

喀斯特石漠化治理成效与逆向风险的空间分异 ——基于文山州CRITIC权重法的驱动解析

伙国春¹, 张明福^{1*}, 赵俊波¹, 常春有², 赵俊娜³, 聂长桢⁴

¹文山州林业和草原资源监测站, 云南 文山

²文山州林业和草原科学研究所, 云南 文山

³云南城市建设职业学院马克思主义学院, 云南 昆明

⁴文山州林业和草原种苗管理站, 云南 文山

收稿日期: 2025年9月24日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年10月30日

摘要

本研究以文山壮族苗族自治州(以下简称文山州)第三、四次岩溶地区石漠化的监测结果为基础, 通过石漠化土地面积变化量、治理程度、演变原因、演变类型四个方面, 对指标冲突性与信息量动态赋权, 从而量化人为与自然驱动力的交互效应, 厘清不同区域石漠化治理差异和逆向风险分异特征。研究结果表明: (1) 2016~2021年石漠化土地面积整体缩减, 但潜在石漠化区域变化率较高, 存在逆向演变风险。岩溶地区存在边治理边退化的风险, 过度樵采、不适当耕作方式等人为干扰因素是主要退化诱因; (2) CRITIC权重分析表明, 人为干预中封山管护对顺向演替贡献显著, 而不适当经营方式是逆向演替主因。未来, 可通过各县市改善-退化类型优化自然恢复与人工干预的协同路径, 降低“二次石漠化”发生概率。

关键词

岩溶地区, 潜在石漠化, CRITIC权重法, 二次石漠化, 空间分异

Spatial Difference between Karst Stone Desertification Control Effectiveness and Reverse Risk

—Driven Analysis Based on Wenshan Prefecture CRITIC Weight Method

Guochun Huo¹, Mingfu Zhang^{1*}, Junbo Zhao¹, Chunyou Chang², Junna Zhao³, Changzhi Nie⁴

¹Wenshan Prefecture Forestry and Grassland Resources Monitoring Station, Wenshan Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 伙国春, 张明福, 赵俊波, 常春有, 赵俊娜, 聂长桢. 喀斯特石漠化治理成效与逆向风险的空间分异[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 1227-1237. DOI: 10.12677/gser.2025.145116

²Wenshan Prefecture Forestry and Grassland Research Institute, Wenshan Yunnan³School of Marxism, Yunnan Urban Construction Vocational College, Kunming Yunnan⁴Wenshan Prefecture Forestry and Grassland Seedling Management Station, Wenshan Yunnan

Received: September 24, 2025; accepted: October 21, 2025; published: October 30, 2025

Abstract

This study is based on the monitoring results of the third and fourth karst areas of Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture (hereinafter referred to as Wenshan Prefecture). By dynamically empowering the conflict of indicators and the amount of information from four aspects: the change in the area of stony desertification, the degree of governance, the evolutionary reasons, and evolution type, the interaction effect between man-made and natural driving forces is quantified, and the differences in the control of stony desertification and the characteristics of reverse risk differentiation in different regions are clarified. The research results show that: (1) The overall area of stony desertification has decreased from 2016 to 2021, but the change rate of potential stony desertification areas is relatively high, and there is a risk of reverse evolution. There is a risk of degradation while managing and degrading in karst areas. Human interference factors such as excessive logging and inappropriate farming methods are the main causes of degradation. (2) CRITIC weight analysis shows that in human intervention, mountain closure management and maintenance contribute significantly to forward succession, while inappropriate business methods are the main cause of reverse succession. In the future, the coordinated path between natural recovery and manual intervention can be optimized through the improvement-degradation type of counties and cities, and the probability of “secondary desertification” can be reduced.

Keywords

Karst Region, Potential Rocky Desertification, CRITIC Weighting Method, Secondary Rocky Desertification, Spatial Differentiation

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

喀斯特岩石荒漠化(Karst rock desertification)是土壤生态系统破坏的组合结果,通常伴随着地上天然植物群落的干扰[1],以及土壤生产力的急剧下降和类似沙漠的景观的出现。中国西南地区作为世界上最大的连续喀斯特地貌代表,其裸露碳酸盐岩面积约 $5.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ [2],长期受自然和人为因素双重影响,为石漠化形成和发展构建了基础条件。西南地区属亚热带季风气候区,约 89.62%喀斯特地区受气候影响,10.38%受人类活动影响[3],降水集中且多暴雨,强烈的水流冲刷加速地表侵蚀,导致水土流失和基岩裸露。喀斯特生态系统的结构缺陷是缺乏水-土壤环境元素[4],环境元素进一步恶化后,土壤养分和水源等资源供给失衡,植被退化、石漠化逆向演替等结构破坏,进而引发生物栖息地破碎化,物种多样性显著降低;喀斯特地区平地地形受限,导致耕地扩展到陡坡造成了水土流失,最终加剧喀斯特岩溶发育[5]。另外,喀斯特地区土地低承载力承受了陡坡耕种、毁林开垦、过度放牧和采矿等不合理的人类开发活动,加速了喀斯特石漠化的扩张[6]。人类创造的强烈干预是喀斯特生态系统的反向继任的开始[7]。近年来,

