

基于改进稳定映射法的云南省土壤侵蚀 强度变化轨迹及其驱动因素

马崇玲^{1,2}, 彭双云^{1,2}, 黄帮梅³, 张瑞^{1,2}, 李婷^{1,2}

(1. 云南师范大学地理学部, 昆明 650500; 2. 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心,
昆明 650500; 3. 昆明市第十中学, 昆明 650500)

摘要: [目的] 揭示云南省 1990—2022 年土壤侵蚀强度的变化轨迹, 分析其变化类型及驱动因素, 为制定有效的土壤侵蚀防治策略提供科学依据。[方法] 基于 RUSLE 模型定量评估云南省土壤侵蚀强度状况, 并引入年际变化速率捕捉其动态特征; 采用改进的稳定映射法(STD), 结合变化速率和变化频率, 识别土壤侵蚀强度变化轨迹类型; 利用随机森林模型分析驱动因素的贡献度, 并比较不同轨迹类型分区的驱动因子特征。[结果] 1) 云南省土壤侵蚀年际变化趋势以基本稳定为主, 大幅减少和大幅增加区域面积变化显著; 2) 土壤侵蚀强度变化轨迹呈显著空间分异, 周期型轨迹占比最高(53.90%), 其次为非连续阶梯型(14.78%)和波动型(14.08%); 3) 降水、坡度、人口密度、GDP 和植被覆盖度是影响土壤侵蚀强度轨迹变化的主要驱动因素, 贡献度分别为 17.92%、14.56%、12.52%、12.67% 和 9.41%; 4) 不同轨迹类型分区的驱动因素存在差异, 周期型轨迹和非连续阶梯型轨迹分区降水量和坡度较大, 阶梯型轨迹分区农田覆盖比例高、森林覆盖比例低。[结论] 云南省土壤侵蚀强度的轨迹变化特征显著, 驱动机制具有空间异质性。因此, 土壤侵蚀防治策略应体现区域差异化和针对性, 并针对不同区域的特点采取因地制宜的措施。基于变化速率的 STD 轨迹分区方法可有效刻画土壤侵蚀的动态变化过程, 为土壤侵蚀的监测、预警和分区防治提供新的思路。

关键词: 土壤侵蚀强度; 稳定映射法; 变化轨迹; 变化速率; 轨迹分区

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-00102-11

Analysis of Soil Erosion Intensity Change Trajectories and Their Driving Factors in Yunnan Province Based on An Improved Stability Mapping Method

MA Dongling^{1,2}, PENG Shuangyun^{1,2}, HUANG Bangmei³, ZHANG Rui^{1,2}, LI Ting^{1,2}

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. GIS Technology
Research Center of Resource and Environment in Western China of Ministry of Education Normal
University, Kunming 650500, China; 3. Kunming No. 10 High School, Kunming 650011, China)

Abstract: [Objective] To elucidate the change trajectories of soil erosion intensity in Yunnan Province from 1990 to 2022, and analyze the types of changes and their driving factors, in order to provide a scientific foundation for effective soil erosion control strategies. [Methods] Soil erosion intensity conditions in Yunnan Province was quantitatively assessed based on the RUSLE model, and the dynamic characteristics were captured by introducing interannual change rates. Soil erosion intensity change trajectory types were identified by combining change rates and frequencies using an improved Stability Mapping Method (STD). The contribution of driving factors were analyzed, and the characteristics of driving factors across different

收稿日期: 2024-09-11

修回日期: 2024-10-09

录用日期: 2024-11-11

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(42261073, 41971369, 42261037); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202305AC160083, 202205AC160014); 云南省重大科技专项(202202AD080010); 云南省基础研究面上项目(202401AT070103); 云南省基础研究专项重点项目(202201AS070024, 202001AS070032)

第一作者: 马崇玲(2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1943206000105@ynnu.edu.cn

通信作者: 彭双云(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事土地利用变化的生态环境效应和城市地理信息系统研究。E-mail: frankmei@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

trajectory types were compared using the Random Forest model. [Results] The interannual change trend of soil erosion in Yunnan Province was mainly stable, with significant changes observed in areas with substantial decrease and increase. Soil erosion intensity change trajectories exhibited significant spatial differentiation, with cyclical trajectories being the most prevalent (53.90%), followed by non-continuous stepwise (14.78%) and fluctuating types (14.08%). Precipitation, slope, population density, GDP, and vegetation cover were the main driving factors affecting soil erosion intensity trajectory changes, which contributed 17.92%, 14.56%, 12.52%, 12.67% and 9.41%, respectively. There were differences in driving factors across different trajectory types. Areas with cyclical and non-continuous stepwise trajectories had higher precipitation and greater slopes, while stepwise trajectory areas had higher farmland coverage and lower forest coverage. [Conclusion] The characteristics of soil erosion intensity trajectory changes in Yunnan Province are significant, with spatial heterogeneity in driving mechanisms. Therefore, soil erosion control strategies should reflect regional differentiation and specificity, and adopt location-specific measures based on regional characteristics. The STD trajectory partitioning method based on change rates effectively captures the dynamic changes in soil erosion, and can provide new insights for monitoring, early warning, and partitioned control of soil erosion.

Keywords: soil erosion intensity; Stability Mapping Method; change trajectories; change rates; trajectory partitioning

Received: 2024-09-11

Revised: 2024-10-09

Accepted: 2024-11-11

Online(www.cnki.net): 2024-12-11

土壤侵蚀是全球性的环境问题,对生态环境^[1]、农业生产^[2]和社会经济发展^[3]造成严重影响。中国是世界上土壤侵蚀最为严重的国家之一^[4],云南省作为西南地区重要的生态屏障,其土壤侵蚀问题尤为突出^[5]。近年来,随着经济发展和人口增长,云南省土地利用方式发生显著变化^[6],加剧了土壤侵蚀的风险。因此,深入研究云南省土壤侵蚀强度的变化轨迹及其驱动因素,对于制定科学有效的土壤侵蚀防治策略,维护生态安全和促进区域可持续发展具有重要意义^[7]。

近年来,国内外研究人员广泛探讨土壤侵蚀的时空演变,常用方法包括强度分区统计^[8]、转移矩阵分析^[9]、重力模型等^[10]。利用 ArcGIS 的分区统计工具,对不同土壤侵蚀强度的面积变化进行统计^[11],并通过构建转移矩阵,分析各等级土壤侵蚀在不同年份间的变化规律,揭示土壤侵蚀等级的稳定性和转化趋势^[12]。然而,方法在捕捉土壤侵蚀的长期动态变化及空间单元间的相互作用方面存在局限性,无法全面反映土壤侵蚀的连续变化和空间相关性^[13]。传统研究更多关注土壤侵蚀强度的时空分布特征,较少涉及其动态变化过程,难以全面呈现土壤侵蚀的演变趋势^[14-15]。为弥补该不足,本文引入变化速率的概念,通过计算相邻时期土壤侵蚀量的变化速率,揭示土壤侵蚀强度的变化趋势并量化其幅度。同时,采用改进的 STD 轨迹分区方法,对土壤侵蚀强度的动态轨迹

变化进行分析。改进后的方法不仅能够捕捉土壤侵蚀类型的变化频率,还引入变化幅度,能更好地反映土壤侵蚀的动态变化过程,有效识别不同侵蚀的演化过程。研究可为土壤侵蚀的动态监测和防治提供新的视角和更精确的理解。

