

# 西南高山峡谷区土壤侵蚀时空变化及驱动因素

孙文洋<sup>1</sup>, 罗璟<sup>1,2</sup>, 裴向军<sup>1,2</sup>, 严睿<sup>1</sup>, 李周骏<sup>1</sup>, 李郭兵<sup>1</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059; 2. 天府永兴实验室, 成都 610213)

**摘要:** [目的] 揭示四川省康定高山峡谷区 2000—2020 年土壤侵蚀时空分异规律及驱动因素, 为高山峡谷区水土保持策略提供科学依据。[方法] 集成 InVEST 模型与地理探测器, 构建“过程模拟—空间表达—驱动解析”分析框架; 基于 InVEST 模型泥沙输移比模块(SDR)与 ArcGIS 10.7 软件空间分析功能, 模拟区域土壤侵蚀时空演化特征并可视化其空间格局; 利用地理探测器定量解析自然要素与人类活动对土壤侵蚀的独立影响及协同效应。[结果] (1) 研究区土壤侵蚀强度在空间上显著分异, 东部森林区以轻度侵蚀为主, 中西部草地区以轻度、中度侵蚀为主, 植被覆盖较少的高海拔、陡坡区域以强烈、极强烈和剧烈侵蚀为主。(2) InVEST 模型结果显示 2000—2020 年平均土壤侵蚀模数呈现先降后升趋势, 2000—2015 年由 3 966.1 t/(km<sup>2</sup>·a) 减少到 3 404.7 t/(km<sup>2</sup>·a), 2020 年增加至 4 299.6 t/(km<sup>2</sup>·a)。(3) 研究区在坡度 15°~30° 范围内土壤侵蚀面积最大, 占 42.29%, 海拔 4 000~5 000 m 范围内土壤侵蚀面积最大, 占 50.94%, 整体上随坡度和海拔的增加, 强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的占比提升。(4) 降雨侵蚀力和土壤质地类型对侵蚀格局有一定的影响, 主要影响强烈侵蚀和极强烈侵蚀的分布, 但不是主导因素。(5) 地理探测器结果表明: 土地利用类型对侵蚀格局具有主导作用(解释力 64%), 其中侵蚀强度最大的土地利用类型为裸地, 以强烈、极强烈和剧烈侵蚀为主; 土地利用类型与其他因子交互作用时, 对研究区土壤侵蚀解释力均有增强, 土地利用类型与坡度交互作用效应最显著(解释力 78%), 表明人类活动与自然要素的耦合作用会加剧侵蚀过程。[结论] 2000—2020 年研究区年平均土壤侵蚀模数呈先降后升趋势, 高海拔和陡坡是高山峡谷区水土流失的主要自然驱动因素, 而土地利用类型对侵蚀格局具有主导作用, 陡坡与土地利用交互作用时解释力最强, 达到 78%, 研究成果可为研究区和类似区域的土壤侵蚀治理工作提供参考。

**关键词:** InVEST 模型; 地理探测器; 土壤侵蚀; 驱动因素; 西南高山峡谷

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0048-11

## Spatiotemporal changes and driving factors of soil erosion in southwest alpine-canyon region

Sun Wenyang<sup>1</sup>, Luo Jing<sup>1,2</sup>, Pei Xiangjun<sup>1,2</sup>, Yan Rui<sup>1</sup>, Li Zhoujun<sup>1</sup>, Li Guobing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to reveal the spatiotemporal differentiation patterns and driving factors of soil erosion in the alpine-canyon region of Kangding, Sichuan Province, from 2000 to 2020, thereby providing a scientific basis for soil and water conservation strategies in alpine-canyon regions. [Methods] The study integrated the InVEST model and geodetector to construct an analysis framework of “process simulation-spatial representation-driving factor analysis”. Based on the sediment delivery ratio (SDR) module of the InVEST model and the spatial analysis function of ArcGIS 10.7 software, the spatiotemporal evolution characteristics of regional soil erosion were simulated and its spatial patterns were visualized. Geodetector was applied to quantitatively

收稿日期: 2025-06-10

修回日期: 2025-07-14

接受日期: 2025-07-26

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3007101); 四川省自然科学基金项目(2025ZNSFSC0318)