人类已经意识到自然与人为因素存在石漠化叠加效应，人类活动与土地利用之间的显著冲突，喀斯特石漠化的正向、反向演替同时发生，与人类活动密切相关，呈现出相互反馈的循环[8][9]，并呈现出一定的耦合关系[10]。

文山州地处西南喀斯特核心区之一，石漠化土地分布具有显著空间异质性。本文以 2021 年云南省石漠化监测结果为分析样本，通过“自然 - 人为”双驱动因素交互机制下的石漠化演变探讨，从文山州石漠化变化量、治理程度、演变类型、演变原因等角度量化分析，客观评价目前治理成效，找出下一步石漠化治理的突破口和工作重点，对文山州石漠化治理与区域可持续发展提出一定参考建议。

2. 研究区概况

文山州位于云南东南部，属中亚热带季风气候，北回归线横穿，立体气候显著。地势西北高、东南低，喀斯特岩溶土地总面积 13,560 km²，占山区 97%，当前全州石漠化土地面积达 4200 km²，潜在石漠化区域约 5200 km²，是前者的 1.24 倍。石漠化中轻度为主(图 1)，重度以上达 500 km²，集中分布于桂黔滇喀斯特防治区。作为长江上中游岩溶地区石漠化综合治理工程和长江重点生态区“双重”石漠化治理项目，截至 2021 年，已完成各类生态修复类工程面积 970 km²。

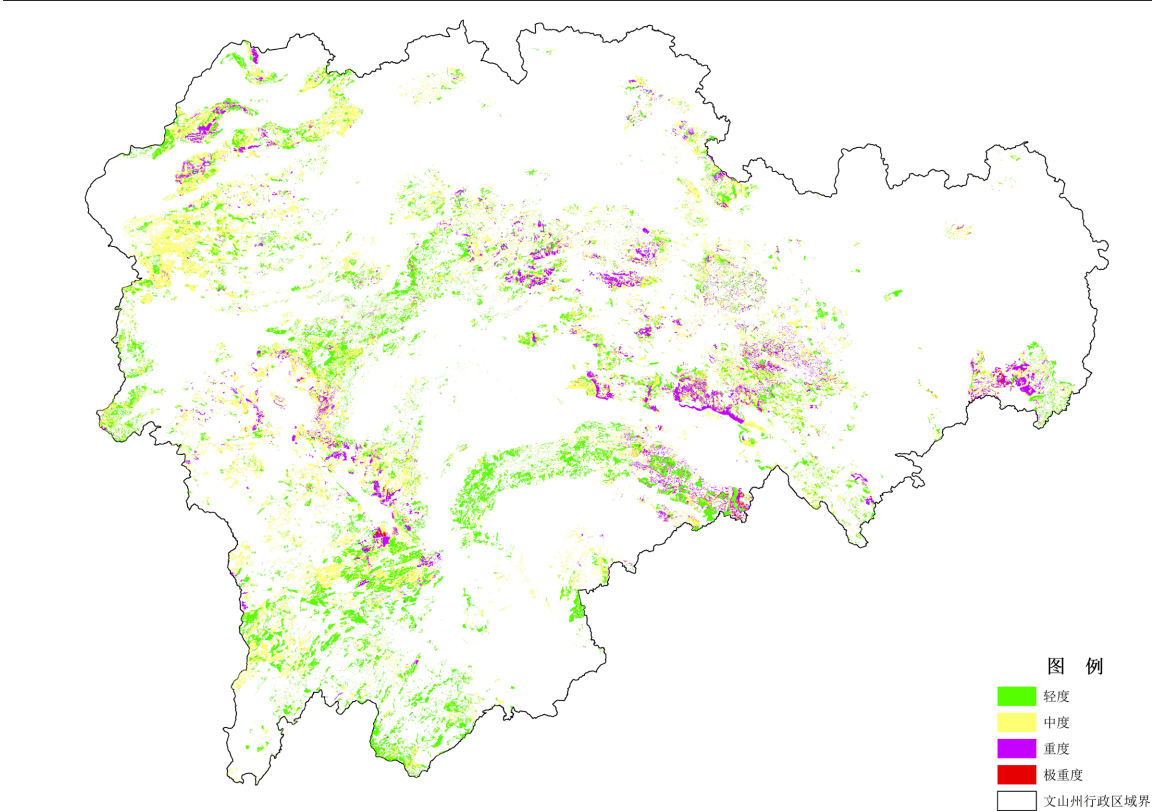


Figure 1. Schematic diagram of the degree of rocky desertification in karst area of Wenshan Prefecture
图 1. 文山州岩溶地区石漠化程度示意图

