

DOI: 10.20103/j.stxb.202502100259

马崇玲, 彭双云, 林之强, 朱加应, 金荣, 崔毕婷. 一种基于“频率-幅度-恢复力”框架的土壤侵蚀脆弱性评价方法. 生态学报, 2025, 45(20): - .
Ma D L, Peng S Y, Lin Z Q, Zhu J Y, Cui B T, Jin R. A soil erosion vulnerability assessment method based on the “Frequency-Magnitude-Resilience” framework. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(20): - .

一种基于“频率-幅度-恢复力”框架的土壤侵蚀脆弱性评价方法

马崇玲^{1,2}, 彭双云^{1,2,*}, 林之强^{1,2}, 朱加应^{1,2}, 金 荣¹, 崔毕婷¹

1 云南师范大学地理学部, 昆明 650500

2 云南师范大学西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500

摘要: 土壤侵蚀作为全球性生态环境问题, 严重威胁土壤生产力和生态系统的稳定性, 其时空动态演变规律与驱动机制研究对生态脆弱区可持续发展具有重要科学价值。针对传统评估方法在动态变化响应特征捕捉和生态系统恢复力评估方面的局限性, 研究提出了一种基于“频率-幅度-恢复力”的土壤侵蚀脆弱性评价框架。基于 1990—2022 年多源时空数据, 结合最优参数地理探测器模型, 以典型生态脆弱区云南省为研究对象, 系统解析了土壤侵蚀演变规律及其驱动机制。结果表明: (1) 云南省土壤侵蚀以微度侵蚀为主 (占比超 76.80%), 同时呈现出低强度侵蚀增加、高强度侵蚀减少的积极趋势; (2) 区域土壤侵蚀脆弱性空间分异显著, 稳定和较稳定区占主导地位 (58.21%), 同时局部区域存在较高的脆弱性 (10.84%); (3) 坡度对脆弱性空间分异的解释力最强 ($q=0.2240$)。 (4) 驱动机制呈现梯度响应特征, 稳定和较稳定区土壤侵蚀主要受气温和植被覆盖度调控; 中度脆弱区受植被覆盖度和有机碳含量的共同驱动; 较脆弱和极脆弱区则主要受降水和坡度的影响, 且在极脆弱区, 土壤性质和植被覆盖度的作用进一步增强。研究提出的“频率-幅度-恢复力”脆弱区识别方法, 为土壤侵蚀评估领域提供了新的理论视角和技术工具。

关键词: 土壤侵蚀脆弱性; 动态视角; 频率-幅度-恢复力; 云南省

A soil erosion vulnerability assessment method based on the “Frequency-Magnitude-Resilience” framework

MA Dongling^{1,2}, PENG Shuangyun^{1,2,*}, LIN Zhiqiang^{1,2}, ZHU Jiaying^{1,2}, CUI Biting¹, JIN Rong¹

1 Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

2 Engineering Research Center for Western Resource and Environmental Geoinformatics, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

Abstract: Soil erosion, as a global ecological and environmental issue, severely threatens soil productivity and ecosystem stability. Investigating its spatiotemporal dynamics and driving mechanisms holds significant scientific value for the sustainable development of ecologically fragile regions. To address the limitations of traditional assessment methods in capturing dynamic response characteristics and evaluating ecosystem resilience, this study proposed a soil erosion vulnerability assessment framework based on the “Frequency-Magnitude-Resilience” paradigm. Utilizing multi-source spatiotemporal data from 1990 to 2022 and integrating the optimal parameter-based geographical detector model, this study systematically analyzed the evolution of soil erosion and its driving mechanisms in Yunnan Province, a typical ecologically fragile region. The results indicated that: (1) Mild erosion dominated in Yunnan Province, accounting for over 76.80%,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42261073, 42261037); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目 (202305AC160083)

收稿日期: 2025-02-10; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengshuangyun@ynnu.edu.cn.

with a positive trend of increasing low-intensity erosion and decreasing high-intensity erosion. (2) The spatial differentiation of soil erosion vulnerability was pronounced, with stable and relatively stable zones dominating (58.21%), while certain localized areas exhibited high vulnerability (10.84%). (3) Slope had the strongest explanatory power on the spatial differentiation of vulnerability ($q=0.2240$). (4) The driving mechanisms exhibited a gradient response pattern: soil erosion in stable and relatively stable zones was primarily regulated by temperature and vegetation cover; in moderately vulnerable zones, it was jointly driven by vegetation cover and soil organic carbon content; in relatively and extremely vulnerable zones, precipitation and slope were the dominant factors, with soil properties and vegetation cover playing an increasingly significant role in extremely vulnerable areas. The "Frequency-Magnitude-Resilience" vulnerability identification method proposed in this study provided a novel theoretical perspective and technical tool for soil erosion assessment.

Key Words: soil erosion vulnerability; dynamic perspective; frequency-magnitude-resilience; Yunnan Province

土壤侵蚀,作为联合国可持续发展议程(Sustainable Development Goals, SDGs)重点关注的全球性环境危机之一^[1],正以惊人的速度侵蚀着全球陆地资源,对地球生态系统的健康和功能构成重大威胁^[2]。据联合国粮农组织(FAO)报告显示,全球约有33%的土壤已发生退化^[3],而土壤侵蚀是其中最主要的驱动因素^[4]。它直接影响了土地生产力^[5],据估计,到2050年,土壤侵蚀可能导致农作物减产10%^[6],威胁全球粮食安全,更对气候变化^[7]、生物多样性^[8]及水资源安全^[9]等全球性挑战产生深远且复杂的负面影响。当前,在全球气候变化和人类活动强度持续增加的双重压力下,土壤侵蚀问题在生态脆弱区表现得尤为突出^[10],其生态、经济和社会影响更为深远^[11]。在这些区域,脆弱的生态系统不仅对土壤侵蚀更加敏感,且一旦遭受破坏,其恢复能力也极为有限,这进一步加剧了土地退化和贫困的恶性循环^[12]。因此,深入理解和准确评估土壤侵蚀的脆弱性,并揭示其时空分异规律及驱动机制,对于有效预警土地退化风险,维护全球生态安全^[13],并最终服务于联合国可持续发展目标的实现至关重要。

尽管土壤侵蚀脆弱性评估日益重要,但现有研究在方法层面仍显不足^[14]。长期以来,研究仍侧重于静态评估,依赖专家打分法和指标体系法^[15-16]。这些方法虽然在早期研究中发挥了重要作用,但主观性强、区域适应性差等缺陷日益突出,难以捕捉动态变化^[17]。即使是广泛应用的RUSLE模型,也主要预测静态年均侵蚀量,虽考虑多重影响因子,但在揭示时空异质性,尤其是在量化水土保持恢复力方面仍有不足^[18]。在全球变化和人类活动影响加剧的背景下,静态评估已无法满足土壤侵蚀风险管理需求^[19]。因此,亟需突破静态局限,整合长时间序列信息,构建动态且能有效评估水土保持恢复力的脆弱性评估框架。为此,本文构建了“频率-幅度-恢复力”脆弱性评价框架。区别于侧重静态情景的传统方法,该框架从时间序列视角出发,以变化频率反映侵蚀强度等级跃迁的频繁程度,以变化幅度量侵蚀强度变动的剧烈程度,并引入“恢复力”指标,弥补传统方法在水土保持功能评估上的缺失,直接表征土壤侵蚀后的自我修复能力。整合频率、幅度及恢复力,“频率-幅度-恢复力”框架能够更全面、深入地刻画土壤侵蚀动态演变和脆弱性特征,更精准识别脆弱区,为高风险区管理和差异化治理提供更科学的决策支持。

云南省地处青藏高原东南缘,作为全球生物多样性保护的关键区域^[20],其生态环境的稳定性和可持续性至关重要。然而,云南省独特而复杂的地质地貌条件^[21],加之,复杂多样的气候类型和降水时空分布的不均^[22],加剧了该省土壤侵蚀的空间异质性。更值得关注的是,快速的城镇化进程加剧改变了云南省的土地利用方式,对地表植被覆盖状况和土壤抗蚀能力造成了显著影响,进一步提升了区域土壤侵蚀的风险^[23]。因此,深入研究云南省的土壤侵蚀问题,不仅对于维护中国西南生态屏障的安全至关重要,更可为其他生态脆弱区的土壤侵蚀防治和可持续发展提供重要的借鉴和示范,具有显著的战略意义和实践价值。