第一作者: 孙文洋(2001—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2023020380@stu.cdut.edu.cn

通信作者: 罗璟(1990—), 男, 四川泸州人, 博士, 研究员, 硕士研究生导师, 主要从事地质灾害风险与韧性防控方面的教学与研究。E-mail: luoj@cdut.edu.cn

<https://stbcjy.publish.founderss.cn>

analyze the independent influence and synergistic effects of natural factors and human activities on soil erosion. [Results] (1) The soil erosion intensity in the study area showed significant spatial differentiation. The eastern forested areas were dominated by very slight erosion, the central and western grassland areas were mainly subjected to slight to moderate erosion, and the high-elevation and steep-slope areas with less vegetation cover were dominated by strong, very strong, and severe erosion. (2) The results of the InVEST model showed that the average soil erosion modulus from 2000 to 2020 exhibited a trend of first decreasing and then increasing. It decreased from 3 966.1 t/(km<sup>2</sup> · a) in 2000 to 3 404.7 t/(km<sup>2</sup> · a) in 2015, and increased to 4 299.6 t/(km<sup>2</sup> · a) in 2020. (3) In the study area, the soil erosion area was the largest in the slope range of 15°~30°, accounting for 42.29%, and within the elevation range of 4 000~5 000 m, accounting for 50.94%. Overall, with the increase of slope and elevation, the proportion of strong, very strong, and severe erosion increased. (4) Rainfall erosivity and soil texture type had a certain impact on the erosion pattern, mainly affecting the distribution of strong and very strong erosion, but they were not the dominant factors. (5) The results of geodetector showed that land use type played a leading role in the erosion pattern (explanatory power 64%), among which the land use type with the highest erosion intensity was bare land, dominated by strong, very strong, and severe erosion. When land use type interacted with other factors, the explanatory power for soil erosion in the study area increased, and the interaction effects between land use type and slope were the most significant (explanatory power 78%), indicating that the coupling of human activities and natural factors would exacerbate the erosion process. [Conclusion] From 2000 to 2020, the annual average soil erosion modulus in the study area showed a trend of first decreasing and then increasing. High elevation and steep slopes are the main natural driving factors of soil erosion in the alpine-canyon region, while land use type plays a leading role in the erosion pattern. The interaction between steep slopes and land use exhibits the strongest explanatory power, reaching 78%. The findings can provide a reference for soil erosion control in the study area and similar regions.

**Keywords:** InVEST model; geodetector; soil erosion; driving factors; southwest alpine-canyon region

土壤侵蚀作为全球性生态环境问题,是指地表土体及其母质在水力、风力、重力及冻融等多营力耦合作用下发生的破坏性物质再分配过程,包含表土剥离、颗粒运移和异位沉积3个阶段<sup>[1-2]</sup>。土壤侵蚀是受到各种外界因素导致的十分复杂的现象,不仅受到降雨、植被、动物、地质活动等自然因素的影响,还受到人类活动的影响,是在前者的共同作用下最终导致的结果,中国西南地区作为长江、珠江等主要流域的生态屏障区及重要水源涵养地,其生态资源禀赋显著<sup>[3]</sup>。受特殊地质构造格局、降水时空异质性显著,以及土壤抗蚀性弱等多重因素叠加影响<sup>[4]</sup>,该区域水土流失呈现空间广域性、侵蚀类型复合性、过程叠加性等特征<sup>[5]</sup>。随着“一带一路”等重大战略的实施,西南地区在中国对外发展中发挥着重要的桥梁纽带作用,研究相关区域内的土壤侵蚀并采取针对性的土壤流失保护措施,在国际范围内进行环境管理和土壤保护项目的实施中发挥着至关重要的作用<sup>[6]</sup>。

目前,土壤侵蚀相关研究主要在土壤侵蚀驱动力、土壤侵蚀时空变化、土壤侵蚀过程及机理等领域展开,土壤侵蚀模拟研究中广泛应用了可量化的土壤侵蚀预测模型,主要分为三大类:数学经验模型、物

