

doi: [10.12097/gbc.2021.50.120](https://doi.org/10.12097/gbc.2021.50.120)

中国南方岩溶石漠化的时空变化及其原因

涂纯^{1,2,3}, 罗为群^{1,2,3*}, 李发东^{4,5}, 岳祥飞^{1,2,3}, 刘朋雨^{1,2,3}, 吴泽燕^{1,2,3}

TU Chun^{1,2,3}, LUO Weiqun^{1,2,3*}, LI Fadong^{4,5}, YUE Xiangfei^{1,2,3}, LIU Pengyu^{1,2,3}, WU Zeyan^{1,2,3}

1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;

2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站/百色平果喀斯特生态系统广西野外科学观测研究站, 广西 平果 531406;

3. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

5. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

1. *Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China;*

2. *Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station/Pingguo Baise, Karst Ecosystem, Guangxi Observation and Research Station, Pingguo 531406, Guangxi, China;*

3. *Key Laboratory of Karst Dynamics Ministry of Natural Resources, Guangxi/International Research Center on Karst under the Auspices of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Guilin 541004, Guangxi, China;*

4. *Institution of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

5. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

摘要:【研究目的】中国南方岩溶区是石漠化广泛分布的生态脆弱区, 查明中国南方岩溶石漠化的时空变化及其成因机制, 有助于制定科学合理的石漠化防治规划和生态修复措施。【研究方法】以 Landsat8 遥感影像为数据源, 利用植被覆盖率和岩石裸露率进行石漠化信息提取, 结合野外调查, 以县域尺度探讨了南方 16 省(自治区、直辖市)岩溶石漠化的时空演变规律。【研究结果】2020 年南方岩溶石漠化面积为 $8.45 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中轻度石漠化占南方岩溶石漠化总面积的 62.75%。2015—2020 年, 岩溶石漠化面积大于 400 km^2 的县域数量减少了 19 个, 广西都安县、马山县、德保县, 贵州思南县、威宁县, 云南会泽县、丘北县, 四川巴塘县石漠化问题改善显著, 云南广南县、文山市和砚山县岩溶石漠化面积大于 1000 km^2 , 石漠化治理形势严峻。【结论】以溶蚀作用为主塑造形成的峰丛洼地区, 集中分布了 30% 的石漠化严重县; 灰岩区因强烈的溶蚀作用和水土流失过程, 导致石漠化面积占比超过 33%。随着农村人口减少, 耕地石漠化面积占比降低至 26.54%, 而灌木地和草地石漠化面积占比升高至 20.51% 和 24.11%。研究将为制定县域尺度石漠化综合治理规划提供参考。

关键词: 南方岩溶区; 石漠化; 地质地貌条件; 土地利用类型; 县域尺度

创新点: 以县域为基本单元, 将西南 8 省区的石漠化研究扩展至江西、浙江、江苏、福建、河南、陕西、甘肃等亚热带气候区, 全面梳理了我国岩溶石漠化的时空演化特征, 为我国分区制定石漠化综合治理规划提供参考。

中图分类号: X171; P642.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2025)02/03-0326-14

Tu C, Luo W Q, Li F D, Yue X F, Liu P Y, Wu Z Y. Spatial and temporal changes of karst rocky desertification and its cause analysis in South China. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(2/3): 326–339

收稿日期: 2023-11-09; 修订日期: 2024-07-26

资助项目: 广西自然科学基金项目《石漠化生态修复区土壤有机碳稳定性对气候变暖的响应机制》(编号: 2023GXNSFAA026471)、国家重点研发计划项目《峰丛洼地关键带水土资源生态调控技术》(编号: 2022YFF1300702)、桂林市创新平台和人才计划项目《气候变化条件下典型岩溶区土壤固碳效率提升关键技术研究》(编号: 20230116-3)、中国地质调查局项目《南方石漠化重点区综合地质调查与评价》(编号: DD20190502) 和《南方岩溶区石漠化生态地质调查》(编号: DD20230453)

作者简介: 涂纯(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 从事岩溶生态系统资源环境效应评估研究。E-mail: tuc.13b@igsnr.ac.cn

* 通信作者: 罗为群(1980-), 男, 硕士, 研究员, 从事岩溶区生态修复及国土空间规划研究。E-mail: lweiqun@mail.cgs.gov.cn

Abstract: [Objective] The karst region in southern China is an ecologically fragile area where karst rocky desertification is widely prevalent. Investigating the spatiotemporal changes of karst rocky desertification in southern China and its underlying mechanisms is instrumental in formulating scientific and reasonable control plans and ecological restoration measures for this phenomenon. **[Methods]** Using Landsat 8 remote sensing imagery as the data source, information on karst rocky desertification was extracted based on fractional vegetation cover and rock exposure rate. Combined with field investigations, the spatiotemporal evolution of rocky desertification in 16 southern provinces (autonomous regions and municipalities) was analyzed at the county scale. **[Results]** The area of karst rocky desertification in southern China was 84,472.09 km² in 2020, with light karst rocky desertification accounting for 62.75% of the total area of karst rocky desertification. From 2015 to 2020, the number of counties with karst rocky desertification areas greater than 400 km² decreased by 19. Notable improvements in karst rocky desertification were observed in Du'an County, Masan County, and Debao County in Guangxi Province; Sinan County and Weining County in Guizhou Province; Huize County and Qiubei County in Yunnan Province; and Batang County in Sichuan Province. However, the karst rocky desertification areas in Guangnan County, Wenshan City, and Yanshan County in Yunnan Province exceeded 1000 km², exacerbating the situation. **[Conclusions]** The peaks and valleys primarily formed by dissolution were concentrated in 30% of the counties with severe karst rocky desertification. Karst rocky desertification in limestone areas accounted for more than 33% due to the intense dissolution and soil erosion processes. With the decline in rural population, the proportion of rocky desertification in cultivated land decreased to 26.54%, while the proportion of rocky desertification in shrubland and grassland increased to 20.51% and 24.11%, respectively. This study will provide a reference for the formulation of comprehensive control plans for karst rocky desertification at the county scale.

Key words: karst area in South China; karst rocky desertification; geological and geomorphological conditions; land use type; county scale

Highlights: Taking county as the basic unit, this study on karst rocky desertification in 8 provinces in southwest China was extended to Jiangxi, Zhejiang, Jiangsu, Fujian, Henan, Shaanxi, Gansu and other subtropical climate areas. The spatio-temporal evolution of karst rocky desertification in China was comprehensively evaluated, and the reference was provided for the comprehensive control plan of karst rocky desertification in China.

岩溶石漠化(简称石漠化)指在热带、亚热带湿润、半湿润气候条件和岩溶极其发育的自然背景下,受人为活动干扰,使地表植被遭受破坏,造成土壤侵蚀程度严重,基岩大面积裸露,土地退化的表现形式(袁道先, 2008)。由石漠化导致的土地贫瘠、旱涝灾害、区域生态功能退化等生态问题,直接威胁长江、珠江流域的生态安全,严重制约着中国南方地区社会经济的可持续发展(宋同清等, 2014)。从 20 世纪 90 年代开始,石漠化问题引起了党和政府、科研院校的广泛关注(中国科学院地学部, 1995);之后,西南地区逐步实施了“天然林资源保护”、“长江珠江防护林工程”、“退耕还林还草”等生态工程(罗旭玲等, 2021; 阮方佑等, 2023; 张亚威等, 2023),启动了 2 期石漠化治理工程(袁道先, 2008; 国家发展改革委等, 2016),开展了 4 期石漠化调查监测(彭玺等, 2023)。经过近 20 余年的治理,石漠化问题得到显著改善,区域生态环境有序恢复。近年来,相继发布了《生态保护和修复支撑体系重大工程建设规划(2021—2035 年)》和《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》,明确了长江重点生态

区、南方丘陵山地带石漠化综合治理的思路和方向,即从全面抑制石漠化扩张转变为石漠化防控监测和提升岩溶生态系统功能稳定。因此,从区域尺度了解石漠化的发展态势,明确不同地区石漠化的数量、规模、程度及其成因机制,可为各地区制定石漠化综合治理规划和实施生态保护与修复工程提供重要的理论支撑。