基于以上背景,本文以云南省1990—2022年长时间序列的土壤侵蚀数据为基础,基于“频率-幅度-恢复力”敏感性评价框架,从变化的频繁程度、剧烈程度以及恢复能力三个关键维度,系统刻画土壤侵蚀的动态演变过程,并据此识别不同程度的土壤侵蚀脆弱区。同时,结合最优参数的地理探测器模型,探讨土壤侵蚀脆弱

性的自然和社会驱动因素及其作用机制。本文的主要研究目标包括:(1)构建一套科学、可行的土壤侵蚀脆弱性评估方法体系;(2)识别云南省土壤侵蚀脆弱区,揭示其空间分布特征;(3)分析土壤侵蚀脆弱性的驱动机制,为制定更具针对性的水土保持对策和区域可持续发展规划提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区

云南省位于中国西南部(东经 97°31'—106°11',北纬 21°08'—29°15'),属低纬度内陆地区(图 1)。该省地形复杂多样,以山地和高原为主,海拔高程差异显著,整体地势呈现西北高、东南低的阶梯状分布。云南属亚热带高原季风气候,具有立体气候特征,干湿季节分明,温差较大。云南省是中国植物多样性最为丰富的地区之一,森林覆盖率约为 65.04%。省内的土壤类型多样,土壤肥力较高,适宜农业发展。近年来,云南的经济迅速增长,城市化进程加速,不合理的土地利用方式涌现,土壤侵蚀问题逐渐显现,生态环境承压加剧。

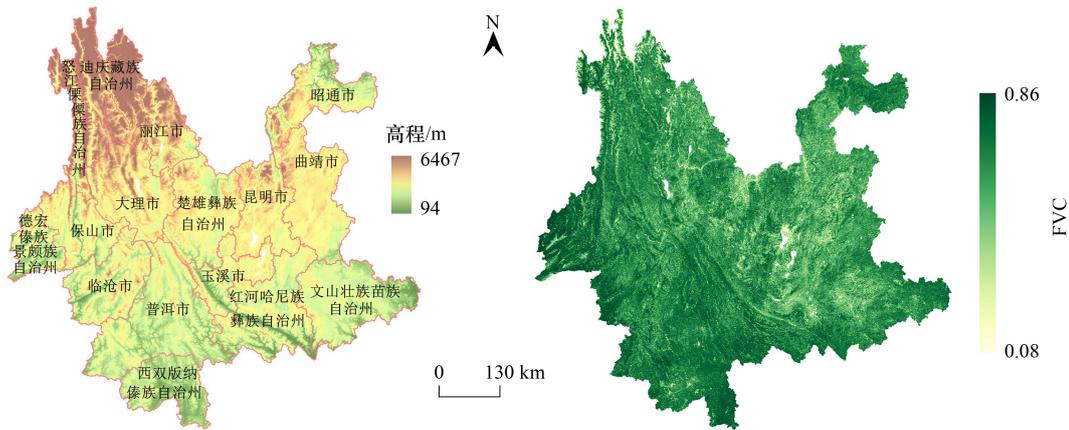


图 1 研究区概况
Fig.1 Study area

1.2 研究材料

研究中所使用的数据空间坐标系统一为 WGS_1984_UTM_zone_48N,空间分辨率均重采样至 1 km。数据详细信息见表 1。

表 1 数据描述

Table 1 Data description

数据 Data	数据来源 Data source
ASTER GDEM V2	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)
Landsat 系列数据(1990—2022 年) Landsat series data(1990—2022) (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS, Landsat 9)	
日降雨,日气温 Daily precipitation and temperature	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)
国内生产总值 Gross domestic product (GDP)	
人口密度 Population density (POP)	
土壤性质数据 Soil properties data	世界土壤数据库 (HWSD) (http://www.fao.org)
土地利用数据 Land use data	武汉大学的 CLCD 数据集 (https://zenodo.org/records/5816591)

1.3 研究方法

1.3.1 土壤侵蚀建模方法

RUSLE 模型作为一种被广泛验证和应用的经典土壤侵蚀预测模型^[24—25],在这项研究中,利用 RUSLE 模

型来评估单位面积上的年均土壤侵蚀量。其计算公式如下:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中, A 为单位时间单位面积内的土壤侵蚀评估值 ($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子 ($t \text{ h hm}^2 \text{ MJ}^{-1} \text{ hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$); LS 、 C 、 P 分别为坡度坡长因子、植被覆盖管理因子、水土保持措施因子, 均为无量纲。

在本项研究中, 基于日降雨量的数据来精确计算降雨侵蚀力^[26], 计算公式如下:

$$R_i = \alpha \sum_{k=1}^n (\text{Pre}_d)^{\beta}$$

$$\alpha = 21.586 \beta^{-7.1891} \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{Pd_{12}} + \frac{24.455}{Py_{12}}$$

式中: R_i 为第 i 个半月的侵蚀力 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$); Pre_d 为第 i 个半月第 d 日 $\geq 12 \text{ mm}$ 的雨量 (mm); n 为第 i 个半月内雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的天数 (d); Pd_{12} 、 Py_{12} 分别为日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均降雨量、年平均降雨量 (mm)。

为考虑加强区域适用性, 本研究采用张科利等^[27]在 EPIC 模型^[28]上改进的方法计算 K 因子, 公式如下:

$$K_{\text{EPIC}} = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\}$$

$$\left[\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right]^{0.3} \left\{ 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right\}$$

$$\left\{ 1.0 - \frac{0.7 \left(1 - \frac{\text{SAN}}{100} \right)}{\left(1 - \frac{\text{SAN}}{100} \right) + \exp(-5.51 + 22.9 \left(1 - \frac{\text{SAN}}{100} \right))} \right\} \quad (3)$$

$$K = -0.01383 + 0.51575 K_{\text{EPIC}}$$

式中, K 为土壤可蚀性因子值 ($t \text{ h hm}^2 \text{ MJ}^{-1} \text{ hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$); SAN 、 SIL 、 CLA 、 C 分别为土壤砂粒、粉粒、粘粒和有机碳含量 (%)。

坡度与坡长体现地形对土壤侵蚀的综合影响, 可利用地貌参数进行评价, 结合前人研究^[28-30], 计算表示边斜坡长度的 L 因子和坡陡度的 S 因子。公式如下:

$$L = ((l \times \cos \alpha) / 22.13)^m \quad (4)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为水平投影坡长 (m); l 为地表沿流向的水流长度; α 为水流地区的坡度值; m 是可变的坡度指数。 S 为坡度因子; θ 为坡度 ($^\circ$)。

结合前人研究成果^[31-32], 农田、森林、灌木、草地、水体、雪/冰、裸地、不透水面、湿地的 C 值赋值分别为 0.12、0.006、0.006、0.03、0、0、0.31、0 和 0, P 值赋值分别为 0.45、0.24、0.23、0.15、0.1、0.1、1、0.9 和 0.15。

为了验证模型的适用性, 结合云南省水利厅于 2022 年发布的“水土流失全覆盖调查数据”中的土壤侵蚀面积统计结果进行了比对。结果显示(表 2), 模型模拟的云南省土壤侵蚀总面积与官方统计面积高度吻合, 全省整体相对误差为 7.19%, 处于可接受范围内, 表明模型能够较好地捕捉区域尺度的侵蚀面积空间分布特征。

基于以上计算程序, 得到了土壤侵蚀模数, 按照中国水利部《土壤侵蚀分类与分级标准》(SL190—2007) 对土壤侵蚀强度进行等级划分, 分级标准可见表 3。

1.3.2 土壤侵蚀变化图谱提取

为了分析时间序列上土壤侵蚀强度的变化特征,参照土地利用变化空间表达方法^[33],提取连续时间序列内各个时相上土壤侵蚀强度的变化。计算公式如下:

$$C = 10^{n-1} \times Y_1 + 10^{n-2} \times Y_2 + \dots + 10^{n-i} \times Y_{i-1} + \dots + 10^{n-n} \times Y_i \quad (6)$$

式中, C 为在连续时间序列内研究区的土壤侵蚀变化图谱; n 为研究期间的时相数, Y_i 为第 i 时相对应的土壤侵蚀强度的分级编码。

表 2 2022 年云南省 16 个州市土壤侵蚀建模验证结果

Table 2 Verification results of soil erosion modeling in 16 prefectures or cities of Yunnan Province in 2022

