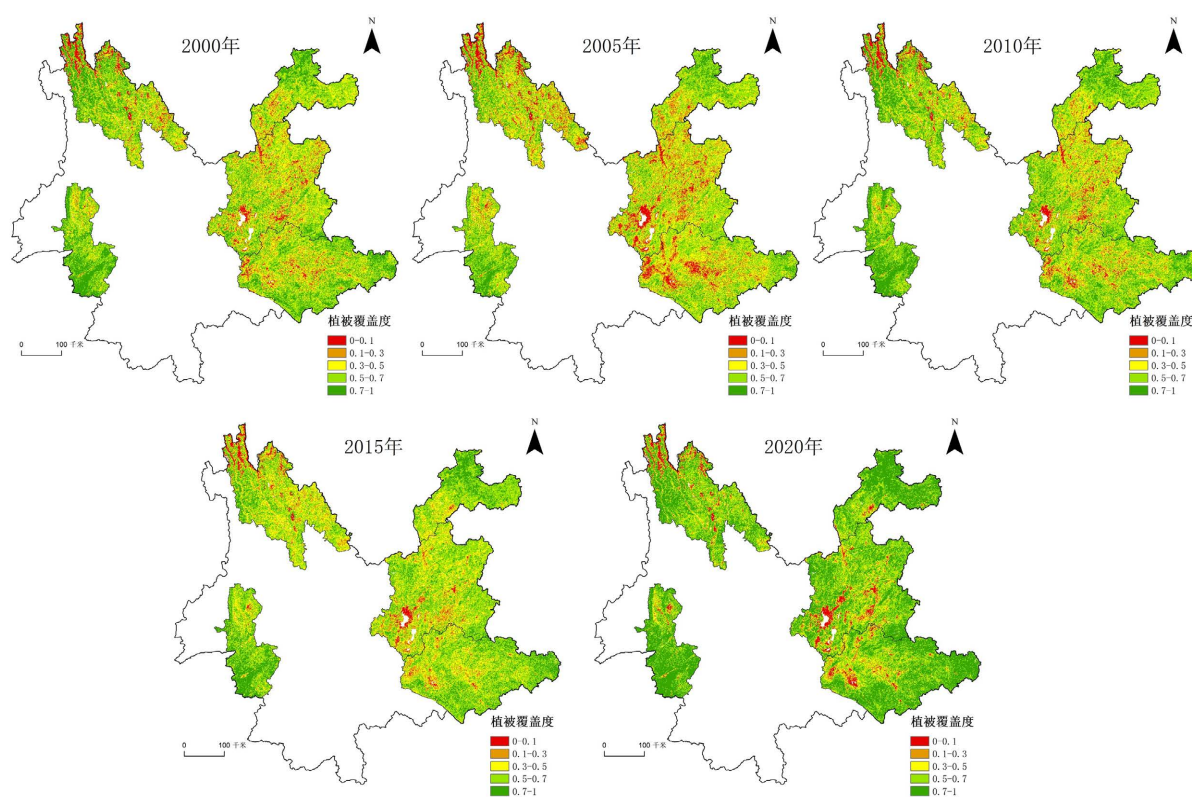


Figure 2. Vegetation coverage map

图 2. 植被覆盖度图

4.3. 基岩裸露率

基岩裸露是石漠化发生的主要特征，因此基岩裸露率是用来评价石漠化状况的关键指标之一，对于基岩裸露率的研究主要从影像的光谱特征、纹理色彩特征等方面进行深入研究。除此之外其它石漠化信息提取研究使用的裸岩信息提取方法还有指数法、分类树决策法、面向对象法和光谱混合分析法等等。其中，裸岩指数法的操作便捷，对于研究长时间序列的影像可以进行批量计算，常常适用于描述时空演变特征的相关研究中。**Huang** 等基于归一化植被指数提出了构建归一化岩石指数(NDRI)，**张晓伦**[18]在此基础上提出了基于短波红外与近红外波段构建归一化岩石指数。基于像元二分模型原理计算基岩裸露率，假设像元只由裸岩像元和非裸岩像元组成，通过 ENVI5.6 软件平台进行波段计算等到基岩裸露率(Fr)，其计算公式如下：