目前,关于石漠化的研究主要集中在云南、贵州、广西、四川、重庆、湖南、湖北、广东等省、自治区、直辖市(简称省区),研究侧重于石漠化遥感信息提取方法探讨(卢涛, 2021; 罗旭玲等, 2021)、生态工程实施前后碳储量和碳汇评估(Bai et al., 2023; Zhu et al., 2024)、生态功能评价(Tong et al., 2018; 王茜等, 2021),以及石漠化演化的人为和自然驱动机制研究等方面(熊平生等, 2010; 张信宝等, 2010)。研究普遍认为,石漠化是地质条件下叠加人类活动导致的土地退化过程(曹建华等, 2004, 2008),其中地质因素涉及纯碳酸盐岩背景下的岩溶生态系统成土物质和成土速率严重受限,导致石漠化发生;人为因素包括陡坡耕种、砍伐、放牧、矿山开采等人类活动导致

的土地功能退化,加剧水土流失和岩石裸露(王世杰, 2003)。区域尺度上,目前主要运用遥感技术探讨西南地区或单个省、市、县级行政区的石漠化演变特征及其成因机制(宋同清等, 2014; 郭丽琴等, 2017; 史迎春等, 2017; 刘鹏等, 2019; 卢涛, 2021; 罗旭玲等, 2021),缺少以县域为基本单元对南方岩溶区石漠化的全面评估。县域是石漠化防控和各类生态工程实施的基层主体(龚傲龙等, 2019),以县域为尺度探讨南方石漠化的发展态势,可直观评估区域石漠化治理的效果和未来生态保护与修复的范围和规模,对于长江重点生态区、南方丘陵山地带开展石漠化综合治理具有重要意义。因此,本次研究以 2015—2020 年 Landsat 遥感影像为数据源,结合野外调查数据,将西南八省区的石漠化研究扩展至江西、浙江、江苏、福建全境,以及河南、陕西、甘肃南部等亚热带气候区,涉及南方 16 个省区;以县域为基本单元,全面评估近年来南方石漠化的时空变化及其成因,为分区制定石漠化生态保护与修复规划提供科学依据。

1 研究区概况

中国南方岩溶区北起秦岭南麓-淮河,西至横断山脉,东抵东部沿海,总体地势西高东低;分布有岩溶中高山、岩溶峡谷、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶槽谷、峰丛洼地、峰林平原、溶丘洼地八大岩溶地貌类型(中华人民共和国水利部, 2009; 王世杰等, 2015)。结合已有研究和野外实际调查情况,本次研究将江西、江苏、浙江、福建、安徽等地的岩溶地貌划为岩溶丘陵区,河南、陕西等地和甘肃南部地区划为岩溶中山丘岭区(图 1)。研究区涵盖长江流域、珠江流域和澜沧江、怒江等国际河流域,包括长江重点生态区和南方丘陵山地生态区,是开展石漠化综合治理和重大生态系统保护与修复工程的主要地区(国家发展改革委等, 2021);区域大部分地区年降水量 1000 mm 以上,属于亚热带季风湿润气候;植被除川西为高寒灌丛、草甸,滇西北为亚热带山地高寒性针叶林地外,其余地区均属亚热带、热带常绿阔叶林或针阔混交林。根据第七次人口普查数据,研究区居住人口 6.39 亿人,原国家级贫困县 292 个。根据 1:20 万区域地质调查资料,区域裸露碳酸盐岩面积 $58.52 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中碳酸盐岩面积占国土面积 30% 以上的岩溶县有 298 个。

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

本次研究使用的遥感影像来源于 Google Earth Engine 云平台;为减少云量的影响,选取了影像云量小于 1% 的 Landsat8 OLI 遥感影像,影像获取时间为 2015 年和 2020 年的 11—12 月,部分影像云量未满足要求,使用 2016 年和 2021 年 1—2 月影像代替;影像空间分辨率为 30 m。影像数据通过辐射定标、大气校正、几何校正、图像增强等预处理后进行石漠化遥感信息提取。岩溶区数据来源于 1:20 万区域地质图提取出的裸露型碳酸盐岩数据;土地利用和气象数据来自中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率为 30 m;海拔高程数据从地理空间云数据获取,空间分辨率为 90 m。以上数据均转换为相同的地理坐标和投影坐标,空间分辨率全部统一采样为 30 m。人口等社会经济统计数据来源于各省、地级市、县区统计年鉴。

2.2 石漠化遥感信息提取及等级划分

石漠化遥感信息提取采用人机交互式解译方法,并计算植被覆盖率和岩石裸露率综合得出。其中植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, *FVC*)计算公式如下(孙耀鹏等, 2022):

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

式中,*FVC* 为植被覆盖率,*NDVI* 为混合像元归一化植被指数,*NDVI_{veg}* 为纯植被像元的 *NDVI* 值,*NDVI_{soil}* 为裸土(无植被)像元的 *NDVI* 值。

岩石裸露率使用归一化岩石指数(Normalized Difference Rock Index, *NDRI*)计算,计算公式如下(卢涛, 2021):

$$F_r = \frac{NDRI - NDRI_0}{NDRI_r + NDRI_0} \quad (2)$$

式中,*F_r* 为基岩裸露率;*NDRI* 为混合像元归一化岩石指数;*NDRI₀* 为无基岩裸露像元的 *NDRI* 值,*NDRI_r* 为基岩全覆盖像元的 *NDRI* 值。

目前石漠化等级存在众多划分方法,主要依据基岩裸露、植被和土被覆盖条件、坡度、土壤厚度等因素进行划分(吴跃等, 2020; 王茜等, 2021; 孙耀鹏等, 2022; 徐红枫等, 2022)。本次研究结合实际情况,选择植被覆盖率、基岩裸露率作为研究区石漠化分

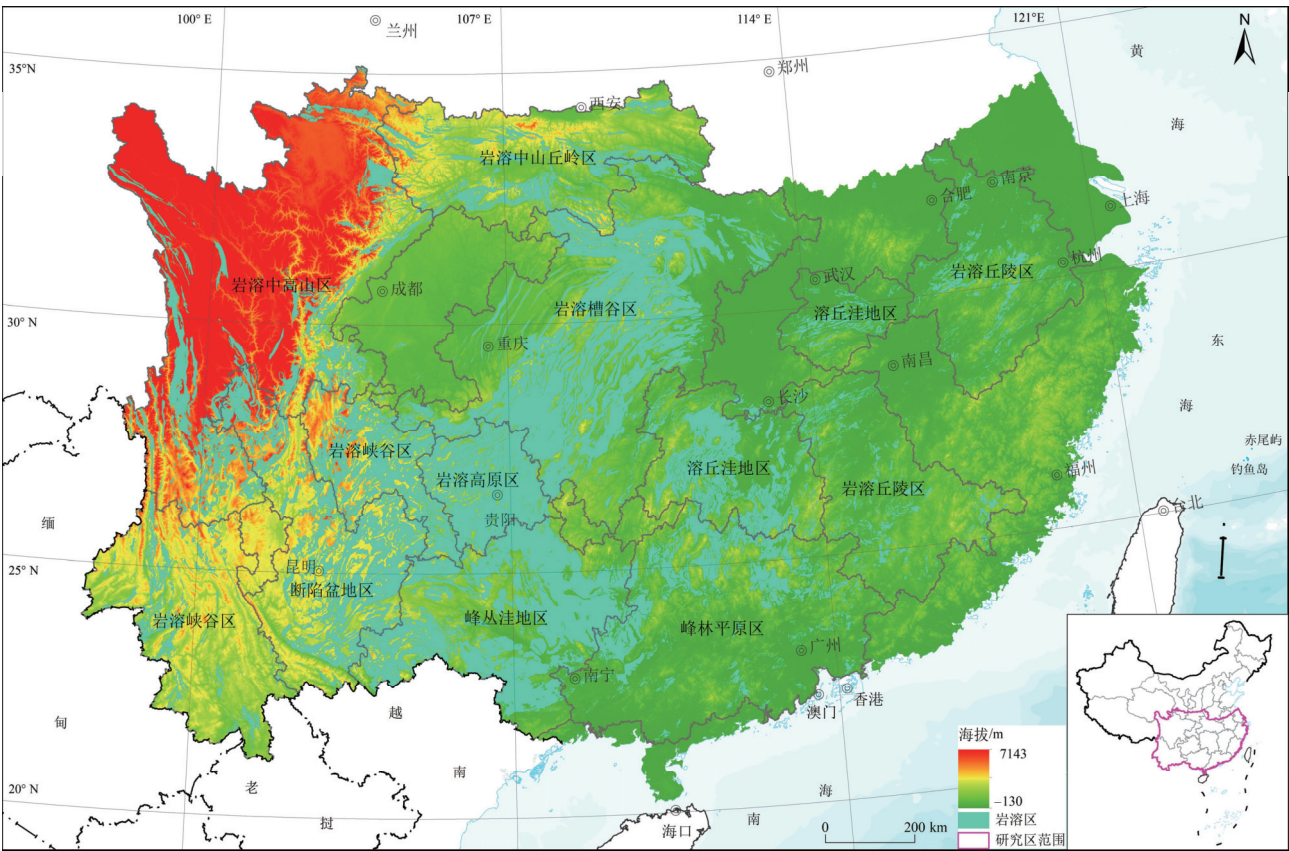


图 1 研究区范围及地理位置(根据自然资源部标准地图服务网站绘制底图,审图号:GS(2016)1612 号,GS(2023)2763 号)