以云南省为研究区,基于 RUSLE 模型定量评估 1990—2022 年土壤侵蚀的情况,并采用改进的 STD 轨迹分区方法和随机森林模型,分析土壤侵蚀强度变化轨迹的类型及其驱动因素,以期为云南省水土保持建设提供科学依据,为区域可持续发展提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国西南部的云南省(97°31'~106°11'E, 21°08'~29°15'N),地势西北高、东南低,地形复杂多样,包括高原、山地、丘陵、河谷等类型(图 1)。属于亚热带季风气候,年平均气温 15~18℃,年降水量约 1 000 mm,降水主要集中在 5—10 月,强降雨易引发土壤侵蚀。研究区土壤类型丰富,包括红壤、黄壤、紫色土等,部分区域土壤肥力低,结构不稳定,易受侵蚀。近年来,由于经济发展和人口增长的压力,研究区内的土地利用变化显著,特别是农业开垦和基础设施建设的增加,对自然生态系统造成一定程度的扰动,导致植被覆盖率下降,加剧土壤侵蚀的风险。尽管部分区域实施植被恢复和水土保持措施,但整体

的土壤侵蚀问题仍然严峻。

1.2 数据来源

本文选取 1990—2022 年为研究时段,旨在探究云南省土壤侵蚀强度变化轨迹及主导因素。为确保数据的一致性和可比性,文中所使用的数据空间坐标系均为 WGS_1 984_UTM_zone_48 N,所有数据的空间分辨率均重采样至 1 km。数据详细信息见表 1。

1.3 研究技术路线

首先,采用修订的通用土壤流失方程(RUSLE)模型,对云南省 1990—2022 年的土壤侵蚀进行量化评估,并引入年际变化速率来捕捉土壤侵蚀的动态特征;其次,采用改进的稳定映射法(STD)识别出 5 种基本的轨迹变化类型;最后,利用随机森林模型计算所选取的 18 个驱动因素的贡献度,并使用统计方法分析各轨迹分区的驱动因子平均值(图 2),为云南省土壤侵蚀的分区防治提供科学依据。

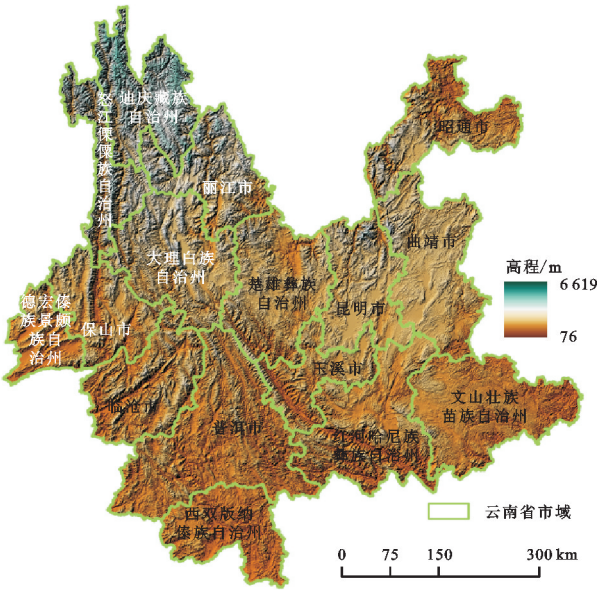


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

表 1 数据描述
Table 1 Data description

数据	相关信息	来源
ASTER GDEM V2	30 m;栅格	地理空间数据云(http:// www.gscloud.cn)
Landsat 系列数据	30 m;栅格	
日降雨,日气温	云南周边 191 个气象站点的文本数据	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(GDP)	1 km;栅格	
人口密度(POP)	1 km;栅格	世界土壤数据库(HWSD)(http:// www.fao.org) 武汉大学的 CLCD 数据集
土壤数据(包括砂粒、粉粒、黏粒和有机碳质量分数)	1 km;栅格	
土地利用	30 m;栅格	

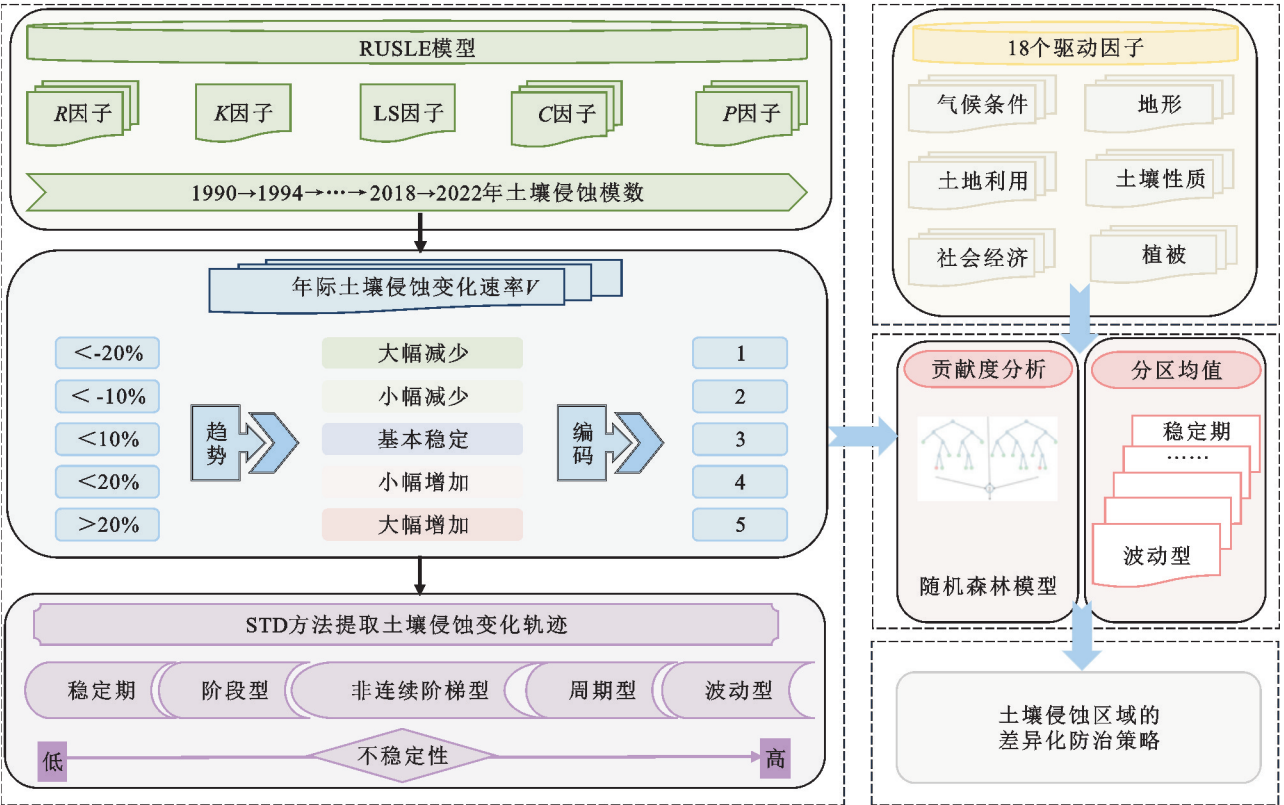


图 2 技术路线

Fig.2 Technical route
[http:// stbxb.alljournal.com.cn](http://stbxb.alljournal.com.cn)

1.4 土壤侵蚀的量化

研究采用修订后的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)模型进行土壤侵蚀模拟。该模型已在全球范围内得到广泛验证和应用,具有较高的可靠性和普适性^[16]。其计算公式为:

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

式中: A 为单位时间单位面积内的土壤侵蚀评估值, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子, $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $(t \cdot h \cdot hm^2)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; 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。

1.4.1 降雨侵蚀力因子(R) 本文基于日降雨量的数据计算降雨侵蚀力^[17],计算公式为:

$$R_i = \alpha \sum_{k=1}^n (Pre_d)^{\beta} \\ \alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (2) \\ \beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}}$$