理过程模型和分布式模型<sup>[7]</sup>。国内外普遍采用RUSLE/USLE模型估算区域的土壤侵蚀量,USLE最早由Wischmeier等于1965年提出<sup>[8]</sup>,随后美国农业部于1997年提出了修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)<sup>[9]</sup>。国内学者在RUSLE的基础上,提出了改进后的中国通用土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)<sup>[10]</sup>。但是上述模型均为数学经验模型,并未考虑土壤侵蚀物理过程的影响,有学者陆续提出了基于物理过程的土壤侵蚀模型,例如EUROSEM<sup>[11]</sup>。随着土壤侵蚀相关研究的进行,生态系统服务与权衡综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)逐渐完善,在该模型中集成了泥沙输移比模块(Sediment Delivery Ratio, SDR),相较于USLE/RUSLE模型,InVEST模型在其基础上进行了改进,不仅可以融入部分土壤侵蚀物理过程特性,使计算结果更加准确,还可以配合其他相关软件进行分析与结果输出,使评价结果更加直观<sup>[12]</sup>。InVEST模型因其优势在近年来被多位学者用于土壤侵蚀研究,在国内被运用于额尔齐斯河流域<sup>[13]</sup>、临沂市<sup>[14]</sup>、大清河流域<sup>[15]</sup>等区域的土壤侵蚀研究,可见

InVEST 模型适用于区域土壤侵蚀研究。地理探测器是一种能够揭示地理空间要素与其驱动因子之间关联关系的分析工具,该方法相较于传统统计方法具有显著优势,不仅能够突破变量处理的技术限制,还可通过交互作用检测解析多个影响因子对因变量的协同作用机制<sup>[16]</sup>,弥补了传统研究方法的不足,使其在土壤侵蚀驱动机制研究中愈加成熟。

研究区地处横断山脉核心区域,是青藏高原向四川盆地的过渡带,地理和气候特征以复杂多样和垂直分异为核心。研究区内地形起伏大,属于中高海拔地区、大渡河流域,区内有着丰富的自然生态系统类型<sup>[17]</sup>。大渡河流域是长江上游的重要支流,是长江水源涵养和生物多样性保护的关键区,而土壤侵蚀是对生态的全面破坏,其影响具有跨区域的传导性<sup>[18]</sup>。目前,在类似区域的土壤侵蚀研究都较为单一地评估某个生态系统类型的土壤侵蚀状况<sup>[19]</sup>,或者是从评估经济价值和其他功能的角度评估区域的土壤侵蚀情况<sup>[20]</sup>。针对当前区域土壤侵蚀研究中多要素耦合机理不明的缺陷,本研究系统集成 InVEST 模型沉积物输移比模块(SDR)与地理探测器(Geodetector, GD),从时间和空间分析研究区土壤侵蚀的时空变化,揭示不同土地利用类型、降雨、高程、坡度、土壤质地下土壤侵蚀的分布规律,并结合地理探测器模型对流域内土壤侵蚀驱动因素开展研究。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省甘孜藏族自治州东部康定市,是西南高山峡谷区的典型区域,坐标位置为 29°51′—30°1′N,101°30′—102°10′E,总面积为 1 914 km<sup>2</sup>。研究区地处四川盆地与青藏高原的过渡地带,地势急剧隆升抬起,属于构造侵蚀高山区,地貌分为东侧的中起伏高山地貌和西侧小起伏高原地貌,研究区内最高点海拔 5 994 m,最低点海拔 1 382 m,高差巨大(图 1)。研究区属高原温带半湿润—湿润气候,干湿季分明,夏季雨量丰沛,地表植被主要为灌木和森林,东部有雅拉河自西北向东南穿过,随后汇入大渡河。

### 1.2 数据来源

本研究使用的数据类型包括:土地利用数据、年降雨数据、高程数据、土壤质地数据、NDVI 数据等。土地利用数据采用 Yang 等公开发表的中国土地覆盖数据集<sup>[21]</sup>(<https://zenodo.org>),共分为耕地、森林、灌木、草地、水体、冰雪、裸地和建设用地 8 个一级类;年降雨数据来源于国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);DEM 数据

来源于地理空间数据云([www.gscloud.cn](http://www.gscloud.cn));土壤数据来源于世界土壤数据库(<https://gaez.fao.org>);NDVI 数据来自国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn>)。本研究所使用的数据均使用 ArcGIS 10.7 软件处理,所有栅格均重采样至 30 m×30 m、坐标系统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_47N。