Fig. 1 Scope and geographical location of the study area

级指标,将石漠化划分为无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化 4 个等级(表 1),其中石漠化面积为轻度、中度、重度石漠化面积之和(蒋忠诚等, 2016)。

2.3 石漠化遥感解译野外验证及解译修正

本研究于 2019—2021 年开展石漠化遥感解译野外验证,验证遵循不同岩溶地貌类型区定点核查验证的原则,对不同等级石漠化的影像特征进行野外比对。野外验证时,对验证点周边的地形、岩性、坡度、土地利用和植被状况、石漠化成因等进行调查。野外验证后,根据实际调查的石漠化及生态地

质情况,部分地区重新选取影像特征标志,修正石漠化解译数据。本研究共完成验证点 2507 个(图 2),综合解译精度 91.36%。

3 结果与分析

3.1 中国南方石漠化的时空分布特征

截止到 2020 年,中国南方石漠化面积为 $8.45 \times 10^4 \text{ km}^2$,相比 2015 年减少 $1.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,石漠化发生率降低 2.34%(表 2);轻度、中度和重度石漠化面积分别减少 $0.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中轻度石漠化面积占石漠化总面积的比例由

表 1 石漠化等级划分

Table 1 Classification of karst rocky desertification

石漠化等级	岩石裸露率/%	植被覆盖度/%	裸岩平面形态	生态环境
重度石漠化	≥ 70	< 30	面状	疏草、土壤零星分布
中度石漠化	50~70	30~50	线状+面状	疏草+疏灌、土壤散布
轻度石漠化	30~50	50~70	线状+点状	乔草+灌草、土壤不连续
无石漠化	< 30	≥ 70	点状	乔灌木植被、土壤连续分布

表 2 南方 16 省 (自治区、直辖市) 石漠化面积
Table 2 Statistical data of karst rocky desertification area in 16 provinces (autonomous regions and municipalities) in southern China

省份	岩溶区面积/km ²	2015年石漠化/km ²			2015年石漠化		2020年石漠化/km ²			2020年石漠化		石漠化严重县数量/个	
		轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	石漠化面积	发生率/%	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	石漠化面积	发生率/%	2015年	2020年
云南	108656.86	10970.54	7674.96	4389.51	23035.01	21.20	12588.86	7360.58	2107.36	22056.80	20.30	19	17
贵州	121135.45	17492.07	7998.87	2113.58	27604.52	22.79	13681.76	5809.80	1614.53	21106.09	17.42	28	19
广西	81670.48	9801.44	3679.98	904.84	14386.27	17.62	8475.47	2525.83	387.70	11389.00	13.95	16	6
四川	69042.38	5528.11	3212.33	1151.23	9891.67	14.33	5010.28	2672.85	1172.06	8855.19	12.83	2	2
湖南	62552.16	2215.65	753.48	156.18	3125.31	5.00	2401.62	759.10	219.68	3380.40	5.41	-	-
湖北	50384.59	3588.10	1771.13	737.91	6097.14	12.10	4587.45	2172.54	850.16	7610.15	15.10	-	2
重庆	30224.82	3258.45	1299.72	250.14	4808.31	15.91	1853.34	820.21	153.03	2826.58	9.35	2	2
广东	11861.75	845.34	566.13	312.52	1723.99	14.53	813.43	281.88	149.54	1244.85	10.50	-	-
江西	11191.96	1324.59	606.23	282.63	2213.45	19.78	1003.69	485.68	316.29	1805.66	16.14	-	-
安徽	6333.29	947.47	836.84	340.29	2124.60	33.55	629.50	135.33	158.91	923.74	14.59	-	-
浙江	2391.59	24.08	17.98	1.29	43.34	1.81	88.52	34.63	9.14	132.29	5.56	-	-
江苏	383.51	64.15	15.27	1.48	80.90	21.07	39.64	34.45	4.06	78.15	20.31	-	-
福建	1988.29	203.41	104.93	80.88	389.22	19.58	180.08	78.41	7.41	265.90	13.33	-	-
甘肃	6030.26	617.32	509.13	248.13	1374.58	22.80	678.00	584.52	148.61	1411.13	23.42	-	-
河南	2049.87	362.46	152.57	11.73	526.77	25.70	368.43	133.86	8.90	511.19	24.93	-	-
陕西	19351.10	535.02	188.36	9.19	732.57	3.79	607.01	244.03	23.93	874.97	4.52	-	-
总计	585248.36	57778.20	29387.91	10991.55	98157.66	16.77	53007.08	24133.69	7331.32	84472.09	14.43	67	48

注: 石漠化严重县指石漠化面积大于400 km²的县级行政区

3.3 不同岩溶地貌类型区石漠化时空分布特征

截止到 2020 年, 峰丛洼地区石漠化面积仍高达 1.94×10⁴ km²(图 5); 有 14 个石漠化严重县分布在该地貌类型区, 占石漠化严重县总数的 30%, 云南广南县、文山市、砚山县等石漠化极严重县主要分布在该地貌类型区。其次, 岩溶槽谷区和断陷盆地区石漠化面积分别为 1.75×10⁴ km² 和 1.26×10⁴ km², 分别有 11 个和 10 个石漠化严重县分布在这 2 种地貌类型区。从演变特征看, 相比 2015 年, 2020 年峰丛洼地区和岩溶峡谷区的石漠化面积分别减少了 0.53×10⁴ km² 和 0.38×10⁴ km², 石漠化治理效果显著; 而岩溶槽谷区和岩溶高原区分别增加了 0.04×10⁴ km² 和 0.07×10⁴ km², 石漠化有进一步恶化的趋势。

3.4 不同碳酸盐岩类型区石漠化时空分布特征

灰岩区是石漠化发生的主要碳酸盐岩类型区, 其分布的石漠化面积占 2 期石漠化总面积的 33.02%~39.21%(图 5), 表明灰岩是主导石漠化形成

的重要地质因素; 其次为碳酸盐岩夹碎屑岩, 该岩性区石漠化占比在 18% 左右。从演变特征看, 相比 2015 年, 2020 年石漠化减少的区域主要集中在灰岩区, 石漠化面积减少了 1.06×10⁴ km², 占南方石漠化减少面积的 77.37%。本次以县域为单元统计发现: 在灰岩区, 石漠化面积大于 200 km² 的县域共有 33 个(图 6-A), 其中广西靖西市和兴宾区, 云南广南县、文山市、砚山县和宣威市均大于 400 km², 广南县和砚山县甚至达到了 796.51 km² 和 723.90 km²; 在碳酸盐岩夹碎屑岩区, 石漠化面积大于 200 km² 的县域有 16 个, 其中贵州安龙县、兴义市和云南丘北县、砚山县均大于 400 km²(图 6-B)。

3.5 不同土地利用类型区石漠化时空分布特征

耕地、草地、灌木地、有林地和疏林地是发生石漠化的主要土地利用类型区(图 5)。相比 2015 年, 各类型区在 2020 年发生的石漠化面积都相应减少, 其中耕地、灌木地和有林地分别减少了 0.72×10⁴ km²、