3. 研究方法

3.1. 数据来源

第四次云南省石漠化监测数据以第三次国土调查图斑界线和地类为基准，通过对第三次石漠化调查

空间数据融合处理,生成第四次调查区划底图,然后对遥感影像数据初步解译判读,并辅以无人机信息采集等技术手段,依影像数据将文山州共区划调查图斑 108.6 万个,其中石漠化区划图斑 35.8 万个,轻度石漠化图斑 1.1 万个,中度石漠化图斑 20.4 万个,重度石漠化图斑 3.7 万个,极重度石漠化图斑 0.1 万个,进而生成现地调查底图。通过将不同属性因子分类统计,以此获得石漠化面积变化量、石漠化正向演替以及逆向演替、土地利用变化原因、治理程度等量化面积统计数据。

3.2. 分析方法

(1) 石漠化土地动态评价方法:综合石漠化动态度(K)用于量化单位时间内石漠化土地类型的转化速率,计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Si \times Wi}{S_{\text{总}} \times T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔSi ——第 i 类石漠化土地类型在时间内转化面积; Wi ——权重系数,轻度 = 0.3,中度 = 0.5,重度 = 0.7,极重度 = 1; $S_{\text{总}}$ ——研究区石漠化土地总面积; T ——时间跨度(a)。

(2) 石漠化治理现状评价:石漠化改善率($RDIR$)是通过计算轻微改善与明显改善面积占总调查面积的比例,直观反映现阶段生态修复的实际效果。其计算公式为:

$$RDIR = \frac{SIA + SIGA}{TSRA} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $RDIR$ ——石漠化改善率, SIA ——轻微改善型石漠化土地面积, $SIGA$ ——明显改善型石漠化土地面积, $TSRA$ ——调查区总面积。

石漠化退化率($RDDR$)通过量化退化加剧型与严重加剧型土地面积占比,可直观反映区域石漠化恶化速率和生态脆弱性,其计算公式为:

$$RDDR = \frac{DIA + SDA}{TSRA} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $RDDR$ ——石漠化退化率, DIA ——退化加剧型石漠化土地面积, SDA ——退化严重加剧型石漠化土地面积, $TSRA$ ——调查区总面积。

(3) 指标评价及相关性分析:CRITIC 权重法是 Diakoulaki 提出的一种综合独立性权数和信息量权数的客观赋权法[11],相关系数和标准差二者结合构成的综合权数越大,相对重要性越高,通过考虑多个指标的综合信息,能够全面评估不同因素对石漠化演变的影响,避免单一指标的片面性,从而能够根据数据的实时变化动态调整权重。

首先,对原始数据矩阵进行无量纲化处理,消除指标量纲差异,计算公式:

正向指标:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (4)$$

负向指标:

$$Y_{ij} = \frac{\max(X_j) - X_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (5)$$

其次,进行信息承载量计算,计算公式为:

波动度(对比强度):用于衡量指标的离散程度,采用标准差计算:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \overline{X_j})^2}{n-1}}$$

(6)

信息承载量(CRITIC 值): 综合波动度与冲突性, 计算各指标信息量:

$$C_j = S_j \times R_j$$

(7)

最后, 将信息承载量归一化, 得到各指标客观权重:

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k}$$

(8)

针对文山州各县市石漠化演变特征的空间分异性问题, 为避免出现离散度被放大, 引发权重虚高的问题, 先通过采用 Z-score 标准化, 并剔除低效指标, 再对比优化前后权重分布, 强化核心驱动因子分布, 利用 SPSS Pro 进行 CRITIC 权重法分析, 最后形成文山州石漠化演变评价指标体系(表 1)。

Table 1. Evaluation index system for the evolution of stone desertification in Wenshan Prefecture
表 1. 文山州石漠化演变评价指标体系

系统层	目标层	因素层	指标层 km²	指标变异性	指标冲突性	指标性质	权重(%)	
石漠化 演变原因 评价	顺向演 替原因 (0.943)	人为因素(0.889)	封山管护	19660.901	16.042	+	49.845	
			封山育林	5228.882	17.215	+	14.226	
			人工造林	4861.614	15.273	+	11.734	
			森林抚育	54.88	14.877	+	0.129	
			人工种草	303.858	15.193	+	0.73	
			草地改良	806.487	15.67	+	1.997	
			保护性耕作	2865.541	15.336	+	6.945	
			坡改梯工程	1027.997	17.065	+	2.772	
			工程建设	264.955	13.479	+	0.564	
		自然因素(0.054)	自然修复	1979.965	17.166	+	5.371	
	逆向演 替原因 (0.057)	人为因素(0.056)	毁林(草)开垦	863.953	16.65	—	2.273	
			过牧	22.587	15.327	—	0.055	
			过度樵采	163.899	15.247	—	0.395	
			火烧	1.863	16.304	—	0.005	
			工矿工程建设	6.999	15.692	—	0.017	
			不适当经营方式	960.02	18.609	—	2.823	
			其他破坏因素	43.144	16.817	—	0.115	
				灾害因素(0.001)	地质灾害	1.284	16.552	—

