

云南省 2000—2020 年石漠化时空演变分析

陈 棋¹, 张 超^{1,2}, 田湘云¹, 史小蓉¹, 张玉薇¹, 王 妍^{1,2}

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

摘要: 【目的】在宏观尺度利用遥感手段识别和提取石漠化斑块信息, 定量分析石漠化的空间分布特征和时序演变过程, 可为中国西南地区石漠化的发生、发展过程研究提供技术手段和数据支撑。【方法】以云南省为研究区, 基于谷歌地球引擎 (Google Earth Engine) 平台, 以 2000、2010 和 2020 年为研究时段, 采用决策树分类法定量提取石漠化斑块信息; 通过时空演变模型分析云南省石漠化的时空演变过程和特征。【结果】①研究时段内, 云南省石漠化状况整体得到改善, 石漠化占国土面积比例从 9.65% 下降至 6.48%, 但局部地区仍在恶化。②云南省石漠化空间分布呈东多西少的特征, 其中昭通、曲靖、文山、红河和昆明等地区的石漠化分布面积较大, 占全省石漠化发生面积的 65.42%~72.14%。③石漠化演变流向复杂, 既转移至石漠化程度高的等级又向石漠化程度低的等级转移, 边治理边破坏的现象未被遏制。④极重度石漠化修复所需的周期较长, 近 20 a 间云南省极重度石漠化大部分转移至重度石漠化。⑤石漠化内部演变过程剧烈, 轻度石漠化和中度石漠化的综合变化速率较快, 易于改善的同时亦存在较高的恶化风险, 需加以重视。【结论】依据相关规程中的石漠化等级判定标准, 采用决策树分类法, 可准确提取宏观尺度的石漠化斑块信息。云南省石漠化土地面积呈减少趋势, 空间分布不均匀, 不同石漠化等级之间存在相互转化的现象。图 3 表 4 参 25

关键词: 石漠化; 表征因子; 遥感识别; 时空分布; 演变过程; 云南省

中图分类号: S758.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)02-0417-10

Spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Yunnan Province from 2000 to 2020

CHEN Qi¹, ZHANG Chao^{1,2}, TIAN Xiangyun¹, SHI Xiaorong¹, ZHANG Yuwei¹, WANG Yan^{1,2}

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

Abstract: [Objective] This study aims to identify and extract information of rocky desertification patches at macroscopic scale by remote sensing tools and quantitatively analyze the spatial distribution characteristics and temporal evolution process of rocky desertification, so as to provide technical means and data support for the study of the occurrence process and development of rocky desertification in southwest China. [Method] Information of rocky desertification patches in Yunnan Province in 2000, 2010 and 2020 was extracted quantitatively by decision tree classification method based on Google Earth Engine platform. The spatio-temporal evolution model was used to analyze the spatio-temporal evolution process and characteristics of rocky desertification. [Result] (1) The overall rocky desertification situation in Yunnan Province was improved during the study period but still deteriorated in some areas. The ratio of rocky desertification to land area decreased from 9.65% to 6.48%. (2) The spatial distribution of rocky desertification in Yunnan Province was characterized by more in

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32160405); 云南省“万人计划”人才培养项目 (YNWR-QNBJ-2018-334)

作者简介: 陈棋 (ORCID: 0000-0001-9440-6199), 从事森林经理学研究。E-mail: 1789480833@qq.com。通信作者:

张超 (ORCID: 0000-0003-3126-6103), 教授, 博士生导师, 从事森林经理学研究。E-mail: zhchgis@126.com

the east and less in the west, and the major distribution areas were Zhaotong, Qujing, Wenshan, Honghe and Kunming, accounting for 65.42%–72.14% of the occurrence area of rocky desertification in the whole province. (3) The evolution of rocky desertification tended to be complex, which shifted to both high grade and low grade of rocky desertification, and the phenomenon of destruction while treatment was not curbed. (4) Most of the extremely severe rocky desertification has shifted to severe rocky desertification in the past 20 years, indicating that it would take a long time for the extremely severe rocky desertification to be restored. (5) The internal evolution process of rocky desertification was intense, and the comprehensive change rate of light rocky desertification and moderate rocky desertification was fast. It was easy to improve but also had a higher risk of deterioration. [Conclusion] The relevant protocols are used as criteria for determining the grade of rocky desertification, and the macro-scale information of rocky desertification patches can be accurately extracted by decision tree classification method. The area of rocky desertification in Yunnan Province is decreasing, with uneven spatial distribution and mutual transformation among different grades of rocky desertification. [Ch, 3 fig. 4 tab. 25 ref.]

