

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.002.

廖瑞恩, 齐实, 赖金林, 等. 西南高山峡谷区水力侵蚀时空变化及其驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 139-147.

Liao Ruien, Qi Shi, Lai Jinlin, et al. Spatial-temporal Variation and Driving Mechanism of Water Erosion in Southwest Alpine-Canyon Area of China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 139-147.

西南高山峡谷区水力侵蚀时空变化及其驱动力

廖瑞恩¹, 齐实^{1,2}, 赖金林¹, 唐颖¹, 李鹏¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘 要: [目的] 确定西南高山峡谷区水力侵蚀的空间分布及其时空变化特征, 探究区域水力侵蚀的驱动机制, 并为区域水土流失治理提供对策。[方法] 基于 GIS 和 RUSLE 模型, 利用 Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验法、随机森林回归对西南高山峡谷区水力侵蚀的时空演变特征以及驱动力进行分析。[结果] (1) 西南高山峡谷区水力侵蚀微度和轻度侵蚀占比 78.05% 以上。(2) 整体上, 2000—2020 年水力侵蚀量变化范围为 $4.606\ 3 \times 10^8 \sim 1.487\ 4 \times 10^9$ t, 多年均值为 $7.966\ 4 \times 10^8$ t。降雨侵蚀力因子变化范围为 $125.11 \sim 249.93$ MJ · mm / (hm² · h · a), 多年均值为 186.71 MJ · mm / (hm² · h · a)。植被覆盖与管理因子变化范围为 $0.37 \sim 0.70$, 多年均值为 0.48 。(3) 整体上坡度坡长因子对西南高山峡谷区水力侵蚀空间分异的解释程度最高, 达到 41%, 其次是植被覆盖与管理因子, 达到 24%, 其余是降雨侵蚀力因子 > 土壤可蚀性因子 > 水土保持措施因子, 分别达到 16%, 12%, 8%, 且各因子对水力侵蚀空间分异的解释程度随着水土保持分区不同而出现差异。[结论] 西南高山峡谷区侵蚀严重的区域主要分布于藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区南部, 藏东南高寒高山峡谷生态维护区西北部、东部。坡度坡长因子及植被覆盖管理因子是西南高山峡谷区水力侵蚀空间分布的主要驱动因素。藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区、藏东南高寒高山峡谷生态维护区和滇西北高山峡谷生态维护区, 建议改善此区域植被覆盖, 提高土壤抵抗侵蚀能力; 滇北—川西南高山峡谷蓄水保土区建议在改善植被覆盖的基础上, 在生态脆弱的区域布置适当水土保持措施。

关键词: 土壤侵蚀; 西南高山峡谷区; RUSLE 模型; 随机森林; 时空变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0139-09

Spatial-temporal Variation and Driving Mechanism of Water Erosion in Southwest Alpine-Canyon Area of China

Liao Ruien¹, Qi Shi^{1,2}, Lai Jinlin¹, Tang Ying¹, Li Peng¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation, State Forestry Bureau, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to determine the spatial distribution of water erosion and its spatial-temporal variation in southwest alpine-canyon area, to explore driving mechanism of water erosion in study area, and to provide countermeasures for regional soil erosion and water loss control. [Methods] Based on GIS and RUSLE model, the spatial and temporal variation and driving mechanism of water erosion in southwest alpine-canyon area were analyzed by using the method of the Theil-Sen trend analysis, Mann-Kendall significance test and random forest model. [Results] (1) The ratio of light erosion and mild erosion was over 78.05%. (2) Generally, during the period of 2000 to 2020, the range of water erosion amount varied between $4.606\ 3 \times 10^8$ t and $1.487\ 4 \times 10^9$ t and the annual value was $7.966\ 4 \times 10^8$ t. The range of rainfall erosion factor amount varied between 125.11 MJ · mm / (hm² · h · a) and 249.93 MJ · mm / (hm² · h · a) and the annual value was 186.71 MJ · mm / (hm² · h · a). The range of vegetation coverage and management factor varied between 0.37 and 0.70 and the average value for years was 0.48 . (3) Topographic factors was

收稿日期: 2023-08-21

修回日期: 2023-12-01

资助项目: 国家重点研发计划“西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范”(2022YFF1302903)

第一作者: 廖瑞恩(1998—), 男, 湖北省恩施市人, 硕士研究生, 研究方向: 水土保持工程。E-mail: 2598618275@qq.com

通信作者: 齐实(1964—), 男, 北京市海淀区人, 博士, 教授, 研究方向: 水土保持工程。E-mail: qishi@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

with the highest contribution to explain spatial variation of water erosion, accounting for 41%, followed by vegetation coverage and management factors, rainfall erosion factor, soil erodibility factor, soil and water conservation measure factor, accounting for 24%, 16%, 12%, and 8%, respectively. Moreover, spatial variation contribution of each factor varied with the soil and water conservation zone. [Conclusion] The severe erosion areas mainly distributed in the southern part of Eastern Xizang & West Sichuan Ecological Maintenance & Water Conservation Region, Eastern and northwest part of Southeast Xizang arctic-alpine Ecological Maintenance Region. Topographic factors and vegetation coverage and management factors was the main driving factors. In the Ecological Maintenance and Water Conservation Zone of Eastern Xizang & Western Sichuan, the Southeast Xizang Ecological Maintenance Arctic-alpine Zone and the Northwest Yunnan Ecological Maintenance Zone, the measures that would improve the vegetation cover to increase the soil anti-erodibility was suggested. In the North Yunnan & Southwest Sichuan Water Storage and Soil Conservation Zone, vegetation cover should be improved while appropriate soil and water conservation measures could be placed.