$$Fr = \frac{NDRI - NDRI_0}{NDRI_t + NDRI_0}$$

式中：Fr 指基岩裸露率，NDRI_t 是由全裸岩石组成的 NDRI 值，NDRI₀ 是全无裸露岩石组成时的 NDRI 值。根据公式生成研究区 NDRI 图像并统计所有像元值，分别选取 2%和 98%的 NDRI 为 NDRI₀和 NDRI_t。通过 ENVI Band Math 工具计算出研究区裸岩率信息，再通过 ArcGIS 进行重分类等操作最后得出研究区 2000~2020 年基岩裸露时空分布图如图 3。

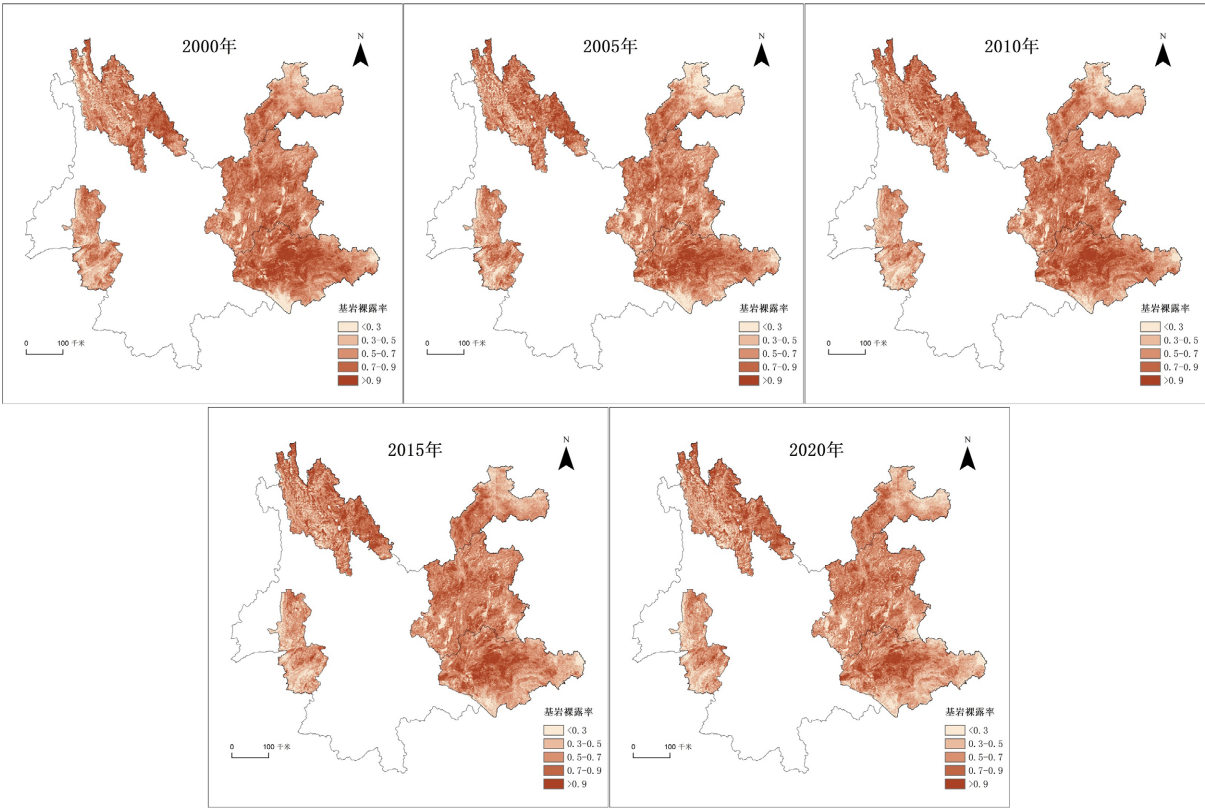


Figure 3. Bedrock exposure rate map
图 3. 基岩裸露率图

4.4. 研究区坡度及土地利用

坡度影响着地表侵蚀作用的强弱程度以及土层厚度、土壤的肥力状况和径流冲蚀的能力和强度。通

常在一定的坡度范围内，坡度越大的地区，地表物质的不稳定性越强，水土越容易流失从而使基岩裸露更容易形成石漠化，所以地表坡度也是用来评价石漠化的重要指标之一。通过资源环境与数据中心获取云南省 DEM 数据计算坡度按照研究需求进行划分如图 4。