式中: R_i 为第*i*个半月的侵蚀力, $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$; Pre_d 为第*i*个半月第*d*日 ≥ 12 mm的雨量,mm; n 为第*i*个半月内雨量 ≥ 12 mm的天数; d ; P_{d12} 、 P_{y12} 分别为日雨量 ≥ 12 mm的日平均降雨量、年平均降雨量,mm。

1.4.2 土壤可蚀性因子(K) 为增强区域适用性,研究采用ZHANG等^[18]在EPIC模型^[19]上改进的方法计算*K*因子,计算公式为:

$$K_{EPIC} = 0.1317 \{0.2 + 0.3 \exp[0.0256SAN(1 - SIL/100)]\} \\ [SIL/(CLA + SIL)]^{0.3} \{1.0 - 0.25OC/(C + \exp(3.72 - 2.95C))\} \\ \{1.0 - 0.7(1 - SAN/100)/((1 - SAN/100) + \exp(-5.51 + 22.9(1 - SAN/100)))\} \\ K = -0.01383 + 0.51575K_{EPIC} \quad (3)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子值, $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; SAN 、 SIL 、 CLA 、 C 分别为土壤砂粒、粉粒、黏粒和有机碳质量分数,%。

1.4.3 坡度坡长因子(LS) 本研究采用WISCHMEIER等^[19]提出的公式计算坡长因子(L),坡度因子(S)的计算综合MCCOOL等^[20]和LIU等^[21]提出的公式:

$$L = \left(\frac{(l \times \cos \alpha)}{22.13} \right)^m \quad (4)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (5)$$

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 为可变的坡度指数; S 为坡度因子; θ 为坡度, $^\circ$ 。

1.4.4 植被覆盖管理因子(C) 根据前人^[22]研究,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、0。

1.4.5 水土保持措施因子(P) 根据云南省水保措施实施情况及土地利用数据分类情况,结合前人^[5]研究成果,农田、森林、灌木、草地、水体、雪/冰、裸地、不透水面、湿地*P*赋值分别为0.45、0.24、0.23、0.15、0.10、0.10、1.00、0.90、0.15。

1.4.6 年际土壤侵蚀变化速率 基于RUSLE模型的计算结果,对1990—2022年每隔4年的土壤侵蚀模数计算年际土壤侵蚀变化速率,其计算公式为:

$$V = \begin{cases} \frac{RUSLE_t - RUSLE_{t-1}}{RUSLE_{t-1}} RUSLE_{t-1} > 10^{-6} \\ \frac{RUSLE_t - RUSLE_{t-1}}{10^{-6}} RUSLE_{t-1} < 10^{-6} \end{cases} \quad (6)$$

式中: V 为第*t*年与第*t*-1年间土壤侵蚀变化速率; $RUSLE_t$ 为第*t*年的土壤侵蚀模数; $RUSLE_{t-1}$ 为第*t*-1年的土壤侵蚀模数。

1.5 土壤侵蚀变化趋势分析

根据计算得到的年际土壤侵蚀速率变化,将土壤侵蚀变化趋势划分为不同的等级,每个等级代表一种变化趋势。按照年际土壤侵蚀变化率 $V < -20\%$ 、 $-20\% \leq V < -10\%$ 、 $-10\% \leq V < 0\%$ 、 $0\% \leq V < 20\%$ 、 $V \geq 20\%$ 依次划分为大幅减少、小幅减少、基本稳定、小幅增加、大幅增加。为方便轨迹分析,将大幅减少、小幅减少、基本稳定、小幅增加、大幅增加依次编码为1、2、3、4、5。

1.5.1 变化图谱的提取 借鉴史培军等^[23]提出的土地利用变化空间表达方法,对云南省近30 a的土壤侵蚀速率的变化趋势进行提取,计算公式为:

$$C = 10^{n-1}Y_1 + 10^{n-2}Y_2 + \dots + 10^{n-i}Y_{i-1} + \dots + 10^{n-n}Y_i \quad (7)$$

式中: C 为在连续时间序列内研究区的土壤侵蚀强度变化图谱; n 为研究期间的时相数; Y_i 为第*i*时相对应的土壤侵蚀变化趋势编码。

1.5.2 基于变化速率的稳定映射法提取土壤侵蚀强度变化轨迹 为进一步探索特定地点土壤侵蚀强度的变化轨迹,采用SWETNAM^[24]提出的稳定映射变化轨迹分析方法(STD)。该方法包含相似性(similarity)、变化次数(turnover)、多样性(diversity)3个指标。相似性反映整个研究时段内,特定位置上任一土壤侵蚀强度变化趋势的主导地位信息;变化次数记录相邻年份间土壤侵蚀强度变化趋势发生变化的频率;多样性识别出研究时段内出现过的土壤侵蚀强度变化趋势的总数量。针对云南省土壤侵蚀强度的动态变化特点,SWETNAM方法无法准确量化土壤侵蚀模数的变化幅度。因此,本文提出基于变化速率的STD轨

迹提取方法,通过引入年际变化速率,将变化幅度作为分析的重要维度,使得轨迹分析更加全面。在 SWETNAM 方法的基础上,通过引入变化速率,改进后的 STD 方法能够有效捕捉到土壤侵蚀强度的变化幅度和方向,不仅仅依赖于侵蚀类型的变化频数。使得该方法在动态监测土壤侵蚀、识别不同侵蚀

类型及其空间分布时更加全面和精准。特别是在云南省此类地形复杂、土壤侵蚀过程高度动态化的地区,能够为科学防治提供更有针对性的依据。通过设定逻辑规则,将以上 3 个指标在时间序列上综合分析,最终将云南省土壤侵蚀强度变化轨迹归纳为 5 种基本类型(表 2)。

表 2 1990—2022 年云南省土壤侵蚀强度的变化轨迹 STD 的逻辑规则

Table 2 Logical rules for the STD of soil erosion intensity change trajectories in Yunnan Province from 1990 to 2022

变化次数	多样性	相似性	一级类	特征
0	1	8	稳定型	无变化
2	2	7		有 1 a 突变,其余不变
1	2	7、6		2 种类型间只在前 4 个时相内发生 1 次变化
1	2	4、5	阶梯型	2 种类别间只在中期发生 1 次变化
1	2	7、6		2 种类型间只在后 4 个时相内发生 1 次变化
2	3	4、5、6		非连续阶梯型
3、4	2、3	4、5、6		
3、4	4	2、3、4、5		周期型
5、6、7	2、3、4	2、3、4、5		
—	—	—		
			波动型	更多类别之间的频繁变化与高变化次数相关

1.6 随机森林模型

随机森林(random forest, RF)模型是基于分类与回归树(CART)的多变量非参数算法^[25],具有高精度和强大的防止过拟合能力^[26]。本研究利用 RF 模型识别土壤侵蚀强度变化轨迹关键的影响变量。随机森林中每个特征的重要性可通过该特征在所有树中的基尼不纯度减少量的平均值为:

$$G=1-\sum_{i=1}^n p_i^2 \tag{8}$$

式中: G 为基尼不纯度; p_i 为第 i 类的样本比例; n 为类的数量; $VI(X_j)$ 为特征 X_j 的重要性; N 为树的总数; $\Delta G_n(X_j)$ 为特征 X_j 在第 n 棵树中的基尼不纯度减少量。

