

研究论文

融合 Logistic 回归的石漠化智能评价模型及空间分析

——以贵州省毕节市为例

刘泽¹, 王嘉琳^{2,3,4*}, 陈建平⁵

摘要 石漠化是制约我国西南岩溶区生态环境与社会经济协调发展的核心问题。针对传统石漠化评价方法存在的主观性强、难以量化等问题,构建了一套融合 Logistic 回归与空间分析技术的智能化石漠化定量评价模型,并在贵州省毕节市进行了案例验证。结合石漠化的演化过程与形成机制,本研究从自然与人文两个维度筛选 12 个候选因子,并利用 Logistic 回归模型分析候选因子影响石漠化的显著性与状态划分的阈值,最终确定植被覆盖度、基岩裸露度、坡度、地表粗糙度和剖面曲率 5 个关键因子作为建模基础。评价模型结合熵值法实现因子权重的自适应赋值,并在 GIS 平台上智能完成石漠化空间分布与程度划分。精度验证表明模型分类精度为 82.6%, Kappa 系数达 0.76,揭示了毕节市石漠化的空间分布及其分异特征。该方法通过阈值量化、权重优化与多源数据融合,为岩溶区石漠化动态监测与差异化治理提供基础数据,对推进生态修复与区域可持续发展具有重要实践价值。

关键词 石漠化;智能评价模型;Logistic 回归;熵值法;贵州毕节

岩溶区作为全球典型的脆弱生态系统,其面积约占陆地总面积的 12.0%^[1]。中国西南岩溶区作为全球 3 大连续发育区之一^[2-5],碳酸盐岩在水岩作用下易发生溶蚀,叠加不合理人类活动,导致植被退化、土地资源锐减等复合生态问题^[6-8]。由此引发的石漠化通过

土地生产力丧失加剧生态退化,直接威胁区域生态安全与社会经济发展^[9-11]。当土地退化至不可逆阶段时,将引发“生态-生计”系统崩溃,成为区域可持续发展的核心制约因素。

针对中国石漠化分布广泛、特征复杂的现实背景,研究者从不同技术路径出发,构建了多种信息提取与评价方法体系,主要包括人机交互法、比值增强法、监督与非监督分类法、指标评价法及专家经验法等。人机交互法基于影像色调、纹理及形状等特征建立解译标志,适用于小尺度精细识别^[12-13],但效率低、主观性强;比值增强法^[14]通过植被与裸岩波段比值突显差异,虽可提高影像辨识度,但依赖于波段比值进

1. 中国地质大学(北京)人工智能学院,北京 100083
2. 中国气象局国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心),北京 100081
3. 中国气象局许健民气象卫星创新中心,北京 100081
4. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081
5. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083

收稿日期: 2025-05-14; 修回日期: 2025-08-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB740200)

作者简介: 刘泽,博士研究生,研究方向为遥感地质学,电子信箱: 3004220010@email.cugb.edu.cn; 王嘉琳(通信作者),博士,研究方向为地理空间智能,电子信箱: wangjh@cma.gov.cn

引用格式: 刘泽,王嘉琳,陈建平. 融合 Logistic 回归的石漠化智能评价模型及空间分析——以贵州省毕节市为例[J]. 科技导报, 2026, 44(17): 114-127; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.05.00081

行差异对比,易受地物光谱重叠、地形复杂性和覆盖类型变化的影响;监督与非监督分类方法依托遥感光谱特性进行自动分级^[15-18],具备较高效率,然而前者依赖训练样本,后者分类精度较低,均受光谱混合及气候干扰影响;指标评价法通过多因子加权构建综合评价体系^[19-23],是目前应用广泛的区域尺度方法,虽能较好表征区域石漠化特征,但在实际应用中存在显著局限:既有研究多采用单一或少量评价指标,缺乏系统性评价框架,且关键参数(如因子权重、分级阈值)多依赖专家经验赋值,主观性强且缺乏量化依据;专家经验法^[24-25]依赖分类规则与领域知识,具备一定适应性,但通用性与可重复性较差。总体来看,现有方法各具优势,但普遍存在适用范围受限、自动化水平不足、主观性强、区域适应性差等问题,亟需探索更加高效、智能、通用性强的石漠化识别与评价技术路径。随着地理智能技术的发展,地理科学与人工智能的深度融合正在推动地理空间感知、分析与决策向智能化方向发展,为复杂地理环境问题的定量评价与智能分析提供了新的技术路径^[26]。

针对上述局限性,本研究融合 Logistic 回归与空间分析技术,构建定量化石漠化智能评价模型。首先结合石漠化的演化过程与形成机制,选取石漠化评价因子,然后运用 Logistic 回归确定石漠化程度划分阈值,最后结合熵值法客观赋权建立多维评价体系。以典型石漠化区域——贵州省毕节市为研究对象,旨在检验评价模型的可靠性,为潜在石漠化区域提供科学预警依据,同时为已退化区域提供基础数据。研究成果对促进岩溶区可持续发展、协调区域生态保护与资源开发利用具有重要理论价值。

1 石漠化演化过程及影响因素分析

石漠化,又称石质荒漠化,是土地荒漠化的一种。该概念最早由中国科学院和贵州学者提出,是指在湿润气候和岩溶发育地区,由于人为活动破坏植被、加剧土壤侵蚀,导致大面积基岩裸露,呈现类似荒漠景观的土地退化现象^[27]。

1.1 石漠化演化过程

石漠化是由物理、化学和生物过程共同作用引起

的复杂土地退化现象,主要包括植被退化、土壤侵蚀、地表水流失、碳酸盐岩溶蚀及土地生产力下降5个关键过程^[3]。其演化具有非线性特征,各过程相互影响、相互促进,可表现为加速或减缓^[1]。植被退化通常为演化起点,当气候变化或人为干扰导致植被减少时,其水土保持功能减弱,引发土壤侵蚀^[28]。南方岩溶区土壤疏松、层薄、附着力弱,易在降雨作用下被冲刷流失^[29]。同时,岩溶发育导致地表水快速下渗,引发区域性干旱,不利于植被恢复。碳酸盐岩在雨水、温度和 CO₂ 作用下易溶蚀崩塌,形成裸岩地貌,生态环境进一步恶化^[30]。随着过程持续,土壤有机质减少、理化与生物特性退化,土地生产力下降,生态系统难以维持。总体而言,石漠化由上述过程共同驱动,而滥伐植被、资源过度开发和土地利用失衡等人类活动进一步加剧了其进程与生态脆弱性。

1.2 石漠化影响因素分析

石漠化是由自然和人文因素共同作用引发的土地退化过程,石漠化的发生与发展涉及多种复杂的因素,其中自然因素起到了基础性作用,而人类活动则在推动其加剧方面发挥了重要作用。

石漠化的形成与多种自然因素密切相关。植被覆盖度降低与岩石裸露共同促进了土壤侵蚀与基岩暴露。在岩溶区,土层薄、贫瘠且成土作用缓慢,导致植被生长受限、保水性差,易受侵蚀^[31]。地形起伏大使水流冲刷增强,土壤难以堆积,基岩暴露进一步加剧石漠化^[32]。气候方面,亚热带季风气候的高温多雨和酸性降水加速碳酸盐岩溶蚀,促进土壤与岩石流失,为石漠化演化提供有利条件。