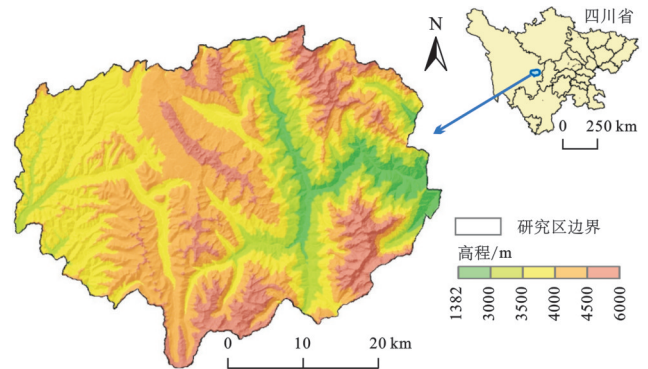


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

## 2 研究方法

### 2.1 InVEST 模型和计算方法

本研究采用 InVEST 模型 3.14.2 版本中的泥沙输移比例模块(SDR)进行土壤侵蚀计算,此模块是基于通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)改进而来的方法进行像元尺度的土壤侵蚀计算。在运行此模型前需要对模型所需数据进行处理,以达到模型运行的要求。模型所需要的参数包含数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、降雨侵蚀力( $R$ )、土壤可蚀性( $K$ )、土地利用数据、植被覆盖因子( $P$ )、水土保持因子( $C$ )和生物物理表等所需要的参数。通用土壤流失方程(USLE)基本形式为:

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

式中: $A$ 为土壤侵蚀模数[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $R$ 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)]; $K$ 为土壤可蚀性因子[t·hm<sup>2</sup>·h/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>)]; $L$ 为地形因子(无量纲); $C$ 为植被覆盖因子(无量纲); $P$ 为水土保持措施因子(无量纲)。

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )。代表了降水诱发土壤侵蚀的潜在能力,暴雨强度和持续时间越大,侵蚀潜力越大,通过降雨侵蚀力因子 $R$ 来反映,采用国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心年降水量数据计算得到研究区降雨侵蚀力因子,并在 ArcGIS 10.7 中使用克里金插值得到降雨侵蚀力图层数据,本研究参考《生产项目土壤流失量测算导则 SL773-2018》及其他相关研究<sup>[22]</sup>,选择 $R$ 因子的计算公式为:

$$R = 0.053P_n^{1.655} \quad (2)$$

式中: $R$ 为年降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ; $P_n$ 为年降雨量 $(\text{mm})$ 。

(2)土壤可蚀性因子( $K$ )。用于评估土壤对水侵蚀的敏感程度<sup>[29]</sup>,该因子反映土壤抵抗侵蚀的能力。本研究选用了 Williams 等<sup>[30]</sup>在 1983 年提出计算  $K$  值的方法—EPIC 模型,计算公式为:

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \text{SAN} \left( 1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} - \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25 \text{OC}}{\text{OC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{OC})} \right] \left[ 1 - \frac{0.7 \text{SAN1}}{\text{SAN1} + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SAN1})} \right] \quad (3)$$

$$\text{SNI1} = 1 - \text{SAN}\% \quad (4)$$

式中: $\text{SAN}$ 为沙砾含量; $\text{SIL}$ 为粉砂含量; $\text{CLA}$ 为黏粒含量; $\text{OC}$ 为有机碳含量; $\text{SAN1}$ 为粉砂与黏粒的含量。

(3)地形因子( $LS$ )在土壤侵蚀评价中有重要作用<sup>[24]</sup>。 $L$ 代表坡长因子,影响地面径流的流速; $S$ 代表坡度因子,影响物质流动的能量转化的规模和强度,两者结合统称为地形因子 $LS$ 。在 InVEST 模型中模型会根据输入的数字高程模型(DEM),使用 SDR 模块内构参数自动计算地形因子( $LS$ ),并生成地形因子( $LS$ )图层。