Keywords: soil erosion; southwest alpine canyon area; RUSLE; Random Forest; temporal and spatial changes

土壤侵蚀是全球范围内的重要生态环境问题之一,严重的土壤侵蚀会导致水土流失、土地生产力下降等问题^[1],对农业、社会、经济的发展造成负面影响。在我国西南高山峡谷区,水力侵蚀造成的生命、经济损失以及石漠化问题严重^[2]。西南高山峡谷区气候地形复杂,生态系统脆弱,部分区域土壤侵蚀严重,经济发展缓慢,本文探究此区域水力侵蚀时空变化及驱动机制,研究成果可为该区域水土流失治理提供科学依据。

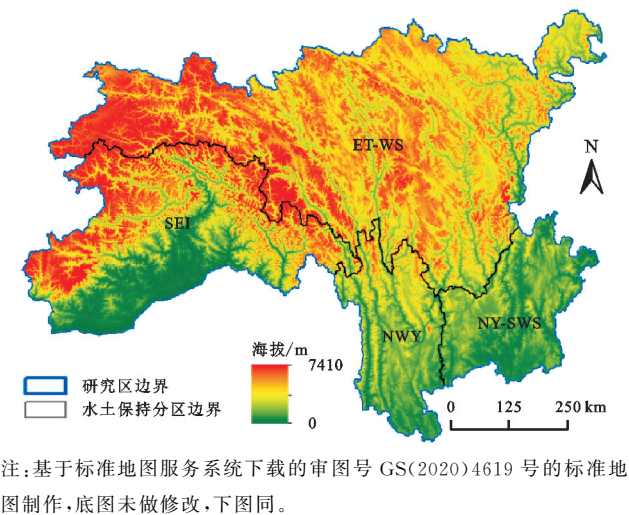
RUSLE 模型是研究土壤侵蚀的有效方法。1978 年,Wischmeier 在 Zingg^[3]、Smith 等研究基础上提出通用土壤流失方程(USLE),1997 年 Renard 等^[4]提出修正通用土壤流失方程(RUSLE),在国内^[5]、国外^[6]应用广泛。目前对于西南高山峡谷区内的土壤侵蚀研究集中于小区域,朱军等^[7]研究了云南泸水县高山峡谷区的土壤侵蚀,学者^[8-10]对澜沧江流域土壤侵蚀进行研究,分析区域内侵蚀空间分布、时空变化特征,但现有研究很少涉及西南高山峡谷区整体土壤侵蚀研究。丁琳等^[11]研究西南高山峡谷区的土壤侵蚀空间分异特征,发现区域内水力侵蚀集中于中南部和西北部地区,但未曾涉及土壤侵蚀的时空变化以及驱动机制。土壤侵蚀驱动力分析对区域水土流失防治具有重要意义^[12],以往研究主要运用地理探测器^[13]、模型参数控制法^[14]、多元线性回归分析等^[15]方法探究驱动因素,随机森林是基于统计学的机器学习算法,可避免多元共线性等问题,近年来在土壤侵蚀驱动力分析中得到一定应用^[16]。

本研究基于 GIS 和 RUSLE 模型,对涉及西藏自治区、云南省和四川省的西南高山峡谷区 2000—2020 年共 21 a 的水力侵蚀进行计算,利用 Sen 趋势

分析和 Mann-Kendall 显著性检验法分析西南高山峡谷区水力侵蚀、降雨侵蚀力因子、植被覆盖因子的时空演变特征,并引入随机森林算法按照水土保持分区分析其驱动力因素,对西南高山峡谷区提出相应水土保持对策,为该区域的水土保持、生态修复以及经济发展提供支撑。

1 研究区概况

西南高山峡谷区地处四川省、西藏自治区和云南省三省交界地带,地理坐标在 24°58′7.47″—32°51′24.93″N, 91°23′48.24″—104°13′43.55″E,海拔 89~6 826 m,面积约 611 026 km²,地形复杂,地貌以山地、丘陵以及高原为主,地势起伏大。该区位于东亚和南亚季风的过渡地带,气候空间分布差异十分显著,平均气温为 -2.98~21.89℃,平均降雨量为 296.62~2 302.90 mm,受到青藏高原隆起的影响,其地理环境极其复杂。土壤和植被类型丰富,土壤类型主要为高山土、淋溶土和铁铝土;植被类型以针叶林、阔叶林、灌丛和草甸为主。区域内水土保持分区分为滇西北高山峡谷生态维护区(Northwest Yunnan Ecological Maintenance Zone,以下简称 NWY)、滇北—川西南高山峡谷蓄水保土区(North Yunnan & Southwest Sichuan Water Storage and Soil Conservation Zone,以下简称 NY-SWS)、藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区(Eastern Tibet & West Sichuan Ecological Maintenance & Water Conservation Region,以下简称 ET-WS)和藏东南高寒高山峡谷生态维护区(Southeast Tibet arctic-alpine Ecological Maintenance Region,以下简称 SET)。该区地质地貌特殊,气候条件复杂,生态环境十分脆弱,属于生态环境重点保护区域,其地理位置见图 1。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location diagram of the study area

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究涉及的数据类型及其来源如表 1 所示。水力侵蚀栅格数据分辨率统一为 90 m,投影坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_47N。降雨侵蚀力因子(R)通

过 ArcGIS 协同克里金插值至 90 m 分辨率,土壤可蚀性因子(K)、植被覆盖与管理因子(C)及水土保持措施因子(P)通过重采样工具中最邻近法统一至 90 m 分辨率。

2.2 水力侵蚀计算方法

运用 RUSLE 模型,对研究区的水力侵蚀进行模拟:

A=R×K×LS×C×P (1)

式中:A 为模型计算的单位面积年土壤侵蚀量[t/(hm²·a)];R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)];K 为土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(MJ·hm²·mm)];LS 为坡长坡度因子(无量纲);C 为植被覆盖与管理因子(无量纲);P 为水土保持措施因子(无量纲)。

2.2.1 降雨侵蚀力因子 利用年降雨量和月降雨量对 R 因子进行计算,采用 Smith 和 Wischemeier 的 Wischemeier 公式计算研究区内及周边站点 R 因子,相关公式在王猛等[18]的研究体现。在各站点 R 因子的基础上,利用 ArcGIS 10.2 软件,根据程柏涵[19]在西南山区降雨插值方法的研究,选取研究区内及周边的 63 个雨量站点,选择海拔、纬度、坡向 3 个要素进行协同克里金插值,得到研究区 2000—2020 年的降雨侵蚀力因子栅格数据。