Key words: rocky desertification; characterization factor; remote sensing identification; spatio-temporal distribution; evolution process; Yunnan Province

石漠化作为一种次生的自然灾害, 指在脆弱的岩溶地区, 由于受到不合理的人类活动干扰, 发生地表植被破坏、土壤侵蚀和基岩裸露等退化极端现象, 是中国第三大生态问题^[1-2]。中国西南地区岩溶地貌类型齐全、石漠化分布范围广^[3], 其中以云南、贵州尤为典型。与贵州省不同, 云南省岩溶地貌分布广泛, 全省 129 个县(市、区)中, 122 个存在石漠化现象, 且在湿润、半湿润以及半干旱、干旱气候条件下均有发生^[4]。云南省严重的石漠化问题, 已造成植被逆演替、水土流失、人地矛盾加剧等问题, 严重威胁长江、珠江和澜沧江等河流的生态安全, 制约着区域经济发展和生态文明建设^[5-6]。近年来, 国内外专家学者对石漠化信息的遥感提取方法^[7-8]、时空演变规律^[9-10]、驱动机制^[11-12]、恢复治理^[13-14]以及修复评价^[15-16]等进行了系统性研究, 为准确掌握石漠化的时空分布信息和演变规律、修复治理区域生态起到关键作用。利用遥感手段对石漠化信息的提取和时空演变过程的探索, 如李阳兵等^[17]基于岩石裸露率将石漠化划分为 6 个等级, 人工目视判别后寨河流域 5 个地点石漠化信息, 并引入石漠化变化重要性指数分析了岩溶山地石漠化的变化趋势; 王茜等^[18]选取岩石裸露率和植被+土被覆盖度, 将石漠化划分为 5 个等级, 采用人机交互方式解译广南县石漠化斑块, 使用石漠化转移矩阵模型探讨了生态治理后的石漠化格局分布变化; 习慧鹏等^[19]依据岩石裸露率、植被覆盖度和坡度, 将石漠化划分为 6 级, 采用地理探测器获得表征因子贡献率, 进行叠加分析提取普定县石漠化斑块信息, 构建因子变化模型对表征因子与石漠化时空演变特征进行了评价; 左太安等^[20]以岩石裸露率、植被+土被覆盖度、土地利用类型为指标, 建立了 6 级分类体系, 采用决策树分类法完成了毕节试验区石漠化斑块信息提取, 分析了石漠化的时空演变过程。上述研究发现: 通过选取若干个遥感表征因子, 建立石漠化遥感识别分类体系, 所选取的表征因子和分类体系不一致, 会增加石漠化斑块信息提取的不确定性, 无法保障石漠化斑块信息提取的一致性, 不易探析各研究结果石漠化时空演变规律的异同。目前多数研究采用人机交互解译的方法进行小尺度石漠化斑块信息提取, 难以满足大尺度石漠化信息提取的需求。

针对上述问题, 本研究基于 Landsat 系列卫星影像, 以云南省为研究区, 依据《岩溶地区石漠化监测技术规定》(2011 年修订), 定量提取表征因子, 采用决策树分类法完成 2000、2010、2020 年石漠斑块信息的提取, 引入多个土地利用动态变化模型定量分析云南省石漠化的时空演变过程和特征, 旨在为宏观石漠化监测及演变规律研究提供方法。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

云南省 (21°08′~29°15′N, 97°31′~106°11′E) 国土总面积为 $39.41 \times 10^4 \text{ km}^2$, 辖 16 个地级市、129 个县

级行政区。境内主要为山地高原地形，地势呈阶梯状自西北向东南逐级降低，平均海拔约 2 000 m。属亚热带高原季风气候，受季风气候和地形影响，区域差异和垂直变化显著，年均气温为 5~24 ℃，南北温差约 19 ℃；降水充沛，但时空分布不均，年均降水量约 1 100 mm，集中于 5—10 月。地质构造复杂，基岩分布以沉积岩和变质岩面积最广，其中，碳酸岩主要分布于滇东北、滇东、滇东南以及滇西北等地区。植被类型丰富，有热带雨林、季雨林、季风常绿阔叶林和暖热针叶林、半湿润常绿阔叶林和暖温性针叶林、湿润常绿阔叶林、温凉性针叶林及寒温性针叶林^[21]。

1.2 数据收集与预处理

收集 2000、2010 和 2020 年共 3 个时段的云南省 Landsat 系列卫星遥感影像、地质分布数据和土地利用分布数据。其中，遥感影像来源于谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 平台，空间分辨率为 30 m，已经过大气校正、几何校正和地形校正等预处理。1:50 万云南省地质分布数据来源于中国地质调查局地质云 (<https://geocloud.cgs.gov.cn>)。土地利用分布数据来源于全球地表覆盖数据产品平台 (Globeland 30)，空间分辨率为 30 m (<http://www.globallandcover.com/>)。

对基础数据进行以下预处理：①基于 GEE 平台，筛选 2000、2010 和 2020 年各年 1 月 1 日至 12 月 31 日影像，借助影像数据集中的 QA 频段进行云像元掩膜，基于去云后影像采用均值算法合成，完成拼接和裁剪，获得年度最优影像^[22-23] (以上步骤均以代码实现)；②对云南省地质分布数据进行几何校正，确定岩溶地区范围。

1.3 石漠化表征因子提取

石漠化表征因子是石漠化识别和等级评定的重要依据。诸多研究采用植被覆盖度和岩石裸露率构建评定体系。此外，有学者通过坡度和地表结构稳定性的关系，将植被覆盖度、岩石裸露率和坡度作为石漠化评定指标。鉴于石漠化表征因子选取标准的不一致，本研究依据《岩溶地区石漠化监测技术规定》(2011 年修订)，选取土地利用类型、岩石裸露率、植被类型、植被覆盖度和土层厚度共 5 个表征因子作为石漠化评定指标。