人文因素是石漠化的外因,可显著加速其形成。尽管自然因素可能缓慢导致石漠化,但人类活动对生态环境的破坏使得这一过程加剧。过度放牧与乱砍滥伐直接削弱了植被的土壤保护功能,诱发了水土流失。此外,低下的环境承载力、传统的农业生产方式与持续的人口压力相互叠加,共同推动了石漠化的恶性发展^[33]。

2 研究方法

本研究构建了一个多阶段石漠化定量评价模型

(图1),融合定性判断与定量建模。首先,根据石漠化演化过程和形成机制筛选评价因子。随后,利用 Logistic 回归模型构建各因子的石漠化程度阈值。该模型能够自动学习因子与石漠化程度之间的非线性关系,并通过最大似然估计拟合数据,避免人为设定阈值的不确定性,更加适应复杂的自然环境和不确定性的评估标准。然后,采用熵值法计算各因子权重,从

信息熵角度衡量因子在评价系统中的贡献度,保证权重的客观性和区域适应性。最后,通过综合分析法对研究区石漠化程度进行空间叠加评价,揭示石漠化的空间分布格局与严重程度。该方法兼顾模型可解释性与实际适用性,适用于大尺度、多因子驱动下的石漠化程度评价分析。

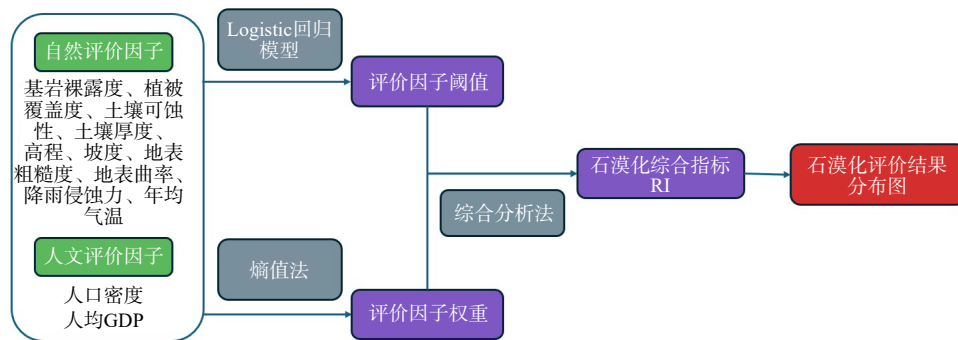


图1 石漠化评价模型构建流程

2.1 Logistic 回归模型

Logistic 回归是基于线性回归的多维分类模型^[34],适用于研究分类结果与影响因素的关系。该模型应避免评价因子(自变量)间存在较强的多重共线性,否则可能影响参数估计的准确性。因此,在应用前需检验自变量相关性,并对高度相关的因子予以剔除或合并。在此基础上,为了描述石漠化发生的概率 P 与影响石漠化的评价因子 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 之间的关系,需要对 P 作如下变换以对应 x 的函数^[35]

$$\ln [P/(1-P)] = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad (1)$$

式中, P 为石漠化发生概率, x_i 为第 i 个评价因子, β_0 为截距, β_i 为对应系数, n 为评价因子总数。

因为转换的异方差性^[36],采用最大似然法进行计算。通过 Wald 统计量(W)检验每个影响因子对石漠化发生的显著性,即

$$W = [\hat{\beta}_i / s(\hat{\beta}_i)]^2 \quad (2)$$

式中, $\hat{\beta}_i$ 为评价因子系数估计值, $s^2(\hat{\beta}_i)$ 为 $\hat{\beta}_i$ 的方差估计值, W 值越大,自变量对因变量的影响越显著^[37]。

鉴于石漠化的形成过程是一个非线性过程,每个评价因子对石漠化程度有不同的影响值,而该值就是

划分不同石漠化状态的阈值^[38]。为划分不同的石漠化状态,使用四分法为每个评价因子设定 3 个阈值,并构建 4 个 Logistic 回归模型,分别表示无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化。具体建模公式如下。

当 $X_i < a$ 时,取 $Y_{i1}=1, Y_{i2}=0, Y_{i3}=0, Y_{i4}=0$, 则

$$\ln \left[\frac{P(\text{不发生石漠化})}{P(\text{发生石漠化})} \right] = \beta_i X \quad (3)$$

根据划分石漠化状态的 3 个标准值,依次构建不同石漠化状态的回归模型。

令 $D_1 = e^{\beta_1}, D_2 = e^{\beta_2}, D_3 = e^{\beta_3}, D_4 = e^{\beta_4}, D_5 = e^{\beta_1}/e^{\beta_2}, D_6 = e^{\beta_2}/e^{\beta_3}, D_7 = e^{\beta_3}/e^{\beta_4}$

则 $D_1(e^{\beta_1})、D_2(e^{\beta_2})、D_3(e^{\beta_3})、D_4(e^{\beta_4})$ 的内涵是表示该分布状态下影响这一石漠化状态产生和不产生几率的比例。同时,把 $D_5、D_6、D_7$ 作为石漠化状态变化的相对危险度指标。以 D_7 为例,其指的是发生中度石漠化概率与发生重度石漠化概率的比值。由于只分析研究石漠化转化递变的具体过程,所以只思考石漠化临近状态相互之间的影响关系。从统计分析学研究分析的作用角度看^[39],当该极限值点相对危险度无限逐步趋向于 1 的时候,这个阈值点所代表的数值就

是划分这一评价因子相邻状态的阈值。

2.2 熵值法

熵值法是一类用于判定某一标准离散水平的数学模型^[40],也是一种常用的指标权重计算方法^[41-42]。该方法依据熵的特性,通过计算熵值可以判断事件的概率性和无序程度,同时也能评估其离散性^[43]。具体步骤包括数据标准化、计算信息熵、变异系数及权重等环节。

对正向和负向指标分别进行标准化处理,标准化计算方法如下^[43]。

正向指标

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \times \sigma + (1 - \delta) \quad (0 < \delta < 1) \quad (4)$$

负向指标

$$X_{ij} = \frac{\min\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \times \sigma + (1 - \sigma) \quad (5)$$

式中, X_{ij} 为标准化值, x_{ij} 为原始值, $\min\{x_j\}$ 、 $\max\{x_j\}$ 分别为指标最小值和最大值, σ 为调节系数。