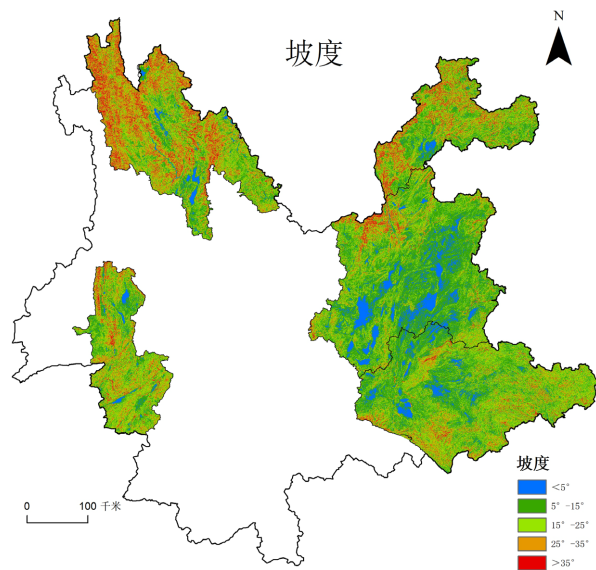


Figure 4. Slope map of the study area
图 4. 研究区坡度图

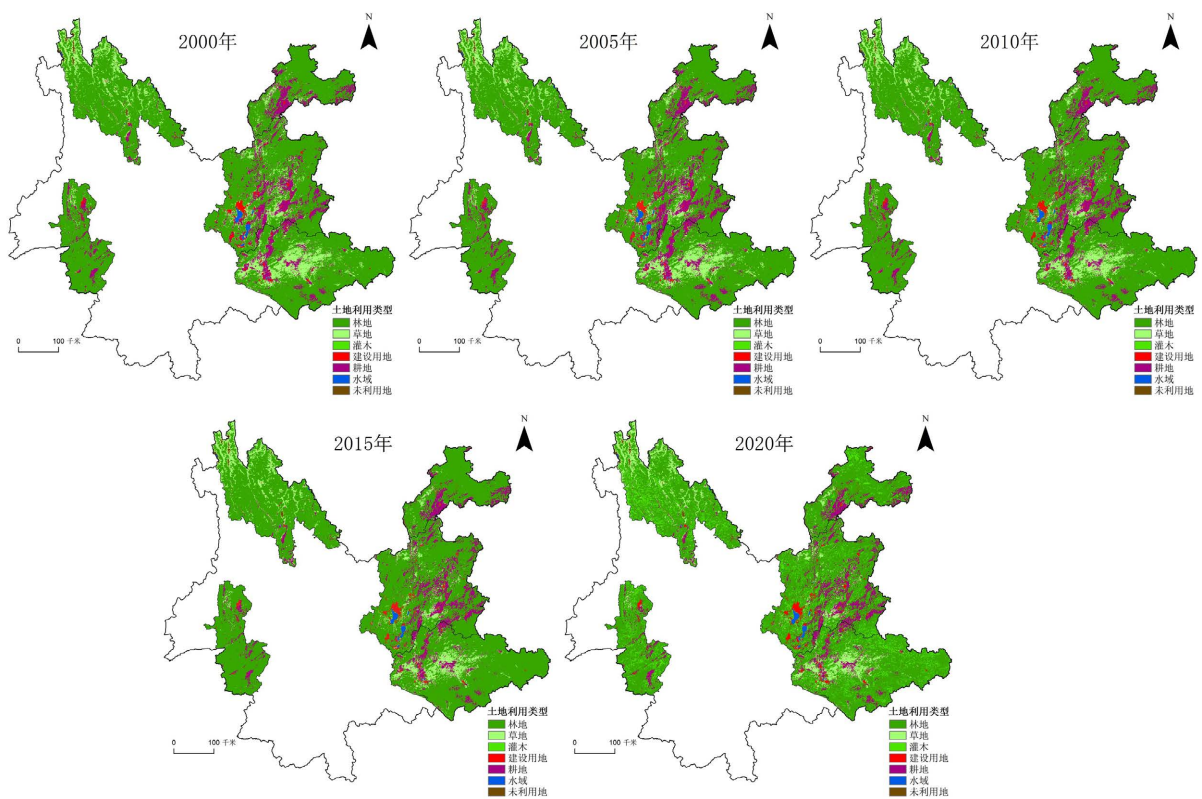


Figure 5. Land use map
图 5. 土地利用图

除此之外，土地利用数据可以辅助我们进行更精确的石漠化信息提取，获取 MODIS 土地覆盖数据根据研究需要进行相关重分类得到云南省五个研究区的 2000~2020 年的土地利用数据如图 5。

5. 石漠化演变特征

根据不同指标进行叠加分析得出各时期石漠化空间分布特征如图 6，可以看出云南省石漠化的空间分布范围广，但不均匀，发生面积总体呈东多西少的分布特征。同时，全省石漠化发生变化的区域较大，呈集中连片分布。