石漠化表征因子的提取过程如下：①计算归一化岩石指数 (I_{NDR}) 和归一化植被指数 (I_{NDV})，采用像元二分法模型计算岩石裸露率 (R_{E}) 和植被覆盖度 (F_{VC})；②依据岩溶地区岩石裸露率与土层厚度 (S_{T}) 空间关联进行岩溶区土层厚度定量反演^[24]；③基于土地利用数据将研究区植被类型划分为乔木型、灌木型、草丛型、作物型和无植被型。各石漠化表征因子的计算方法如表 1 所示。

1.4 石漠化斑块信息提取

完成上述 5 个表征因子的计算 (图 1)，将岩溶地区石漠状况分为无石漠化土地、潜在石漠化土地和石漠化土地 3 种类型，其中，石漠化土地又细分为轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化和极重度石漠化 4 个等级。石漠化信息提取过程如下：①基于岩石裸露率、植被覆盖度和土地利用类型，采用决策树分类法进行岩溶地区土地类型划分；②根据评定标准计算岩石裸露率、植被覆盖度、植被类型、土层厚度的分值，根据综合评分值确定石漠化程度。

1.5 石漠化时空演变过程分析

为了探析石漠化的时空演变特征，引入土地利用动态变化分析模型研究单一等级石漠化动态度、综合等级石漠化动态度、石漠化面积转移矩阵及石漠化双向变化率，定量描述石漠化的时空演变过程。

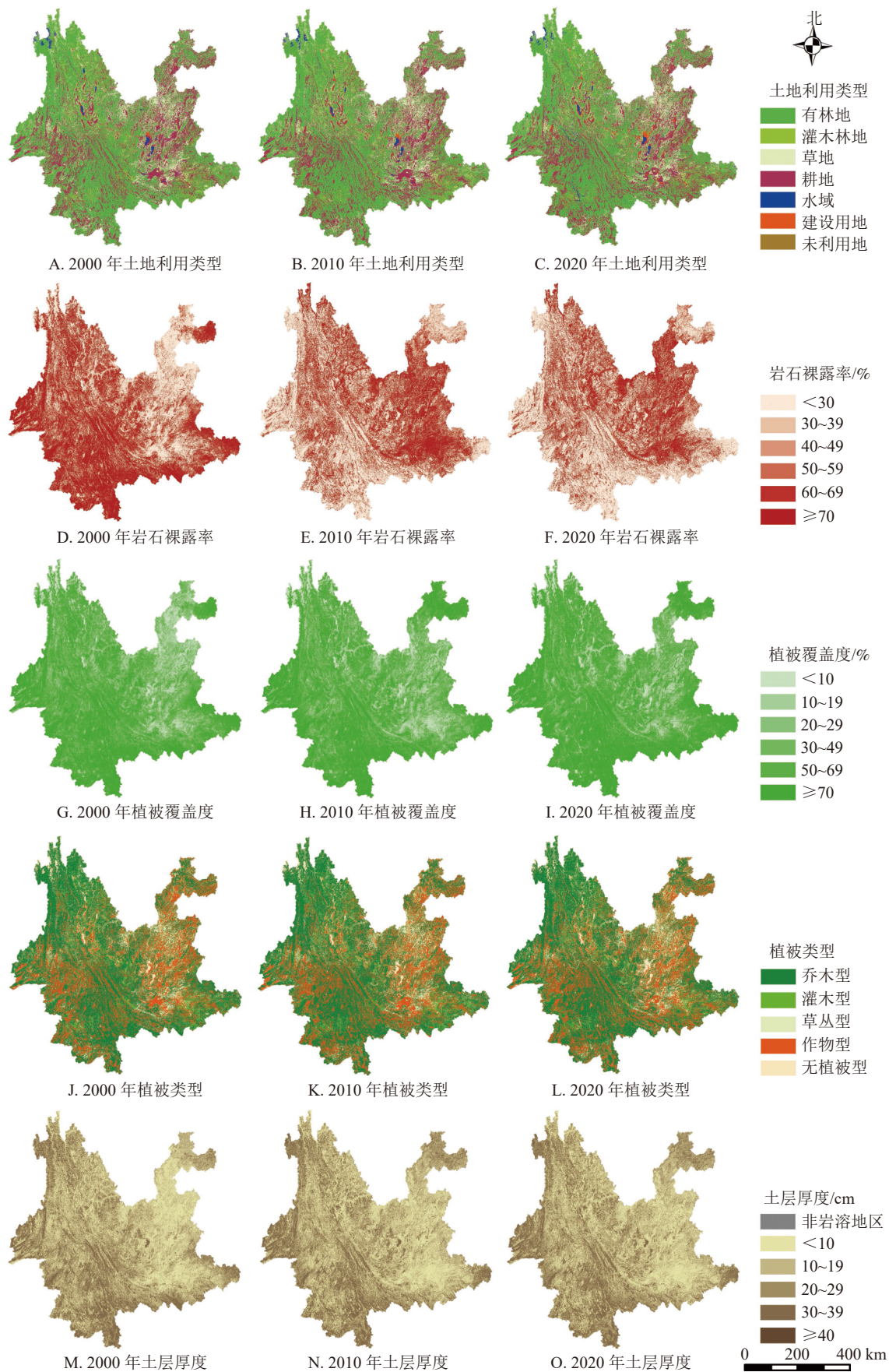
①单一等级石漠化动态度：用于表示研究时段内单一等级石漠化的变化幅度，是石漠化等级变化差异和未来变化预测的重要依据。计算公式为：