注: “+”表示正项指标, 数值越大越利于安全; “—”表示负项指标, 数值越大越石漠化逆向演替越严重。

采用皮尔逊相关性分析客观量化指标间线性关系, 探讨石漠化演变类型与石漠化正向演替、逆向演替相关性, 为石漠化演替机制解析、治理策略制定及生态修复效果评估提供了科学工具。计算公式为:

$$r = \frac{\sum (Xi - X) \times (Yi - Y)}{\sqrt{\sum (Xi - X)^2 \sum (Yi - Y)^2}}$$

(9)

X ——正向/逆向演替指标， Y ——演变类型和石漠化治理程度。

4. 结果与分析

4.1. 石漠化土地动态变化特征

由表 2 可知，文山州在 2016~2021 年间整体上石漠化面积均在减少，其中广南县石漠化面积变化量占比最大，占比达 22.54%。文山州平均综合石漠化动态度 3.196%，低于文山州平均水平的县(市)为文山市、砚山县、西畴县，其中综合石漠化动态度富宁县最高，西畴县最低，分别为 4.01%、2.65%。由此，富宁县动态变化最为强烈，且各类型之间石漠化交换量最大，动态度最大；西畴县动态变化相对其他县市最为弱，说明西畴县退化程度未显著加剧。

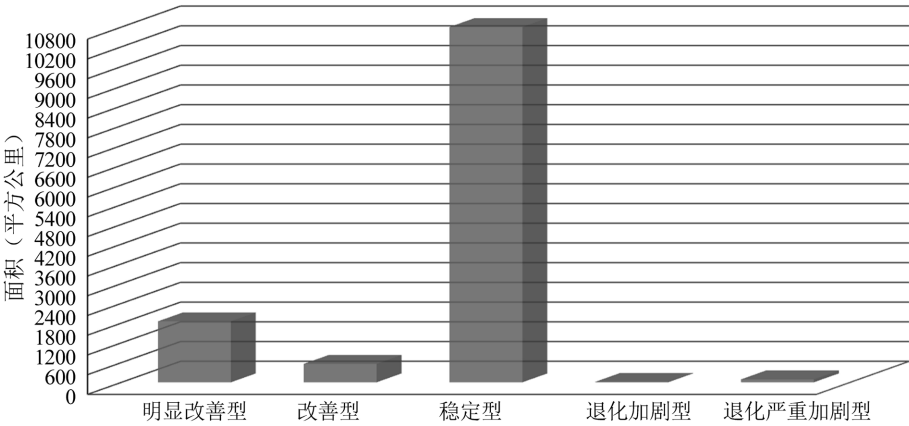
Table 2. Dynamic assessment of comprehensive rocky desertification in various counties and cities of Wenshan Prefecture from 2016 to 2021

表 2. 文山州各县市 2016~2021 年综合石漠化动态度

地区	文山州	文山市	砚山县	西畴县	麻栗坡县	马关县	丘北县	广南县	富宁县
面积变化量/km ²	2268.37	286.11	253.61	118.83	133.98	374.93	388.07	511.37	201.43
动态度/%	3.196%	2.824%	2.990%	2.651%	3.205%	3.277%	3.109%	3.404%	4.010%

4.2. 石漠化土地演变类型与治理阶段

由图 2 可知，文山州岩溶地区演变类型以稳定型为主，面积占比 81.39%，是顺向演替的 4.5 倍、逆向演替的 107.1 倍；从治理阶段来看，文山州岩溶地区治理阶段以初步治理和中等治理为主。其中，石漠化土地又以轻度石漠化治理占比最高，轻度石漠化分别占初步治理和中等治理的 52.1%、59.5%。文山州治理失败面积和逆向演替面积占比分别为 35.23 km²、102.75 km²，但基本治理面积仅为 79.38 km²。对文山州各县市石漠化改善率和石漠化退化率两个指标互补性分析(图 3)，并以云南省石漠化改善率 6.86%和退化率 0.95%为基准，石漠化变化可划分为“低改善-低退化”、“高改善-低退化”、“高改善-高退化”三类。其中，麻栗坡县、马关县、丘北县、广南县属于“高改善-低退化”。除逆向演替除治理失败的面积外，初步治理的岩溶土地仍有 67.53 km²在发生逆向演替。另外，砚山县和富宁县存在高于云南省平均改善率和退化率的矛盾型问题，存在“边治理、边退化”的现象。