2 结果与分析

2.1 RUSLE 建模验证

研究采用云南省水利厅发布的关于 2022 年云南省 16 个州市的土壤侵蚀面积作为参考,对 RUSLE 模型模拟的侵蚀区域差异的准确性进行验证(表 3)。验证结果表明,模型在大尺度范围内具有较高可靠性,总体相对误差为 7.19%。大多数州市的模拟结果与实际数据较为吻合,如玉溪市和德宏州。但西双版纳州和丽江市的误差较大,可能与局部地形差异、植被覆盖率变化及水土保持措施的实施情况等因素有关。

同时,结合 2012 年全国水利普查数据对不同侵蚀强度等级下的模拟结果进行验证(表 4),进一步检验模型的适用性。对不同侵蚀强度等级的模拟结果

进行验证发现,模型对轻度和中度侵蚀区域的模拟较为准确,但对强烈及以上侵蚀区域的模拟误差较大,尤其是剧烈侵蚀区域。可能与极端条件下的复杂变化有关,表明模型在极端侵蚀条件下的适用性仍有待提高。综合以上验证结果,研究基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀模拟在云南省大尺度范围内具有较高的可信度,其结果可满足研究的需求。

表 3 2022 年云南省 16 个州市土壤侵蚀模型验证

Table 3 Validation of soil erosion modeling for 16 prefectures in Yunnan Province in 2022

土壤侵蚀强度等级	参考面积/km ²	模拟面积/km ²	相对误差/%
昆明市	5 331.08	6 381.72	19.71
昭通市	9 309.97	10 202.45	9.59
曲靖市	7 164.71	7 921.97	10.57
玉溪市	3 013.26	3 012.69	-0.02
保山市	4 626.79	4 794.74	3.63
楚雄州	6 130.39	7 064.11	15.23
红河州	8 640.20	8 350.84	-3.35
文山州	11 759.89	11 575.35	-1.57
普洱市	9 146.01	10 015.93	9.51
西双版纳州	3 619.59	4 733.21	30.77
大理州	7 155.05	8 139.06	13.75
德宏州	2 118.92	2 083.86	-1.65
丽江市	5 903.38	4 590.07	-22.25
怒江州	4 026.93	4 990.61	23.93
迪庆州	3 100.02	2 947.51	-4.92
临沧市	6 847.36	8 124.07	18.65
合计	97 893.55	104 928.20	7.19

表 4 结合 2012 年全国水利普查的数据的土壤侵蚀建模验证

Table 4 Validation of soil erosion modeling based on the 2012 national water resources census data

土壤侵蚀 强度等级	模拟 面积/km ²	参考 面积/km ²	相对 误差/%
轻度侵蚀	44 876.00	40 201.62	-10.42
中度侵蚀	34 764.00	31 201.61	-10.25
强烈侵蚀	15 860.00	13 574.73	-14.41
极强烈侵蚀	8 963.00	7 357.76	-17.91
剧烈侵蚀	5 125.00	4 099.10	-20.02
合计	109 588.00	96 434.81	-12.00

注:相对误差为模拟面积与参考面积间的相对偏差,计算公式为
(模拟面积-参考面积)/参考面积。

2.2 土壤侵蚀强度的变化轨迹特征

2.2.1 年际变化趋势的时空分布特征 由图 3 可知,1990—2022 年,云南省土壤侵蚀强度年际变化趋势以基本稳定为主(变化速率为 $\pm 10\%$),占总面积的 42.98%。其余依次为大幅减少(22.23%)、大幅增加(20.99%)、小幅减少(8.48%)和小幅增加(5.31%)。不同年际变化周期分析发现,基本稳定区域面积占比维持在 40%左右,而大幅减少与大幅增加区域面积变化显著,特别是 1998—2002 年和 2014—2018 年 2 个时期,大幅增加面积占比远高于大幅减少。

从空间分布来看,同一区域的土壤侵蚀变化速率呈现出年际交替的特征。具体表现为在某些区域,前 1 个年际变化周期内土壤侵蚀强度大幅减少,随后在下 1 个年际周期内则大幅增加。交替变化特征表明,土壤侵蚀过程在时间维度上存在显著的波动性和不稳定性。反映土壤侵蚀过程的复杂性和动态性,受到自然条件(如年际间降雨量变化、极端气候事件)和人为因素(如土地利用方式的改变、植被恢复与破坏)双重影响。特别是在云南省复杂的地形条件下,短期内的极端降雨事件或人类活动干扰可能对土壤侵蚀产生剧烈的影响,导致交替变化的发生。

同时,交替变化特征也表明,区域土壤侵蚀治理措施的实施效果可能存在一定的滞后性。水土保持措施往往需要较长时间才能显现出有效的侵蚀抑制效果,而在初期阶段,降雨或其他自然因素仍可能导致局部土壤侵蚀强度的波动。为有效应对该动态变化的特征,土壤侵蚀防治策略需要综合考虑长期的变化趋势,在不同时间尺度上进行持续和系统的管理措施。因此,在制定土壤侵蚀防治政策时,应充分考虑年际交替的特征,不仅要在短期内应对极端气候事件对土壤侵蚀的影响,还要确保防治措施的长期稳定性,逐步改善生态环境,达到土壤侵蚀的可持续控制。

2.2.2 土壤侵蚀强度变化轨迹 为进一步分析云南省土壤侵蚀强度变化趋势的动态特征,本文采用改进

的 STD 方法对 1990—2022 年的土壤侵蚀强度变化轨迹进行分类(图 4)。根据变化趋势的时间序列特征,将土壤侵蚀强度变化轨迹划分为稳定型、阶梯型、非连续阶梯型、周期型和波动型 5 种基本类型。

研究结果显示,云南省的土壤侵蚀强度变化轨迹呈显著的空间分异特征。周期型轨迹占比最高,约为 53.90%,并呈以离散斑块为主的分布模式。表明大部分地区的土壤侵蚀变化受自然因素(如降雨、植被变化)和人为因素(如土地利用方式和水土保持措施)的共同作用,表现出一定的周期性。周期性变化可能与降水年际变率及植被和土地利用恢复周期有关。

非连续阶梯型和波动型轨迹分别占 14.78%和 14.08%,在云南省土壤侵蚀强度变化轨迹中排名第 2 和第 3。非连续阶梯型轨迹表现出一定的规律性变化,但整体趋势不明显,可能与区域性水土保持措施或土地利用方式的局部调整有关。波动型轨迹则反映出土壤侵蚀过程中的不稳定性,主要分布在楚雄彝族自治州、保山市、临沧市、普洱市和红河哈尼族彝族自治州等地区,显示出从北到南的集中分布特征,可能与该区域自然条件和土地利用方式的高动态性相关。

稳定型轨迹占比约为 12.88%,表明该地区在研究期间内的土壤侵蚀变化趋势相对平稳,长期维持在某一变化模式。该区域主要位于滇中城市群的西北-东南向和东北-西南向地带,包括昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州和红河哈尼族彝族自治州北部的 7 个县市。尽管滇中城市群是土地利用变化较为剧烈的区域,但在已完成城市化的核心区域,土地利用方式趋于稳定,人工覆盖(如建筑和基础设施)在一定程度上抑制土壤侵蚀的发生。稳定型轨迹可能反映出城市核心区域的土壤侵蚀强度变化已趋于平稳,或是由于保护区和农业集约化地区的政策保护所致。

阶梯型轨迹占比最低,仅为 4.37%,说明该地区在研究期间内仅发生过一次显著的土壤侵蚀强度变化。此类轨迹的出现可能与特定区域的土地利用方式调整或水土保持工程的实施有关,如短期的农业扩张或基础设施建设活动对土壤侵蚀的影响较为集中,但在单次干预后趋于稳定。