各指标的信息熵计算公式为

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (6)$$

式中, 常量 $K = 1/\ln(m)$, $0 \leq E_j \leq 1$ 。

各指标的权重通过变异系数 $d_j = 1 - E_j$ 计算得到

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (7)$$

式中, m 为样本数, n 为指标总数, W_j 表示第 j 个指标的权重。

3 研究区概况及数据来源

3.1 研究区概况

毕节市(26°21'~27°46'N, 103°36'~106°43'E)地处贵州省西北乌蒙山区(图2)。本图及下文各图均基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2024)0650 号的标准地图制作)。气候属季风型,夏无酷暑、冬无严寒,雨量充沛,立体气候明显。地貌以山地为主,地形起伏大、切割强烈,平均海拔约 1600 m。地质方面,自震旦系至第四系地层均有分布,海相碳酸盐岩(石灰岩、白云岩)占优势,岩溶发育良好。构造上,毕节市位于扬子准地台黔北台隆,处于川滇、川黔经纬向构造交汇区,发育多方向断裂,构造活动频繁,增强岩溶作用与地下水系统发展^[44]。典型喀斯特地貌广泛分布,地表水“漏斗化”明显,土壤浅薄且生态脆弱,人类活动加剧水土流失和石漠化,是贵州石漠化最严重地区之一。

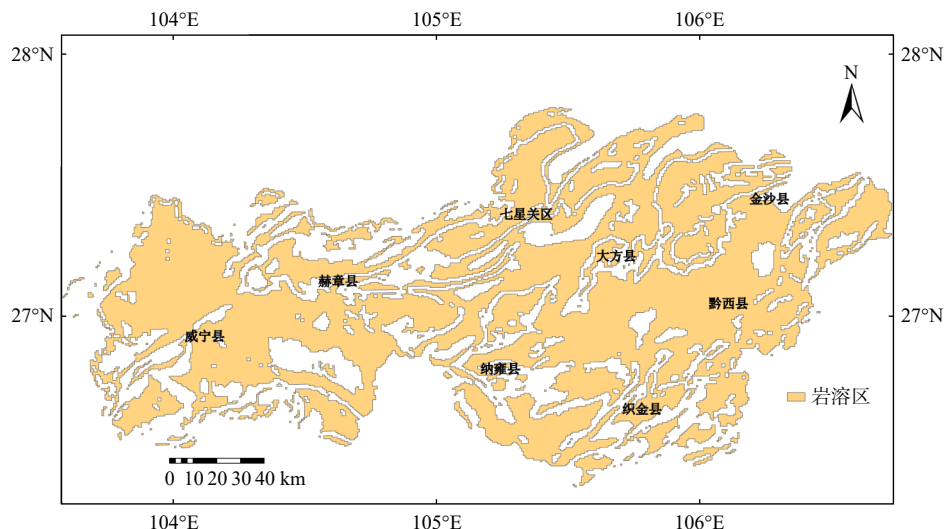


图2 毕节市岩溶区分布

3.2 数据来源

本研究用到的数据分别是 landsat-8 影像、数字

高程模型(digital elevation model, DEM)数据及其他数据。本研究区为贵州省毕节市,共覆盖 6 景数

据,数据均在地理空间数据云下载,影像获取时间见表 1。

表 1 landsat-8 数据介绍

遥感影像	获取时间	行列号
Landsat-8 OLI/ TIRS	20180607	127041
Landsat-8 OLI/ TIRS	20180607	127042
Landsat-8 OLI/ TIRS	20180310	128041
Landsat-8 OLI/ TIRS	20190329	128042
Landsat-8 OLI/ TIRS	20190310	129041
Landsat-8 OLI/ TIRS	20180402	129042

研究区位于云贵高原,海拔高、地形起伏大且云量多,因此优先选用云量较少的影像以提高遥感精度。原计划使用 2018 年 Landsat-8 影像,但 2 景受云量干扰严重,改用 2019 年同季节、覆盖一致且云量更低的影像,以保证数据完整性和结果可靠性。本研究所用的其他数据包括: DEM 数据来自地理空间数据云,分辨率为 30 m; 年均气温、年均降水量、土壤厚度数据均来自国家地球系统科学数据中心,分辨率为 1000 m; 土壤数据来自世界土壤数据库,分辨率 1000 m; 人口密度数据采用 World Pop 世界人口密度地图,分辨率 1000 m; 人均 GDP 数据来源于《毕节市年鉴》。

4 石漠化评价模型建立及评价结果

4.1 石漠化程度划分

石漠化程度划分是石漠化信息提取研究的核心基础,其科学性与合理性直接影响治理决策的有效性。通过界定不同等级的石漠化程度,既可量化评估生态退化强度,又能为差异化治理策略提供科学依据。本研究遵循综合性、稳定性、可操作性、科学性^[45]及相对一次性 5 项基本原则,构建分级评价框架。

当前石漠化程度划分因研究尺度与目标不同存在显著差异,尚无统一标准。既有研究多依据地表覆盖或基岩裸露率,将石漠化分为 3~6 级^[46-48]。本研究结合毕节市岩溶区地貌特征及人地关系特点,采用

4 级分类体系:无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化及重度石漠化,以精准表征研究区石漠化空间分布特征和发育程度。

4.2 评价因子选择

本研究结合石漠化的演化过程与形成机制,选取对其形成与发展具有代表性的因子,构建贵州毕节地区的石漠化评价体系。评价因子分为自然因子和人文因子 2 类。自然因子包括表象、土壤、地形和气候。表象因子中的基岩裸露度限制土壤发育和植被生长,削弱生态稳定性;植被覆盖度反映生态系统恢复力,破坏后易引发水土流失并加速石漠化。土壤因子中的可蚀性决定土壤受侵蚀程度,厚度越薄则生态稳定性降低,加剧石漠化。地形因子包括高程、坡度、地表粗糙度和剖面曲率,高海拔区干扰小、石漠化较轻;坡度和曲率增大会加快径流、增强侵蚀;粗糙度大则水土保持能力下降。气候因子包括降雨侵蚀力和年均气温,降雨强度增大会加剧径流与侵蚀,温度升高则影响植被生长,降低土壤稳固性。人文因子包括人口密度和人均 GDP,人口集中和经济薄弱地区土地开发压力大,植被退化、土壤破坏明显,易加速石漠化。上述 12 个评价因子空间分布见图 3。

4.3 石漠化定量评价模型构建

根据前人研究情况^[19,24,49],岩石裸露度因子、植被覆盖度因子以及坡度因子都有比较完善的等级划分体系,在此不再进行重复计算。

为保证 Logistic 回归模型的有效性,需分析因子间相关性以避免多重共线性干扰。通过 9 个候选因子的相关系数矩阵(表 2)发现,“高程”与“年均气温”($r=-0.93$)及“降雨侵蚀力”($r=-0.78$)存在显著负相关,“人均 GDP”与“降雨侵蚀力”($r=0.82$)相关性较强。为降低共线性风险,本研究剔除“高程”和“人均 GDP”,保留其余 7 个因子进行建模,从而兼顾因子代表性和模型稳定性,提高解释能力。

根据筛选所得到的 7 个评价因子。首先,分别运用式(2),对 7 个评价因子通过计算 Wald 统计量来检验它们对于石漠化影响的显著程度,计算结果如表 3 所示。这 7 个评价因子的统计量(W)都偏大,说明这 7 个因子对于石漠化的影响程度比较显著。