州市 Prefectures or cities	参考面积 Reference area/km ²	模拟面积 Simulated area/km ²	相对误差 Relative error/%	州市 Prefectures or cities	参考面积 Reference area/km ²	模拟面积 Simulated area/km ²	相对误差 Relative error/%
昆明市	5331.08	6381.72	19.71%	西双版纳州	3619.59	4733.21	30.77%
昭通市	9309.97	10202.45	9.59%	大理州	7155.05	8139.06	13.75%
曲靖市	7164.71	7921.97	10.57%	德宏州	2118.92	2083.86	-1.65%
玉溪市	3013.26	3012.69	-0.02%	丽江市	5903.38	4590.07	-22.25%
保山市	4626.79	4794.74	3.63%	怒江州	4026.93	4990.61	23.93%
楚雄州	6130.39	7064.11	15.23%	迪庆州	3100.02	2947.51	-4.92%
红河州	8640.20	8350.84	-3.35%	临沧市	6847.36	8124.07	18.65%
文山州	11759.89	11575.35	-1.57%	合计 Total	97893.55	104928.20	7.19%
普洱市	9146.01	10015.93	9.51%				

表 3 土壤侵蚀强度分级标准/(t hm⁻² a⁻¹)

Table 3 Soil erosion intensity classification standard

侵蚀分级 Erosion classification	微度侵蚀 No apparent erosion	轻度侵蚀 Slight erosion	中度侵蚀 Moderate erosion	强烈侵蚀 Intense erosion	极强烈侵蚀 Very intense erosion	剧烈侵蚀 Severe erosion
土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	0—5	5—25	25—50	50—80	80—150	>150

1.3.3 基于频率-幅度-恢复力指标的土壤侵蚀脆弱性评估框架

为系统评估云南省土壤侵蚀的脆弱性,本文基于 1990—2022 年长时间序列的土壤侵蚀建模结果,深入分析了该地区土壤侵蚀的动态变化特征。通过量化土壤侵蚀时间序列内的变化频率、变化幅度和水土保持恢复力指标,构建了“频率-幅度-恢复力”指标框架,用于识别云南省不同程度的土壤侵蚀脆弱区域。

变化频率记录了相邻年份之间土壤侵蚀强度分级发生变化的次数,反映了侵蚀强度变化的频繁程度。频率越高,表明土壤侵蚀强度变化越频繁。计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^{n-1} I(Y_i \neq Y_{i+1}) \quad (7)$$

式中, Y_i 为第 i 个研究时相上土壤侵蚀强度的分级编码, n 是研究时相数, I 是指示函数,当 Y_i 和 Y_{i+1} 不相同, I 的值为 1;否则为 0。每当相邻年份的变化分级编码不同,频次 F 就增加 1。

变化幅度捕捉了相邻年份之间土壤侵蚀强度变化的程度,衡量了侵蚀强度的时序变化量,计算公式如下:

$$M = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |A_i - A_{(i-1)}| \quad (8)$$

式中: M 为时间序列内土壤侵蚀强度的平均变化量; A_i 为第 i 个研究时相上土壤侵蚀评估值; n 为研究时相数。

除了考虑土壤侵蚀在时间序列上的动态变化外,本文还引入了水土保持恢复力指标,以衡量区域生态系统在遭受侵蚀扰动后,维持或快速恢复到低侵蚀状态的能力。该指标综合反映了当前时段内,基于植被状况、

土壤侵蚀实际改善情况以及地形条件的系统水土保持功能状态,能够更准确地评估不同环境背景下的水土保持效果,为精准识别土壤侵蚀脆弱区提供依据。计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{NDVI}_{\text{norm}} &= \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{min}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{min}}} \\ A_{\text{norm}} &= \frac{A - A_{\text{min}}}{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}} \\ A_{\text{resilience}} &= 1 - A_{\text{norm}} \\ S &= \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \\ \text{SVSI} &= \frac{\text{NDVI}_{\text{norm}} \times A_{\text{resilience}}}{S} \times C_\theta \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\text{NDVI}_{\text{norm}}$ 为标准化的植被归一化指数, NDVI 是归一化植被指数, NDVI_{min} 和 NDVI_{max} 分别是 NDVI 值的最小值和最大值; A_{norm} 为标准化的土壤侵蚀量, A 是土壤侵蚀模数, A_{min} 和 A_{max} 分别是土壤侵蚀值的最小值和最大值; $A_{\text{resilience}}$ 为标准化的土壤侵蚀恢复量; S 为坡度因子, θ 为坡度 ($^\circ$); SVSI 为水土保持恢复力指标, C_θ 为坡度等级对应的修正系数, 坡度越大, 坡度修正系数越小。本文参照前人研究成果^[34], 对坡度修正系数进行赋值 (表 4)。

表 4 坡度修正系数赋值

Table 4 Slope correction coefficient assignment

坡度 Slope	$0^\circ \leq \theta < 8^\circ$	$8^\circ \leq \theta < 15^\circ$	$15^\circ \leq \theta < 25^\circ$	$25^\circ \leq \theta < 35^\circ$	$35^\circ \leq \theta < 45^\circ$	$45^\circ \leq \theta < 60^\circ$	$\geq 60^\circ$
修正系数 Correction factor	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.1

为消除不同指标间量纲差异和数值分布不均对综合评价结果的影响, 在进行等权重加和之前, 对频率、幅度、恢复力三个指标分别进行了标准化处理和自然间断法重分类, 考虑到与坡度修正系数部分输入要素的分级层级相对应, 统一划分为七个等级。

目前, 关于土壤侵蚀变化频率、幅度以及恢复力对土壤侵蚀脆弱性的影响权重尚无定论。同时, 考虑到频率、幅度代表扰动特征, 恢复力代表系统响应能力, 三者概念上共同构成了脆弱性的不同维度。同时, 借鉴生态安全、环境脆弱性等在处理不同维度多指标综合评价领域常采用等权重法的实践^[35-36]。此外, 数据已通过蒙特卡洛模拟检验支持了在当前数据和知识水平下采用等权法的合理性。本文在当前研究阶段初步采用等权重策略, 计算公式如下:

$$V = \frac{1}{3} \times \left(F + M + \frac{1}{\text{SVSI}} \right) \quad (10)$$

式中, V 为土壤侵蚀脆弱性指数, F 为土壤侵蚀变化频率, M 为土壤侵蚀变化幅度, SVSI 为水土保持恢复力指标。基于计算得到的土壤侵蚀脆弱性指数, 采用自然间断法将研究区划分为 5 种不同程度的土壤侵蚀脆弱分区。

1.3.4 基于最优参数的地理检测器

为了深入探索土壤侵蚀脆弱性的驱动机制, 本文采用基于最优参数的地理检测器 (Optimal Parameters-based Geographical Detector, OPGD), 对驱动因素进行定量分析。地理检测器是一种有效的空间统计分析工具, 通过量化驱动因素对目标变量的解释力度, 揭示不同因素在空间分异中的主导作用^[37]。公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{\sigma^2} \quad (11)$$

式中, q 为因子探测度量, 表示解释因子对土壤侵蚀脆弱性的影响程度, L 为驱动因子的样本数量, N_h 和 N 分别为 h 层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为 h 层和区域内因变量 Y 的方差。

在本文中, 以土壤侵蚀脆弱性评价结果为基础, 分别选取土壤侵蚀脆弱性指数和不同土壤侵蚀脆弱分区的年均土壤侵蚀量作为响应变量 (Y)。结合区域自然和社会经济特征, 选取了 11 个潜在驱动因子, 分为两大类: 自然因子 (气温, 降水, 植被覆盖度, 高程, 坡度, 土壤性质 (包括土壤有机质含量、土壤质地等) 等), 社会经济因子 (GDP, 人口密度 (这些社会经济因子通过影响土地利用方式、植被管理和水土保持措施等途径, 间接驱动土壤侵蚀脆弱性的空间分异)) 等在内的 11 个驱动因素 (表 5), 依次编码为 X1—X11, 利用 OPGD 识别这些潜在因素并定量衡量其影响。