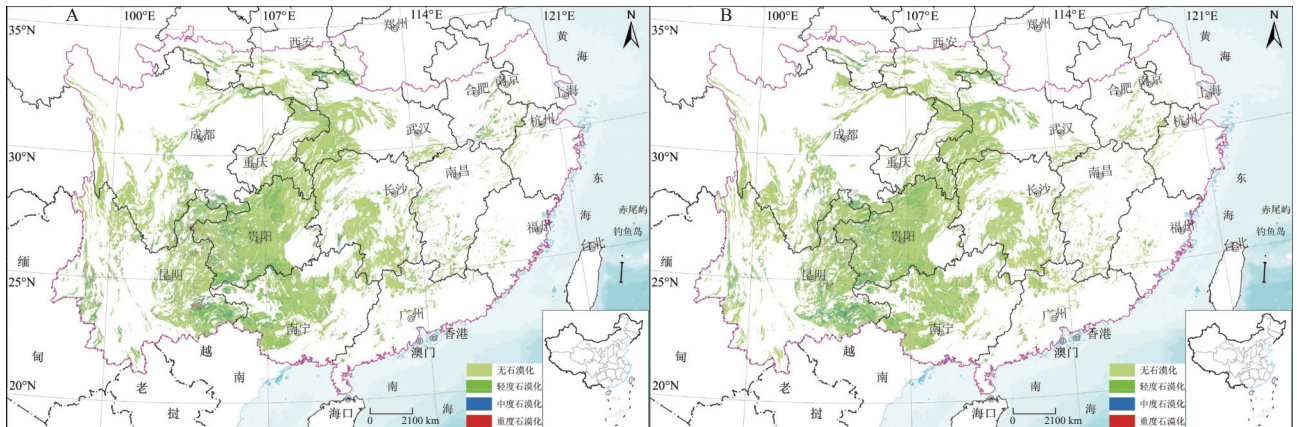


图3 2015年(A)和2020年(B)南方16省(自治区、直辖市)石漠化分布(底图根据自然资源部标准地图绘制,审图号:GS(2016)1612号,GS(2023)2763号)

Fig. 3 Distribution of karst rocky desertification in 16 provinces (autonomous regions and municipalities) in southern China in 2015 (A) and 2020 (B)

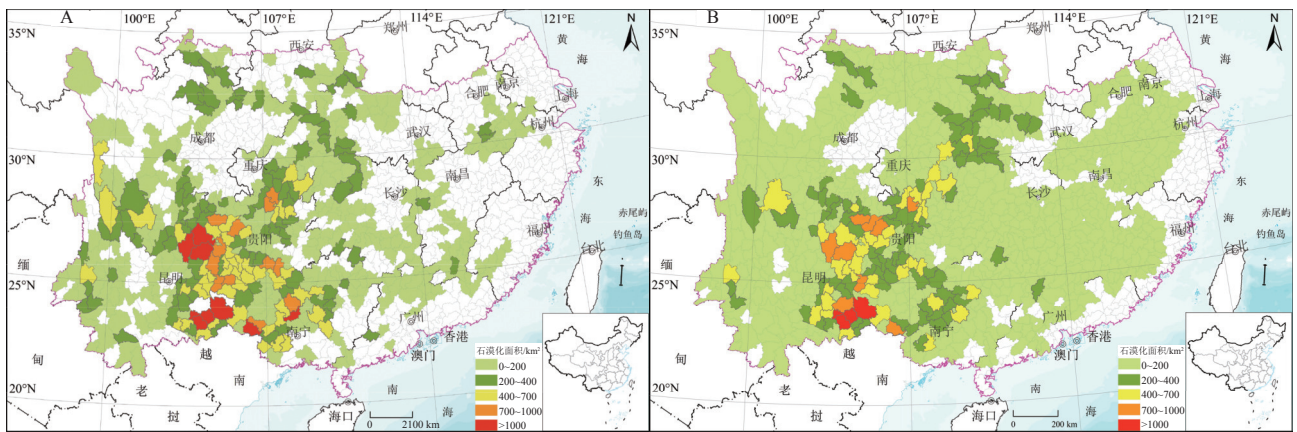


图4 2015年(A)和2020年(B)南方各县石漠化分布(底图根据自然资源部标准地图绘制,审图号:GS(2016)1612号,GS(2023)2763号)

Fig. 4 Distribution of karst rocky desertification in southern counties of China in 2015 (A) and 2020 (B)

$0.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.19 \times 10^4 \text{ km}^2$, 耕地石漠化面积占比由2015年的30.19%降低至2020年的26.54%, 而灌木地和草地所占比例分别由2015年的19.78%和21.74%升高至2020年的20.51%和24.11%。按照县域统计, 2020年耕地和草地石漠化面积大于 200 km^2 的县域数量分别为19个和14个(图7), 其中云南广南县耕地和草地石漠化面积均超过 400 km^2 , 原因可能是耕种或者耕地撂荒后演变为草地, 导致石漠化发生的土地类型区发生转变。

3.6 不同坡度区石漠化时空分布状况

按照坡度划分, 石漠化主要分布在 $8^\circ \sim 15^\circ$ 和 $15^\circ \sim 25^\circ$ 区域, 面积分别占2期石漠化总面积的25.81%~26.37%和26.79%~27.22%(图6); 从演变特征来看, 相比2015年, 2020年 $<5^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 和

$8^\circ \sim 15^\circ$ 坡度区的石漠化面积分别减少了 $0.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.31 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 $<5^\circ$ 坡度区石漠化面积占比从2015年的18.15%减少至2020年的16.56%, 而 $15^\circ \sim 25^\circ$ 和 $8^\circ \sim 15^\circ$ 坡度区占比从2015年的26.79%和25.81%增加至2020年的27.22%和26.37%, 表明随着坡度升高, 石漠化治理的难度也增大。按照县域统计, $8^\circ \sim 15^\circ$ 和 $15^\circ \sim 25^\circ$ 坡度区石漠化面积大于 200 km^2 的县域数量为17个和15个(图8), 其中云南广南县和贵州七星关区在这2类坡度区的石漠化面积均高于 300 km^2 。

4 讨论

4.1 南方石漠化的时空演变分析

目前南方石漠化研究主要集中在云南、贵州、广

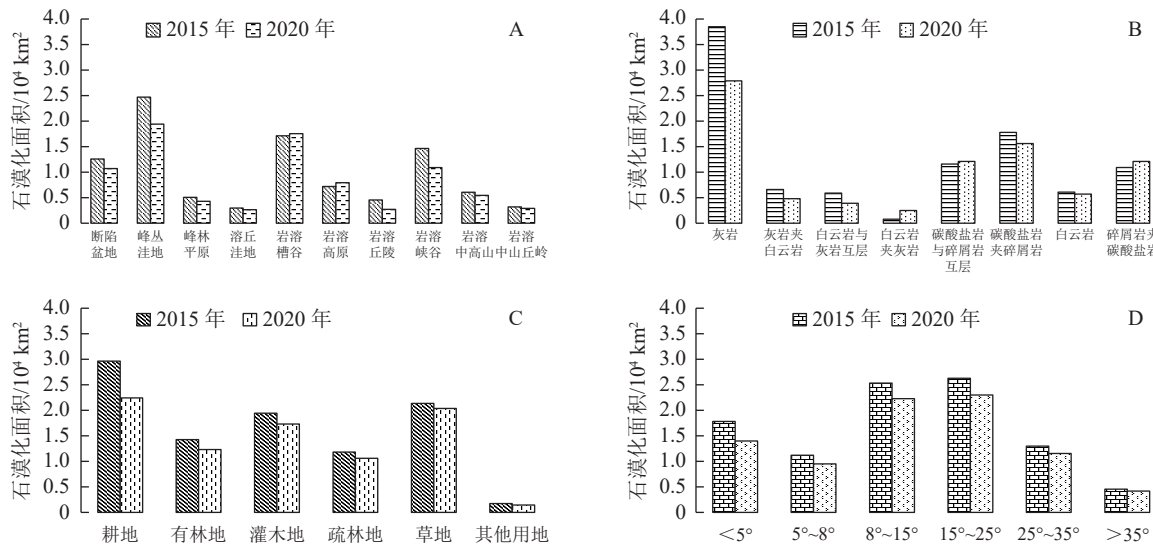


图 5 2020 年不同岩溶类型区(A)、碳酸盐岩类型区(B)、土地利用类型区(C)和坡度区(D)石漠化面积统计

Fig. 5 Statistics of karst rocky desertification in different karst landform(A), carbonate rock areas(B), land use areas(C) and slope areas(D) in 2020