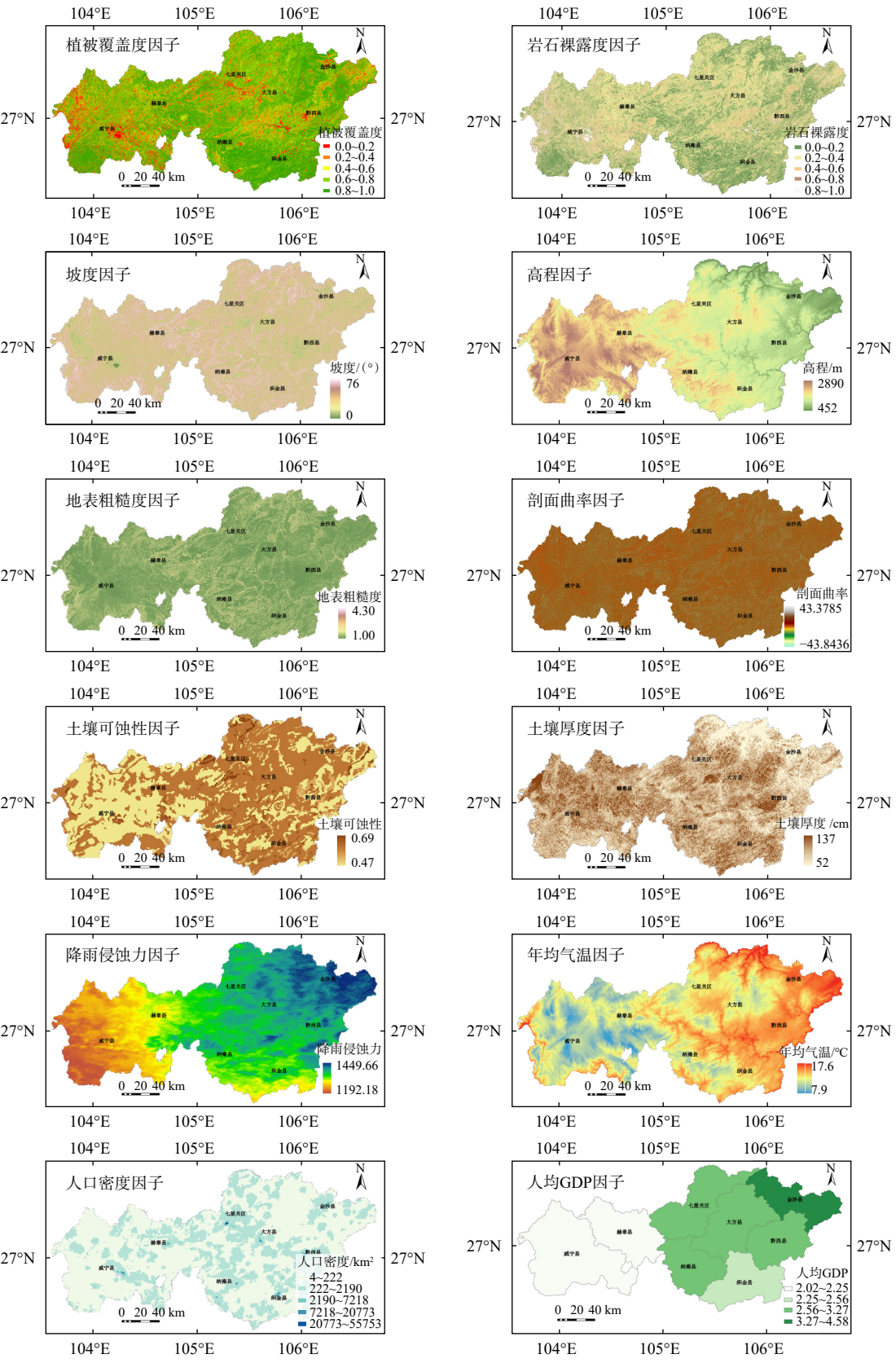


图3 毕节市12种评价因子分布情况

针对这7个石漠化评价因子,运用 SAS(statistical analysis system)统计分析软件中的 Logistic 回归模型

模块,计算第2节所提到的 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 , 其分析流程可简要表达为图4。

表 2 不同石漠化评价因子之间的相关系数矩阵

	土壤厚度	地表粗糙度	高程	剖面曲率	降雨侵蚀力	年均气温	人口密度	人均GDP	土壤可蚀性
土壤厚度	1	-0.23	0.39	-0.02	-0.3	-0.39	0.02	-0.40	-0.07
地表粗糙度	-0.23	1	-0.04	-0.02	-0.02	0.071	-0.08	-0.02	0.11
高程	0.39	-0.04	1	0.10	-0.78	-0.93	-0.05	-0.77	-0.29
剖面曲率	-0.02	-0.02	0.10	1	-0.00	-0.06	-0.01	0.00	0.00
降雨侵蚀力	-0.30	-0.02	-0.78	-0.00	1	0.58	0.02	0.82	0.27
年均气温	-0.39	0.07	-0.93	-0.06	0.58	1	0.06	0.64	0.27
人口密度	0.02	-0.08	-0.05	-0.01	0.02	0.06	1	0.02	0.03
人均GDP	-0.40	-0.02	-0.77	0.00	0.82	0.64	0.02	1	0.22
土壤可蚀性	-0.07	0.11	-0.29	0.00	0.27	0.27	0.03	0.22	1

表 3 评价因子 Wald 统计量

序号	因子	回归系数(β)	统计量(W)
1	土壤厚度	0.029	419.651
2	地表粗糙度	-19.519	2289.644
3	剖面曲率	-1.399	22.487
4	降雨侵蚀力	-0.006	676.234
5	年均气温	-0.195	594.387
6	人口密度	0.001	153.644
7	土壤可蚀性	-7.567	1173.221

算法
1: for i = 1 to 4 do
2: 设置模型变量 $y \leftarrow y_i$
3: 调用 proc_logistic (data, y, x)
4: 输出 OddsRatios 至 D_i
5: end for

图 4 计算伪代码

程序运行结果为各因子遍历的 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 。
通过分析结果发现,在这 7 个评价因子中,只有

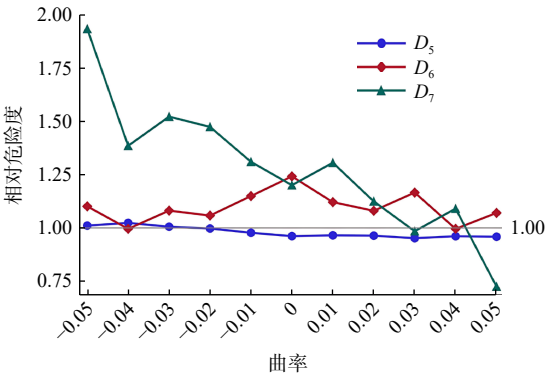


图 5 剖面曲率指标计算结果

地表粗糙度因子和剖面曲率因子能够比较清晰地计算出阈值。从统计学上来说,相对危险度趋近于 1 说明这个数值正是发生 2 种不同状态的阈值。根据剖面曲率因子的运算结果(图 5)可知,排除掉误差的影响, D_5 、 D_6 、 D_7 最接近 1 的值分别是 0.99、1.08、1.09,而这 3 个数所对应的剖面曲率分别是 -0.02、0.02、0.04,因此,剖面曲率为 -0.02、0.02、0.04 3 个值为石漠化 4 种状态演变的阈值。