2.3 土壤侵蚀强度轨迹变化的驱动因素分析

为进一步探究影响云南省土壤侵蚀强度轨迹变化的主要驱动因素,利用随机森林模型对不同轨迹类型的特征因素进行贡献度分析(图 5)。模型的 R^2 为 0.877,表明模型能够较好地解释数据中的方差。降水、坡度、人口密度、GDP 和植被覆盖度是影响土壤侵蚀强度轨迹变化的最主要因素,其贡献度依次为 17.92%、14.56%、12.52%、12.67%和 9.41%。

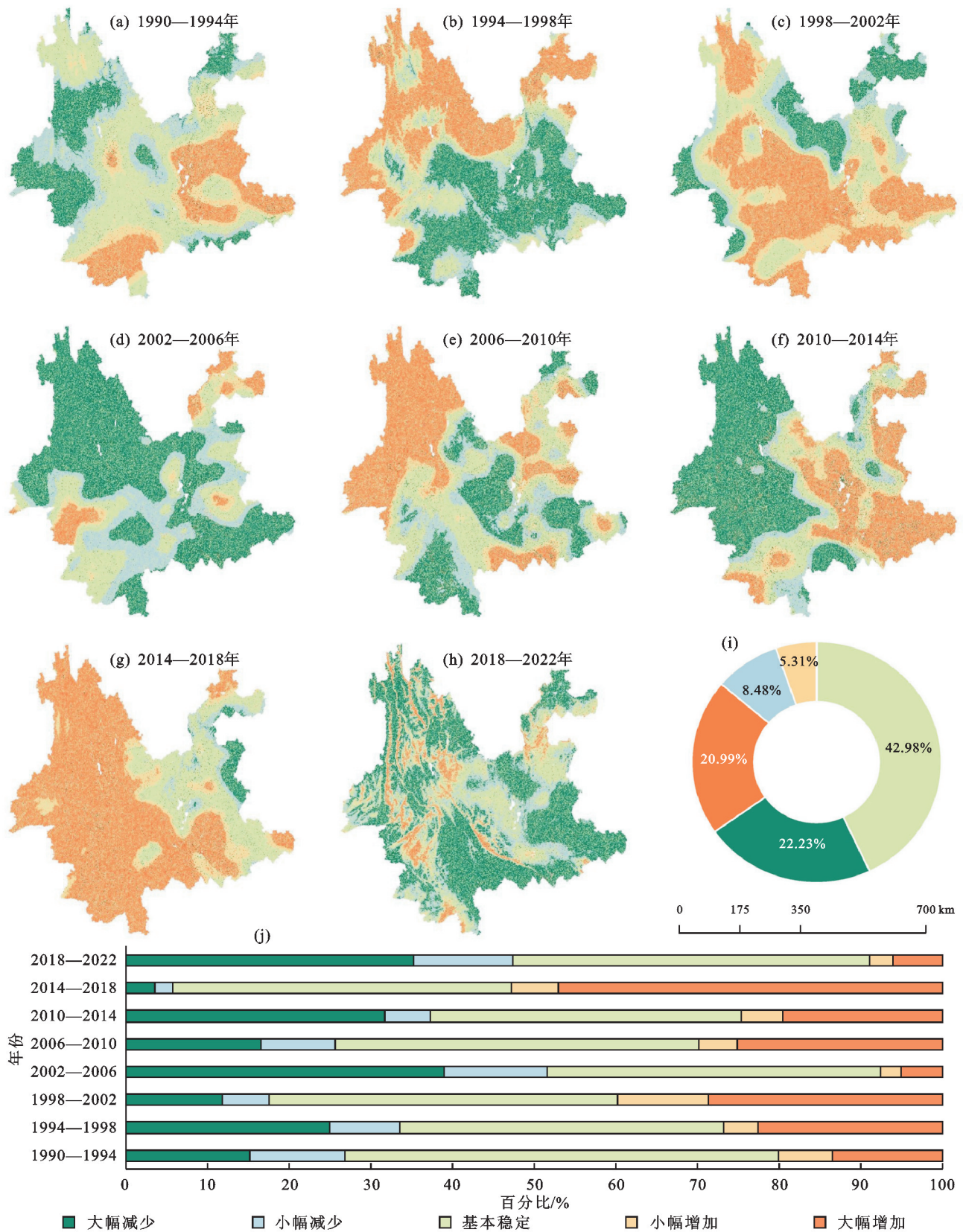


图 3 1990—2022 年年际土壤侵蚀强度变化趋势的时空分布

Fig.3 Spatiotemporal distribution of interannual soil erosion intensity change trends from 1990 to 2022

2.3.1 气候和地形因素的影响 在各个因素中,降水的贡献度最高,达到 17.92%,表明降水是影响云南省土壤侵蚀强度轨迹变化的最主要自然因素。可能是由于降水通过雨滴溅蚀和地表径流等方式直接参

与土壤侵蚀过程,同时也影响植被生长和土壤性质,进而间接影响土壤侵蚀。坡度的贡献度为 14.56%,是影响土壤侵蚀的第二大自然因素。坡度越大,地表径流的流速和剪切力越大,导致土壤侵蚀加剧。此

外,高程和气温的贡献度分别为 7.25%、10.48%,也在一定程度上影响着土壤侵蚀过程。

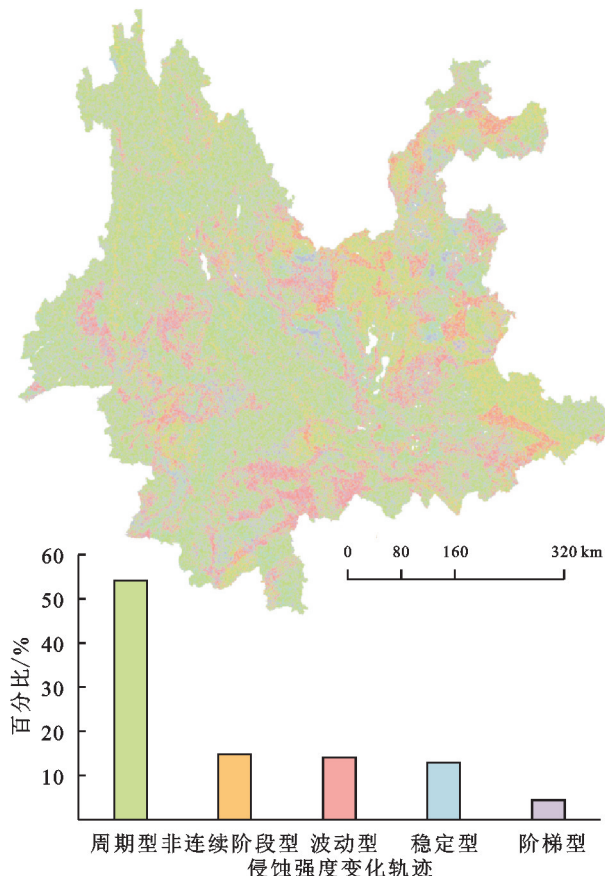


图 4 1990—2022 年土壤侵蚀强度的变化轨迹
Fig.4 Soil erosion intensity change trajectories from 1990 to 2022

2.3.2 社会经济和植被因素的影响 人口密度和 GDP 的贡献度较高,分别为 12.52%、12.67%,表明社会经济发展对土壤侵蚀同样具有重要影响。人口密度的增加可能导致土地利用方式的转变和强度增大,加剧土壤侵蚀;而经济发展可能带来土地利用方式的改变,如城镇扩张导致不透水面积增加,农业活动导致土壤扰动加剧等,从而影响土壤侵蚀过程。此外,植被覆盖度的贡献度为 9.41%,表明植被状况也是影响土壤侵蚀的重要因素。植被覆盖度的提高能够减少雨滴对土壤的直接溅蚀,并通过根系固土,提高土壤的抗侵蚀能力。