表 5 潜在预测因子描述
Table 5 Description of potential predictive factors

性质 Attribute	因子 Factor	编码 Code	描述 Description
气候 Climate	气温	X1	年平均气温/°C
	降水	X2	年平均降水量/mm
植被 Vegetation	植被覆盖度	X3	植被在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比/%
地形 Topography	高程	X4	地表的起伏程度/m
	坡度	X5	地表单元陡缓的程度/(°)
土壤性质 Soil properties	砂粒	X6	土壤中砂粒的含量/%
	粉粒	X7	土壤中粉粒的含量/%
	粘粒	X8	土壤中粘粒的含量/%
	有机碳	X9	土壤中有有机碳的含量/%
社会经济 Socioeconomics	国内生产总值	X10	国内所有经济活动的价值/%
	人口密度	X11	单位土地面积上的人口数量/(人/km ²)

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀的时空演变特征

基于 RUSLE 模型, 研究量化评估了 1990 年至 2022 年云南省的土壤侵蚀状况 (图 2), 揭示了不同土壤侵蚀强度等级的空间分布特征及其时间演变规律。表 6 显示, 在过去 33 年间, 微度侵蚀始终占据主导地位, 其面积占比持续保持在 76.80% 以上, 并呈现波动上升趋势。具体而言, 微度侵蚀面积占比的峰值出现在 2022 年, 高达 82.93%, 谷值则为 2002 年, 占比 76.80%。与之相反, 轻度侵蚀的面积占比在 9.03% 至 14.42% 之间波动, 整体呈下降趋势, 其变化趋势与微度侵蚀大致相反。轻度侵蚀的峰值和谷值分别出现在 2002 年 (14.42%) 和 2022 年 (9.03%)。中度侵蚀的面积占比相对稳定, 维持在 3.28% 至 3.60% 范围内, 整体呈现小幅上升趋势。

表 6 1990—2022 年不同土壤侵蚀强度等级的面积占比
Table 6 Area proportion of different soil erosion intensity classifications from 1990 to 2022

侵蚀分级 Erosion classification	1990 年	1994 年	1998 年	2002 年	2006 年	2010 年	2014 年	2018 年	2022 年
微度侵蚀 No apparent erosion	77.78%	78.69%	78.39%	76.80%	81.46%	78.42%	82.30%	77.34%	82.93%
轻度侵蚀 Slight erosion	13.70%	12.86%	13.51%	14.42%	10.78%	14.20%	9.85%	14.00%	9.03%
中度侵蚀 Moderate erosion	3.28%	3.38%	3.39%	3.43%	3.34%	3.60%	3.55%	3.41%	3.51%
强烈侵蚀 Intense erosion	2.24%	2.27%	2.13%	2.33%	2.08%	1.84%	2.11%	2.30%	2.24%
极强烈侵蚀 Very intense erosion	2.02%	1.95%	1.79%	2.07%	1.67%	1.37%	1.60%	2.02%	1.71%
剧烈侵蚀 Severe erosion	0.98%	0.86%	0.79%	0.95%	0.67%	0.57%	0.59%	0.94%	0.58%

高强度土壤侵蚀(包括强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀)的面积占比较低,且随时间推移呈现出不同的变化特征。强烈侵蚀的占比在 1.84%至 2.33%之间波动,变化相对平缓;极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的占比分别在 1.37%至 2.07%和 0.57%至 0.98%之间波动,总体呈现下降趋势。这些高强度侵蚀主要集中分布于云南省西北部高山地区以及东部元江流域下游。

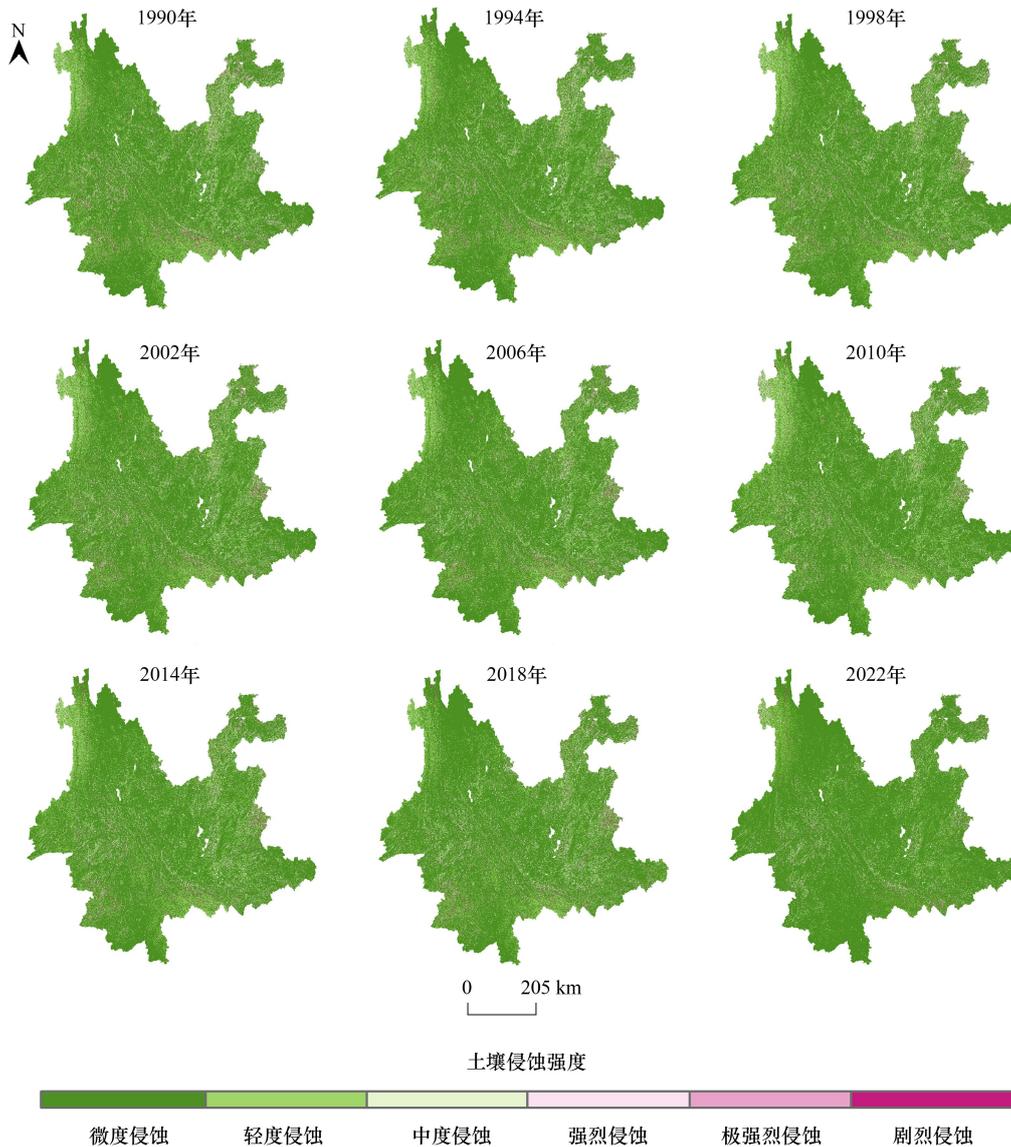


图 2 土壤侵蚀 1990—2022 年不同土壤侵蚀强度分级的时空分布特征

Fig.2 Spatiotemporal distribution characteristics of different soil erosion intensity classifications from 1990 to 2022

总体来看,云南省土壤侵蚀在过去 33 年间表现出显著的空间异质性和动态变化特征。从强度变化来看,低强度侵蚀(微度侵蚀和轻度侵蚀)占比持续提升,表明区域生态环境明显改善,土壤侵蚀风险整体向较低强度转化。从中高强度侵蚀(中度、强烈、极强烈及剧烈侵蚀)的变化趋势来看,其总体占比呈下降态势,尤其是剧烈侵蚀的显著减少。值得注意的是,虽然中高强度侵蚀总体占比呈下降态势,但仍然集中在特定区域,表明这些地区的土壤侵蚀问题依然严峻,需要持续关注和治理。