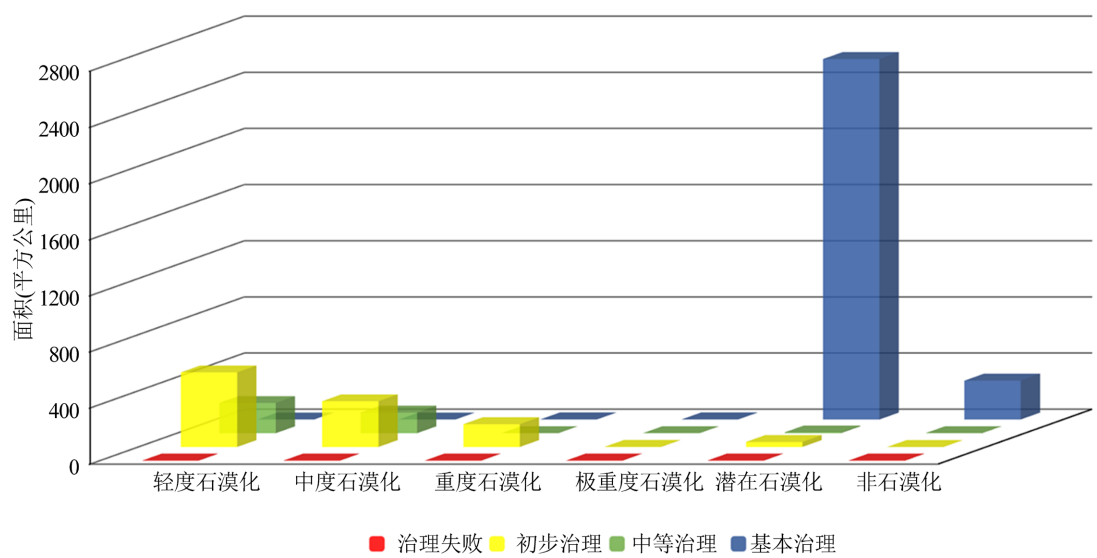


Figure 2. Statistics of evolution types and governance stages of rocky desertification land in the karst region
图 2. 文山州岩溶地区石漠化土地演变类型与治理阶段统计

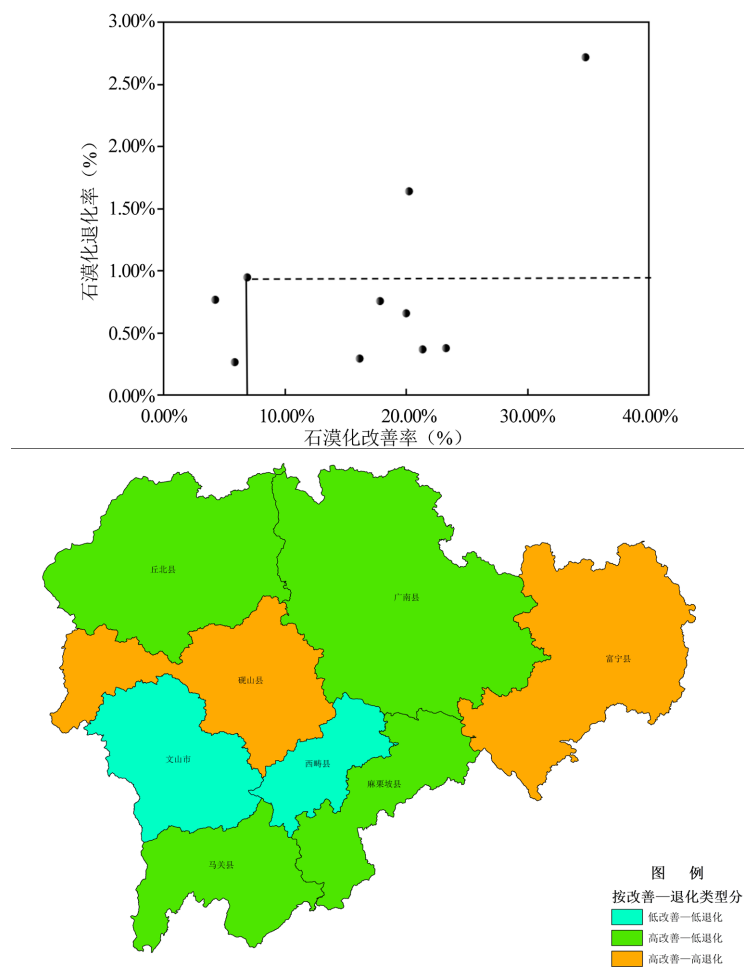


Figure 3. Distribution diagram of the changes in stone desertification in counties and cities in Wenshan Prefecture
图 3. 文山州各县市石漠化变化分布图