2.3.3 土地利用和土壤性质的影响 在土地利用覆盖因素中,农田、森林、灌木、草地、裸地、不透水面和湿地的贡献度均较低,贡献度总和为 10.34%,表明土地利用覆盖类型在云南省土壤侵蚀强度轨迹变化中并非主要驱动因素。在土壤性质因素中,粉砂比例、砂土比例、有机碳和黏土比例的贡献度也较低,贡献度总和为 12.21%,表明土壤性质对土壤侵蚀的影响也相对较小。

综上,气候因素(降水)和地形因素(坡度)是影响云南省土壤侵蚀强度轨迹变化的主要自然驱动力,而社会经济因素(人口密度、GDP)和植被因素(植被覆盖度)是主要人为驱动力。土地利用和土壤属性对土壤侵蚀的影响相对较小。该结果对于理解时间序列内云南省土壤侵蚀的轨迹变化和制定有针对性的土壤侵蚀防治措施具有重要意义。

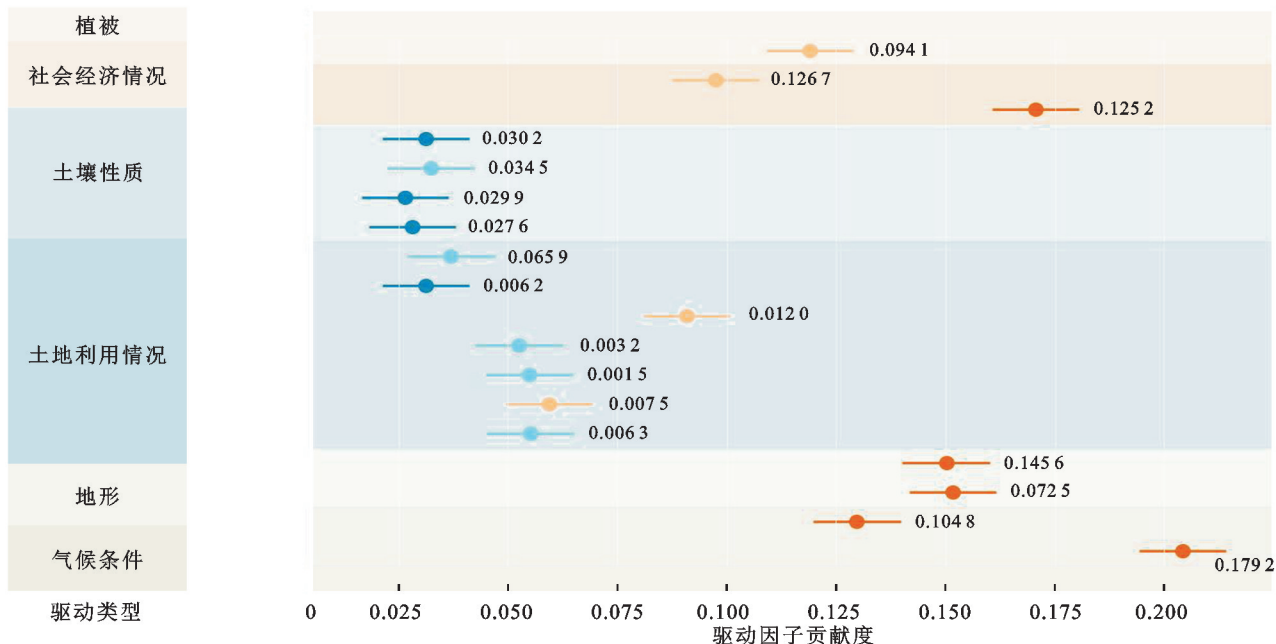


图 5 土壤侵蚀强度变化轨迹的驱动因子贡献度
Fig.5 Contribution of driving factors to soil erosion intensity change trajectories

2.4 不同轨迹分区驱动因素特征

为进一步识别不同土壤侵蚀强度轨迹分区中可能

影响土壤侵蚀变化趋势的关键因子,对各个驱动因子均
值在不同土壤侵蚀强度轨迹类型间进行比较分析(表

5)。从气候因素来看,周期型和非连续阶梯型轨迹分区的平均降水量较高,分别为 1 171.21、1 232.60 mm,而阶梯型轨迹分区的平均降水量最低,为 1 065.03 mm。

从地形因素来看,周期型轨迹分区的平均高程最高,为 1 932.48 m,而阶梯型轨迹分区的平均高程最低,为 1 744.86 m。周期型和波动型轨迹分区的平均坡度较大,分别为 21.42°和 20.30°,而稳定型轨迹分区的平均坡度最小,为 17.28°。

从土地覆盖因素来看,阶梯型轨迹分区的农田覆盖比例最高,为 28.02%,而非连续阶梯型轨迹分区的农田覆盖比例最低,为 19.56%。非连续阶梯型和周期型轨迹分区的森林覆盖比例较高,分别为 71.45%和 70.29%,而阶梯型轨迹分区的森林覆盖比例最低,为 59.10%。波动型轨迹分区的草地覆盖比例最低,为 4.40%,而阶梯型轨迹分区的草地覆盖比例最高,为 8.43%。

从土壤性质来看,各轨迹分区间的粉砂比例、砂土比例、有机碳质量分数和黏土比例差异较小,表明土壤

性质可能不是影响土壤侵蚀强度变化的主要因素。

从社会经济因素来看,周期型轨迹分区的人口密度最高,为 100.10 人/km²,而波动型轨迹分区的人口密度最低,为 89.52 人/km²。稳定型轨迹分区的 GDP 最高,为 133.43 万元/km²,而非连续阶梯型轨迹分区的 GDP 最低,为 75.67 万元/km²。从植被覆盖度来看,非连续阶梯型轨迹分区的植被覆盖度最高,为 64.96%,而阶梯型轨迹分区的植被覆盖度最低,为 62.32%。

综上,不同土壤侵蚀强度轨迹类型分区的驱动因素存在一定差异。降水量、坡度、农田覆盖比例、森林覆盖比例、人口密度和 GDP 等因素可能是影响土壤侵蚀强度变化的关键因子。其中,周期型和非连续阶梯型轨迹分区的降水量较高、坡度较大,而阶梯型轨迹分区的农田覆盖比例较高、森林覆盖比例较低,可能是导致不同轨迹类型形成的重要原因。在今后的土壤侵蚀防治工作中,需要针对不同轨迹类型分区的特点,采取有针对性的措施。

表 5 不同轨迹类型分区驱动因素的平均值

Table 5 Mean values of driving factors in different trajectory type zones

驱动因子	稳定型	阶梯型	非连续阶梯型	周期型	波动型
降水/mm	1 131.85	1 065.03	1 232.60	1 171.21	1 175.92
气温/℃	15.11	15.56	14.83	14.66	15.80
高程/m	1 863.38	1 744.86	1 915.90	1 932.48	1 739.11
坡度/(°)	17.28	17.49	19.11	21.42	20.30
农田覆盖/%	23.91	28.02	19.56	20.61	23.41
森林覆盖/%	65.78	59.10	71.45	70.29	70.04
灌木覆盖/%	1.56	2.73	1.72	2.08	2.13
草地覆盖/%	7.09	8.43	6.45	6.85	4.40
裸地覆盖/%	0.06	0.04	0.09	0.08	0
不透水面/%	0.53	0.66	0.25	0.05	0.01
湿地覆盖/%	0.01	0	0	0	0
粉砂比例/%	27.60	27.28	27.00	27.18	27.19
砂土比例/%	35.52	34.49	34.93	34.70	35.32
有机碳/%	0.52	0.54	0.51	0.51	0.53
黏土比例/%	34.97	36.12	35.19	35.30	36.13
人口密度/(人·km ⁻²)	96.17	91.24	92.34	100.10	89.52
GDP/(万元·km ⁻²)	133.43	120.78	75.67	90.60	120.89
植被覆盖度/%	63.47	62.32	64.96	64.36	64.71