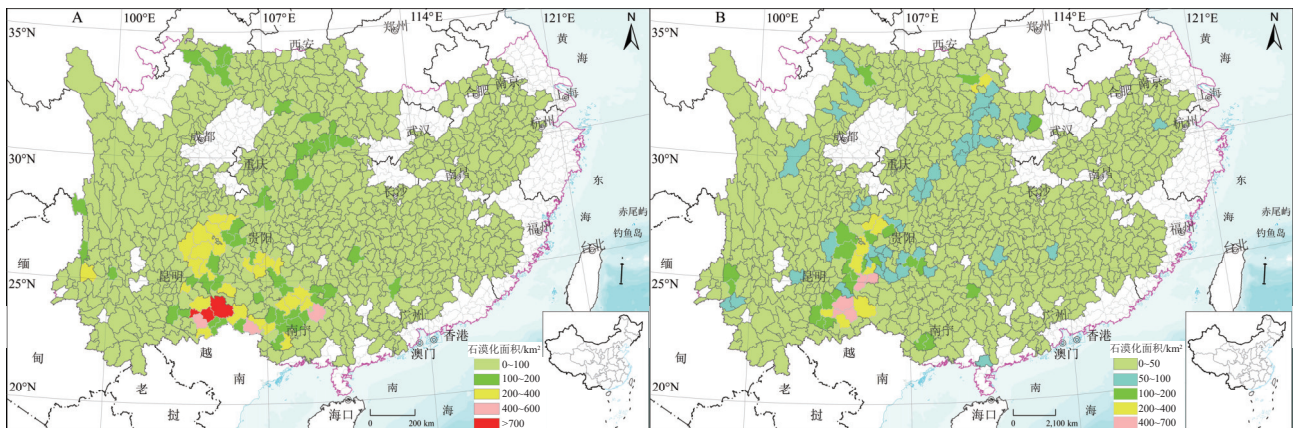


图 6 基于县域统计的 2020 年灰岩区(A)和碳酸盐岩夹碎屑岩区(B)石漠化面积分布(根据自然资源部标准地图服务网站绘制底图,审图号:GS(2016)1612 号)

Fig. 6 Area distribution of karst rocky desertification in limestone (A) and carbonate rocks with clastic rocks (B) in 2020 based on county statistics

西等西南地区。罗旭玲等 (2021) 研究发现, 西南石漠化面积由 2005 年的 $13.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少至 2015 年的 $10.70 \times 10^4 \text{ km}^2$; 国家林草局组织的第四次石漠化监测显示, 石漠化面积由 2016 年的 $10.07 \times 10^4 \text{ km}^2$ 下降至 2021 年的 $7.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ (国家林业和草原局, 2018; 宁小斌等, 2023), 该监测范围由原来的西南 8 省区扩展到南方 10 省区的 508 个县。本研究通过遥感解译与地面调查相结合的方式, 将石漠化调查范围扩大至中国中东部和秦岭—淮河一带, 覆盖全国 16 个省区共计 804 个县。研究结果显示, 2020 年中国南方石漠化面积为 $8.45 \times 10^4 \text{ km}^2$, 相比 2015

年减少 $1.37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中西南地区减少至 $7.85 \times 10^4 \text{ km}^2$, 与国家林草局和其他研究结果基本一致, 验证了本次研究数据的可靠性及中国石漠化治理效果显著。从各省区看, 贵州和广西是石漠化改善最显著的地区, 从 2015 年到 2020 年, 石漠化面积分别减少了 $0.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 与阮方佑等 (2023)、周学武等 (2023)、陈棋等 (2023) 在该地区的研究结果基本一致; 而云南仍保持在 $2.21 \times 10^4 \text{ km}^2$, 相比 2015 年仅减少 978.21 km^2 , 低于之前的研究结果 (宁小斌等, 2023; 阮方佑等, 2023)。通过以县域为单元统计发现, 2020 年分布在云南和贵州的石漠

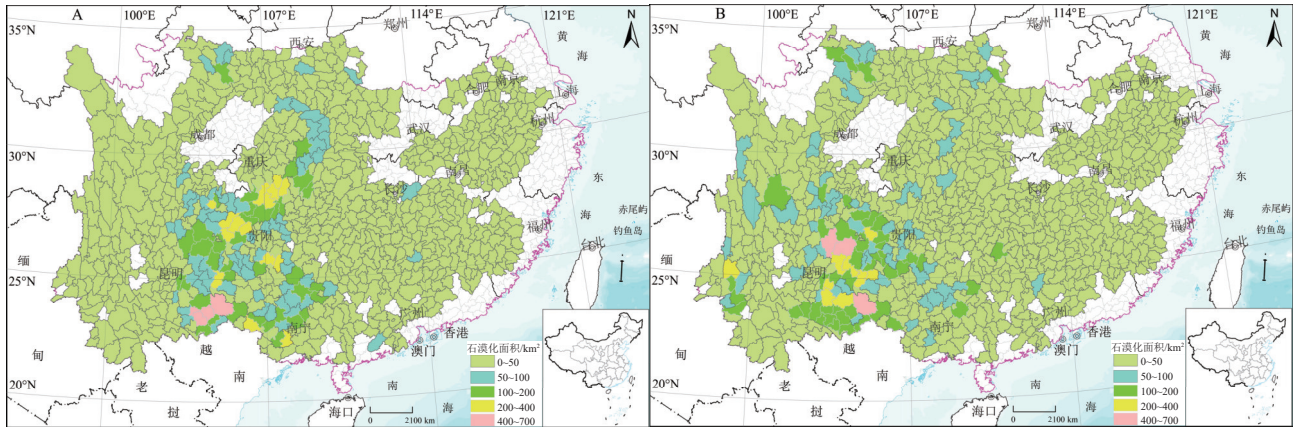


图7 基于县域统计的2020年耕地(A)和草地(B)区石漠化面积分布(底图根据自然资源部标准地图绘制,审图号:GS(2016)1612号,GS(2023)2763号)

Fig. 7 Area distribution of karst rocky desertification in cultivated land (A) and grassland (B) areas in 2020 based on county statistics

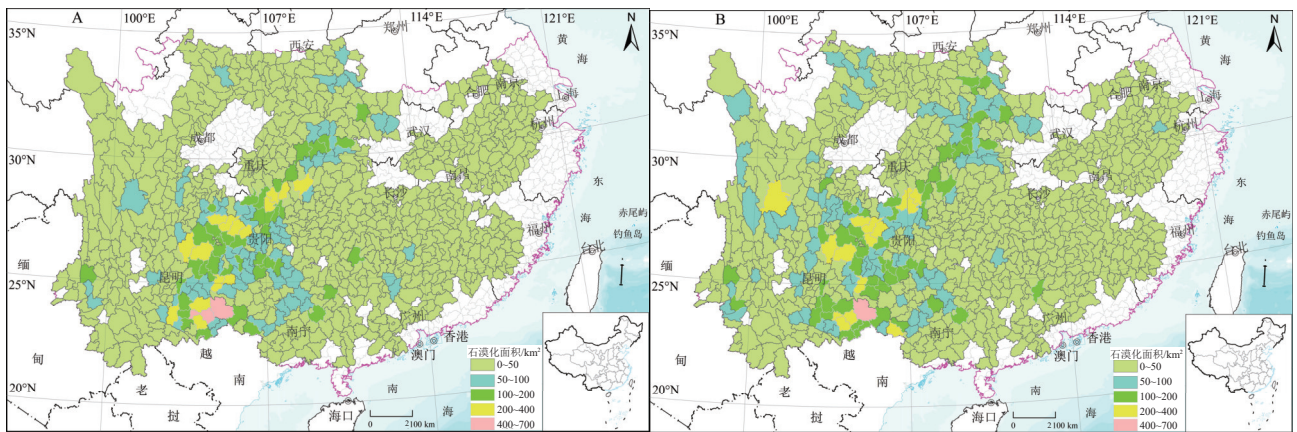


图8 基于县域统计的2020年8°~15°(A)和15°~25°(B)坡度区石漠化面积分布(底图根据自然资源部标准地图绘制,审图号:GS(2016)1612号,GS(2023)2763号)

Fig. 8 Area distribution of karst rocky desertification in slope areas of 8°~15° (A) and 15°~25° (B) in 2020 based on county statistics

化严重县共35个,占石漠化严重县总数的70%以上;其中云南东南部的广南县、文山市和砚山县石漠化面积均大于1000 km²。

作为生态修复与保护的重点地区之一,西南岩溶地区大范围开展石漠化综合治理工程已有20余年时间(罗旭玲等,2021;田湘云等,2022),其治理措施包括人工造林、退耕还林、封山育林、生态移民、循环生态产业发展等多种形式(中国科学院学部,2003;熊平生等,2010)。有研究显示,2006—2021年云南实施的石漠化治理工程修复面积为0.20×10⁴ km²,封山管护、封山育林育草等自然修复面积为0.53×10⁴ km²(阮方佑等,2023),但云南东部地区的治

理效果并不明显。实际上,林草植被恢复需考虑区域气候和地质地貌特征、水资源利用状况、人类活动导致的土地利用方式转变等因素(但新球等,2015;蒋忠诚等,2016;吴协保,2016);其中水资源条件对实施人工造林等生态修复工程具有重要影响,蒋忠诚等(2016)研究认为,云南岩溶区的年降雨量普遍在1000 mm左右,部分地区低于800 mm,而且单位岩溶面积的水资源开发量也处于较低水平。本次研究进一步分析各县域多年平均降水量和石漠化的关系,发现石漠化面积小于400 km²的县域,其降水量普遍在1200 mm以上,而石漠化面积大于400 km²的县域降水量在1100 mm以内,其中丘北县2020年