2.2 土壤侵蚀脆弱区的识别

本文基于“频率-幅度-恢复力”指标框架,从动态变化频率、变化幅度以及水土保持恢复力三个关键维度,

评估了云南省 1990 年至 2022 年间土壤侵蚀的脆弱性。

图 3 展示了频率、幅度、恢复力三维指标的空间分布情况。首先,从土壤侵蚀变化频率来看,该指标反映了时间序列内侵蚀强度分级变化的频繁程度。结果显示,云南省大部分地区的土壤侵蚀变化频率较低,超过 90%的区域处于较低水平(极低、非常低和低),表明过去 33 年间云南省大部分地区的土壤侵蚀强度等级相对稳定。其次,关于土壤侵蚀变化幅度,该指标反映了时间序列内侵蚀强度变化的剧烈程度。结果显示,云南省大部分地区土壤侵蚀变化幅度较小,超过 95%的区域处于较低水平,说明云南省大部分地区土壤侵蚀强度在时间序列上的波动幅度不大。最后,聚焦水土保持恢复力,该指标反映了区域土壤在受到侵蚀后自我修复的能力。结果表明,云南省水土保持恢复力水平存在较大差异,超过 70%的区域水土保持恢复力处于较低水平(极低和非常低),反映出这些区域对土壤侵蚀的抵抗和恢复能力相对较弱,是土壤侵蚀防治的重点区域。这些低恢复力区域往往与土壤侵蚀严重的高风险区重叠,在长期土壤侵蚀的影响下,难以快速恢复其结构和功能。

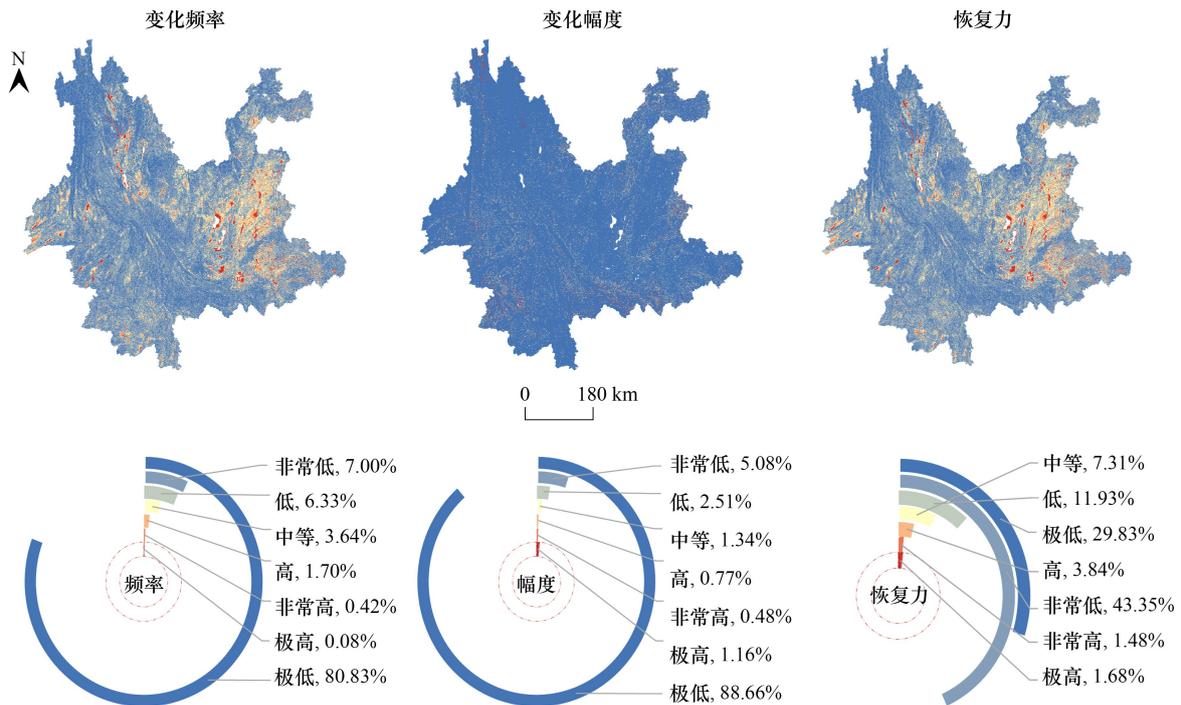


图 3 频率、幅度、恢复力三维指标的空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution characteristics of the three-dimensional indicators of frequency, magnitude, and resilience

总体来看,大部分区域的土壤侵蚀变化频率和幅度较低,这反映出云南省整体土壤侵蚀的稳定性较强。然而,水土保持恢复力的低水平则突显了生态系统在应对土壤侵蚀时的脆弱性。特别是在生态恢复能力较弱的区域,虽然土壤侵蚀的变化不剧烈,但长期的低恢复力可能导致生态功能的持续退化,进而加剧土壤侵蚀的恶性循环。

基于频率、幅度和恢复力三个维度的综合分析,本文进一步对云南省不同土壤侵蚀脆弱性区域进行了划分(图 4)。结果表明,云南省的土壤侵蚀脆弱性分布呈现出显著的区域性特征。具体来看,稳定区和较稳定区占据了云南省的大部分区域,面积占比高达 58.21%(其中稳定区占 12.33%,较稳定区占 45.88%)。这些区域的土壤侵蚀风险相对较低,生态系统的自我恢复能力较强,主要分布于云南省中部城市群及其向东北—西南方向延伸的区域。中度脆弱区的面积占比约为 30.95%,是云南省土壤侵蚀脆弱性中不可忽视的一部分。这些区域虽然目前的土壤侵蚀风险尚可控,但需警惕极端气象事件叠加高强度人为扰动引发的系统性风险。因此,需要持续关注并采取相应的预防措施,避免其向更高脆弱性等级转变。值得重点关注的是较脆弱区和

极脆弱区,其面积占比合计约为 10.84%(其中较脆弱区占 8.50%,极脆弱区占 2.34%)。这些区域主要集中在云南省的昭通市、临沧市、普洱市以及文山市等州市的部分地区。

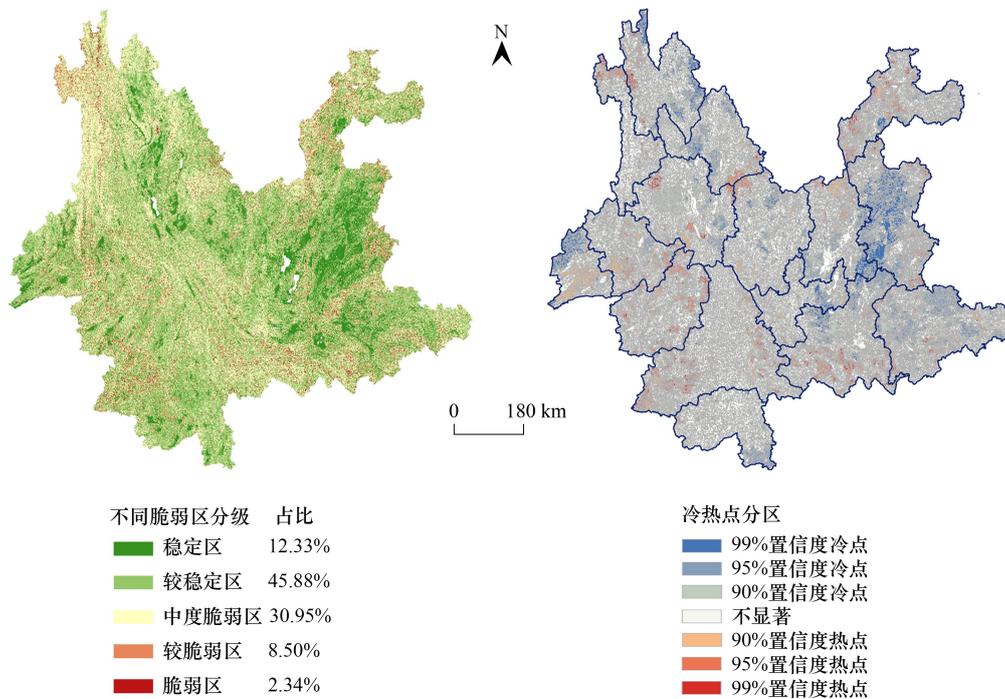


图 4 土壤侵蚀脆弱区识别

Fig.4 Identification of soil erosion vulnerable areas

2.3 土壤侵蚀脆弱性的驱动机制分析

2.3.1 区域土壤侵蚀脆弱性驱动机制

基于前文构建的土壤侵蚀脆弱性指数,本文进一步探讨了影响云南省不同区域土壤侵蚀脆弱性的主要驱动因素。具体而言,以脆弱性指数作为响应变量,采用 OPGD 模型,对潜在影响因素进行了定量分析。探测结果(图 5)表明,不同驱动因子对土壤侵蚀脆弱性的解释能力存在显著差异。其中,坡度(X5)对土壤侵蚀脆弱性的影响最大,其解释力为 0.2240,揭示了地形因素在区域土壤侵蚀脆弱性中的主导作用。紧随其后的是有机碳含量(X9)和国内生产总值(X10),二者对脆弱性的影响同样不可忽视。特别是有机碳含量,它与土壤肥力及水分保持能力密切相关,显著影响土壤的抗蚀性与恢复力,进而对土壤侵蚀脆弱性产生深远影响。其他因素,如气温(X1)、降水(X2)及植被覆盖度(X3),虽展现出一定的解释能力,但相较而言,其对土壤侵蚀脆弱性的贡献较为有限。