3 讨论

3.1 基于变化速率的 STD 轨迹分区方法在土壤侵蚀研究中的创新性和应用价值

STD 轨迹分区方法最初应用于土地利用变化研究^[24],通过分析不同时期土地利用类型的转移轨迹,可识别土地利用变化的主要类型和空间分布特征^[27]。然而,传统 STD 方法更适用于分析类型变量,如土地利用类型的转变,而难以直接应用于具有数值变化幅度的连续变量。是因为传统 STD 方法将不同土地利用类型间的转换视为离散的状态变化,而

没有考虑变化的数值大小。因此,在分析诸如土壤侵蚀速率等连续变量的变化轨迹时,传统 STD 方法可能无法充分刻画其变化幅度该关键因素。

然而,在将 STD 方法应用于土壤侵蚀等领域时,变化幅度的概念变得尤为重要。与土地利用类型不同,土壤侵蚀模数是连续变量,不同侵蚀程度间存在数量差异。仅考虑侵蚀类型的变化次数,而忽略侵蚀强度的变化幅度,无法全面反映土壤侵蚀的动态变化特征。因此,将 STD 轨迹分区方法引入土壤侵蚀研究时,创新性地引入变化速率指标,以量化土壤侵蚀

强度的变化幅度。通过计算相邻时期土壤侵蚀量的变化速率,可识别出土壤侵蚀加剧或减缓的区域,更准确、细致地刻画土壤侵蚀的动态变化过程。改进后的 STD 方法弥补传统 STD 方法在处理连续变量时的不足,为土壤侵蚀的动态监测和预警提供新思路。该方法不仅拓展 STD 方法的应用范围,而且为理解复杂环境问题的动态变化机制提供新视角。

3.2 土壤侵蚀防治策略的区域差异化

土壤侵蚀是自然因素和人为因素相互作用的结果^[28]。通过随机森林模型分析土壤侵蚀强度轨迹的驱动因素表明,气候因素(降水)和地形因素(坡度)是影响土壤侵蚀时空分异的主要自然驱动力,结论与研究者^[29]在西南展开的研究成果一致。而社会经济因素(人口密度和 GDP)和植被因素(植被覆盖度)是主要人为驱动力。因此,在制定土壤侵蚀防治措施时,需要充分考虑不同区域的自然和人为因素,采取因地制宜的措施^[30]。对于降水量大、坡度较陡的区域,应加强水土保持工程措施的建设,如修建梯田、水平阶、沟头防护等,减少降水对土壤的直接侵蚀;同时,加强植被恢复与建设,提高植被覆盖度,减少地表径流对土壤的侵蚀。对于人口密集、经济发展水平较高的区域,应加强土地利用管理,合理控制土地开发强度,减少不透水面积;优化土地利用结构,提高林草地比例;推广应用保护性耕作措施,减少农业活动对土壤的扰动;加强生态保护与修复,提高植被覆盖度,增强土壤抗侵蚀能力。对于植被覆盖度较低的区域,应采取措施促进植被恢复,如封山育林、退耕还林还草等;加强水土流失重点区域的综合治理,控制土壤侵蚀的发生和发展。

本研究发现,不同轨迹分区的驱动因素存在差异,表明土壤侵蚀的驱动机制具有空间异质性。土壤侵蚀防治策略应体现区域差异化,针对不同区域的土壤侵蚀特点和驱动机制,制定相应的防治措施。如对于周期型变化,应重点关注降水和坡度的影响,采取修建梯田、植树造林等水土保持措施;对于波动型轨迹,应重点关注人口密度和 GDP 的影响,控制土地利用强度,优化产业结构等。此外,还应加强土壤侵蚀监测和科学研究,提高对土壤侵蚀过程、机理的认识,为土壤侵蚀防治提供更加科学、有效的决策支持。加强部门协作和公众参与,形成政府主导、部门协同、社会参与的土壤侵蚀综合防治格局,促进水土资源的可持续利用和生态文明建设。

3.3 研究限制

本文采用 RUSLE 模型和改进的 STD 轨迹分区方法,分析云南省 1990—2022 年土壤侵蚀的时空变

化特征及其驱动因素。但是仍存在一些限制,需要在未来的研究中进行改进和完善。本研究引入变化速率指标,并采用改进的 STD 轨迹分区方法,识别云南省土壤侵蚀强度变化轨迹的主要类型及其空间分布特征。但是,目前的研究中对变化轨迹的探索对于土壤侵蚀的变化方向并未探明,即土壤侵蚀是呈增加趋势还是减少趋势。未来研究可进一步分析不同轨迹类型与土壤侵蚀变化方向间的关系,明确不同区域土壤侵蚀的发展趋势,为土壤侵蚀的预警和防控提供更有针对性的依据;本研究采用随机森林模型分析影响云南省土壤侵蚀强度变化轨迹的主要驱动因素,但仍有一些潜在的影响因素未纳入分析,如土地管理政策^[31]、农业技术水平等^[32]。未来研究可收集更多的社会经济数据,综合考虑自然和人文因素对土壤侵蚀的影响,深入探究土壤侵蚀的驱动机制。

4 结论

1) 云南省土壤侵蚀强度轨迹的多样化特征和空间分异,研究基于改进的 STD 轨迹分析法,进行轨迹划分表明,周期型轨迹占据主导地位,集中分布于滇中和滇西地区,而稳定型轨迹集中于滇中城市群周边。

2) 土壤侵蚀强度变化轨迹的驱动因素具有空间异质性。研究通过随机森林模型明确不同轨迹类型的主导驱动因素发现,自然因素(如降水、坡度)和社会经济因素(如人口密度、GDP、植被覆盖)对土壤侵蚀的影响在不同区域具有显著的空间异质性。周期型轨迹区域受自然因素的影响更为显著,表明该地区的水土保持工作需重点考虑气候变化下的自然条件。波动型轨迹则受人类活动干扰较大,揭示社会经济发展与土壤侵蚀间的复杂关系,为土地利用管理提供具体方向。

3) 土壤侵蚀防治的区域差异化策略。研究提出的防治策略不仅体现因地制宜的原则,还强调在不同驱动因素下的管理优先级。周期型轨迹区域应针对气候周期变化带来的影响,优先实施工程性措施(如梯田修建和植被恢复),而波动型轨迹区则应加强土地利用规划,减少人类活动的扰动。通过针对不同区域的土壤侵蚀模式采取差异化的防治措施,可提高水土保持工程的效率,促进生态环境的可持续恢复与发展。

参考文献:

- [1] ZHOU Y, YI Y J, LIU H X, et al. Spatiotemporal dynamic of soil erosion and the key factors impact processes over semi-arid catchments in Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2024, 201: e107217.
- [2] SONDEREGGER T, PFISTER S. Global assessment of agricultural productivity losses from soil compaction and