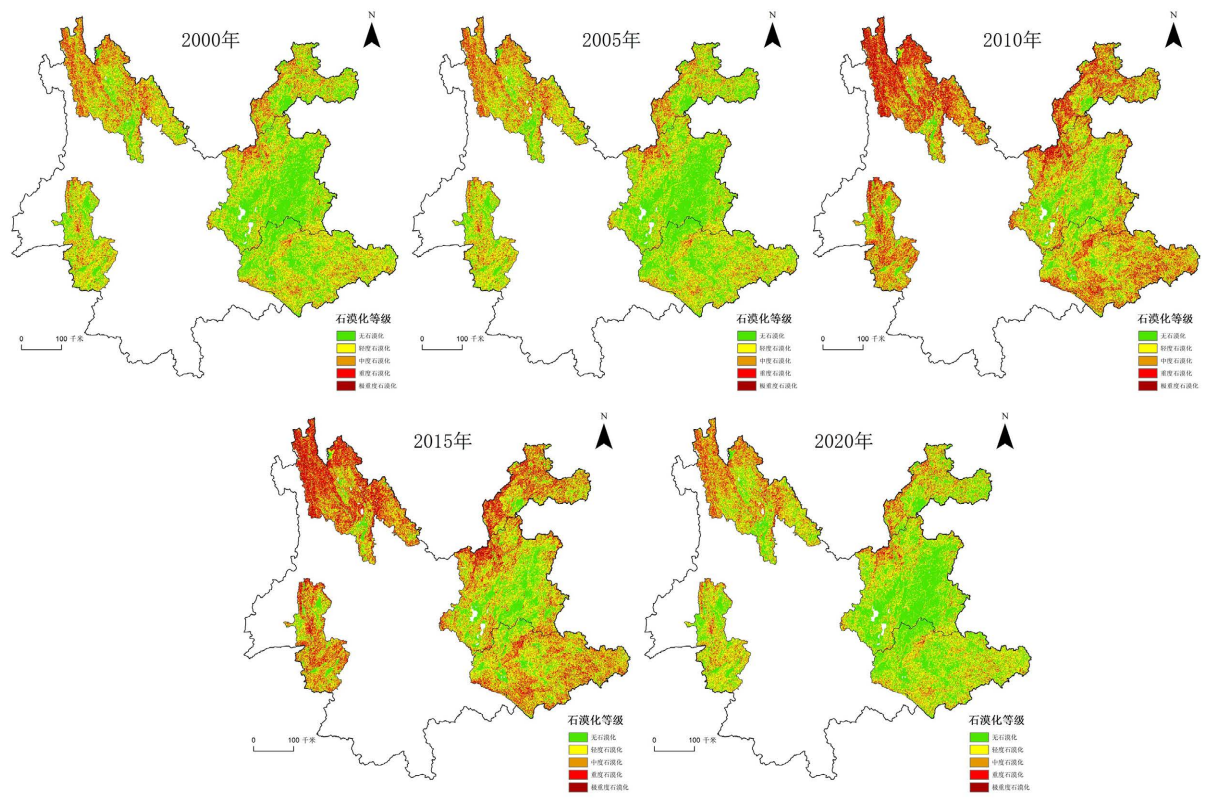


Figure 6. Spatial distribution map of rocky desertification
图 6. 石漠化空间分布图

从时间上为了可以更加直观的看出不同年份不同类型石漠化的面积变化，计算出每个年份的面积并得出石漠化面积转移矩阵，如表 4，可以看出在 2000~2005 年无石漠化主要向轻度石漠化转移，转出面积比转入面积少，无石漠化面积有轻微增加，轻度石漠化有较多转为无石漠化，少部分转移为中度石漠化，从转出和转入面积上来看，轻度石漠化面积减少，中度石漠化则主要转向轻度和重度石漠化，总体面积只有轻微的减少，重度石漠化和极重度石漠化都没有向无石漠化和轻度石漠化类型转移，从总体面积上看，二者面积几乎没变。

综上，在 2000~2005 期间，不同类型石漠化主要向相邻类型的石漠化进行转移，重度和极重度石漠化转移面积较少，石漠化整体面积较多，情况较为恶劣，可能与当时治理技术和人们对于生态保护观念较薄弱有关。

从表 5 可以看出在 2015~2020 期间无石漠化主要向轻度石漠化转移，转入来源则主要来自轻度和中度石漠化，转入比转出面积大，表明石漠化整体情况好转，轻度和中度石漠化也都是向无石漠化和轻度

石漠化转移没有向中度和极重度石漠化转移，石漠化较严重的重度石漠化主要向重度石漠化类型转移而没有向极重度石漠化类型转移，从整体上来看重度和极重度石漠化的转出面积比转入面积多，从数据可以看出石漠化整体面积在减少且程度也在降低。

Table 4. Area transfer matrix of various rocky desertification types from 2000 to 2005
表 4. 2000~2005 各类型石漠化面积转移矩阵

石漠化类型	无石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	极重度石漠化	总计