交互探测结果(图 5)进一步揭示,除坡度(X5)外,任意双因子耦合均优于单因子对云南省土壤侵蚀脆弱性的解释力。各因素之间的耦合交互效应较为强烈,特别是坡度(X5)与其他因子之间的交互解释力尤为显著。坡度与砂粒(X6)、粉粒(X7)、粘粒(X8)以及有机碳含量(X9)等因子的双因子耦合对土壤侵蚀脆弱性的交互解释力均在 0.30 以上,其中坡度与砂粒(X6)双因子的解释力最强,达 0.3132。坡度(X5)与其他因子间的交互解释力也表现突出,均在 0.26 以上,尤其是在有机碳含量(X9)与其他因子的交互作用中,解释力较高,进一步揭示了土壤有机质对土壤侵蚀脆弱性的复合影响。

2.3.2 不同类型脆弱区的驱动机制差异

为了进一步揭示不同脆弱程度区域土壤侵蚀驱动机制的差异,本文以不同土壤侵蚀脆弱分区的年均土壤侵蚀量作为响应变量,分别运用 OPGD 模型分析各脆弱区内土壤侵蚀的主导驱动因素。通过对比不同脆弱区驱动因素差异,旨在更精细地理解土壤侵蚀发生的机制,为分区施策提供科学依据。因子探测结果(图 6)

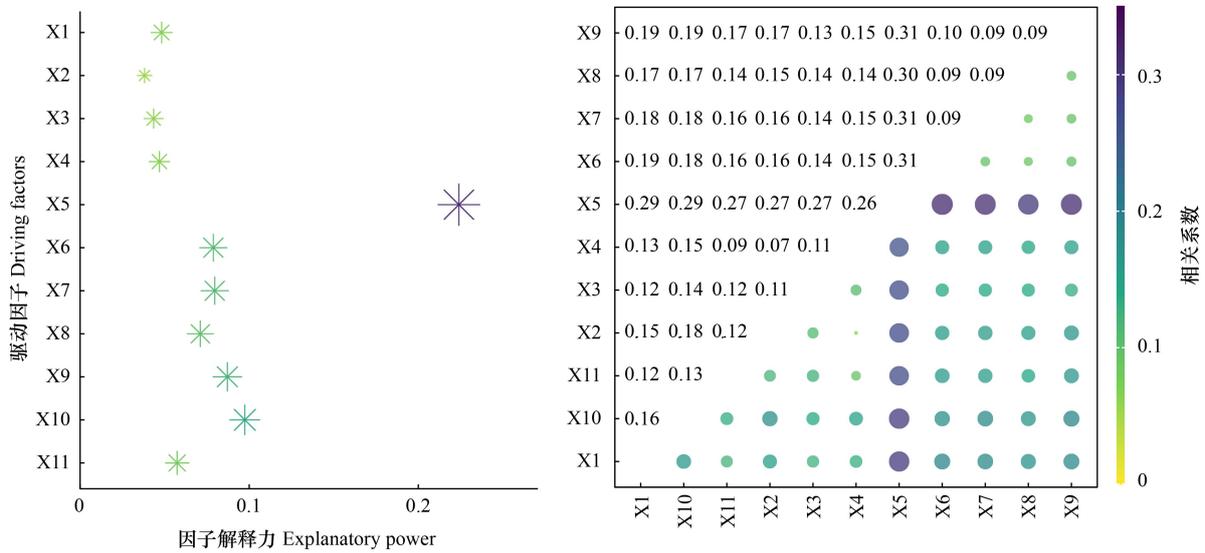


图5 区域土壤侵蚀脆弱性的驱动机制分析

Fig.5 Analysis of the driving mechanisms of regional soil erosion vulnerability

显示,不同脆弱区的驱动因子具有显著差异,各因子的解释力在不同脆弱区域呈现出不同的趋势。

具体而言,在稳定区和较稳定区,气温(X1)和植被覆盖度(X3)是影响土壤侵蚀的主要因素,特别是植被覆盖度,其解释力在较稳定区达到0.2133,显示出植被覆盖度对土壤稳定性的重要作用。中度脆弱区的驱动因素则更加复杂,除植被覆盖度外,有机碳含量(X9)成为该区域土壤侵蚀的重要影响因素,解释力为0.1274,体现了土壤有机质对抗土壤侵蚀的关键作用。

在较脆弱区和极脆弱区,降水(X2)和坡度(X5)对土壤侵蚀的解释力逐渐增加,尤其在极脆弱区,降水的影响最为显著,其解释力高达0.1810,表明降水量在该区域的土壤侵蚀中起着至关重要的作用。此外,极脆弱区的植被覆盖度(X3)和土壤性质(如砂粒含量X6、粉粒含量X7)等因素的影响力也有所提升,解释力分别为0.3453和0.1273,揭示了该区域土壤退化与地形和土壤特征的密切关系。

通过这些因子探测结果,可以看出,随着脆弱程度的加剧,降水、坡度以及土壤性质等因素的主导作用逐渐增强,而植被覆盖度和气温则在较为稳定的区域表现得更加显著。这些差异揭示了不同脆弱程度区域在土壤侵蚀发生机制中的多样性,强调了在不同土壤侵蚀脆弱区采取相应的保护和治理措施的必要性。

3 讨论

3.1 频率-幅度-恢复力框架的应用价值

本文提出的“频率-幅度-恢复力”分析框架,是对传统土壤侵蚀脆弱性评估方法的重要改进和补充。该框架的核心价值在于其突破了静态评估的局限性,从动态变化的视角来识别脆弱性,并将水土保持恢复力纳入评估体系,深化了对土壤侵蚀脆弱性的理解。

具体而言,该框架的应用价值主要体现在两个方面。首先,该框架强调了时间维度在土壤侵蚀脆弱性评估中的重要性。传统的脆弱性研究大多采用静态评估方法,往往基于单一时间点^[38]或时相平均数据,难以捕捉土壤侵蚀过程的动态变化特征,容易导致评估结果的主观性和区域适应性不足^[39]。本文基于1990—2022年长时间序列的土壤侵蚀数据,通过分析土壤侵蚀变化频率和幅度两个指标,揭示了云南省土壤侵蚀在时间序列上的动态变化规律。这种基于时间序列的动态评估方法,能够更真实、客观地反映土壤侵蚀的演变趋势和潜在风险,为土壤侵蚀防治工作的开展提供了更可靠的依据。其次,该框架将水土保持恢复力纳入评估体系。传统的基于RUSLE模型的评估方法虽然考虑了多种影响因子,但在评估土壤受到侵蚀后的恢复能力方