表 1 本研究所用数据及来源

Table 1 Dataset and resources used in the study

数据类型	分辨率/比例尺	数据来源	用途
降雨	—	中国气象数据网(http://cdc.cma.gov.cn)	计算 R 因子
土壤	1 : 1 000 000	世界土壤数据(Harmonized World Soil Database, HWSO, http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soildatabase/HTML/)	计算 K 因子
地形数据	90 m	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)	计算 LS 因子
植被覆盖	30 m	国家科技基础条件平台—国家生态科学数据中心(http://www.nesdc.org.cn)	计算 C 因子
土地利用	30 m	武汉大学杨杰等[17]制作的 CLCD 土地利用数据集	计算 P 因子

2.2.2 土壤可蚀性因子 对于 K 因子,本研究借鉴蒋刚等[8]的研究采用的 EPIC 公式,利用土壤数据的砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量对研究区土壤可蚀性因子进行计算。

2.2.3 坡度坡长因子 对于 LS 因子,通过 ArcGIS 10.2 软件对坡度、坡长进行计算,根据 Wischemeier 等[20]和 Renard 等[4]的研究,采用下列公式计算坡度坡长因子:

L=⎧⎪⎨⎩⎡⎣λ22.13⎤⎦mλ30522.13m⎫⎪⎬⎭⎧⎪⎨⎩⎡⎣λ22.13⎤⎦mλ30522.13m⎫⎪⎬⎭ 累计流量≤325 累计流量>325 (2)

S=⎧⎪⎨⎩10.8sinθ+0.0316.8sinθ−0.5021.9sinθ−0.96⎫⎪⎬⎭⎧⎪⎨⎩θ<5°5°≤θ<10°θ≥10°⎫⎪⎬⎭ (3)

式中:L 为坡长因子(无量纲);λ 为坡长(m);m 为可变坡度指数(无量纲);S 为坡度因子(无量纲);θ 为

坡度值(°)。

2.2.4 植被覆盖与管理因子 本研究采用蔡崇法等[21]应用的方法,利用 ArcGIS 10.2 软件中栅格计算器工具对 NDVI 数据进行 C 因子的计算。

2.2.5 水土保持措施因子 利用 ArcGIS 10.2 软件对土地利用数据进行重分类、属性编辑等处理,对 P 因子进行计算。借鉴孙治娟[22]的研究,对草地、未利用地赋值为 1,对耕地赋值 0.35,对林地赋值 0.8,对水域和建设用地赋值为 0,见表 2。

表 2 研究区水土保持措施因子值

Table 2 Factor value of water and soil conservation

measures in the study area

土地利用类型	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
P 因子赋值	0.35	0.8	1	0	0	1

2.3 Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验

Sen 趋势分析是一种非参数斜率估计方法,不要求

线性的趋势,对异常值具有包容性。计算公式如下:

$$\text{Slope} = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad 1 < i < j \quad (4)$$

式中: Slope 为某对象的变化趋势值; i, j 分别为时间; x_i 及 x_j 分别为对应时间的对象值; median 为取中值函数。当 $\text{Slope} > 0$ 时,该时段内呈上升趋势,反之则呈下降趋势。

采用 Mann-Kendall 检验法对 Sen 趋势分析进行显著性检验。该方法在靖娟利等^[23]的研究中得到了充分概述。本研究对 Z 采用双边检验,在给定显著性水平 α 下,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,表示对象在 α 水平上具有显著变化。本文选取 $\alpha = 0.05$,对研究对象的 Sen 趋势分析进行显著性检验。

2.4 随机森林

随机森林(Random Forest)是一种基于机器学习

的包含多个决策树的算法。目前已应用于土地覆盖变化、湿地演变、蝗灾爆发等方面的驱动力研究,但用于土壤侵蚀驱动力研究的较少^[16]。关于随机森林的原理及应用方法在 Rigatti^[24]的研究中得到详细的叙述。本研究使用的随机森林回归不涉及预测,只进行变量的重要性评估,所以无需区分训练集和测试集,这在 Zhang 等^[25]的研究中得到表述。

3 结果和分析

3.1 水力侵蚀的空间分布

运用 RUSLE 模型对研究区 2000—2020 年的各因子进行运算,得到研究区 21 期水力侵蚀模数栅格图,并以《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)为基础,将研究区的水力侵蚀划分为以下 6 个标准等级,见表 3。

表 3 土壤侵蚀强度分级

Table 3 Grading of soil erosion intensity

土壤侵蚀强度	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀
土壤侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	< 500	$500 \sim 2500$	$2500 \sim 5000$	$5000 \sim 8000$	$8000 \sim 15000$	> 15000

从研究区各水土保持分区水力侵蚀等级面积占比(图 2)可知,整体上水力侵蚀在各水土保持分区以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,微度侵蚀占比最大,占研究区面积的 45.00% 以上,其次为轻度侵蚀,微度、轻度侵蚀面积之和占研究区的面积的 78.05% 以上。中度及以上侵

蚀的区域面积在 NY-SWS 和 NWY 区域较少,分别占研究区面积的 14.27% 和 15.87%,而在 ET-WS 和 SET 区域的面积较多,分别占研究区面积的 21.85% 和 21.95%,说明在 ET-WS 和 SET 区域的水力侵蚀更加严重。土壤侵蚀强度空间分布见图 3A。