- water erosion[J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 55(18):12162-12171.
- [3] WANG L, YAN H, WANG X W, et al. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, Southern China [J]. *Catena*, 2020, 194: e104678.
- [4] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. *自然杂志*, 2008, 30(1): 12-16.
- ZHENG F L, WANG Z L, YANG Q K. The retrospection and prospect on soil erosion research in China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2008, 30(1): 12-16.
- [5] 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 [J]. *Catena*, 2023, 220: e106703.
- [6] 沈健, 岳彩荣, 郭喜龙, 等. 基于 GEE 平台 1995—2022 年云南省 LULC 变化及驱动因素分析[J]. *森林工程*, 2024, 40(4): 58-70.
- SHEN J, YUE C R, GUO X L, et al. Analysis of LULC changes and driving factors in Yunnan Province from 1995 to 2022 based on GEE platform [J]. *Forest Engineering*, 2024, 40(4): 58-70.
- [7] SENANAYAKE S, PRADHAN B, WEDATHANTHIRIGE H, et al. Monitoring soil erosion in support of achieving SDGs: A special focus on rainfall variation and farming systems vulnerability[J]. *Catena*, 2024, 234: e107537.
- [8] 澹腾辉, 焦雄, 平原, 等. 基于土壤侵蚀时空演变的县域生态承载力评价[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 210-216.
- TAN T H, JIAO X, PING Y, et al. Ecological carrying capacity evaluation based on spatial and temporal evolution of soil erosion at county scale[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4): 210-216.
- [9] 平耀东, 田培, 任茜, 等. 鄂东北土壤侵蚀时空演变及其影响因子定量评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(1): 61-71.
- PING Y D, TIAN P, REN Q, et al. Spatiotemporal evolution of soil erosion and quantitative evaluation of its influencing factors in northeast Hubei[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(1): 61-71.
- [10] XIAO Y, GUO B, LU F, et al. Spatial-temporal evolution patterns of soil erosion in the Yellow River Basin from 1990 to 2015: Impacts of natural factors and land use change[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, 12(1): 103-122.
- [11] 马悦, 何洪鸣, 赵宏飞. 基于 GIS 和 RUSLE 的甘南州土壤侵蚀时空演变[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 37-46.
- MA Y, HE H M, ZHAO H F. Spatiotemporal change of soil erosion in Gannan Tibetan autonomous prefecture based on GIS and RUSLE [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 37-46.
- [12] 谢明阳, 焦春萌, 韩小雨, 等. 1990—2020 年延安市土壤侵蚀演变及其时空偏移特征[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 187-192.
- XIE M Y, JIAO C M, HAN X Y, et al. Evolution and spatial-temporal shift characteristics of soil erosion in Yan'An city during 1990—2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 187-192.
- [13] MA T L, LIU B Y, HE L, et al. Response of soil erosion to vegetation and terrace changes in a small watershed on the Loess Plateau over the past 85 years [J]. *Geoderma*, 2024, 443: e116837.
- [14] 石学瑾, 张彪, 郭家龙, 等. 黄土高原典型小流域土壤侵蚀时空演变[J]. *地理学报*, 2024, 79(7): 1787-1803.
- SHI X J, ZHANG B, GUO J L, et al. Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical watershed of the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(7): 1787-1803.
- [15] 徐刘洋, 郭伟玲, 贾纪昂. 东南丘陵地区土壤侵蚀时空变化及其驱动因素: 以湖南省张家界市为例[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 218-226.
- XU L Y, GUO W L, JIA J A. Spatial and temporal variability and driving factors of soil erosion in hilly areas of Southeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1): 218-226.
- [16] BENAVIDEZ R, JACKSON B, MAXWELL D, et al. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(11): 6059-6086.
- [17] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 35-41.
- ZHANG W B, FU J S. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. *Resources Science*, 2003, 25(1): 35-41.
- [18] ZHANG K L, SHU A P, XU X L, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 1002-1011.
- [19] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [20] MCCOOL D K, FOSTER G R, MUTCHLER C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation [J]. *Transactions of the Asae*, 1989, 32(5): 1571-1576.
- [21] LIU B Y, NEARING M A, RISSE L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. *Transactions of the Asae*, 1994, 37(6): 1835-1840.

- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000;156-161.
LU R K. Methods for soil agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,2000;156-161.
- [16] STOECK T, BASS D, NEBEL M, et al. Multiple marker parallel tag environmental DNA sequencing reveals a highly complex eukaryotic community in marine anoxic water[J].Molecular Ecology,2010,19(1):21-31.
- [17] CAPORASO J G, KUCZYNSKI J, STOMBAUGH J, et al. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data[J].Nature Methods,2010,7:335-336.
- [18] EDGAR R C. Uparse: Highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads [J]. Nature Methods, 2013,10:996-998.
- [19] BASTIDA F, ELDRIDGE D J, ABADES S, et al. Climatic vulnerabilities and ecological preferences of soil invertebrates across biomes [J]. Molecular Ecology, 2020,29(4):752-761.
- [20] GUILLOU L, BACHAR D, AUDIC S, et al. The Protist Ribosomal Reference database (PR2): A catalog of unicellular eukaryote small sub-unit rRNA sequences with curated taxonomy [J]. Nucleic Acids Research, 2013,41(D1):597-604.
- [21] WU B X, JIAO X Y, SUN A Q, et al. Precipitation seasonality and soil pH drive the large-scale distribution of soil invertebrate communities in agricultural ecosystems[J]. Fems Microbiology Ecology,2023,99(11):e131.
- [22] LIU J, LIU M, WU M, et al. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of Southern China [J].Journal of Soils and Sediments,2018,18(5):1853-1864.
- [23] TIE L H, WEI S Z, PENUELAS J, et al. Phosphorus addition reverses the negative effect of nitrogen addition on soil arthropods during litter decomposition in a sub-tropical forest [J]. Science of the Total Environment, 2021,781:e146786.
- [24] YE G P, LIN Y X, KUZYAKOV Y, et al. Manure over crop residues increases soil organic matter but decreases microbial necromass relative contribution in upland Ultisols: Results of a 27-year field experiment [J].Soil Biology and Biochemistry,2019,134:15-24.
- [25] ERKTAN A, OR D, SCHEU S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions [J].Soil Biology and Biochemistry,2020,148:e107876.
- (上接第 112 页)
- [22] YANG D W, KANAE S, OKI T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes [J].Hydrological Processes,2003,17(14):2913-2928.
- [23] 史培军,陈晋,潘耀忠.深圳市土地利用变化机制分析 [J].地理学报,2000,55(2):151-160.
SHI P J, CHEN J, PAN Y Z. Landuse change mechanism in Shenzhen City [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(2):151-160.
- [24] SWETNAM R D. Rural land use in England and Wales between 1930 and 1998: Mapping trajectories of change with a high resolution spatio-temporal dataset[J].Landscape and Urban Planning,2007,81(1/2):91-103.
- [25] BREIMAN L. Random forests[J].Machine Learning, 2001,45:5-32.
- [26] LYU Y, JU Q R, LV F M, et al. Spatiotemporal variations of air pollutants and ozone prediction using machine learning algorithms in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2021[J].Environmental Pollution,2022,306:e119420.
- [27] 王世东,冯正英,余洋,等.基于改进稳定映射法的土地利用/覆被变化轨迹分析[J].农业机械学报,2020,51(8):152-162.
WANG S D, FENG Z Y, YU Y, et al. Land use/cover change trajectory analysis based on improved stable mapping method[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):152-162.
- [28] GUO L J, LIU R M, MEN C, et al. Multiscale spatiotemporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion[J].The Science of the Total Environment,2021,779:e146474.
- [29] ZHANG X Q, HU M C, GUO X Y, et al. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China[J].Catena,2018,160:394-402.
- [30] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
WANG H, GAO J B, HOU W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: Based on the geographical detector method[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73 (9):1674-1686.
- [31] BORRELLI P, PANAGOS P. An indicator to reflect the mitigating effect of common agricultural policy on soil erosion[J].Land Use Policy,2020,92(C):e104467.
- [32] NASIR AHMAD N S B, MUSTAFA F B, MUHAMMAD YUSOFF S@ Y, et al. A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia[J].International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8 (2):103-115.