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

表 1 石漠化表征因子计算公式

Table 1 Calculation formulas of rocky desertification indicators	
表征指标	计算公式
归一化岩石指数	$I_{\text{NDR}} = (B_{\text{SWIR}} - B_{\text{NIR}}) / (B_{\text{SWIR}} + B_{\text{NIR}})$
归一化植被指数	$I_{\text{NDV}} = (B_{\text{NIR}} - B_{\text{RED}}) / (B_{\text{NIR}} + B_{\text{RED}})$
岩石裸露率	$R_{\text{E}} = (I_{\text{NDR}} - I_{\text{NDR-min}}) / (I_{\text{NDR-max}} - I_{\text{NDR-min}})$
植被覆盖度	$F_{\text{VC}} = (I_{\text{NDV}} - I_{\text{NDV-min}}) / (I_{\text{NDV-max}} - I_{\text{NDV-min}})$
土层厚度	$S_{\text{T}} = 0.0036R_{\text{E}}^2 - 0.7179R_{\text{E}} + 40.312$

说明：取 I_{NDR} 累计贡献率为 5% 和 95% 的值作为 $I_{\text{NDR-min}}$ 和 $I_{\text{NDR-max}}$ ；取 I_{NDV} 累计贡献率为 5% 和 95% 的值作为 $I_{\text{NDV-min}}$ 和 $I_{\text{NDV-max}}$ ^[10]。 B_{SWIR} 、 B_{NIR} 、 B_{RED} 分别表示近红外、红外、红光波段的像元值



地图审图号：云S(2023)3号

图 1 石漠化表征因子示意图

Figure 1 Rocky desertification characterization factors

式 (1) 中: K_i 为研究时段内第 i 类石漠化类型动态度 (%); U_a 和 U_b 分别为研究初期及研究末期该类石漠化类型的面积 (km^2); T 为研究时段长度 (a)。

②综合等级石漠化动态度: 反映研究时段内石漠化总体的变化幅度和速度。计算公式为:

$$K_n = \sum_{i=1}^n \frac{(|U_{bi} - U_{ai}|)}{S} \times \frac{1}{T} \times 100\%。 \quad (2)$$

式 (2) 中: K_n 为研究时段内综合等级石漠化类型动态度 (%); U_{ai} 、 U_{bi} 为研究区域内第 i 类石漠化类型在研究起始年和终止年的统计面积 (km^2); S 为研究区总面积 (km^2); n 为石漠化类型数量。

③石漠化面积转移矩阵: 反映石漠化各等级内部的变化特征, 亦能描述研究区不同时期各等级石漠化的转换方向和转换量。计算公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}。 \quad (3)$$

式 (3) 中: S_{ij} 为研究时段内第 i 等级石漠化转换成第 j 等级石漠化的面积 (km^2); n 为转换前后的石漠化等级数量。

④石漠化双向变化率: 是对石漠化内部变化速度的量化表达, 反映研究区各等级石漠化转换速度的差异。计算公式为:

$$P_i = \frac{\sum_{ij} [(U_{ij} + U_{ji}) / U_i]}{T} \times 100\%。 \quad (4)$$

式 (4) 中: P_i 为第 i 等级石漠化的双向变化率 (%); U_{ij} 为 i 等级石漠化转换到非 i 等级石漠化的面积 (km^2); U_{ji} 为除 i 等级的其他等级石漠化转换为 i 等级石漠化的面积 (km^2); U_i 为初期第 i 等级石漠化的面积 (km^2)。

2 结果与分析

2.1 石漠化斑块信息提取结果

结合云南省岩溶地区的边界范围和谷歌地球引擎不同成像时间的高清遥感影像, 随机抽取 1 200 个样点, 采用目视解译的方法完成验证数据的采集。以 2020 年石漠化分类结果为例, 计算石漠化斑块遥感分类精度的混淆矩阵 (表 2)。结果显示: 中间过渡等级的判对率较低, 两端等级的判对率较高, 无石漠化和极重度石漠化的识别精度均可达 75% 以上。遥感分类结果的总体精度为 75.25%, Kappa 系数为 0.680, 利用本研究提出的方法可较为准确地提取石漠化斑块信息。

表 2 云南省石漠化遥感分类精度混淆矩阵

Table 2 Confusion matrix of remote sensing classification accuracy of rocky desertification in Yunnan

等级	无石漠化/个	潜在石漠化/个	轻度石漠化/个	中度石漠化/个	重度石漠化/个	极重度石漠化/个	制图精度/%	用户精度/%
无石漠化	401	18	5	4	1	2	79.25	93.04
潜在石漠化	61	114	21	10	1	1	73.08	54.81
轻度石漠化	44	4	65	0	0	0	55.08	57.52
中度石漠化	0	14	15	97	16	3	76.98	66.90
重度石漠化	0	6	9	7	132	27	79.04	72.93
极重度石漠化	0	0	3	8	17	94	74.02	77.05

2.2 云南省石漠化空间分布格局分析

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。研究时段内, 滇东北的昭通、滇东的曲靖、滇东南的文山、滇南的红河及滇中的昆明等地的石漠化发生面积占全省石漠化发生总面积的 65.42%~72.14%, 是云南省石漠化分布的集中区 (图 2)。同时, 全省石漠化发生变化的区域较大, 呈集中连片分布。石漠化的演变过程可分为 2 种类型, 大部分地区属于持续减少型, 仅有临沧、丽江、文山和迪庆属于先增后减型。其中, 文山、昭通、曲靖和红河的石漠化变化最为显著, 占