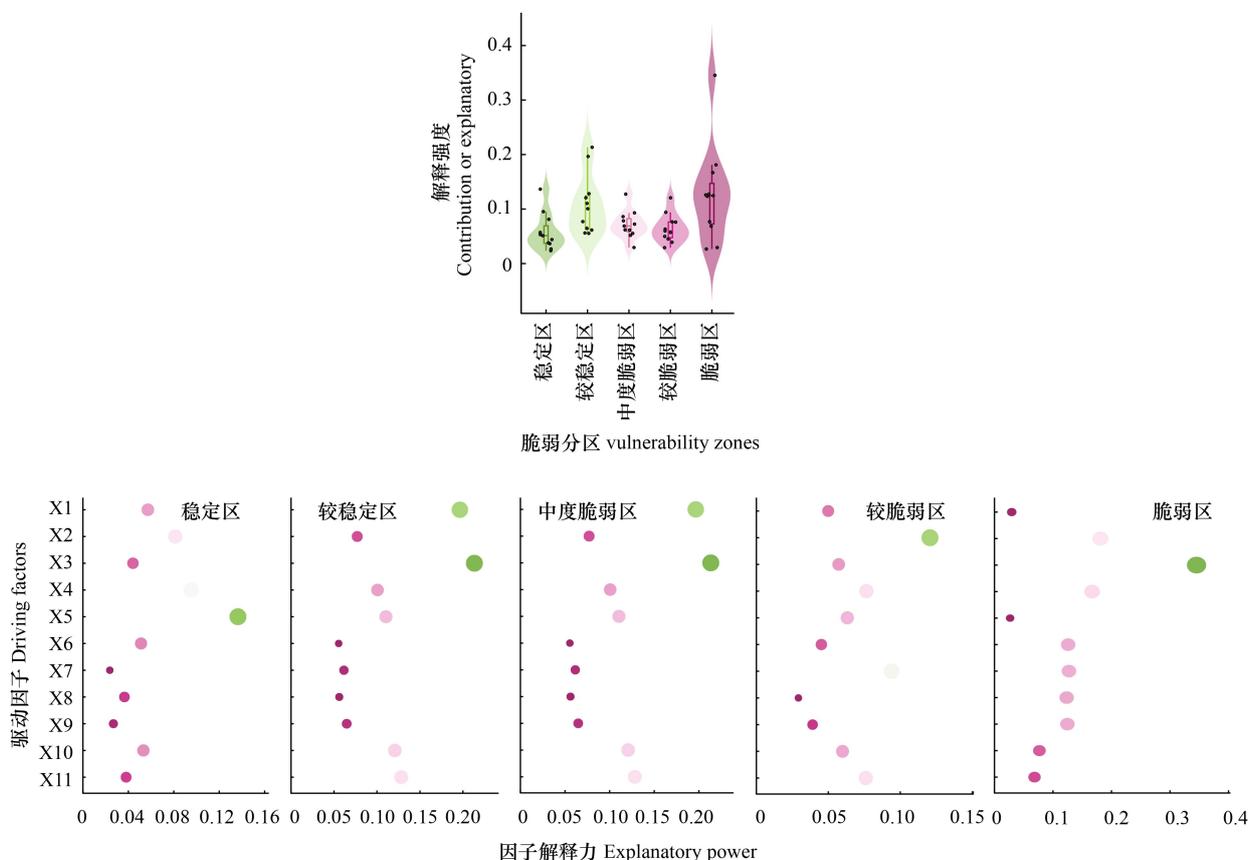


图 6 不同脆弱程度区域土壤侵蚀驱动机制的差异分析

Fig.6 Analysis of the differences in the driving mechanisms of soil erosion in areas with different vulnerability levels

面存在明显不足^[40]。特别是在气候变化和人类活动影响日益加剧的背景下,仅仅关注静态的土壤侵蚀量已无法全面反映土壤侵蚀的真实状况和潜在风险。本文构建的水土保持恢复力指标综合考虑了植被恢复、土壤侵蚀恢复以及坡度因子的影响,能够更全面地评估土壤在受到侵蚀后的自我修复能力。将恢复力纳入脆弱性评估,不仅可以识别出那些当前侵蚀强度不高,但恢复能力较弱的“隐性脆弱区”,还可以为生态修复和保护措施的制定提供更具针对性的指导。

3.2 不同土壤侵蚀脆弱区的差异化治理策略

基于前文对云南省土壤侵蚀脆弱性驱动机制的分析,明确了不同区域的土壤侵蚀受多种因素的影响,其中地形、气候、土壤性质、植被覆盖度等因素交织作用,在不同脆弱性分区内产生了显著的空间差异。因此,针对不同脆弱区的治理策略应具有针对性和差异化,才能有效遏制土壤侵蚀,促进区域生态恢复与可持续发展。

在稳定和较稳定区,气温和植被覆盖度是主要的土壤侵蚀驱动因素。气温在这些区域的驱动分析结果中也显示出一定的解释力,这可能反映了气候背景因素对维持低侵蚀状态的间接影响,并非直接驱动。植被覆盖度尤为重要,尤其是在较稳定区,其解释力高达 0.2133,表明植被是控制土壤侵蚀和维持土壤稳定性的关键因素。因此,在这些区域,应强化植被保护与恢复,增加草地、林地及农田的植被覆盖,尤其是通过合理的农业耕作模式和草地退耕还林等措施,促进自然植被的恢复与多样化。

在中度脆弱区,除了植被覆盖度外,有机碳含量对土壤侵蚀的影响逐渐增强,表明土壤有机质和肥力对防止土壤侵蚀起着重要作用。因此,这一地区的治理策略应更加注重土壤改良与农业技术的引入,增加土壤有机质含量,通过有机肥料的使用和减少化肥施用,恢复土壤的自然肥力。同时,可以结合生物工程措施,如采用覆盖作物和水土保持植被的种植,进一步加强土壤的水分保持能力。

较脆弱与极脆弱区的主要土壤侵蚀驱动因子为降水和坡度,尤其是在极脆弱区,降水的影响力最为显著,其解释力达到 0.1810。降水量大的区域易导致表层水流冲刷加剧,坡度较大的地方则容易形成土壤侵蚀的热点^[41]。因此,这些区域的治理措施必须集中在防止土壤侵蚀的根本原因——水的侵蚀。可通过构建水土保持设施如梯田、水库、拦水坝等,减少水流对土壤的直接冲刷作用。

在极脆弱区,土壤性质(如砂粒、粉粒、粘粒的含量)和植被覆盖度等因素的影响力逐渐增加,表明土壤结构的恶化和植被的退化已成为重要问题。因此,加强土壤改良措施、恢复生态系统的完整性是该区域治理的重点。可以通过实施土地恢复项目,如退耕还林、植树造林等措施,恢复当地的自然植被,增强土壤的抗侵蚀性。

3.3 研究局限性与未来研究方向

本文通过动态变化视角提出了土壤侵蚀脆弱区的识别方法,探讨了云南省土壤侵蚀脆弱性的空间分布特征及驱动机制。然而,这项研究仍存在一些局限性和不确定性,值得进一步分析和探讨。首先,目前尚未有足够的实证数据或广泛的研究来验证频率、幅度和恢复力三者的权重分配,导致这一假设缺乏充分的理论依据和数据支撑。不同地区的土壤类型、气候条件及人类活动的差异可能使得这些因素的相对重要性有所不同,简单的权重假设可能无法准确捕捉这些复杂的动态关系。因此等权重作为一种初步探索和简化假设。未来的研究应致力于通过更精细的实地观测数据、结合机器学习方法优化权重分配,或开展控制实验等方式,深入探索并建立更具理论依据和区域适应性的权重模型,从而构建更完善的土壤侵蚀脆弱性综合评估模型。其次,本研究所考虑的土壤侵蚀强度的分级标准是基于 RUSLE 模型的预估结果,但该模型对于某些极端气候事件的响应可能不够充分,特别是在极端降水和气候变化的背景下。未来的研究可以引入更多气候变化情景模拟和动态土壤侵蚀模型^[42, 43],以便更准确地预测未来不同情境下的土壤侵蚀情况。

4 结论

本文采用 RUSLE 模型评估了 1990—2022 年间云南省的土壤侵蚀情况,并提出了基于“频率-幅度-恢复力”的土壤侵蚀脆弱区识别方法,结合 OPGD 模型,分析了土壤侵蚀脆弱性的驱动机制。主要结论如下:

(1) 过去 33 年间,云南省土壤侵蚀强度呈现积极变化,低强度侵蚀(微度和轻度侵蚀)占比显著提升,土壤侵蚀风险整体降低。然而,中高强度侵蚀(强烈、极强烈、剧烈侵蚀)依然存在,主要集中于西北部高山地区和东部元江下游。

(2) 基于频率-幅度-恢复力框架的脆弱性评估结果显示,云南省土壤侵蚀脆弱性具有显著区域性特征。稳定区和较稳定区占比达 58.21%,集中于中部及其东北—西南延伸区域;中度脆弱区占 30.95%,虽风险可控,但需持续关注以防恶化;较脆弱区和极脆弱区占 10.84%,主要分布于昭通、临沧、普洱和文山等地,是土壤侵蚀防治的重点区域。