4.3. 石漠化土地演变指标评价

由图 1 可知, 18 个评价指标中以顺向演替原因权重最高, 其中封山育林、封山管护、人工造林, 权重分别为 49.845%、14.226%、11.734%, 说明当前石漠化治理模型更强调人为干预对生态恢复的积极贡献。而石漠化逆向演替权重偏低, 其中权重最高的指标是不适当经营方式, 权重比 2.823%, 这表明文山州岩溶地区整体上以正向演替为主, 不适当经营方式和地质灾害等自然和人为因素对石漠化的影响相对较小, 但仍需关注其潜在风险。

4.4. 相关性分析

Table 3. Analysis of correlation between the driver factor of desertification-evolution stage-governance response

表 3. 石漠化驱动因子 - 演变阶段 - 治理响应相关性分析

相关因素	顺向演变	稳定型	逆向演变	治理失败	初步治理	中等治理	基本治理
封山管护	0.880**	0.455	0.159	0.271	0.759*	0.610	0.796*
封山育林	0.320	-0.179	0.255	-0.068	-0.026	0.696	0.205
人工造林	-0.154	0.252	-0.426	0.319	-0.419	-0.429	0.651
森林抚育	0.268	0.496	-0.308	-0.499	-0.380	0.338	0.625
人工种草	0.826*	0.542	0.015	-0.529	0.772*	0.348	0.550
草地改良	0.326	-0.234	-0.573	-0.367	0.402	0.179	-0.021
其他林草措施	0.683	0.503	-0.078	-0.682	0.479	0.417	0.237
封山育草	-0.219	0.497	-0.217	-0.154	0.112	0.361	0.006
保护性耕作	0.125	0.152	-0.184	-0.275	-0.284	0.161	0.445
其他农业技术措施	0.689	0.515	-0.099	-0.696	0.456	0.406	0.208
坡改梯工程	0.074	-0.091	-0.206	-0.021	-0.135	-0.393	0.293
其他工程措施	0.422	0.724*	-0.195	0.116	0.290	0.245	0.002
工程建设	0.353	0.849**	-0.387	0.568	0.225	-0.125	-0.129
自然修复	-0.276	-0.012	-0.577	0.127	-0.516	-0.436	-0.667
保护性耕作(逆向)	0.208	0.095	0.725*	0.353	-0.326	-0.519	0.367
毁林(草)开垦	-0.079	-0.452	0.488	0.156	-0.285	-0.072	-0.140
过牧	-0.687	-0.506	0.078	0.677	-0.49	-0.414	-0.248
过度樵采	-0.687	-0.511	0.091	0.689*	-0.469	-0.410	-0.223
火烧	-0.358	-0.460	0.245	0.355	-0.243	-0.269	-0.389
工矿工程建设	-0.182	-0.582	0.314	0.545	-0.124	-0.170	-0.345
不适当经营方式	0.279	0.243	0.681*	0.588*	-0.171	-0.470	-0.543
其他破坏因素	-0.482	0.558	0.281	-0.198	0.314	0.330	-0.416
地质灾害	0.080	-0.441	0.501	0.180	0.248	-0.042	-0.170

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

石漠化指标相关性分析可揭示不同驱动机制、治理措施效能及生态经济耦合规律, 为精准治理、风险防控和跨区域协作提供量化依据。由表 3 所示可知, 顺向演变与人工种草呈显著正相关, 与封山管护

呈极显著正相关；稳定型与其他工程措施呈显著正相关，与工程建设呈极显著正相关；逆向演变与保护性耕作(逆向演变)和不适当经营方式呈显著正相关；治理失败与过度樵采和不适当经营方式呈显著正相关；初步治理与封山管护、人工种草呈显著正相关；基本治理与封山管护呈显著正相关。生态系统恢复通过技术手段快速提升植被覆盖，并且自然恢复创造条件需结合人工主动干预和被动保护，两者协同可加速生态修复进程；而稳定型演变与工程措施有极显著正相关，表明工程措施在生态修复中为生态系统提供长期稳定的资源供给，并增强抗干扰能力。