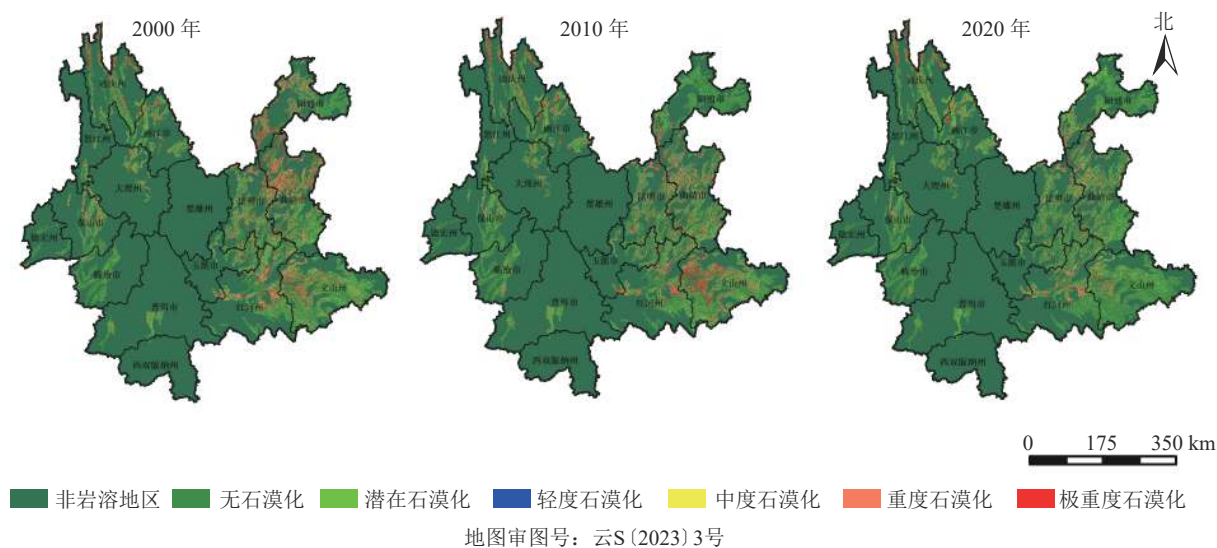


图2 研究区石漠化分布示意图

Figure 2 Distribution of rocky desertification

全省石漠化变化面积的 75.22%。可见, 2010 年前云南省石漠化的扩张趋势大部分已得到遏制, 但 2008—2010 年遭遇不同程度的干旱和冰雪灾害, 以及石漠化综合治理等生态工程的实施对生态系统造成的破坏, 局部地区石漠化程度仍在恶化; 2010 年以后, 云南省石漠化状况整体得到一定改善, 但治理形式依然严峻。

2.3 云南省石漠化时间演变过程分析

由表 3 可知: 2000—2020 年, 云南省石漠化分布面积整体呈缩减趋势, 石漠化分布面积占国土面积比例从 9.65% 下降至 6.48%。其中: 重度石漠化面积缩减面积最多, 减少面积占国土面积的 2.05%。无石漠化分布面积呈持续扩张趋势, 增加面积占国土面积比例从 16.30% 增加至 19.50%。潜在石漠化面积变化不明显, 变化面积仅占国土面积的 0.03%。

从单一等级石漠化动态度来看, 研究区石漠化状况可分为 4 种演变特征: ①动态度持续正值变化, 面积呈扩张趋势, 为无石漠化演变特征; ②动态度负向变化, 面积呈缩减趋势, 为重度石漠化演变特征; ③动态度由负值变化为正值, 面积变化呈先缩减后扩张, 以潜在石漠化和轻度石漠化演变特征为主; ④动态度由正值变化为负值, 面积变化呈先扩张后缩减, 以轻度石漠化和极重度石漠化演变特征为主。

2000—2010 年, 云南省石漠化面积缩减了 3 217.48 km², 占国土面积的 0.84%。在此期间, 无石漠化、轻度石漠化和极重度石漠化分布面积扩张, 其中, 轻度石漠化扩张幅度最大, 动态度为 1.44%, 年均扩张面积为 55.35 km²; 其余等级石漠化分布面积缩减, 其中, 重度石漠化面积缩减幅度最大, 动态度为 -1.82%, 年均缩减面积为 363.48 km²。

2010—2020 年, 云南省石漠化状况显著改善, 石漠化缩减面积占国土面积的 2.33%。无石漠化、潜在石漠化和中度石漠化分布面积增加; 其余等级石漠化面积减少。与 2000—2010 年相比, 除潜在石漠化和中度石漠化外, 其余各等级石漠化变化幅度有所增加, 其中, 无石漠化面积扩张幅度最大, 动态度为 1.29%, 年均扩张面积为 854.02 km², 轻度石漠化面积缩减幅度最大, 动态度为 -4.46%, 年均缩减面积为 196.40 km²。

2 个时段相比, 2010—2020 年各等级石漠化变化面积多于 2000—2010 年, 综合等级石漠化动态度也远高于 2000—2010 年 (表 3)。上述结果表明, 2010—2020 年云南省石漠化演变幅度较 2000—2010 年大。