同理,根据地表粗糙度结果(图 6)可知, D_5 、 D_6 、 D_7 最接近 1 的值分别是 0.96、1.02、0.85,而这 3 个数所对应的地表粗糙度分别是 1.1、1.08、1.04。因此,地表粗糙度为 1.1、1.08、1.04 3 个值为石漠化 4 种状态演变的阈值。

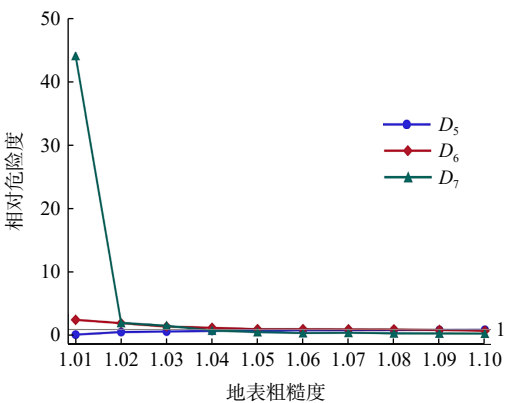


图 6 地表粗糙度指标计算结果

其他因子未能明确划分石漠化 4 级状态。以人口密度为例(图 7), D_5 、 D_6 、 D_7 相对危险度分别为 1.00、0.99、1.06,对应人口密度为 220、280、160。按阈值划分,4 个区间存在重叠,无法清晰区分石漠化等

级。因此,本研究最终选取地表粗糙度、剖面曲率,以及已有较完善分类体系的基岩裸露度、植被覆盖度和坡度,共 5 个指标作为石漠化评价因子。

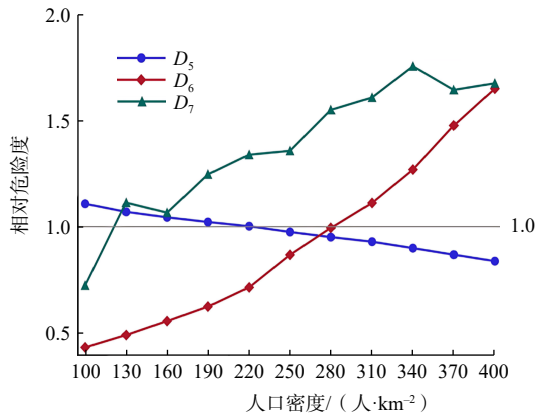


图 7 人口密度因子计算结果

根据已有研究及石漠化四级划分原则,本研究确定各评价因子的轻度、中度和重度阈值,并将具体区间及赋值整理如表 4 所示,用于后续石漠化评价。

表 4 石漠化评价因子等级赋值

评价因子	无石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化
植被覆盖度因子	70%~100%	50%~70%	25%~50%	0%~25%
基岩裸露度因子	0~30%	30%~50%	50%~70%	70%~100%
坡度因子	0°~18°	18°~22°	22°~25°	25°~90°
地表粗糙度因子	>1.1	1.08~1.1	1.04~1.08	<1.04
剖面曲率因子	<-0.02	-0.02~0.02	0.02~0.04	>0.04
赋值	0	4	8	12

根据前文所述的式(7)以及上文中所选取的评价因子,进一步对 5 个评价因子的权重进行了计算。其中,植被覆盖度因子和地表粗糙度因子属于负向指标,其他 3 个因子为正向指标,根据公式计算结果见表 5。

表 5 石漠化评价因子权重

评价因子	信息熵 E_j	变异系数 d_j	权重 W_j
基岩裸露度因子	0.992789	0.007211	0.287427
植被覆盖度因子	0.988984	0.011016	0.439110
地表粗糙度因子	0.998664	0.001336	0.053239
坡度因子	0.996091	0.003909	0.155791
剖面曲率因子	0.998383	0.001617	0.064433

根据表 5,植被覆盖度权重最大(0.44),对石漠化贡献最大;地表粗糙度权重最小(0.05)。其余各因子权重为:基岩裸露度 0.29,坡度 0.16,剖面曲率 0.06。

根据前人的研究^[12,18,50]以及 logistic 回归模型所得到的结果,对基岩裸露度、植被覆盖度、坡度、地表粗糙度以及剖面曲率 5 个因子进行重新赋值后,依照运用熵值法所确立的 4 种评价因子的权重,建立石漠化综合评价指标,最终石漠化的评价等级由石漠化综合指标来确定(表 6)。

$$R_i=0.29\times R+0.44\times V_{eg}+0.05\times S_r+0.16\times S+0.06\times P_c$$

(8)

式中, R_i 代表石漠化综合指标, R 代表基岩裸露度因子, V_{eg} 代表植被覆盖度因子, S_r 代表地表粗糙度因子, S 代表坡度因子, P_c 代表剖面曲率因子。

表 6 石漠化评价等级

综合指标 R_i	0~3	3~4	4~8	8~12
石漠化程度	无石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化

通过 ArcGIS 中的栅格计算器完成石漠化综合指标的计算,生成石漠化综合指标图。在此基础上,依据综合指标值划分石漠化程度,得到研究区石漠化程度的空间分布图。鉴于前文已指出石漠化主要发生于岩溶区范围内,进一步将石漠化程度分布图与岩溶区数据进行空间叠加分析,最终获取毕节市石漠化程度评价结果的空间分布图(图 8)。

5 结果与讨论

5.1 评价结果精度分析

本研究成果通过中国地质科学院岩溶地质研究所提供的 2018 年毕节市石漠化分类图进行验证。通过卫星遥感的影像按照 4 种不同石漠化解译标志得到 2018 年毕节市四分法石漠化程度分类图,以该数据为实际数据对上述石漠化评价模型进行验证,得到毕节市石漠化四分法结果分布(图 9)。

通过混淆矩阵以及 Kappa 系数对所建立的石漠化评价模型进行精度验证。其中,经过计算,总体分类精度为 82.6%,Kappa 系数为 0.76,Kappa 系数为