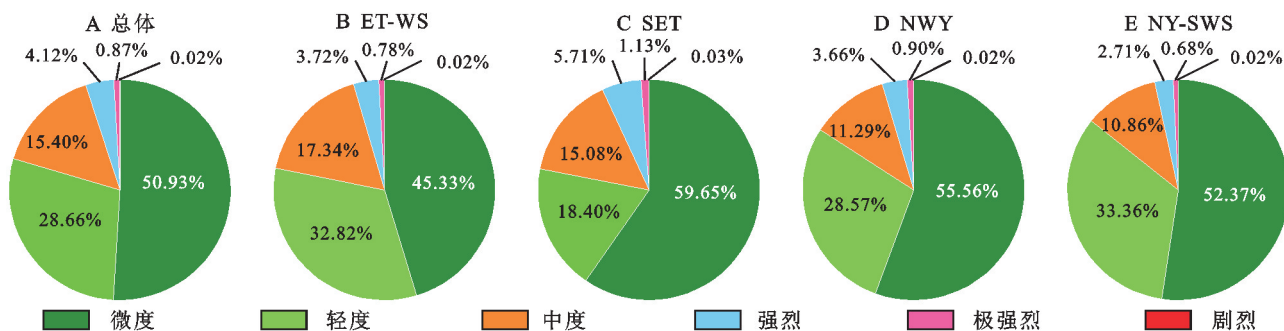


图 2 研究区各侵蚀强度占比

Fig. 2 Proportion of erosion intensity

从土壤侵蚀空间聚类来看(图 3B),西南高山峡谷区水力侵蚀严重区域主要集中于 ET-WS 的南部和东部区域,SET 的西北部、东部区域。

3.2 水力侵蚀量及各因子整体时间变化

统计 2000—2020 年的水力侵蚀及各因子栅格数据平均值,得到研究区水力侵蚀量及各因子整体的时间变化特征(图 4)。图 4A 所示,研究区 2000—2020 年的水力侵蚀量呈波动变化趋势,2019 年、2020 年的侵蚀量急剧增加。侵蚀量变化范围为 $4.6063 \times 10^8 \sim 1.4874 \times 10^9 \text{ t}$,多年均值 $7.9664 \times 10^8 \text{ t}$,最小值出现

在 2006 年为 $4.6063 \times 10^8 \text{ t}$,最大值出现在 2020 年为 $1.4874 \times 10^9 \text{ t}$ 。图 4B 所示,研究区 2000—2020 年的平均降雨侵蚀力呈波动上升趋势,平均增长速率为 $1.823/\text{a}$ 。降雨侵蚀力变化范围为 $125.11 \sim 249.93 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,多年均值 $186.71 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,最小值出现在 2006 年为 $125.11 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,最大值出现在 2014 年为 $249.93 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。图 4C 所示,研究区 2000—2020 年的平均植被覆盖与管理因子呈波动变化趋势,2019 年和 2020 年的植被覆盖与管理因

子急剧增加。植被覆盖与管理因子变化范围为 0.37~0.70,多年均值为 0.48,最小值出现在 2017 年为 0.37,最大值出现在 2019 年为 0.70。2000—2020 年的水土保持措施因子平均值无明显变化,故未在图中列出。

在 2000—2020 年,水力侵蚀量和降雨侵蚀力的变化趋势一致。C 因子在 2003—2005 年、2007—2008 年、

2015—2017 年及 2019—2020 年和水力侵蚀量的变化趋势相反,K 因子和 LS 因子在短时间尺度上可认为不变,P 因子在 21 年间无明显变化,因此在上述时间段 R 因子的变化是水力侵蚀量变化的主要原因。而在 2018—2019 年,水力侵蚀量急剧增多,R 因子增幅不大,这主要是 C 因子在这个时间急剧增大导致。