综上, 2000—2020 年期间, 云南省石漠化演变过程复杂、变化幅度大。2000—2010 年和 2000—2020 年 2 个时段, 云南省石漠化状况整体上均有一定改善, 但部分等级石漠仍在恶化。无石漠化和重度石漠化演变方式单一, 其余石漠化演变方式复杂, 说明云南省石漠化防治仍需高度重视。

2.4 云南省石漠化演变过程流向分析

进入 21 世纪以来, 云南省石漠化演变过程较为剧烈。基于 2000、2010 和 2020 年石漠化遥感分类

表 3 云南省 2000—2020 年各等级石漠化动态度

等级	面积/km ²			2000—2010 年		2010—2020 年	
	2000 年	2010 年	2020 年	变化面积/km ²	动态度/%	变化面积/km ²	动态度/%
无石漠化	62 459.24	66 179.97	74 720.13	3 720.73	0.60	8 540.16	1.29
潜在石漠化	18 895.02	18 391.77	18 763.56	-503.25	-0.27	371.79	0.20
轻度石漠化	3 849.05	4 402.55	2 438.54	553.50	1.44	-1 964.01	-4.46
中度石漠化	5 644.20	4 976.98	5 140.92	-667.22	-1.18	163.94	0.33
重度石漠化	19 957.55	16 322.75	12 122.71	-3 634.80	-1.82	-4 200.04	-2.57
极重度石漠化	7 500.45	8 031.49	5 119.65	531.04	0.71	-2 911.84	-3.63
总计				9 610.54	0.81	18 151.78	1.53

结果制作转移矩阵弦图(图 3)。2000—2010 年,无石漠化变化面积最大,重度石漠化次之。无石漠化转移至潜在石漠化面积最多,占无石漠化转移面积的 49.65%;潜在石漠化和轻度石漠化主要向低等级石漠化转移;中度石漠化转移为无石漠化和重度石漠化面积较多,分别占中度石漠化转移面积的 28.89% 和 25.43%;重度石漠化转移至其余各等级石漠化面积相差不大,其中转移至极重度石漠化面较多,占重度石漠化转移面积的 23.17%;极重度石漠化转移至重度石漠化面积最多,占转移面积的 56.30%。2010—2020 年,轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化主要转移为无石漠化和潜在石漠化;极重度石漠转移为重度石漠化面积仍最多,占极重度石漠化转移面积的 51.01%,转移为无石漠化面积有所增加,占重度石漠化转移面积的 28.64%。

上述结果表明:2000—2010 年,中度石漠化、重度石漠化在转移过程中向高等级石漠化转移面积较多,存在恶化倾向;2010—2020 年,以高等级石漠化转出为低等级石漠化为主,石漠化改善面积多于恶化面积。2 个时段,在转移过程中极重度石漠化转移至重度石漠面积均最多,且占转移面积的 50% 以上,极重度石漠化治理难度大,改善周期长。

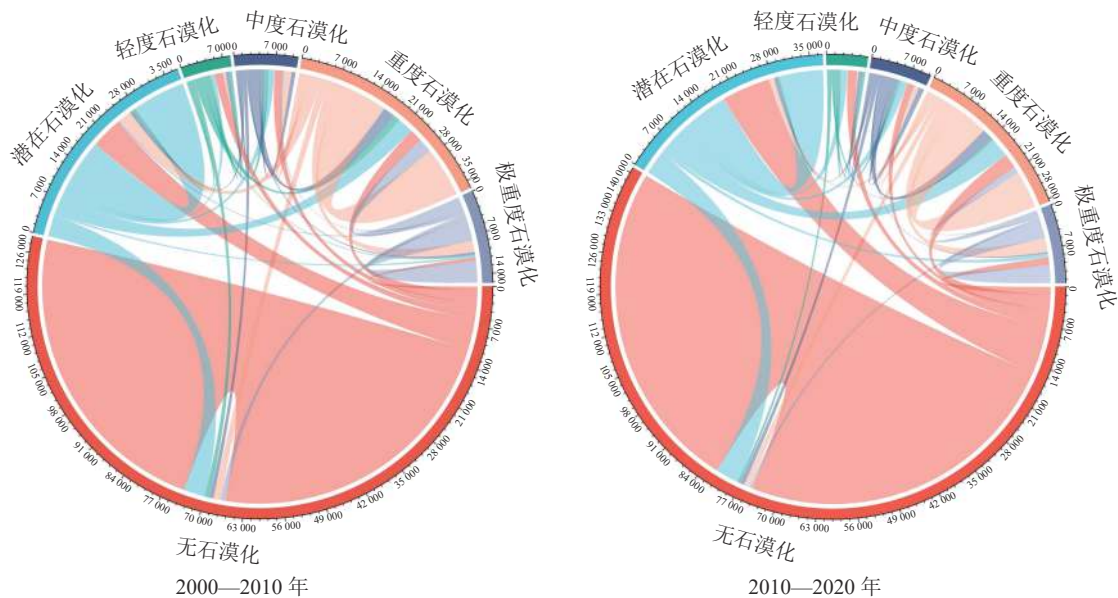


图 3 石漠化等级转移矩阵弦图

Figure 3 Rocky desertification grade shift matrix chord diagram

2000—2010 年,轻度石漠化新增速率快、中度石漠化转移速率快,双向变化速率轻度石漠化最快(表 4)。2010—2020 年,轻度石漠化变化为转移速率快,中度石漠化则变为新增速率快,双向变化速率中度石漠化最快。2 个时段相比,2010—2020 年各等级石漠化变化速率均有所提高。无石漠化、潜在石漠化、中度石漠化的新增速率增高,转移速率降低;轻度、重度、极重度石漠化则与之相反。分析可