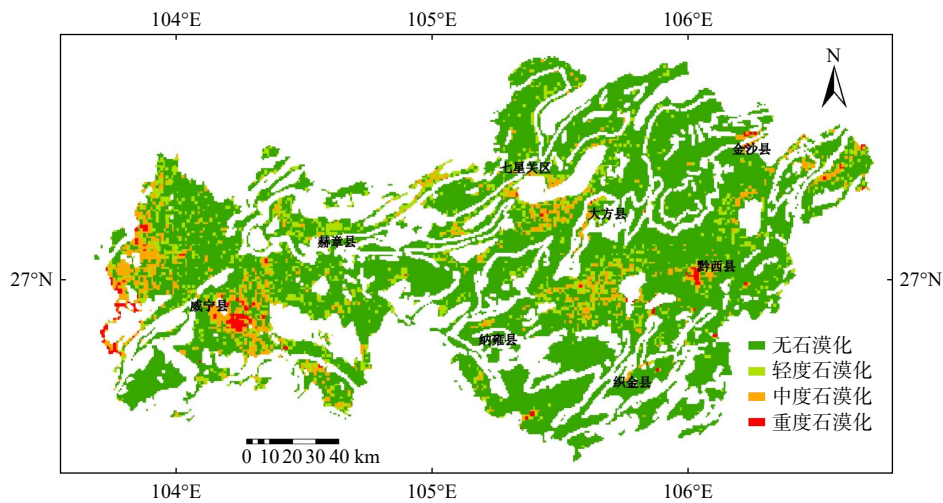


图 8 毕节市石漠化评价结果分布

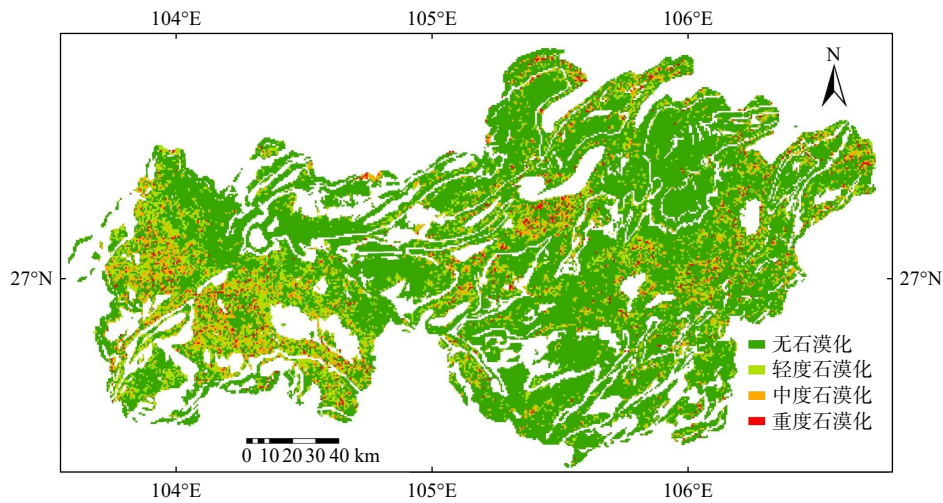


图 9 毕节地区石漠化实际结果分布

0.76, 表明本研究构建的石漠化评价模型具有较好的分类精度和一致性。

5.2 石漠化评价模型精度影响因素分析

石漠化评价精度主要取决于因子配置的科学性和遥感数据的适用性。因子权重影响各因子对结果的贡献, 遥感数据的时间选择则决定关键因子的时效性, 共同影响评价的准确性和稳定性。

1) 权重计算方法对模型精度的影响。为了深入分析因子权重赋值方法对石漠化评价模型精度的影响, 本研究对比了熵权法和层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)在权重分配和分类结果上的差异(表 7)。结果显示, 2 种方法赋予各因子的权重存在明显差异, 进而对模型预测精度产生显著影响。

表 7 不同权重赋值方法的因子权重对比

因子	AHP权重	熵权法权重
岩石裸露度	0.510	0.29
植被覆盖度	0.249	0.44
坡度	0.137	0.16
地表粗糙度	0.085	0.05
剖面曲率	0.019	0.06

AHP 方法基于专家经验对因子重要性进行判断, 结果显示岩石裸露度权重最高, 达到 0.510, 而植被覆盖度仅为 0.249, 其他因子权重普遍较低。这种偏向可能导致模型过于依赖岩石裸露度, 忽视植被退化等在石漠化形成中的关键作用。相比之下, 熵权法依据因子的信息熵值分配权重, 体现了数据本身的客观差异性, 赋予植被覆盖度最高权重(0.44), 其次是岩石裸

露度(0.29)和坡度(0.16),其余因子权重较均衡,更符合石漠化的自然演化机制。

在模型精度方面,基于熵权法构建的模型表现更优,整体分类精度达到 82.6%, Kappa 系数为 0.76,显示出较高的一致性与可靠性。反观基于 AHP 的模型,

分类精度仅为 67.1%, Kappa 系数 0.56,误判较多,尤其在轻度石漠化区常将非石漠化区误判为石漠化区。相关评价结果如图 10 所示。熵权法通过抑制单一因子的主导作用,增强了模型对多因子综合信息的响应能力,有效提升了石漠化不同等级区的识别准确性。

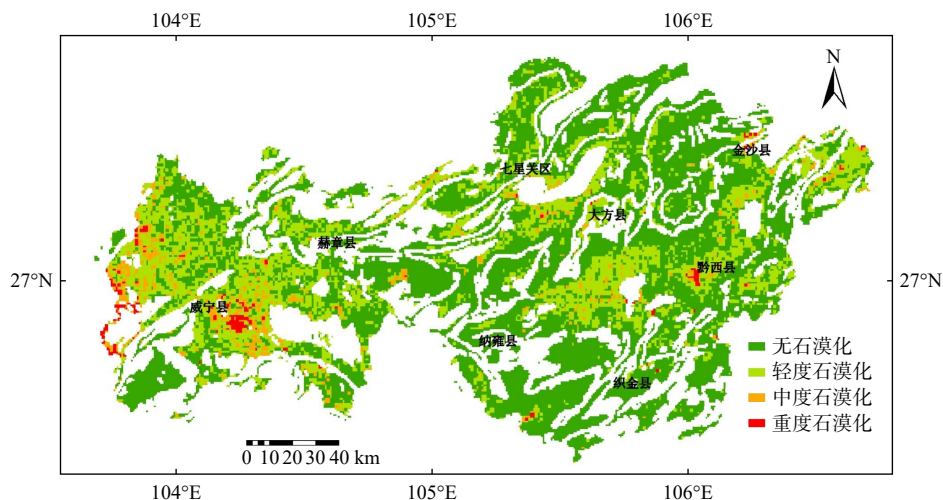


图 10 基于层次分析法的石漠化评价结果

综上所述,因子权重确定方法在石漠化评价模型中起着关键作用。熵权法以其客观、数据驱动的优势,减少了人为主观偏差,能够更真实地反映各因子的实际影响力,因而在多因子复杂系统中展现出更高的适应性和精确性。相较之下,AHP 方法虽然便于构建因子关系结构,但在专家意见不统一或存在主观偏差时,易导致评价结果失真。因此,在构建高精度石漠化评价模型时,采用熵权法的客观赋权方式具有明显优势。

2) 数据时间差异对模型精度的影响。数据采集时间的差异,尤其是遥感影像的获取时间,显著影响了植被覆盖度和岩石裸露度的反演结果,进而影响石漠化评价的精度。由于植被覆盖度和岩石裸露度均通过遥感影像反演获取,其结果受影像采集时间、季节变化及气候条件等多因素影响。