5. 讨论

5.1. 逆向演替的风险评估

本研究通过对滇东南文山州岩溶地区石漠化土地演变特征及驱动机制的分析，揭示了石漠化土地在不同因素驱动下的演变规律及其治理成效。2016~2021年，文山州石漠化土地面积整体呈现缩减趋势，但潜在石漠化土地变化率较高，存在逆向演变的风险。由于潜在石漠化土地具有地表面层结构脆弱性特点，在演变过程中易向相邻强度类型转变，在自然驱动力因素和人为因素驱动下，潜在石漠化演变风险较高[12]。随着近年文山州耕地流出专项整治工作不断的优化布局，按照富宁县第三次全国国土调查主要数据公报显示，富宁县 $>15^{\circ}$ 坡耕地占比60.74%，陡坡耕地水土流失风险高并加剧土壤侵蚀。因此，富宁县今后须针对 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 陡坡耕地推广坡改梯工程、坡面水系工程、水土保持耕作措施、优化种植制度、布设植物篱等治理措施，而 $>25^{\circ}$ 坡耕地应全面实施退耕还林还草措施[13]，统筹解决陡坡耕地生态风险与区域发展矛盾。另外，土地使用和人类定居是决定石漠化的重要因素[14]，文山州需调整人地矛盾并严控潜在石漠化地区“二次”石漠化发生风险[15]。

5.2. 治理成效评估与优化路径

目前文山州以稳定型演变为主导，这反映出当前的治理措施在一定程度上有效抑制了石漠化退化趋势。但目前的治理阶段主要集中在初步和中等水平，这意味着文山州很多区域还未达到深度治理的标准，且各县市治理成效存在显著差异，如砚山县和富宁县存在“边治理、边退化”现象。针对该现象，笔者结合现有研究成果和文山州人民政府政策文件进行梳理总结，发现主要有两方面原因。其一是砚山县和富宁县存在资源开发与生态保护的矛盾。砚山县作为文山州工业重点区域，近年来传统有色金属冶炼增长迅速，工业建设步伐较快，开发强度大，生态修复速度滞后于开发强度；而富宁县农业扩张压力巨大，全县大于 15° 的坡耕地占比超60%，此类陡坡地本就因坡度大、土层薄、保水能力差而生态脆弱，叠加持续的耕地开垦活动，进一步破坏原生植被覆盖，加剧土壤侵蚀与养分流失，最终显著推高石漠化发生风险；其二是治理资金不足。根据州政府统计数据显示，2022年全州节能环保支出仅占财政支出的2.1%，分配到各县的资金可能难以支撑持续性治理，演变为石漠化治理的“减法”跟不上自然+人为因素带来的“加法”。因此在工业建设发展和土地利用变化下，易引发石漠化地区生境质量改变，尤其在林耕交叉区域，在土地压力和环境脆弱双重压力下，石漠化地区生态环境无法承载高频度的人为干扰，从而引发生态功能退化。但总体上，文山州治理工作显著提升了石漠化改善率，且退化率低于省级平均水平，治理失败和逆向演替面积占比较小，说明石漠化治理措施有效性明显。但初步治理区域仍存在生态退化的风险，这可能归因于部分治理工程或农业技术措施可能存在技术缺陷或后续维护不足，因而需建立动态监测机制，对高改善高退化区域实施二次治理或强化管护措施，对低改善低退化的区域减少人为干扰、促进顺向演替，如封山育林、封山管护、人工造林等措施。通过有效增加退化风险高的区域植被覆盖度，降低生态系统对气候扰动的敏感性来减少荒漠化风险[16]，然而仅依靠增加植被覆盖度降低敏感性并不能完全解决荒漠化问题，还需要综合考虑其他因素，如地形地貌、人类活动强度等对荒漠化的影响。为

促进正向的植被演替过程，应强化对干扰因子的管控、群落结构的优化。

5.3. 石漠化治理措施与演变类型相关性分析

人工干预与自然恢复的协同作用是生态修复的核心机制。然而石漠化地区和潜在石漠化地区生态系统稳定性不足，当未超过生态系统恢复力临界点时，应辅以适当的生态工程，进行人工修复[17]。人工种草和封山管护分别体现主动干预与被动保护，二者与顺向演变、初步治理均呈显著正相关，说明植被快速恢复需通过人工措施创造初期生存条件，再依靠封育减少人为干扰实现持续恢复。其次，人为干扰是逆向演变的主因。过度樵采、不合理耕作与治理失败显著相关，可能也存在人为破坏因素造成潜在石漠化土地逆向演替为石漠化土地的区域均没有实施林业工程、封山管护、封山育林等治理措施[18]。虽然毁林(草)开垦无显著相关性，但是随着文山林下三七种植产业发展，土地资源利用模式与生态保护目标的冲突将越加尖锐，破解办法为严格执行《文山州林下三七种植林地利用管理办法》，划定种植禁区与缓冲区，大力推进立体生态种植模式。

6. 结语

(1) 文山州石漠化土地面积在 5 年间呈现缩减的趋势，但潜在石漠化土地动态变化率较高，且存在逆向演变风险。岩溶地区石漠化治理虽成效显著，但初步治理区域受人为扰动因素治理成效巩固难度变大，且存在逆向演替风险，亟需结合改善-退化类型优化治理措施并加强动态监测。