知：轻度石漠化和中度石漠化为石漠化演变的过度阶段，双向变化速率较快，易于改善的同时也需防止其恶化。此外，2010—2020年较2000—2010年石漠化改善速率有大幅提升。

表4 云南省2000—2020年石漠化演变双向变化速率

Table 4 Two-way change rate of rocky desertification evolution in Yunnan from 2000 to 2020

等级	2000—2010年					2010—2020年				
	新增面积/km ²	转移面积/km ²	新增速率/%	转移速率/%	变化速率/%	新增面积/km ²	转移面积/km ²	新增速率/%	转移速率/%	变化速率/%
无石漠化	11 351.06	7 630.33	1.82	1.22	3.04	15 582.55	7 042.38	2.35	1.06	3.42
潜在石漠化	8 917.64	9 420.88	4.72	4.99	9.71	10 884.71	10 512.93	5.92	5.72	11.63
轻度石漠化	3 768.21	3 214.71	9.79	8.35	18.14	1 808.59	3 772.60	4.11	8.57	12.68
中度石漠化	4 266.72	4 933.93	7.56	8.74	16.30	4 176.47	4 012.53	8.39	8.06	16.45
重度石漠化	7 386.66	11 021.46	3.70	5.52	9.22	5 446.48	9 646.52	3.34	5.91	9.25
极重度石漠化	4 139.78	3 608.74	5.52	4.81	10.33	1 925.33	4 837.18	2.40	6.02	8.42

3 结论

基于遥感数据提取的石漠化信息和全国石漠化监测结果存在一定差异。目前，云南省采用以地面调查为主的方法对65个石漠化重点监测县进行了3次综合监测，其中以2011年与本研究2010年石漠化研究时段相近。据统计，2011年监测区石漠化面积为28 397.51 km²，潜在石漠化面积为17 710.26 km²^[25]；而本研究2010年65个重点监测县石漠化面积为30 725.78 km²，潜在石漠化面积为16 107.40 km²。两项研究石漠化提取面积相差2 328.27 km²，相对误差为8.20%；潜在石漠化相差1 602.86 km²，相对误差为9.05%，进一步验证了本研究的提取方法的可靠性。

石漠化的时空演变过程实质上是人类活动干扰生态系统，从而影响生态演替的方向和进程。本研究采用遥感手段定量提取石漠化斑块信息，引入多种模型对石漠化时空演变总体特征和内部转移特征进行定量评价，探讨了石漠化分布特征和演变规律。主要结论如下：

①基于GEE平台的Landsat TM/OLI数据，采用决策树分类法对云南省岩溶区石漠化信息进行遥感识别和提取，云南省2020年石漠化遥感分类总体精度达75.25%，Kappa系数达0.680，利用本研究提出的方法可较为准确地提取石漠化斑块信息。

②云南省石漠化空间分布特征呈东多西少，其中，以昭通、曲靖、文山、红河等地区石漠化分布面积较多，且石漠化发生情况较严重；演变类型空间分布特征整体表现为持续减少型，局部地区石漠化面积仍有扩张。

③研究时段内，云南省石漠化面积总体呈持续缩减的演变趋势，但部分等级石漠化存在先增后减或先减后增的演变态势；与2000—2010年相比，2010—2020年石漠化综合等级动态度及大部分单一等级石漠化动态度数值有所增加，表明云南省石漠化演变方式多样，且后一时段较前一时段的演变幅度大。

④研究时段内，云南省石漠化的演变流向复杂，且内部演变过程较为剧烈，无石漠化为最大的新增型，重度石漠化面积转移最多；2个阶段，轻度石漠化和中度石漠化双向变化速率较高，易发生变化，稳定性低。

4 参考文献

- [1] 肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 551–554. XIAO Rongbo, OUYANG Zhiyun, WANG Xiaoke, et al. Sensitivity of rocky desertification and its spatial distribution in southwestern China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 551–554.
- [2] JIANG Zhongcheng, LIAN Yanqing, QIN Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132(3): 1–12.
- [3] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