植被覆盖度表现出明显的季节性波动:生长季节覆盖度较高,而干旱季节或降水不足时显著降低。岩石裸露度同样受季节影响,干旱季节裸露度上升,湿润季节植被生长掩盖裸露岩石。不同时间采集的影像可能导致反演结果差异较大,影响石漠化等级的准确判别。

此外,影像采集时间的差异也影响模型在不同区域的适用性。例如,夏季影像显示高植被覆盖度,而冬季则较低,导致模型在不同时间段的精度出现波动。时间跨度过大可能掩盖细微变化,尤其对轻度石漠化区的判别影响明显。因此,数据时间选择和一致性是保证石漠化评价精度的重要因素。研究区域内若影像时间跨度较大,将引入季节性和年际变化误差,降低评价准确性。

5.3 毕节地区石漠化评价模型空间分析

由上文所述,本次石漠化评价模型评价结果较好。根据本研究得到的毕节市石漠化评价结果,对 2018 年毕节市石漠化情况进行分析。基于本次石漠化评价结果,2018 年毕节市岩溶区石漠化总面积为 3539 km²,占总面积 20.4%。其中,轻度石漠化 1993 km² (56.3%)、中度 1358 km²、重度 188 km²。

2010 年,毕节市石漠化面积 7008.38 km²,占国土总面积 26.10%。石漠化面积中,轻度石漠化 4577.18 km²,占国土总面积的 17.05%;中度石漠化 2067.69 km²,占国土总面积的 7.70%;重度石漠化 312.94 km²,占国土总面积的 1.17%;极重度石漠化 51.76 km²,占国土总面积的 0.19%。2018 年毕节市石

漠化程度与 2010 年毕节市石漠化程度相比, 总体石漠化程度明显减轻。

毕节市各县(区)石漠化空间统计显示(表 8), 石漠化面积最大的区县为威宁县, 达 1433 km², 占其岩溶区总面积 35%, 占全市石漠化总面积的 40.5%, 各等级面积均高于其他区县。除威宁县外, 大方县的轻

度和中度石漠化面积相对较大, 其中轻度石漠化面积最小的为织金县和纳雍县, 中度石漠化面积最小的为纳雍县; 重度石漠化面积则以黔西县较大, 七星关区、纳雍县和赫章县最小。整体来看, 石漠化程度较轻的区县为织金县和纳雍县, 需要进一步改善的区县为大方县和赫章县。

表 8 毕节地区各区县石漠化面积统计表

	无石漠化/ km ²	轻度石漠化/ km ²	中度石漠化/ km ²	重度石漠化/ km ²	石漠化总面积/ km ²	石漠化面积占比/%
七星关区	1700	298	139	2	439	21
大方县	1942	323	208	6	537	22
黔西县	1771	173	104	24	301	14
金沙县	1350	116	103	16	235	15
织金县	1574	76	45	8	129	8
纳雍县	1380	76	40	2	118	8
威宁县	2655	633	673	128	1434	35
赫章县	1433	298	46	2	346	19

6 结论

石漠化是西南岩溶区生态退化的典型表现, 严重制约区域生态安全与社会经济协调发展。传统石漠化评价方法存在主观性强、难以量化等问题, 亟需构建科学、客观的评价模型。本研究以贵州省毕节市为例, 构建融合 Logistic 回归与空间分析的石漠化定量评价模型, 主要结论如下。

1) 综合自然与人文 2 类影响因子, 初选 12 个候选指标, 经 Logistic 回归显著性检验与状态划分分析, 最终确定植被覆盖度、基岩裸露度、坡度、地表粗糙度和剖面曲率 5 个关键因子, 并基于熵值法实现权重自适应赋值。

2) 模型在 GIS 平台上实现石漠化程度划分与空间分布制图, 精度验证结果表明, 分类精度为 82.6%, Kappa 系数为 0.76, 具有良好的可靠性和实用性。

3) 毕节市 2018 年石漠化面积约为 3539 km², 占全市岩溶区面积的 20.39%。威宁县石漠化程度较高, 而织金县和纳雍县石漠化程度相对较轻。

本研究构建的石漠化评价模型融合演化机制理解与数据驱动方法, 具有一定的区域应用潜力。模型通过非线性建模实现石漠化等级的动态划分, 避免人

为主观设定, 提升分类精度; 同时结合客观权重分配与空间叠加分析, 有效应对因子间复杂交互, 精准揭示石漠化的空间分布特征与异质性, 可为岩溶区石漠化监测与生态治理提供科学支持与决策依据。

本研究虽然在石漠化评价中引入了矿产评价思路, 但仍存在局限性: 一方面, 模型仅在毕节市区域开展实证分析, 其在其他地区的适用性尚待验证; 另一方面, 评价因子的选取仍存在一定局限, 部分因子在定量层面对石漠化程度的区分能力不足, 模型的全面性与精度仍有提升空间, 后续研究可进一步拓展因子类型与数据支撑, 以增强模型的普适性与完整性。

致谢 感谢中国地质科学院岩溶地质研究所的老师们在研究过程中提供的指导与帮助。

参考文献(References)

[1] Parise M, De Waele J, Gutierrez F. Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(2): 235–237.

[2] 安霞霞. 喀斯特山区石漠化多源高分遥感定量评估[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2018.