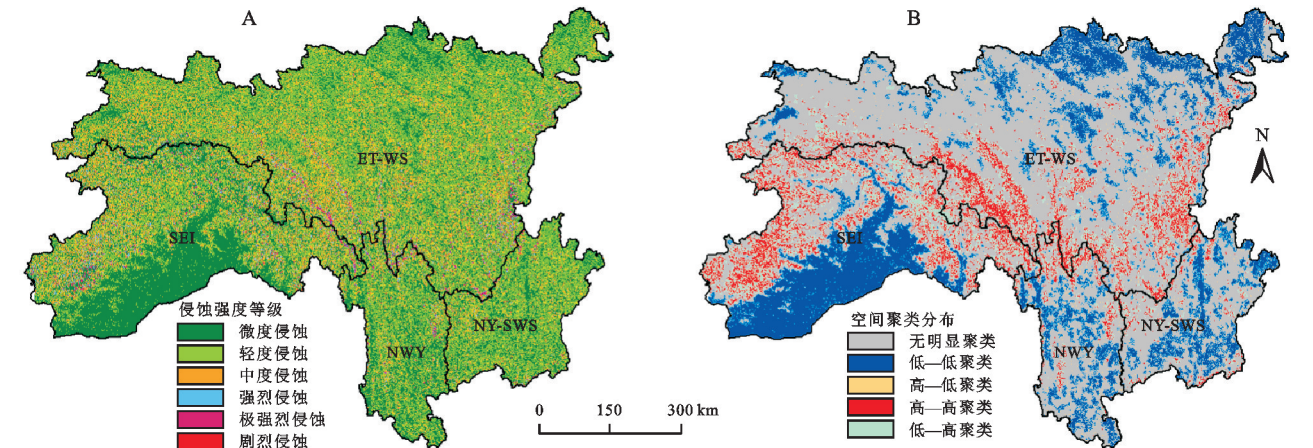


图 3 西南高山峡谷区土壤侵蚀强度以及聚类

Fig. 3 Soil erosion grading and cluster analysis

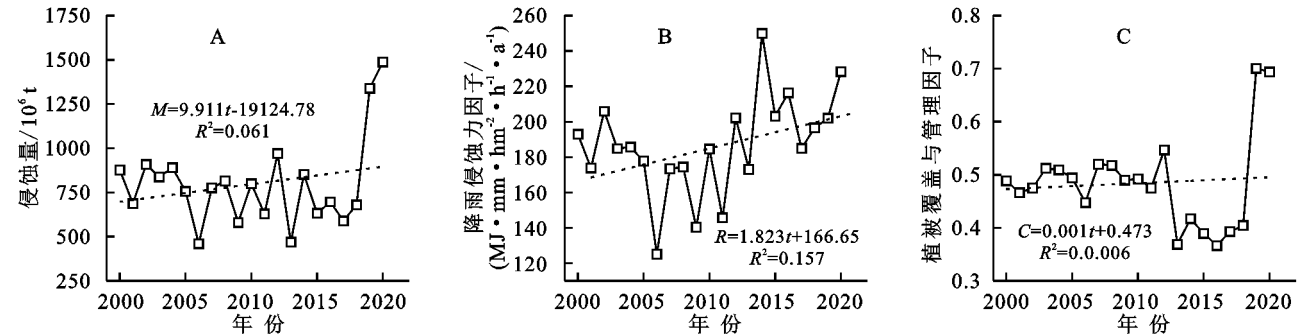


图 4 2000—2020 年西南高山峡谷区水力侵蚀量及各因子变化

Fig. 4 Variation of Water Erosion and Various Factors from 2000 to 2020

3.3 水力侵蚀模数及各因子空间变化

由图 5A、图 5B 看出,西南高山峡谷区的水力侵蚀模数变化趋势存在明显空间差异,研究区中部以及东北部呈上升趋势,西部以及东南部呈下降趋势,较大区域趋于无明显变化。研究区水力侵蚀模数呈上升趋势的面积达到 24.59%,其中显著上升的区域面积为 3.86%,主要分布在 ET-WS、SET 西北部以及 NWY 北部区域;水力侵蚀模数呈下降趋势的面积达到 6.69%,其中显著下降的区域面积达到 0.92%,主要分布在 SET 东部和东南部,ET-WS 的东部区域以及 NY-SWS。

由图 5C、图 5D 看出,西南高山峡谷区的降雨侵蚀力变化趋势存在明显的空间差异,研究区除西部边缘以及 ET-WS 南部区域外皆呈上升趋势,极少区域趋于无明显变化。降雨侵蚀力因子呈上升趋势的面积达到 84.12%,其中显著上升的区域面积为 25.02%,主要分布

在 ET-WS 东北部、NY-SWS 的东北部以及 SET 的南部区域;降雨侵蚀力呈下降趋势的面积达到 15.33%,皆为不显著下降,主要分布在 ET-WS 的西南部、SET 的西部区域以及两区的交界地带。

由图 5E、图 5F 看出,西南高山峡谷区的植被覆盖与管理因子变化趋势存在明显的空间差异,ET-WS 较大区域以及 NWY 北部区域呈上升趋势,研究区东部以及西南部呈下降趋势,部分区域趋于无明显变化。植被覆盖与管理因子呈上升趋势的面积达到 26.74%,其中显著上升的区域面积为 3.28%,主要分布在 ET-WS 和 NWY 的东北部区域;植被覆盖与管理因子呈下降趋势的面积达到 24.54%,皆为不显著下降,主要分布在 ET-WS 西部区域、SET 西部区域以及 NY-SWS 区域。西南高山峡谷区的水土保持因子变化趋势不存在明显的空间差异,21 年间研究区土地利用的变化不明显。

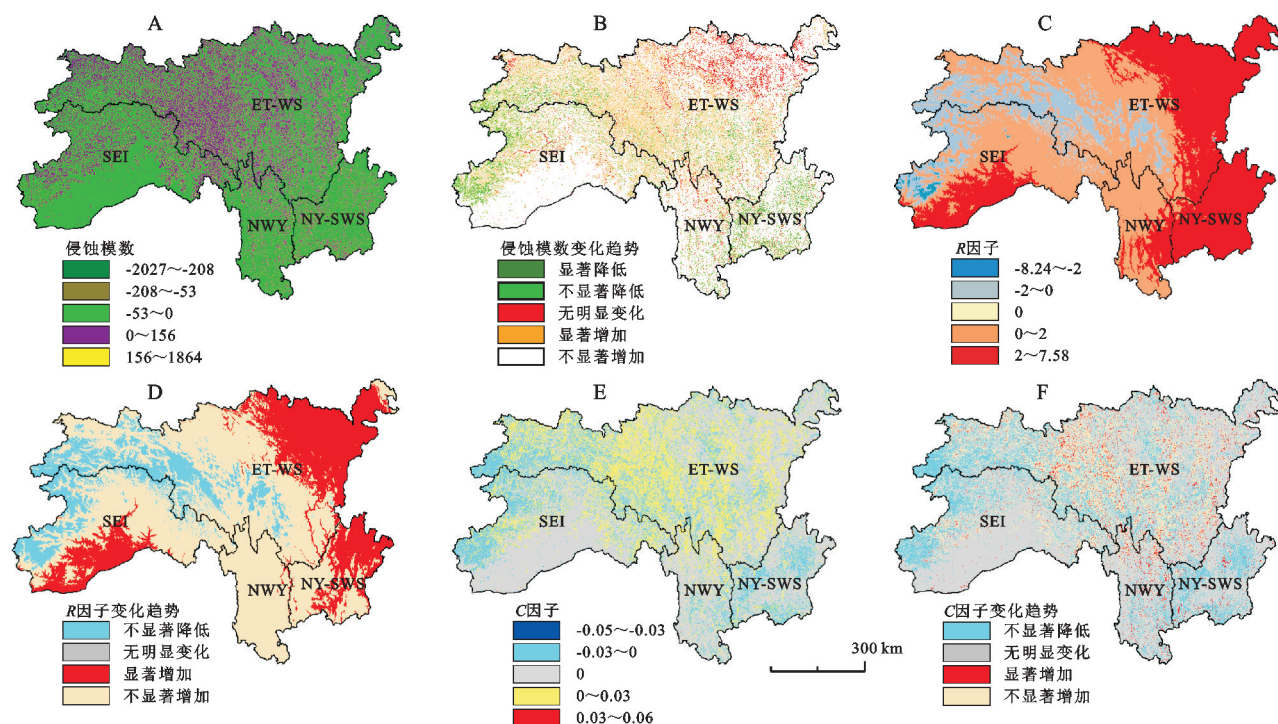


图 5 西南高山峡谷区侵蚀模数及各因子空间变化趋势

Fig. 5 Spatial variation trend of erosion modulus and each factors in Southwest alpine canyon area