(3) 云南省土壤侵蚀脆弱性的驱动因素表现出显著差异。坡度是主要的驱动因子,地形因素在脆弱性中占主导地位;有机碳含量对土壤抗蚀性和恢复力的影响也不可忽视。此外,不同脆弱区的土壤侵蚀机制具有明显空间差异,在较稳定区域,气温和植被覆盖度为主导因素;在较脆弱与极脆弱区,降水和坡度的影响逐渐增强,尤其是极脆弱区降水的作用最为突出。

(4) 针对不同脆弱区应精准施策,因地制宜,强化关键驱动因素的调控。稳定和较稳定区侧重植被保护与恢复;中度脆弱区注重土壤改良和农业技术引入;较脆弱和极脆弱区则应构建水土保持设施、恢复植被、并加强土壤改良。

参考文献(References):

- [1] Yin C C, Zhao W W, Pereira P. Soil conservation service underpins sustainable development goals. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 33: e01974.
- [2] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, Lugato E, Yang J E, Alewell C, Wuepper D, Montanarella L, Ballabio C. Land use and climate change

- impacts on global soil erosion by water (2015—2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [3] 黄慧琼. 遏止全球土壤退化刻不容缓. *生态经济*, 2021, 37(2): 5-8.
- [4] Zhang Y, Pang Z L, Zhu Q, Liu S, Wang X T, Chen X W, Wang E H. Time-sensitive effects of vegetation restoration on slowing down soil erosion: Evidence from Northeastern China with Mollisols. *Catena*, 2024, 246: 108406.
- [5] Thaler E A, Larsen I J, Yu Q. The extent of soil loss across the US corn belt. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(8): e1922375118.
- [6] Pimentel D, Burgess M. Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 2013, 3(3): 443-463.
- [7] Amelung W, Bossio D, de Vries W, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Amundson R, Bol R, Collins C, Lal R, Leifeld J, Minasny B, Pan G, Paustian K, Rumpel C, Sanderman J, van Groenigen J W, Mooney S, van Wesemael B, Wander M, Chabbi A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature Communications*, 2020, 11: 5427.
- [8] Orgiazzi A, Panagos P. Soil biodiversity and soil erosion: it is time to get married. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(10): 1155-1167.
- [9] Panagos P, Ballabio C, Himics M, Scarpa S, Matthews F, Bogonos M, Poesen J, Borrelli P. Projections of soil loss by water erosion in Europe by 2050. *Environmental Science & Policy*, 2021, 124: 380-392.
- [10] Gong X W, Li Y Q, Wang X Y, Zhang Z S, Lian J, Ma L, Chen Y, Li M Y, Si H T, Cao W J. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on vegetation degradation and restoration in typical ecologically fragile areas of China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109536.
- [11] Gupta G S. Land degradation and challenges of food security. *Review of European Studies*, 2019, 11(1): 63.
- [12] Wang D D, Yuan Z J, Cai Y T, Jing D W, Liu F, Tang Y, Song N N, Li Y Y, Zhao C Y, Fu X Y. Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: a review. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112165.
- [13] Mahapatra S K, Obi Reddy G P, Nagdev R, Yadav R P, Singh S K, Sharda V N. Assessment of soil erosion in the fragile Himalayan ecosystem of Uttarakhand, India using USLE and GIS for sustainable productivity. *Current Science*, 2018, 115(1): 108.
- [14] Chen S F, Zha X, Bai Y H, Wang L Y. Evaluation of soil erosion vulnerability on the basis of exposure, sensitivity, and adaptive capacity: a case study in the Zhuxi watershed, Changting, Fujian Province, Southern China. *Catena*, 2019, 177: 57-69.
- [15] Ameri A A, Pourghasemi H R, Cerda A. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. *Science of The Total Environment*, 2018, 613-614: 1385-1400.
- [16] 杨严攀, 田培, 沈晨竹, 平耀东, 贾婷惠, 乐雪, 黄建武. 基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 91-103.
- [17] Haidara I, Tahri M, Maanan M, Hakdaoui M. Efficiency of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to detect soil erosion vulnerability. *Geoderma*, 2019, 354: 113853.
- [18] Pandey S, Kumar P, Zlatic M, Nautiyal R, Panwar V P. Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3): 305-318.
- [19] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Oost K V, Montanarella L, Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 2017, 8: 2013.
- [20] Qian L S, Chen J H, Deng T, Sun H. Plant diversity in Yunnan: Current status and future directions. *Plant Diversity*, 2020, 42(4): 281-291.
- [21] Li Y, Bai X Y, Zhou Y C, Qin L Y, Tian X, Tian Y C, Li P L. Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical mountainous karst basin in SW China, based on GIS and RUSLE. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41(1): 209-221.
- [22] Li Y G, He D M, Hu J M, Cao J. Variability of extreme precipitation over Yunnan Province, China 1960—2012. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(2): 245-258.
- [23] 丁剑宏, 陈奇伯, 陶余铨, 黎建强. 云南省土壤侵蚀分布特征及动态变化. *西部林业科学*, 2018, 47(6): 15-21.
- [24] Ganasri B P, Ramesh H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(6): 953-961.
- [25] 许长安, 王乃举. 基于 RUSLE 和地理探测器的皖南地区土壤侵蚀时空分异及定量归因. *水土保持研究*, 2025, 32(1): 21-29.
- [26] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力. *资源科学*, 2003, 25(1): 35-41.
- [27] Zhang K L, Shu A P, Xu X L, Yang Q K, Yu B. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 1002-1011.
- [28] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. Washington: U. S. Department of

- Agriculture, 1990.
- [29] Zhang H, Yang Q, Li R, Liu Q, Moore D, He P, Ritsema C J, Geissen V. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 177-188.
- [30] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [31] Yang D W, Kanae S, Oki T, Koike T, Musiak K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 2003, 17(14): 2913-2928.
- [32] Rao W G, Shen Z H, Duan X W. Spatiotemporal patterns and drivers of soil erosion in Yunnan, Southwest China: RULSE assessments for recent 30 years and future predictions based on CMIP6. *Catena*, 2023, 220: 106703.
- [33] 李晖, 冯莉, 聂芹, 孙凤琴, 吴学文. 基于稳定映射变化轨迹分析的厦门土地利用时空演化. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2132-2143.
- [34] Duan X W, Bai Z W, Rong L, Li Y B, Ding J H, Tao Y Q, Li J X, Li J S, Wang W. Investigation method for regional soil erosion based on the Chinese Soil Loss Equation and high-resolution spatial data: Case study on the mountainous Yunnan Province, China. *Catena*, 2020, 184: 104237.
- [35] 王辰星, 王泽童, 杨森, 赵兴华, 潘焱辰, 冯启源, 郑力夫, 王欣妍, 严岩. 基于生态网络构建与生态系统韧性的超大城市生态修复空间识别——以北京市为例. *生态学报*, 2025, 45(10): 4626-4637.
- [36] 王欣妍, 冯启源, 王辰星, 严岩. 基于生态适应性理论的粤港澳大湾区生态安全格局构建. *生态学报*, 2025, 45(12): 5769-5782.
- [37] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [38] Kucuker D M, Cedano Giraldo D. Assessment of soil erosion risk using an integrated approach of GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP) in Erzurum, Turkiye. *Ecological Informatics*, 2022, 71: 101788.
- [39] Haregeweyn N, Tsunekawa A, Poesen J, Tsubo M, Meshesha D T, Fenta A A, Nyssen J, Adgo E. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. *Science of The Total Environment*, 2017, 574: 95-108.
- [40] Han X X, Xiao J, Wang L Q, Tian S H, Liang T, Liu Y J. Identification of areas vulnerable to soil erosion and risk assessment of phosphorus transport in a typical watershed in the Loess Plateau. *Science of The Total Environment*, 2021, 758: 143661.
- [41] Pham T G, Degener J, Kappas M. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin; Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6(2): 99-110.
- [42] Senanayake S, Pradhan B. Predicting soil erosion susceptibility associated with climate change scenarios in the Central Highlands of Sri Lanka. *Journal of Environmental Management*, 2022, 308: 114589.
- [43] David Raj A, Kumar S, Sooryamol K R. Modelling climate change impact on soil loss and erosion vulnerability in a watershed of Shiwalik Himalayas. *Catena*, 2022, 214: 106279.