无石漠化	73921.46	3233.70	0.00	0.00	0.00	77155.16
轻度石漠化	5123.82	55791.84	2526.51	0.00	0.00	63442.17
中度石漠化	0.00	3234.69	29208.04	1196.41	0.00	33639.14
重度石漠化	0.00	0.00	1305.90	9278.05	256.03	10839.98
极重度石漠化	0.00	0.00	0.00	247.43	1713.09	1960.52
总计	79045.28	62260.23	33040.45	10721.89	1969.12	187036.96

从 2000 年到 2020 年，经过多年的治理，在治理技术和治理观念的共同促进下，研究区石漠化的面积和严重程度等都有所改善，但是从部分地区来看，整体改善的同时，也有部分地区有着局部的恶化，需要我们在后面的治理中不断进行改进。

Table 5. Area transfer matrix of various rocky desertification types from 20015 to 2020
表 5. 2015~2020 各类型石漠化面积转移矩阵

石漠化类型	无石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	极重度石漠化	总计
无石漠化	40544.47	8.75	0.00	0.00	0.00	40553.23
轻度石漠化	38754.60	16337.59	2.21	0.00	0.00	55094.41
中度石漠化	451.73	43333.57	4034.71	0.00	0.00	47820.01
重度石漠化	0.00	2362.70	26769.21	1303.34	0.00	30435.25
极重度石漠化	0.00	0.00	1367.57	9445.00	2062.18	12874.75
总计	79750.81	62042.62	32173.69	10748.35	2062.18	186777.64