3.4 水力侵蚀空间分异驱动力分析

利用随机森林算法对研究区水力侵蚀模数与降雨侵蚀力因子、植被覆盖与管理因子、水土保持措施因子、坡度坡向因子以及土壤可蚀性因子进行回归,得到各因子对水力侵蚀模数的相对重要性(表 4),并通过计算各因子相对重要性百分比,得到各因子对水力侵蚀空间分异的解释程度(图 6)。

表 4 随机森林计算各因子相对重要性结果

Table 4 Results of relative importance of factors calculated by random forest

区域	$R^2/\%$	相对重要性				
		R 因子	C 因子	P 因子	K 因子	LS 因子
总体	86.12	339.34	494.32	158.47	253.83	850.66
SET	89.23	181.14	358.48	153.95	124.87	486.42
ET_WS	85.42	260.78	413.17	58.32	192.81	681.64
NWY	82.75	142.82	481.71	71.19	165.26	456.93
NY_SWS	79.59	80.62	425.51	84.85	182.06	453.10

由图 6 可知,总体上 LS 因子对研究区水力侵蚀空间分异的解释程度最高,达到 41%,其次是 C 因子,达到 24%,其余是 $R > K > P$,其解释程度分别达到 16%,12%,8%。各因子对水力侵蚀空间分异的解释程度随着水土保持分区不同而出现差异,ET-WS 区域的因子解释程度为 $LS > C > R > K > P$,SET 区域的因子解释程度为 $LS > C > R > P > K$,NWY 区域的因子解释程度为 $C > LS > K > R > P$,NY-SWS 的因子解释程度为 $LS > C > K > P > R$ 。可以发现,LS 和 C 因子在 4 个水土保持分区水力侵蚀空间分异中起着主导

作用,R 因子在 ET-WS 和 SET 的解释程度都仅次于 LS 和 C 因子,在 NWY 区域和 NY-SWS 区域则是 K 因子仅次于 LS 因子和 C 因子。

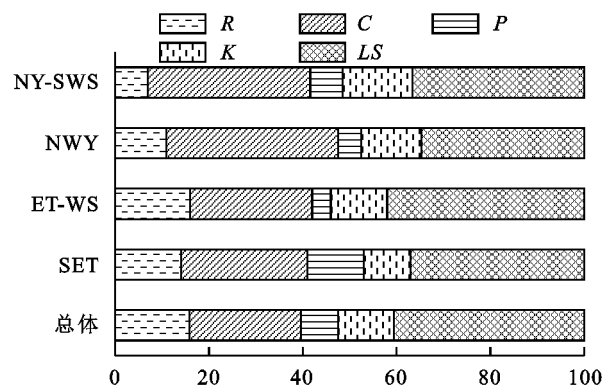


图 6 各水土保持分区因子解释程度

Fig. 6 Contribution of various factor in soil and water conservation zone

整体上西南高山峡谷区水力侵蚀的空间分异是 LS 因子起着主导性驱动作用。西南高山峡谷区的地形复杂,海拔高度差大,因此 LS 因子是整个研究区水力侵蚀空间分异的主导因子。

C 因子在整个研究区的解释程度仅次于 LS 因子,说明植被覆盖对西南高山峡谷区水力侵蚀的空间分异有着重要的影响。在本研究中,2019 年 C 因子均值较 2018 年急剧增加,相应的水力侵蚀模数也急剧增加,也体现了 C 因子对于研究区水力侵蚀空间分异的重要性。

R 因子在各水土保持分区中的解释程度排名处

于变化的状态,从整个研究区来看仍然对水力侵蚀的空间分异起着较为重要的作用。在 ET-WS 区域,水力侵蚀模数主要呈不显著增加和显著增加趋势,此区域 R 因子主要呈不显著增加和显著增加趋势, C 因子不显著增加和显著增加的区域相对于 R 因子较少,说明此区域导致水力侵蚀呈增加趋势的主要原因包括了 R 因子,从因子解释程度排序($R=16\%$, $C=26\%$)来看符合研究结果。在 SET 西北部区域,水力侵蚀模数主要呈不显著下降趋势,此区域 R 因子呈显著下降趋势, C 因子也呈显著下降趋势;在 SET 东部和东南部区域,水力侵蚀模数主要呈不显著增加趋势,对应区域 R 因子呈不显著增加趋势, C 因子主要呈不显著增加趋势,说明 R 因子和 C 因子对该区域水力侵蚀模数的增加或减少都产生了较大贡献;在 SET 南部区域,水力侵蚀模数呈无明显变化趋势,对应区域的 R 因子却是显著增加趋势,而 C 因子也是无显著变化趋势,说明 R 因子的增加并未导致该区域的水力侵蚀产生明显增加,通过该区域的因子解释程度排序可知, C 因子占据着主导驱动地位。在 NY-SWS 区域的 R 因子对其水力侵蚀空间分布的解释程度(7%)并不高,该区域水力侵蚀模数主要呈无明显变化和不显著下降趋势,降雨侵蚀力因子主要呈不显著增加和显著增加趋势,说明该区域的水力侵蚀受到了更重要的因子影响,该区域 C 因子主要呈不显著下降趋势,在 NY-SWS 区域的因子解释程度排序中 C 因子达到了 35%,由于 LS 因子和 K 因子短时间尺度上不可改变,则说明 C 因子的显著降低是该区域水力侵蚀减轻的主要原因。NWY 区域同理。

研究区 P 因子在 2000—2020 年主要呈无明显变化的趋势,通过研究区整体和各水土保持分区因子解释程度排序上来看, P 因子对于研究区水力侵蚀的影响相对于其他因子来说相对较小。值得注意的是,在 SET 区域, P 因子的解释程度达到了 12%,说明在此区域实施相应的水土保持措施,对于该区域的水力侵蚀防治具有较明显效果。