(2) 过度樵采、不合理耕作等人为因素是逆向演变的主要原因。未来应继续强化封山育林、人工造林等治理措施，严格控制潜在石漠化地区“二次石漠化”风险，推动石漠化土地向更稳定、可持续的状态演变，确保生态修复成效的长久保持。

基金项目

2021 年度中央财政林业科技推广示范项目 - 文山州岩溶地区石漠化治理模式推广示范项目(云(2021)TG14 号)。

参考文献

- [1] Tang, J., Tang, X., Qin, Y., He, Q., Yi, Y. and Ji, Z. (2019) Karst Rocky Desertification Progress: Soil Calcium as a Possible Driving Force. *Science of the Total Environment*, **649**, 1250-1259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.242>
- [2] Jiang, Z., Lian, Y. and Qin, X. (2014) Rocky Desertification in Southwest China: Impacts, Causes, and Restoration. *Earth-Science Reviews*, **132**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.005>
- [3] Liu, W., Jiang, L., Liu, B., Liu, R. and Xiao, Z. (2023) Monitoring the Evolution Process of Karst Desertification and Quantifying Its Drivers in the Karst Area of Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 123259-123273. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30920-y>
- [4] Wang, S.J., Liu, Q.M. and Zhang, D.F. (2004) Karst Rocky Desertification in Southwestern China: Geomorphology, Landuse, Impact and Rehabilitation. *Land Degradation & Development*, **15**, 115-121. <https://doi.org/10.1002/ldr.592>
- [5] Xu, E. and Zhang, H. (2021) Human-Desertification Coupling Relationship in a Karst Region of China. *Land Degradation & Development*, **32**, 4988-5003. <https://doi.org/10.1002/ldr.4085>
- [6] Yang, Q., Wang, K., Zhang, C., Yue, Y., Tian, R. and Fan, F. (2010) Spatio-Temporal Evolution of Rocky Desertification and Its Driving Forces in Karst Areas of Northwestern Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, **64**, 383-393. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0861-3>
- [7] Xu, E., Zhang, H. and Li, M. (2013) Mining Spatial Information to Investigate the Evolution of Karst Rocky Desertification and Its Human Driving Forces in Changshun, China. *Science of the Total Environment*, **458**, 419-426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.048>
- [8] Chen, S., Wei, X., Cai, Y., Li, H., Li, L. and Pu, J. (2024) Spatiotemporal Evolution of Rocky Desertification and Soil Erosion in Karst Area of Chongqing and Its Driving Factors. *Catena*, **242**, Article ID: 108108.

- <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108108>
- [9] Zhang, L., Xiong, K., Wang, X., *et al.* (2022) Study of Soil Nitrogen in Karst Rocky Desertification Areas: A Literature Review. *Polish Journal of Environmental Studies*, **31**, 5533-5547. <https://doi.org/10.15244/pjoes/152450>
- [10] Pan, S., He, Z., Gu, X., Xu, M., Chen, L., Yang, S., *et al.* (2024) Agricultural Drought-Driven Mechanism of Coupled Climate and Human Activities in the Karst Basin of Southern China. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 12072. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62027-w>
- [11] 张玉泽, 任建兰, 刘凯, 等. 山东省生态安全预警测度及时空格局[J]. 经济地理, 2015, 35(11): 166-171, 189.
- [12] 邹细霞, 陈海旭, 陈燕英, 等. 喀斯特石漠化产生的必要条件及其治理足迹[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(11): 1154-1166.
- [13] 陈正发, 李靖, 段青松, 等. 基于 USLE 模型的云南省坡耕地土壤侵蚀和养分流失评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 124-134.
- [14] Zhang, Z., Huang, X. and Zhou, Y. (2020) Factors Influencing the Evolution of Human-Driven Rocky Desertification in Karst Areas. *Land Degradation & Development*, **32**, 817-829. <https://doi.org/10.1002/ldr.3731>
- [15] 岳跃民, 王克林, 罗为群, 等. 人地耦合视角下喀斯特石漠化地区生态系统服务提升[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8159-8164.
- [16] Tong, X., Brandt, M., Yue, Y., Horion, S., Wang, K., Keersmaecker, W.D., *et al.* (2018) Increased Vegetation Growth and Carbon Stock in China Karst via Ecological Engineering. *Nature Sustainability*, **1**, 44-50. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0004-x>
- [17] 许闯胜, 刘伟, 宋伟, 等. 差异化开展国土空间生态修复的思考[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 384-394.
- [18] 刘威. 广西桂林市岩溶地区石漠化土地动态变化研究及预测[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2021.