降水量仅为 770 mm。因此,目前在云南东部、贵州西部等石漠化严重区开展生态修复时,需考虑气候和水资源利用条件,选择耐旱性、适生性植物进行植被恢复营建。

4.2 地质条件对石漠化的影响

本次研究显示,2015 年和 2020 年峰丛洼地区石漠化面积为 $1.88 \times 10^4 \sim 2.33 \times 10^4 \text{ km}^2$,石漠化发生率在 19.50%~24.10% 之间,高于其他岩溶地貌类型区。峰丛洼地区位于云贵高原和广西丘陵平原过渡的大斜坡地带,属于扬子准地台和华南加里东褶皱带的大地构造单元(王世杰等,2013),由于强烈的构造运动与侵蚀、溶蚀作用叠加,塑造了现有陡峭而破碎的地貌景观,由此产生了较大的地表切割度和地形坡度,为水土流失和石漠化提供了动力潜能(王世杰,2002;李阳兵,2005)。张信宝等(2013)研究认为,以溶蚀为主的峰丛峰林地貌区,石漠化严重程度和分布面积较高,原因是该区坡地的石质化土地面积比例高、土层薄,在原始植被受人类活动破坏后,植被恢复的速度和质量都相对较差。因此,溶蚀作用形成的陡峭峰丛洼地地形,为石漠化的形成提供了重要的地质环境。

本次研究显示,云南、广西和贵州广泛分布的灰岩区,石漠化面积占南方石漠化总面积的 26% 以上,其中在云南广南县和砚山县,灰岩区石漠化面积均超过了 700 km^2 。与之相似,郭丽琴等(2017)发现云南文山州中部和西北部地区是石漠化的集中分布区,其灰岩地区石漠化发育率超过 33%。灰岩主要成分是可溶性极强的方解石,氧化硅、氧化铝等利于土壤形成的矿物含量极低;同时,灰岩风化后形成的风化面较为光滑,不利于成土物质堆积(张殿发等,2001),加之灰岩区溶蚀作用强烈,成土物质容易水土流失,使土壤浅薄稀少,零星分布在负地形(溶沟、溶槽等)中,从而形成石漠化。因此,在云南东部、贵州和广西西部的灰岩连片区开展石漠化治理时,应根据岩溶山地的生境异质性特点,着重考虑植被生长所需的水土条件,以草本和灌草等耐旱性植物作为先锋物种进行生态修复(李先琨等,2008;蒋忠诚等,2009)。

4.3 土地利用类型及人类活动对石漠化的影响

人类活动导致的土地利用方式转变,是石漠化形成的主要驱动力。研究显示,耕地、草地、灌木地石漠化面积占南方石漠化总面积比例在 70% 以上,

而在云南、贵州和广西 3 个省(区),该比例为 52.49%~53.37%。对比其他研究,李阳兵等(2006)认为石漠化土地在灌木林地、草地中发生的比例较大,罗旭玲等(2021)认为林地与耕地中石漠化发生最多,陈欢等(2020)认为发生石漠化的土地类型主要为旱地、有林地和灌木林地。耕地对石漠化的影响除与人口密度有关外,还与农村聚居的密集程度、单位面积劳动力有关,但其根本原因是人口压力超过了土地承载力,尤其是在峰丛洼地区,耕地资源匮乏使当地农民开垦陡坡种植(李阳兵等,2006,2014),这种耕作活动不仅破坏了坡地地表植被和土壤肥力,同时还导致了地表和地下土壤流失(张信宝等,2010;王正雄等,2019),降低了土壤抗侵蚀性,最终形成坡耕地石漠化景观(李阳兵等,2014;王正雄等,2019)。灌木林地发生的石漠化面积较大,主要在于土地利用类型的转变,当植被从有林地向疏林地、灌木林地转变时,植被覆盖度逐渐降低,生态系统稳定性下降,土壤侵蚀加剧而引发石漠化(彭文君等,2018)。

本次研究发现,耕地石漠化面积占比由 2015 年的 30.19% 降低至 2020 年的 26.54%,而在灌木地和草地,该比例分别升高至 21.74% 和 24.11%;其中在石漠化治理较显著的云南会泽县和丘北县,其草地石漠化面积分别达到 451.62 km^2 和 384.71 km^2 ,耕地石漠化面积均降至 120 km^2 左右。石漠化发生区由耕地向灌木地和草地转变,可能是农村人口向城市转移,区域人口承载力下降、撂荒地增加,使得原有的耕地转变为灌木地和草地。研究统计了南方岩溶县的人口数据,发现 2020 年农村人口为 6657.32×10^4 人,相比 2015 年减少 36.55%;而 2020 年城镇人口为 5858.98×10^4 人,相比 2015 年增加 57.94%。空间分布显示(图 9),从 2015—2020 年,岩溶县农村人口总体趋于减少,但云南东部和贵州西北部的农村人口仍维持在较高水平;其中石漠化严重县的平均农业人口为 33.40×10^4 人,而其他岩溶县仅为 20.30×10^4 人。这表明岩溶地区农村人口向城市的转移,一定程度上缓解了土地承载压力,相应地降低了石漠化发生率;而石漠化严重县仍可能面临人口压力过大、耕地资源不足的困境,这将进一步导致坡地开垦,加剧石漠化发生。研究发现,8°~25°坡度区分布的石漠化面积占比超过 52%,其中在贵州道真县、湖北建始县等岩溶槽谷区的调查发现,花椒种植和林地开荒导致的 8°~25°坡度区石漠化面积比例分别

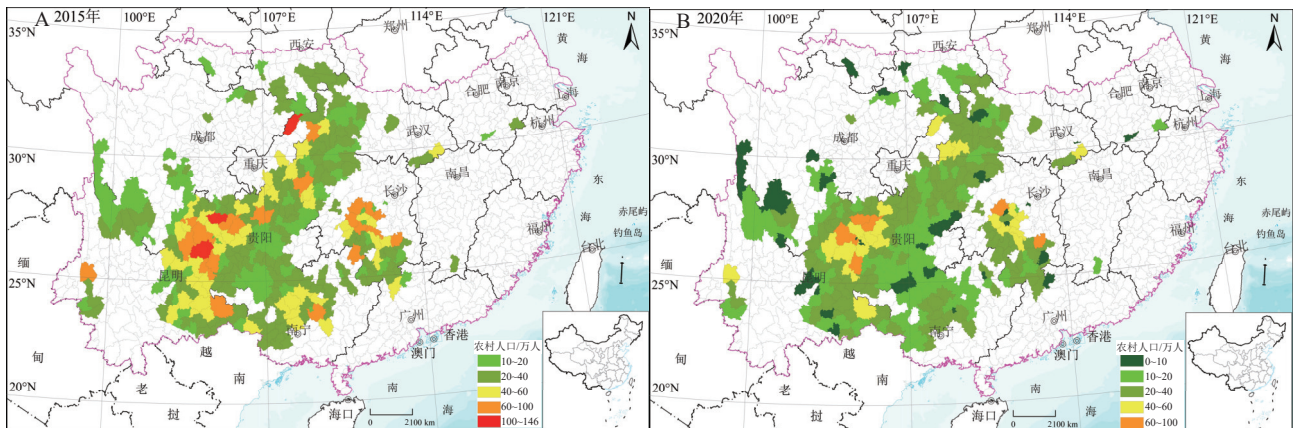


图9 2015年(A)和2020年(B)南方岩溶县农村人口分布(底图根据自然资源部标准地图绘制,审图号:GS(2016)1612号,GS(2023)2763号)

Fig. 9 Rural population distribution in karst counties in southern China in 2015 (A) and 2020 (B)

达到了 66.18% 和 69.53%。因此,后期在湖北西部、贵州北部等岩溶槽谷区,以及滇东南等峰丛洼地区开展石漠化治理时,应注重对中高坡度区的石漠化治理,通过采取退耕还林、杜绝开垦新的坡耕地、不同坡位林灌草地和经果林合理配置等措施(李阳兵等, 2013; 余李敏等, 2022),加强岩溶区坡耕地水土保持和林草植被恢复,实现岩溶区生态功能与经济效益稳步提升。