4 讨论

4.1 RUSLE 的精度验证

在本研究中,西南高山峡谷区的云南省的水力侵蚀模数介于 $583.16 \sim 2\,336.47 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,与刘致远^[26]的研究结果基本一致,滇中地区土壤侵蚀模数介于 $1\,000.25 \sim 2\,064.79 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;川西南地区的土壤侵蚀强度占比与蒲泓君^[27]在该地区研究成果基本一致;云南省泸水县的土壤侵蚀强度占比与朱军等^[7]在该地区

的研究基本一致。说明本研所得到的西南高山峡谷区水力侵蚀结果基本可靠,可用于支撑本文分析。

4.2 随机森林与水力侵蚀驱动力

本研究中,随机森林的参数不变时,对整个研究区水力侵蚀空间分异的解释程度达到 86.16%,在各水土保持分区的解释能力最低达到 79.59%,拟合结果优秀,这意味着随机森林能很好地用于水力侵蚀驱动力因素的研究^[16]。

西南高山峡谷区总体上 LS 因子对研究区水力侵蚀空间分异的解释程度最高,达到 41%,其次是 C 因子,达到 24%,其余是 $R>K>P$,其解释程度占比分别达到 16%,12%,8%,这和 GE Yuankai 等^[16]以及钟旭珍等^[28]在四川沱江流域的研究结果一致。在空间尺度上, LS 因子对于西南高山峡谷区的侵蚀空间分异起着主导性的驱动作用,但在时间尺度上, LS 因子以及 K 因子可近似处于不变的状态。

ET-WS 区域,水力侵蚀模数主要呈不显著增加和显著增加趋势,其主要原因包括了 R 因子($R=16\%$, $C=26\%$),但 C 因子的增加起着主导作用。NWY 区域和 NY-SWS 的水力侵蚀在时间尺度上的降低趋势主要是 C 因子起到主导驱动性作用,这两个区域的生态建设工作成绩突出,使得该区域植被覆盖情况显著改善,这得益于多年来,国家实施退耕还林还草、天然林资源保护、长江流域防护林体系建设和西南岩溶石漠化综合治理等一系列林业生态工程,有效推进了西南高山峡谷区生态环境建设,区域植被得到了有效修复^[29]。此外,时间尺度上西南高山峡谷区水力侵蚀呈现波动的变化趋势,2000—2018 年的水力侵蚀总体上呈现波动但稳定的状态,2019 年出现急剧上升的现象,这主要是 2019 年的 C 因子急剧上升引起,可能与 2019 年遭遇旱灾^[30]导致植被覆盖度整体减少有关。

4.3 研究区土壤侵蚀及防治措施

土壤侵蚀是威胁区域生态环境的主要危害,严重影响着当地生产力。水力侵蚀受到地形、降雨、植被覆盖、人为因素等因素影响,因此有必要从多个角度分析影响侵蚀强度的因素。结合西南高山峡谷区水力侵蚀强度和驱动力分析结果,可对不同水土保持分区的防治措施提出建议。ET-WS 区域、SET 区域和 NWY 区域,解释程度 $C>R>P$,由于 R 因子的变化很难受到人为改变,需要采取措施改善此区域的植被覆盖情况,提高土壤抵抗侵蚀的能力;NY-SWS 区域,解释程度 $C>P>R$,需要在改善当地植被覆盖

度的基础上,在生态脆弱的区域考虑布置适当的水土保持措施。此外,本研究对西南高山峡谷区的水力侵蚀及其驱动力进行了详细分析,未来可以在此基础上开展水力侵蚀及其驱动力变化的长期监测,探索研究区不同水土保持分区更合理的治理方案。

5 结论

(1) 西南高山峡谷区水力侵蚀微度和轻度侵蚀占比 78.05% 以上。水力侵蚀严重的区域主要分布于藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区的南部,藏东南高寒高山峡谷生态维护区的西北部、东部。

(2) 整体上,2000—2020 年,水力侵蚀量变化范围为 $4.606\ 3 \times 10^8 \sim 1.487\ 4 \times 10^9\ \text{t}$,多年均值为 $7.966\ 4 \times 10^8\ \text{t}$ 。降雨侵蚀力因子变化范围为 $125.11 \sim 249.93\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,多年均值为 $186.71\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。植被覆盖与管理因子变化范围为 $0.37 \sim 0.70$,多年均值为 0.48 。

(3) 整体上坡度坡长因子对研究区水力侵蚀空间分异的解释程度最高,达到 41%,其次是植被覆盖与管理因子,达到 24%,其余是降雨侵蚀力因子 > 土壤可蚀性因子 > 水土保持措施因子,分别达到 16%, 12%, 8%,且各因子对水力侵蚀空间分异的解释程度随着水土保持分区的不同而出现差异。

(4) 藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区、藏东南高寒高山峡谷生态维护区和滇西北高山峡谷生态维护区,建议采取措施改善此区域的植被覆盖,提高土壤抵抗侵蚀的能力;滇北—川西南高山峡谷蓄水保土区建议在改善当地植被覆盖度的基础上,在生态脆弱的区域考虑布置适当的水土保持措施。

参考文献 (References):