在空间上云南省石漠化的空间分布范围广，但不均匀，发生面积总体呈东多西少的分布特征。同时，全省石漠化发生变化的区域较大，呈集中连片分布。在 2000~2020 年期间，各时期石漠化面积分布较广的主要是滇中和滇东南岩溶区，滇西和滇西北岩溶区石漠化分布较少，滇东北岩溶区变化较明显，从 2005 年到 2015 年石漠化面积增加迅速。滇中岩溶区是云南省社会经济发展的中心，人口较集中，人类活动对岩溶土地的影响较大。在滇东南岩溶区，岩溶分布较广且岩层厚度大，为石漠化的发展提供了条件。滇西岩溶区和滇西北岩溶区石漠化面积较小，在云南西南部和西部地区，森林植被覆盖度较高，加上人口密度较小，人类活动相对较弱，加上岩溶面积较小，石漠化面积相对较少。滇东北岩溶区在不同研究时期石漠化面积变化较大，在 2000~2010 年呈先减少后增加的趋势，从 2010~2020 年呈先增加后减少趋势，该地区人口较密集，经济发展和生产方式较落后，尤其在河谷地区，农业生产对石漠化的土地干扰严重，一些地区的采矿业也造成了大面积的基岩裸露，生态环境脆弱，使得该地区的石漠化演变比较剧烈。

6. 驱动因子分析

石漠化往往是在自然、社会等多种因素的共同作用下形成的，其发育形成过程是一个与自然地质地

貌，土地利用类型、降水等自然生态环境与高强度的人类活动等多种因素共同影响的过程。此外在不同的时期，影响石漠化的因素不同，同种因素在不断阶段影响的程度也存在差异。

因此选取自然因子和人为因子作为石漠化驱动因子，分别从第一生产总值、人均 GDP、高程、坡度等因素指标，建立岩溶区石漠化驱动因子指标体系，具体如表 6。

Table 6. Respective driving factors and stratification plan
表 6. 各驱动因子及分层方案

驱动因子	编号	分层方案	层数
高程	X1	JenKs 自然断裂点分级法	5
坡度	X2	3enKs 自然断裂点分级法	5
第一生产总值	X3	enKs 自然断裂点分级法	5
人均 GDP	X4	enKs 自然断裂点分级法	5

采用地理探测器，基于地理现象之间的空间异质性原理来研究不同因子对于石漠化的影响，地理探测器模型主要用于分析类型量数据，输入变量数据类型要求为类别量数据，因此需要对连续型的变量数据进行离散化处理，首先在 ArcGis 中将各个驱动因子栅格化，然后采用重分类工具中的 Jenks 自然最佳断裂点分级法进行分层，将驱动因子分为五类，而因变量 Y 为数量值。根据已有的研究区，通过创建渔网提取采样点，然后分别将数量值 Y 和各类型值 X 标识到格网中，最后导出数据到地理探测器模型中，选取 2000、2010、2020 三个时期进行探测，得出各驱动因子对于石漠化形成的贡献率如表 7。

Table 7. Statistics of factor detection q-values in the study area for 2000, 2010, and 2020
表 7. 2000、2010、2020 研究区因子探测 q 值统计

驱动因子	X1	X2	X3	X4
2000 年	0.0573	0.2197	0.0337	0.0326
2010 年	0.0730	0.2406	0.0376	0.0376
2020 年	0.0711	0.2200	0.0449	0.0449

Table 8. Interactive detection results of various driving factors
表 8. 各驱动因子交互式探测结果

		X1	X2	X3	X4
2000 年	X1	0.0573			
	X2	0.2405	0.2197		
	X3	0.0939	0.2350	0.0337	
	X4	0.0926	0.2346	0.0345	0.0326
2010 年	X1	0.0730			
	X2	0.2643	0.2406		
	X3	0.1096	0.2560	0.0376	
	X4	0.1096	0.2560	0.0379	0.0376
2020 年	X1	0.0711			
	X2	0.2480	0.2200		
	X3	0.1081	0.2434	0.0449	
	X4	0.1081	0.2434	0.0452	0.0449

根据各驱动因子不同年份 q 值探测结果来看在各驱动因子中, 对石漠化贡献率排序为坡度(0.2197~0.2406), 高程(0.0573~0.0730)第一生产总值(0.0337~0.0449)人均 GDP (0.0326~0.0449)。

从驱动因子分类来看, 自然因子的贡献率比人为因子大, 可以看出, 自然因子是石漠化发生的决定性因子, 社会经济因子则间接的驱动石漠化的发生。在社会经济因素的, 第一生产总值的影响在三个时期的影响都较大。而人均 GDP 的影响则较小和有限。