5 结 论

本次研究基于遥感解译与地面调查相结合的方式,以县域为尺度探讨了南方 16 省区石漠化的时空变化及其成因。主要结论如下。

(1)从 2015—2020 年,南方石漠化面积和石漠化严重县数量逐步减少;云南、贵州和广西仍是石漠化分布最大的地区,浙江、福建、安徽、江苏、江西、河南、陕西、甘肃等省区石漠化面积小于 $0.19 \times 10^4 \text{ km}^2$;广西都安县、马山县、德保县,贵州思南县、威宁县,云南会泽县、丘北县,以及四川巴塘县石漠化问题改善显著;云南广南县、文山市和砚山县石漠化问题仍旧严重。区域气候和水资源的限制,可能导致云南东部地区石漠化治理效果相对较差。

(2)灰岩区因溶蚀作用强烈、成土速率缓慢、水土流失严重等特点,导致石漠化主要发生在该岩性区,而以灰岩为主的峰丛洼地区集中分布了 30% 的石漠化严重县。因此,在云南东部、广西和贵州西部等灰岩连片区开展石漠化治理时,需考虑植被生长所需的水土条件,优先选择草本和灌草等耐旱性植

物进行生态修复。

(3)耕地、草地、灌木地是石漠化发生的主要土地类型区,随着农村人口向城市转移,区域人口承载力下降、撂荒地增加,使石漠化发生地由耕地向灌木地和草地转变;农村人口减少是近年来石漠化面积减少的主要原因,而石漠化严重县仍面临农村人口压力过大和坡地开垦的困境,这将导致 $8^\circ \sim 25^\circ$ 坡度区石漠化问题加剧。

References

- Academic Divisions of the Chinese Academy of Sciences. 2003. Several suggestions on promoting comprehensive management of rocky desertification in Southwestern Karst Areas[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 18(3): 169 (in Chinese with English abstract).
- Bai X, Zhang S, Li C, et al. 2023. A carbon-neutrality-capacity index for evaluating carbon sink contributions[J]. *Environmental science and ecotechnology*, 15: 100237.
- Cao J H, Yuan D X, Tong L Q. 2008. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China[J]. *Pratacultural Science*, 25(9): 40–50 (in Chinese with English abstract).
- Cao J H, Yuan D X, Zhang C, et al. 2004. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China[J]. *Earth and Environment*, 32(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Chen H, Bai X Y, Li Y B, et al. 2020. The evolution of rocky desertification and its response to land use changes in Wanshan Karst area, Tongren City, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 37(1): 24–35 (in Chinese with English abstract).
- Chen Q, Zhang C, Tian X Y, et al. Spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Yunnan Province from 2000 to 2020[J]. *Journal Zhejiang A&F University*, 40(2): 417–426 (in Chinese with English abstract).

- Dan X Q, Bai J H, Wu X B, et al. 2015. Research on the general idea of the second phase of the rocky desertification comprehensive treatment project[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 34(3): 62–66 (in Chinese with English abstract).
- Geology Department of Chinese Academy of Sciences. 1995. Consultation suggestions on sustainable development and technological poverty alleviation in Southwest China Karst Mountain[J]. *Advance in Earth Sciences*, 10(2): 113–115 (in Chinese with English abstract).
- Gong A L, Pu Q Y. 2019. Some thoughts on comprehensive treatment project of rocky desertification in Northwest Yunnan[J]. *Forestry Construction*, (5): 57–60 (in Chinese with English abstract).
- Guo L Q, Zhao Z F, Dai Q X, et al. 2017. Temporal and spatial evolution and genesis of rocky desertification based on RS and GIS in Wenshan Prefecture[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 29(S1): 106–113 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z C, Li X K, Zeng F P, et al. 2009. Study of fragile ecosystem reconstruction technology in the karst peak-cluster mountain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(2): 155–166 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z C, Luo W Q, Tong L Q, et al. 2016. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of southwest China in the 21st century[J]. *Carsologica Sinica*, 35(5): 461–468 (in Chinese with English abstract).
- Li X K, He C X, Tang J S, et al. 2008. Evolution and ecological processes of karst ecosystem of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, (1): 80–86, 91 (in Chinese with English abstract).
- Li Y B, Bai X Y, Qiu X C, et al. 2006. The correlation analysis of desertification of karst rock and land use patterns[J]. *Resources Science*, 28(2): 67–73 (in Chinese with English abstract).
- Li Y B, Luo G J, Bai X Y, et al. 2014. The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification—cases study based on typical peak-cluster depression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(9): 2195–2207 (in Chinese with English abstract).
- Li Y B, Luo G J, Cheng A Y, et al. 2023. A typical case study on evolution of karst rocky desertification in Houzhaihe, Puding County, central Guizhou Province, China[J]. *Geographical Research*, 32(5): 828–838 (in Chinese with English abstract).
- Li Y B, Tan Q, Wang S J. 2005. Current status, problems analysis and basic framework of karst rocky desertification research[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, (3): 27–34 (in Chinese with English abstract).
- Liu P, Wang Y, Liu Z B, et al. 2019. Distribution and division of stony desertification on county scale[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 36(5): 965–973 (in Chinese with English abstract).
- Lu T, Hu W Y, Zhang J. 2021. Spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of rocky desertification in karst area of Eastern Yunnan[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 35(8): 71–79.
- Luo X L, Wang S J, Bai X Y, et al. 2021. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest Karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(2): 680–693 (in Chinese with English abstract).
- Ning X B, Wu X B, Huang J W, et al. 2023. Main results of the fourth rocky desertification survey in karst area and analysis of rocky desertification control situation[J]. *Forest Resources Management*, 17(3): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Peng W J, Shu Y G. 2018. Assessment on ecological risk of land use spatial change at county level in the rocky desertification mountainous area based on GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(1): 342–348, 355 (in Chinese with English abstract).
- Peng X, Wu X B, Huang J W, et al. 2023. Analysis on overall situation and strategy of rocky desertification controlling karst areas of China[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 42(4): 70–74 (in Chinese with English abstract).
- Ruan F Y, Wu N, An K, et al. 2023. Dynamic change of rocky desertification land in karst area of Yunnan Province[J]. *Forest Inventory and Planning*, 48(3): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- Shi Y C, Shu Y G. 2017. Analysis on karst rocky desertification temporal and spatial variation characteristics and driving factors—A case study of Qinglong county of Guizhou Province[J]. *Forest Resources Management*, 11(1): 135–143, 152 (in Chinese with English abstract).
- Song T Q, Peng W X, Du H, et al. 2014. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(18): 5328–5341 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y P, Zhou Z F, Zhao Y L, et al. 2022. Evolution and distribution pattern of land use and rocky desertification in karst mountainous area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 29(1): 311–318 (in Chinese with English abstract).
- Tian X Y, Zhang C, Chen Q, et al. 2022. Influence of land use on landscape pattern evolution of rocky desertification in karst areas of Yunnan, China[J]. *Forest Resources Management*, 14(1): 61–69 (in Chinese with English abstract).
- Tong X, Brandt M, Yue Y, et al. 2018. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 1(1): 44–50.
- Wang Q, Zhao X Q, Pu J W, et al. 2021. Study on temporal and spatial pattern evolution of karst rocky desertification region of southeast Yunnan: A case study of Guannan county[J]. *Carsologica Sinica*, 40(4): 707–717 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J, Li Y B, Li R L. 2003. Karst rocky desertification: formation background evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences*, (6): 657–666 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J, Zhang X B, Bai X Y. 2013. Discussion on nomenclature of the karst desertification regions and illustration for their environment characteristics in Southwest China[J]. *Journal of Mountain Science*, 31(1): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J, Zhang X B, Bai X Y. 2015. An outline of karst geomorphology zoning in the karst areas of Southern China[J]. *Mountain Research*, 33(6): 641–648 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J. 2002. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, (2): 31–35 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

Wang Z X, Jiang Y J, Zhang Y Z, et al. 2019. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and geodetectors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 74(5): 1025–1039 (in Chinese with English abstract).

Wu X B. 2016. Realistic significance of carrying forward the project phase ii for comprehensive treatment of rocky desertification in China[J]. *Carsologica Sinica*, 35(5): 469–475 (in Chinese with English abstract).

Wu Y, Zhou Z F, Zhao X, et al. 2020. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in plateau mountainous areas based on remote sensing cloud computing platform: A case study of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 39(2): 196–205 (in Chinese with English abstract).

Xiong P S, Yuan D X, Xie S Y. 2010. Progress of research on rocky desertification in South China Karst Mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 29(4): 355–362 (in Chinese with English abstract).

Xu H F, Wang Y, Liu Y Y G, et al. 2022. Analysis of the spatial and temporal evolution and driving factors of rocky desertification in typical cluster depression areas in the past 30years based on google earth engine—Taking Xichou County as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 29(4): 407–414 (in Chinese with English abstract).