- [1] Fayas C M, Abeysingha N S, Nirmanee K G S, et al. Soil loss estimation using rusle model to prioritize erosion control in KELANI river basin in Sri Lanka [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7(2): 130-137.
- [2] 何永彬,张信宝,文安邦.西南喀斯特山地的土壤侵蚀研究探讨[J].生态环境学报,2009,18(6):2393-2398.
He Y B, Zhang X B, Wen A B. Discussion on karst soil erosion mechanism in karst mountain area in southwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(6): 2393-2398.
- [3] Zingg A. Degree and length of land slope as it affects soil loss in run-off[J]. Agric. Engng, 1940, 21(2): 59-64.
- [4] Renard K G. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE)[M]. Washington, Us Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [5] Tian P, Zhu Z L, Yue Q, et al. Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and its validation: Case study on mountainous and hilly areas of Hubei Province, China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(3): 433-444.
- [6] Ganasri B P, Ramesh H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Nethravathi Basin[J]. Geoscience Frontiers, 2016, 7(6): 953-961.
- [7] 朱军,李益敏,蒋德明.基于 GIS 和 RUSLE 的高山峡谷区土壤侵蚀研究:以云南省泸水县为例[J].水土保持通报,2016,36(3):277-283,370.
Zhu J, Li Y M, Jiang D M. A study on soil erosion in alpine and gorge region based on GIS and RUSLE model: taking Lushui County of Yunnan Province as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 277-283, 370.
- [8] 蒋刚,康金莲,曹广超,等.基于 RUSLE 模型的青海澜沧江流域土壤侵蚀研究[J].高原科学研究,2022,6(4):1-13.
Jiang G, Kang J L, Cao G C, et al. Study on soil erosion of Lancang River Basin in Qinghai based on RUSLE model [J]. Plateau Science Research, 2022, 6(4): 1-13.
- [9] 陈龙,谢高地,张昌顺,等.澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征[J].资源科学,2012,34(7):1240-1247.
Chen L, Xie G D, Zhang C S, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion in Lancang River Basin[J]. Resources Science, 2012, 34(7): 1240-1247.
- [10] 陈晨晨,武谦,张占友,等.澜沧江中下游流域土壤侵蚀时空演变特征[J].水土保持研究,2022,29(2):11-17,30.
Chen C C, Wu Q, Zhang Z Y, et al. Spatiotemporal change of soil erosion in the middle and lower reaches of Lancangjiang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 11-17, 30.
- [11] 丁琳,黄婷婷,秦伟,等.西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征[J].泥沙研究,2023,48(6):51-58,66.
Ding L, Huang T T, Qin W, et al. Spatial variation of soil erosion in Southwest Alpine Canyon Area [J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(6): 51-58, 66.
- [12] 张驰,冯秀丽.基于 RUSLE 模型的浙江省土壤侵蚀风险时空演变与驱动力分析[J].上海国土资源,2023,44(2):46-52.
Zhang C, Feng X L. Spatial-temporal evolution of erosion risk and driving forces analysis in Zhejiang Province based on RUSLE [J]. Shanghai Land & Resources, 2023, 44(2): 46-52.
- [13] Zhao Y H, Liu L, Kang S Z, et al. Quantitative analysis of factors influencing spatial distribution of soil erosion based on geo-detector model under diverse geomorpho-

- logical types[J]. *Land*, 2021,10(6):604.
- [14] 曹巍,刘璐璐,吴丹.三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析[J].*草业学报*,2018,27(6):10-22.
- Cao W, Liu L L, Wu D. Soil erosion changes and driving factors in the Three-River Headwaters region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018,27(6):10-22.
- [15] Chuenchum P, Xu M Z, Tang W Z. Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang-Mekong River by using the modified RUSLE model[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020,8(3):213-227.
- [16] Ge Y, Zhao L, Chen J, et al. Study on soil erosion driving forces by using (R) USLE framework and machine learning: A case study in southwest China[J]. *Land*, 2023,12(3):639.
- [17] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [18] 王猛,王鹤松,姜超,等.基于 RUSLE 和地理探测器模型的西南地区土壤侵蚀格局及定量归因[J].*应用基础与工程科学学报*,2021,29(6):1386-1402.
- Wang M, Wang H S, Jiang C, et al. Spatial soil erosion patterns and quantitative attribution analysis in southwestern China based on RUSLE and geo-detector model[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021,29(6):1386-1402.
- [19] 程柏涵.山区降水空间分布的影响因素及插值方法研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- Cheng B H. The study on multivariate spatial interpolation method of precipitation in mountainous area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [20] Wischmeier W H, Smith D D, States U, et al. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Washington, Us Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [21] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].*水土保持学报*,2000,14(2):19-24.
- Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000,14(2):19-24.
- [22] 孙治娟. CMIP6 模式下的云南省土壤侵蚀时空演变预测[D].重庆:西南大学,2022.
- Sun Z J. Spatial-temporal evolution prediction of soil erosion in Yunnan province under CMIP6 model[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [23] 靖娟利,邓棋方,和彩霞,等.1999—2019 年西南喀斯特地区 NDVI 时空变化及其气候驱动[J].*水土保持研究*, 2023,30(3):232-239.
- Jing J L, Deng Q F, He C X, et al. Spatiotemporal evolution of NDVI and its climatic driving factors in the southwest Karst Area from 1999 to 2019 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(3):232-239.
- [24] Rigatti S J. Random Forest[J]. *Journal of Insurance Medicine*, 2017,47(1):31-39.
- [25] Zhang J Y, Zhang N, Liu Y X, et al. Root microbiota shift in rice correlates with resident time in the field and developmental stage [J]. *Science China Life Sciences*, 2018,61(6):613-621.
- [26] 刘致远.基于遥感和 GIS 技术的滇中地区土壤侵蚀研究[D].昆明:云南师范大学,2019.
- Liu Z Y. Soil erosion research based on remote sensing and GIS technology in central Yunnan province [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019.
- [27] 蒲泓君.川西南干热河谷土壤侵蚀风险评价:以 2000—2015 年为例[J].*农业与技术*,2022,42(11):112-114.
- Pu H J. Risk assessment of soil erosion in dry-hot valley of southwest Sichuan: A case study from 2000 to 2015[J]. *Agriculture and Technology*, 2022,42(11):112-114.
- [28] 钟旭珍,张素,吴瑞娟,等.沱江流域土壤侵蚀动态变化及驱动力分析[J].*水土保持研究*,2022,29(2):43-49,56.
- Zhong X Z, Zhang S, Wu R J, et al. Analysis of dynamic changes and driving forces of soil erosion in Tuojiang River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(2):43-49,56.
- [29] 徐勇,戴强玉,黄雯婷,等.2000—2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究[J].*环境科学*,2023,44(1):323-335.
- Xu Y, Dai Q Y, Huang W T, et al. Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in southwest China from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2023,44(1):323-335.
- [30] 刘芳芳.西南地区近 20a 干旱灾害时空特征研究[D].西安:长安大学,2022.
- Liu F F. Spatio-temporal characteristics of drought disasters in Southwest China in recent 20 years[D]. Xi'an: Changan University, 2022.