- [3] 李森, 魏兴琥, 黄金国, 等. 中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 918-926.
- [4] 谷勇, 陈芳, 李昆, 等. 云南岩溶地区石漠化生态治理与植被恢复[J]. 科技导报, 2009, 27(5): 75-80.
- [5] 贺凯凯, 陈清敏, 成星, 等. 中国西南及陕西秦巴地区岩溶石漠化研究进展[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 147-162.
- [6] 童立强. 西南岩溶石山地区石漠化信息自动提取技术研究[J]. 国土资源遥感, 2003, 15(4): 35-38.
- [7] 龙明康, 白晓永, 李姿霖, 等. 中国西南喀斯特石漠化治理对生物多样性的影响[J]. 地理学报, 2024, 79(1): 97-113.
- [8] 肖杰, 方若男, 熊康宁, 等. 农林生态系统功能优化对石漠化生态修复的作用[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9708-9722.
- [9] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, et al. Biological feedbacks in global desertification[J]. Science, 1990, 247(4946): 1043-1048.
- [10] Bestelmeyer B T, Okin G S, Duniway M C, et al. Desertification, land use, and the transformation of global drylands[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2015, 13(1): 28-36.
- [11] 戴应发, 刘建忠, 郭颖, 等. 治理喀斯特石漠化的建议[J]. 科技导报, 2011, 29(14): 11.
- [12] 周忠发, 黄路迦, 肖丹. 贵州高原喀斯特石漠化遥感调查研究: 以贵州省清镇市为例[J]. 贵州地质, 2001, 18(2): 93-98.
- [13] 兰安军. 基于GIS-RS的贵州喀斯特石漠化空间格局与演化机制研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2003.
- [14] 涂杰楠, 杨亮, 梁丽新, 等. 基于RapidEye遥感影像的比值密度分割法在岩溶石漠化调查中的应用: 以云南鹤庆县为例[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 298-307.
- [15] 蒋红娟, 黄义忠. 基于Landsat遥感影像的石漠化时空演变分析: 以西畴县兴街镇为例[J]. 软件, 2018, 39(12): 166-171.
- [16] 周迪, 倪忠云, 杨振宇. 面向对象的喀斯特地区石漠化遥感信息提取研究: 以贵州省大方地区为例[J]. 地质力学学报, 2018, 24(2): 263-273.
- [17] 高伟杰, 周斯怡, 赵彩云, 等. 基于GEE的曲靖市喀斯特石漠化时空演变过程[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(11): 75-81.
- [18] 李娜, 甘甫平, 董新丰, 等. 基于高分五号高光谱数据的石漠化调查应用研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 230-235.
- [19] 朱梓弘, 朱同彬, 黄静, 等. 基于GIS的广西西江流域石漠化动态分析[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 49-55.
- [20] Lamchin M, Lee J Y, Lee W K, et al. Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(1): 64-77.
- [21] Christian B A, Dhinwa P S, Ajai. Long term monitoring and assessment of desertification processes using medium & high resolution satellite data[J]. Applied Geography, 2018, 97: 10-24.
- [22] 涂纯, 罗为群, 李发东, 等. 中国南方岩溶石漠化的时空变化及其原因[J]. 地质通报, 2025, 44(S1): 326-339.
- [23] 习靖, 姜琦刚, 刘骅欣, 等. 基于Sentinel-2A的喀斯特石漠化信息提取及成因分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1301-1312.
- [24] 陈飞, 周德全, 白晓永, 等. 典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 174-180.
- [25] 王贵为. 基于遥感数据对普定石漠化分布区域的提取研究[J]. 贵州科学, 2018, 36(5): 83-87.
- [26] 姜侯, 姚凌, 刘唐, 等. 地理智能培育新质生产力的发展路径[J]. 科技导报, 2025, 43(18): 41-47.
- [27] 袁道先. 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, 2008, 25(9): 19-25.
- [28] 蓝安军. 喀斯特石漠化过程、演化特征与人地矛盾分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2002, 20(1): 40-45.
- [29] 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.
- [30] 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 岩溶生态系统脆弱性剖析[J]. 热带地理, 2006, 26(4): 303-307.
- [31] 程洋, 陈建平, 皇甫江云, 等. 基于RS和GIS的岩溶石漠化恶化趋势定量预测: 以广西都安瑶族自治县典型岩溶石漠化地区为例[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(3): 135-139.
- [32] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 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](#), 2013, 31(1): 18–24.
- [33] 姚永慧, 索南东主, 张俊瑶, 等. 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[J]. [地理科学进展](#), 2019, 38(11): 1759–1769.
- [34] 谢花林, 李波. 基于logistic回归模型的农牧交错区土地利用变化驱动力分析: 以内蒙古翁牛特旗为例[J]. [地理研究](#), 2008, 27(2): 294–304.
- [35] 姜广辉, 张凤荣, 陈军伟, 等. 基于Logistic回归模型的北京山区农村居民点变化的驱动力分析[J]. [农业工程学报](#), 2007, 23(5): 81–87.
- [36] 范金城, 梅长林. 数据分析[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010: 80–83.
- [37] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 216–224.
- [38] 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.
- [39] 许勇, 张鹰, 刘吉堂, 等. 基于Logistic回归的海州湾赤潮环境要素阈值研究[J]. [海洋通报](#), 2009, 28(3): 70–75.
- [40] 郭显光. 熵值法及其在综合评价中的应用[J]. [财贸研究](#), 1994, 5(6): 56–60.
- [41] 陆添超, 康凯. 熵值法和层次分析法在权重确定中的应用[J]. [电脑编程技巧与维护](#), 2009(22): 19–20.
- [42] 张钦礼, 肖崇春, 陈秋松, 等. 某矿山最佳充填站站址方案选择[J]. [科技导报](#), 2013, 31(19): 39–43.
- [43] Wu K Y, Liang J J. Attribute recognition method of regional ecological security evaluation based on combined weight on principle of relative entropy[J]. [Geographical Science](#), 2008, 28(6): 754–758.
- [44] 郭静涟, 韦艳玲. 贵州省毕节市区域地质构造特征及矿区地质环境治理研究[J]. [世界有色金属](#), 2020(24): 193–194.
- [45] 张仕豪, 熊康宁, 张俞, 等. 典型石漠化生态系统演替过程优势植物种叶片功能性状特征及影响因素[J]. [生态环境学报](#), 2019, 28(11): 2165–2175.
- [46] 王明明, 王世杰, 白晓永, 等. 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[J]. [生态学报](#), 2019, 39(16): 6083–6097.
- [47] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 等. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨: 以贵州省为例[J]. [热带地理](#), 2004, 24(2): 145–149.
- [48] 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.
- [49] 白云星, 周运超. 贵州省后寨河小流域地形因子、人为干扰与石漠化定量研究[J]. [生态学报](#), 2019, 39(19): 7087–7096.
- [50] 孙悦, 蔡湘文, 程洋, 等. 基于RS和GIS的岩溶石漠化与大气降雨关系: 以贵州省典型岩溶石漠化地区为例[J]. [桂林理工大学学报](#), 2015, 35(4): 834–838.

Intelligent evaluation model and spatial analysis of rocky desertification based on logistic regression: a case study of Bijie city, Guizhou province

LIU Ze¹, WANG Jiahe^{2,3,4*}, CHEN Jianping⁵

1. School of Artificial Intelligence, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

4. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

5. School of Earth Science and Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract Rocky desertification is a core issue restricting the coordinated development of the ecological environment and socio-economy in the karst regions of southwestern China. To address the limitations of traditional evaluation methods—such as high subjectivity and difficulty in quantification—this study proposes an intelligent quantitative evaluation model for rocky desertification by integrating logistic regression and spatial analysis techniques. A case study was conducted in Bijie City, Guizhou Province. Based on the evolution process and formation mechanism of rocky desertification, this study selects 12 candidate factors from both natural and human dimensions. Logistic regression models are then used to analyze the significance of these factors' influence on rocky desertification and the threshold for classifying its states. Ultimately, five key factors—vegetation cover, bedrock exposure, slope, surface roughness, and profile curvature—are identified as the foundation for model construction. The evaluation model integrates the entropy weight method to adaptively assign weights to the factors, and intelligently accomplishes the spatial distribution and severity classification of rocky desertification on the GIS platform. Accuracy validation shows a classification accuracy of 82.6% and a Kappa coefficient of 0.76, effectively revealing the spatial distribution and differentiation patterns of rocky desertification in Bijie. This method, through threshold quantification, weight optimization, and multi-source data fusion, provides foundational data for dynamic monitoring and differentiated management of rocky desertification in karst areas. It holds significant practical value for advancing ecological restoration and regional sustainable development.

Keywords rocky desertification; intelligent evaluation model; logistic regression; entropy weight method; Bijie, Guizhou ●



(责任编辑 赵庆圆)