- YUAN Daoxian. *Major Environmental Geological Problems and Countermeasures in Karst Regions of Southwest China* [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [4] 李乡旺, 陆素娟. 云南石漠化区划研究[J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2019, **39**(2): 1 – 10.
LI Xiangwang, LU Sujuan. Regionalization of stony desertification in Yunnan Province [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2019, **39**(2): 1 – 10.
- [5] WANG S J, LIU Q M, ZHANG D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. *Land Degradation & Development*, 2004, **15**(2): 115 – 121.
- [6] 刘鹏, 王妍, 刘宗滨, 等. 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, 2019, **36**(5): 965 – 973.
LIU Peng, WANG Yan, LIU Zongbin, *et al.* Distribution and division of stony desertification on county scale [J]. *Journal Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(5): 965 – 973.
- [7] 况忠, 包平, 吴开彬, 等. 基于 Landsat-X GEVI 的贵州纳雍地区 2003—2015 年岩溶石漠化分布变化遥感调查[J]. 中国岩溶, 2019, **38**(6): 883 – 888, 915.
KUANG Zhong, BAO Ping, WU Kaibin, *et al.* Remote sensing investigation to the distribution and change of karst rocky desertification from 2003 to 2015 in the Nayong area of Guizhou based on Landsat-X GEVI [J]. *Carsologica Sinica*, 2019, **38**(6): 883 – 888, 915.
- [8] 朱大运, 熊康宁, 肖华, 等. 基于植被指数的 GF-1 与 Landsat-OLI 石漠化识别能力对比评价[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(11): 1949 – 1957.
ZHU Dayun, XIONG Kangning, XIAO Hua, *et al.* Comparison of rocky desertification detection ability of GF-1 and Landsat-OLI based on vegetation index [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(11): 1949 – 1957.
- [9] XU Erqi, ZHANG Hongqi. A spatial simulation model for karst rocky desertification combining top-down and bottom-up approaches [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, **29**(10): 3390 – 3404.
- [10] 文林琴, 栗忠飞. 2004—2016 年贵州省石漠化状况及动态演变特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(17): 5928 – 5939.
WEN Linqin, LI Zhongfei. Evolution characteristics of rocky desertification during 2004–2016 in Guizhou Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(17): 5928 – 5939.
- [11] 胡宝清, 蒋树芳, 廖赤眉, 等. 基于 3S 技术的广西喀斯特石漠化驱动机制图谱分析——以广西壮族自治区为例[J]. 山地学报, 2006, **24**(2): 234 – 241.
HU Baoqing, JIANG Shufang, LIAO Chimei, *et al.* TUPU analysis on driving mechanism of Guangxi karst rocky desertification based on 3S techniques [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(2): 234 – 241.
- [12] 王正雄, 蒋勇军, 张远瞩, 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J]. 地理学报, 2019, **74**(5): 1025 – 1039.
WANG Zhengxiong, JIANG Yongjun, ZHANG Yuanzhu, *et al.* Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and geodetectors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(5): 1025 – 1039.
- [13] TONG Xiaowei, WANG Kelin, BRANDT M, *et al.* Assessing future vegetation trends and restoration prospects in the karst regions of southwest China [J/OL]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(5): 357 [2021-12-10]. doi: 10.3390/rs8050357.
- [14] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报, 2019, **39**(20): 7432 – 7440.
WANG Kelin, YUE Yumin, CHEN Hongsong, *et al.* The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7432 – 7440.
- [15] 肖林颖, 吴秀芹. 云南省建水县石漠化修复模式评价[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2020, **56**(6): 1073 – 1080.
XIAO Linying, WU Xiuqin. Evaluation of rock desertification restoration model in Jianshui County, Yunnan Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, **56**(6): 1073 – 1080.
- [16] 张靖宙, 吴秀芹, 肖桂英. 云南省建水县不同石漠化治理模式下碳储量功能评估[J]. 北京林业大学学报, 2018, **40**(8): 72 – 81.
ZHANG Jingzhou, WU Xiuqin, XIAO Guiying. Evaluation on carbon storage function under different rocky desertification control models in Jianshui County of Yunnan Province, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40**(8): 72 – 81.
- [17] 李阳兵, 李珊珊, 徐倩, 等. 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[J]. 生态学报, 2019, **39**(22): 8526 – 8538.

- LI Yangbing, LI Shanshan, XU Qian, *et al.* The evolution of karst rocky desertification for nearly 50 years in karst mountain, Southwest China based on five cases study [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(22): 8526 – 8538.
- [18] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 等. 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, 2021, **40**(4): 707 – 717.
- WANG Qian, ZHAO Xiaoqing, PU Junwei, *et al.* Temporal and spatial pattern evolution of rocky desertification in karst region of southeast Yunnan: a case study of Guangnan County [J]. *Carsologica Sinica*, 2021, **40**(4): 707 – 717.
- [19] 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.
- XI Huipeng, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, *et al.* Spatio-temporal characteristics of rocky desertification in typical karst areas of Southwest China: a case study of Puding County, Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8919 – 8933.
- [20] 左太安, 刁承泰, 苏维词, 等. 毕节试验区石漠化时空演变过程和演变特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(23): 7067 – 7077.
- ZUO Taian, DIAO Chengtai, SU Weici, *et al.* Spatial-temporal evolution process and its evaluation characteristic of rocky desertification in Bijie experimental area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(23): 7067 – 7077.
- [21] 吴征镒, 朱彦丞, 姜汉侨. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- WU Zhengyi, ZHU Yancheng, JIANG Hanqiao. *Vegetation of Yunnan* [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [22] FOGA S, SCARAMUZZA P L, GUO Song, *et al.* Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **194**: 379 – 390.
- [23] ZHU Zhe, WANG Shixiong, WOODCOCK C E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **159**: 269 – 277.
- [24] 高帅. 滇东南岩溶山地土壤厚度空间分布探测技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- GAO Shuai. *Study on Spatial Distribution Detection Technology of Soil Thickness in Karst Mountains of Southeast Yunnan* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [25] 吴宁. 云南石漠化[M]. 北京: 中国林业出版社, 2020.
- WU Ning. *Rocky Desertification of Yunnan* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020.