石漠化是自然因子和人为因子共同作用的结果, 地理探测器中的交互因子探测器能够探测石漠化的共同驱动因子及其两个因子共同作用时对石漠化的贡献率是加强还是减弱了, 如表 8 可以看出, 在 2000 年和 2010 年、2020 年的交互探测结果中可以看到坡度和高程共同作用时对石漠化分布的解释力最大, 其 q 值为 0.2405 和 0.2643。

根据三个时期各驱动力的解释力 q 值大小, 可以看出高程和坡度市其石漠化发展的主要驱动力其解释力呈现先上升后下降的趋势, 而第一生产总值和人均 GDP 的影响有限, 但是可以看出其解释力都呈现逐渐增强的形势。

7. 结论

现阶段云南岩溶区石漠化形势依旧严峻, 2000~2020 年间云南岩溶区石漠化呈现先增加后减少的演变趋势, 整体上石漠化面积在减少, 但局部地区仍在增加。在前期阶段未进行系统化石漠化治理, 导致石漠化在自然和人为影响下快速恶化, 到后期随着人们意识的增强和一系列石漠化治理工程的实施, 石漠化减幅较大。在岩溶分区中, 滇中、滇东南和滇西岩溶区石漠化面积整体在减少; 滇东北和滇西北岩溶区石漠化分布则有所增加。

云南省石漠化的空间分布范围广, 但不均匀, 发生面积总体呈东多西少的分布特征。同时, 全省石漠化发生变化的区域较大, 呈集中连片分布。在 2000~2020 年期间, 各时期石漠化面积分布较广的主要是滇中和滇东南岩溶区, 滇西和滇西北岩溶区石漠化分布较少, 滇东北岩溶区在不同研究时期石漠化面积变化较大, 在 2000~2010 年呈先减少后增加的趋势, 从 2010~2020 年呈先增加后减少趋势。云南岩溶区石漠化在 2000~2020 年间经过治理后取得显著成效, 但局部地区仍在发生恶化, 尤其是滇东北和滇西北岩溶区石漠化形势较为严峻, 后期要合理制定治理规划, 加大对滇东北和滇西北岩溶区石漠化的治理, 同时在其他岩溶区上也要边保护边治理, 防止出现治理好又恶化现象。

基金项目

国家自然科学基金项目(42361009)。

参考文献

- [1] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461-468.
- [2] 卢耀如. 地质-生态环境与可持续发展中国西南及邻近岩溶地区发展途径[M]. 南京: 河海大学出版社, 2003.
- [3] 张平仓, 丁文峰. 我国石漠化问题研究进展[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3): 1-5.
- [4] 国家林业和草原局. 岩溶地区石漠化状况公报[R]. 北京: 国家林业和草原局, 2006.
- [5] 国家林业与草原局. 中国·岩溶地区石漠化状况公报[EB/OL]. <https://www.forestry.gov.cn/main/65/20190620/104657229771680.html>, 2018-12-14.
- [6] 中国林业和草原局. 云南省石漠化状况公报[R/OL]. https://lcj.yn.gov.cn/html/2012/gongshigonggao_1025/31734.html, 2025-01-15.
- [7] 李阳兵, 白晓永, 邱兴春, 等. 喀斯特石漠化与土地利用相关性研究[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 67-73.
- [8] 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.

-
- [9] 段华超, 郑鑫华, 李世民, 等. 云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 137-146.
- [10] 王丹. 云南岩溶区石漠化时空演变特征及驱动因子研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- [11] 袁利平, 杨朝梅, 李希燕, 等. 青藏高原东南侧滇西北一次强降水天气过程分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(3): 24-32.
- [12] 丁文荣, 曾学梅. 云南岩溶区降水变化的气候特征[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 7-12.
- [13] 易桂花, 张廷斌, 何奕萱, 等. 四种气温空间插值方法适用性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 115-128.
- [14] 王宇, 张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J]. 地球科学进展, 2003(6): 933-938.
- [15] 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.
- [16] 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题[J]. 中国岩溶, 2005(3): 192-195.
- [17] 况顺达. 贵州马别河流域岩溶石漠化遥感评价及其形成机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- [18] 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.