Yu L M, Li Y B, Luo G J, et al. 2022. Spatiotemporal evolution and driving factors of slope cultivated land in karst mountainous areas of central Guizhou Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 38(11): 289–298 (in Chinese with English abstract).

Yuan D X. 2008. Global view on Karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China[J]. *Practical Science*, 25(9): 19–25 (in Chinese with English abstract).

Zhang D F, Wang S J, Zhou D Q, et al. 2001. Intrinsic driving mechanism of land rocky desertification in karst regions of Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 21(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).

Zhang X B, Wang S J, Bai X Y, et al. 2013. Relationships between the spatial distribution of karst land desertification and geomorphology, lithology, precipitation, and population density in Guizhou Province[J]. *Earth And Environment*, 41(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).

Zhang X B, Wang S J, Meng T Y, et al. 2010. Mechanisms for cultivation-driving land rocky desertification on carbonate rock slopes in the karst region of Southwest China[J]. *Earth and Environment*, 38(2): 123–128 (in Chinese with English abstract).

Zhang Y W, Liu T W, Huang J W, et al. 2023. Dynamic change and reason analysis of rocky desertification land in karst area of China during 2016—2021[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 42(3): 67–72 (in Chinese with English abstract).

Zhou X W, Wu X B, Ning X B, et al. 2023. Status and main distribution characteristics of rocky desertification land in karst area of China[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 42(2): 60–64 (in Chinese with English abstract).

Zhu, M, Zhou, Z, Wu, X, et al. 2024. Response of vegetation carbon sequestration potential to the effectiveness of vegetation restoration in karst ecologically fragile areas in Guizhou, southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 158: 111495.

附中文参考文献

曹建华, 袁道先, 童立强. 2008. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. *草业科学*, 25(9): 40–50.

曹建华, 袁道先, 章程, 等. 2004. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. *地球与环境*, 16(1): 1–8.

陈欢, 白晓永, 李阳兵, 等. 2020. 铜仁市万山喀斯特地区石漠化演变及其对土地利用变化的响应[J]. *农业资源与环境学报*, 37(1): 24–35.

陈棋, 张超, 田湘云, 等. 2023. 云南省 2000—2020 年石漠化时空演变分析[J]. *浙江农林大学学报*, 40(2): 417–426.

但新球, 白建华, 吴协保, 等. 2015. 石漠化综合治理二期工程总体思路研究[J]. *中南林业调查规划*, 34(3): 62–66.

龚傲龙, 普千益. 2019. 关于滇西北地区县级石漠化综合治理工程的几点思考[J]. *林业建设*, (5): 57–60.

郭丽琴, 赵志芳, 代启学, 等. 2017. 基于 RS 和 GIS 文山州石漠化时空演变特征及成因研究[J]. *国土资源遥感*, 29(S1): 106–113.

国家发展改革委、国家林业局、农业部, 等. 2016. 岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划[R]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzgh/201706/t20170614_1196796.html. 1–27.

国家发展改革委, 科技部, 自然资源部, 等. 2021. 生态保护和修复支撑体系重大工程建设规划 (2021–2035 年) [R]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/23/content_5664114.htm. 1–45.

国家林业和草原局. 2018. 中国岩溶地区石漠化状况公报[R]. <https://www.forestry.gov.cn/main/3457/20181214/161611806917453.html>.

蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 等. 2009. 岩溶峰丛山地脆弱生态系统重建技术研究[J]. *地球学报*, 30(2): 155–166.

蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 等. 2016. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. *中国岩溶*, 35(5): 461–468.

李先琨, 何成新, 唐建生, 等. 2008. 广西岩溶山地生态系统特征与恢复重建[J]. *广西科学*, (1): 80–86, 91.

李阳兵, 白晓永, 邱兴春, 等. 2006. 喀斯特石漠化与土地利用相关性研究[J]. *资源科学*, 28(2): 67–73.

李阳兵, 罗光杰, 白晓永, 等. 2014. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究[J]. *生态学报*, 34(9): 2195–2207.

李阳兵, 罗光杰, 程安云, 等. 2013. 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*, 32(5): 828–838.

李阳兵, 谭秋, 王世杰. 2005. 喀斯特石漠化研究现状、问题分析与基本构架[J]. *中国水土保持科学*, (3): 27–34.

刘鹏, 王妍, 刘宗滨, 等. 2019. 云南省县域尺度的石漠化分布与区划[J]. *浙江农林大学学报*, 36(5): 965–973.

卢涛, 胡文英, 张军. 2021. 滇东喀斯特地区石漠化时空演化特征研究——以曲靖市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 35(8): 71–79.

罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 等. 2021. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. *生态学报*, 41(2): 680–693.

- 宁小斌, 吴协保, 黄俊威, 等. 2023. 岩溶地区第四次石漠化调查主要结果及防治形势分析[J]. 林业资源管理, 17(3): 9–14.
- 彭文君, 舒英格. 2018. 基于 GIS 的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J]. 水土保持研究, 25(1): 342–348, 355.
- 彭玺, 吴协保, 黄俊威, 等. 2023. 中国岩溶地区石漠化防治总体形势与策略分析[J]. 中南林业调查规划, 42(4): 70–74.
- 阮方佑, 吴宁, 安科, 等. 2023. 云南省岩溶地区石漠化土地动态变化研究[J]. 林业调查规划, 48(3): 13–18.
- 史迎春, 舒英格. 2017. 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[J]. 林业资源管理, 11(1): 135–143, 152.
- 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 2014. 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[J]. 生态学报, 34(18): 5328–5341.
- 孙耀鹏, 周忠发, 赵宇鸾, 等. 2022. 喀斯特山区土地利用演变与石漠化分布格局[J]. 水土保持研究, 29(1): 311–318.
- 田湘云, 张超, 陈棋, 等. 2022. 云南省岩溶地区土地利用对石漠化景观格局演变的影响分析[J]. 林业资源管理, 14(1): 61–69.
- 王茜, 赵筱青, 普军伟, 等. 2021. 滇东南喀斯特区域石漠化时空格局演变研究——以广南县为例[J]. 中国岩溶, 40(4): 707–717.
- 王世杰. 2002. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, (2): 31–35.
- 王世杰, 张信宝, 白晓永. 2013. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J]. 山地学报, 31(1): 18–24.
- 王世杰, 张信宝, 白晓永. 2015. 中国南方喀斯特地貌分区纲要[J]. 山地学报, 33(6): 641–648.
- 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 2003. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, (6): 657–666.
- 王正雄, 蒋勇军, 张远瞩, 等. 2019. 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, 74(5): 1025–1039.
- 吴协保. 2016. 继续推进岩溶地区石漠化综合治理二期工程的现实意义[J]. 中国岩溶, 35(5): 469–475.
- 吴跃, 周忠发, 赵馨, 等. 2020. 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, 39(2): 196–205.
- 熊平生, 袁道先, 谢世友. 2010. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J]. 中国岩溶, 29(4): 355–362.
- 徐红枫, 王妍, 刘云根, 等. 2022. 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[J]. 水土保持研究, 29(4): 407–414.
- 余李敏, 李阳兵, 罗光杰, 等. 2022. 贵州中部岩溶山区坡耕地时空演变特征及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 38(11): 289–298.
- 袁道先. 2008. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 25(9): 19–25.
- 张殿发, 王世杰, 周德全, 等. 2001. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制[J]. 水土保持通报, 21(4): 1–5.
- 张信宝, 王世杰, 白晓永, 等. 2013. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系[J]. 地球与环境, 41(1): 1–6.
- 张信宝, 王世杰, 孟天友, 等. 2010. 农耕驱动西南喀斯特地区坡地石质化的机制[J]. 地球与环境, 38(2): 123–128.
- 张亚威, 刘庭威, 黄俊威, 等. 2023. 我国岩溶地区 2016—2021 年石漠化土地动态变化及其原因分析[J]. 中南林业调查规划, 42(3): 67–72.
- 中国科学院地学部. 1995. 西南岩溶石山地区持续发展与科技脱贫咨询建议[J]. 地球科学进展, 10(2): 113–115.
- 中国科学院学部. 2003. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议[J]. 中国科学院院刊, 18(3): 169.
- 中华人民共和国水利部. 2009. 岩溶地区水土流失综合治理技术标准[S].
- 周学武, 吴协保, 宁小斌, 等. 2023. 我国岩溶地区石漠化土地现状及主要分布特征[J]. 中南林业调查规划, 42(2): 60–64.