(4)植被覆盖管理因子( $C$ )是植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的作用,是人为控制土壤侵蚀的重要因子<sup>[25]</sup>。取值范围为 0~1, $C$ 值越大表示该区域的植被覆盖度越低,发生水土流失的概率越高,本研究采用蔡崇法<sup>[26]</sup>的  $C$  因子的估算方法,同时结合研究区实际情况对研究区  $C$  因子进行取值,反映研究区内植被覆盖以及管理方式对土壤侵蚀的影响。计算公式为:

$$\begin{cases} C = 1 & c = 0 \\ C = 0.6508 - 0.3436 \times \lg c & 0 < c \leq 78.3\% \\ C = 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

$$c = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (6)$$

式中: $c$ 表示植被覆盖度; $\text{NDVI}_{\max}$ 表示植被覆盖指数最大值; $\text{NDVI}_{\min}$ 表示植被覆盖指数最小值。

(5)水土保持因子( $P$ )是指其他条件相同时,特定水土保持措施下的土壤流失量与未实施水土保持措施地块顺坡耕作时的土壤流失量之比<sup>[27]</sup>,取值范围为 0~1。0 表示没有发生土壤侵蚀的风险,1 表示没有采取任何水土保持措施。在天然状态下林地和草地都无法对其实施水土保持措施。土地利用类型不同,取值也不同,参考前人研究<sup>[28]</sup>,确定本研究相应土地利用类型的  $P$  值, $C$ ,  $P$  因子的取值见表 1。

表 1 植被覆盖管理因子( $C$ )和水土保持因子( $P$ )取值  
Table 1 Values of vegetation cover-and-management factor ( $C$ ) and soil and water conservation factor ( $P$ )

土地利用类型	$C$ 值	$P$ 值
耕地	0.04	0.15
林地	0.02	1
灌木	0.02	1
草地	0.06	1
水域	0	0
永久冰雪覆盖	0	0
裸地	1	1
建设用地	0.2	0

## 2.2 地理探测器

地理探测器主要由因子、交互、风险和生态探测 4 个部分组成,本文选取因子和交互探测两个部分,地理探测器的基本原理为通过将研究对象分层并分析方差特征,判定影响因子(自变量)与地理现象的空间分异性关联。其核心判别准则为层内方差之和应显著小于层间方差,该空间分异程度由解释力指标  $q$  值定量表征,其中  $q$  值反映自变量对因变量空间分布的解释程度<sup>[16]</sup>。

因子探测器可以探测各个影响因子对因变量的影响能力,表达式为:

$$q = 1 - \sum_{h=1}^Y I_h \sigma_h^2 / I \sigma^2 \quad (7)$$

式中: $h$ 为影响因素的分层, $h=1,2,\dots,Y$ ; $I$ 和  $I_h$ 分别为全区和第  $h$  层的样本数; $\sigma_h^2$ 和  $\sigma^2$ 分别是第  $h$  层和全区影响因素的方差。 $q$  的值域为  $[0,1]$ , $q$  越大说明该因素的作用越明显,解释力越强,反之更弱。

交互探测器用于识别不同影响因子的交互作用,即评估因子  $X_1$  和  $X_2$  共同作用时是否会增加或者减弱对因变量  $Y$  的解释力,或者这些因子对  $Y$  的影响是否是相互独立的。首先分别计算两种因子  $X_1$  和  $X_2$  对  $Y$  的  $q$  值: $q(X_1)$ 和  $q(X_2)$ ,随后计算它们交互式的  $q$  值: $q(X_1 \cap X_2)$ ,并且对  $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与  $q(X_1 \cap X_2)$  进行比较确定影响因子交互作用的类型。因子间的关系有以下几种类型(表 2)。

参考相关研究<sup>[6]</sup>,结合研究区实际情况,选取土地利用类型( $X_1$ )作为反映人类活动的指标;降雨侵蚀力( $X_2$ )、高程分级( $X_3$ )、坡度分级( $X_4$ )和土壤质地( $X_5$ )作为反映自然条件的指标,共 5 个指标作为研究区土壤侵蚀的影响因子进行驱动因素分析。基于空间异质性原理,本研究对影响因子实施差异化离散处理:降雨侵蚀力采用 Jenks 自然断裂点分类法划分为 10 个强度等级;高程分级按海拔梯度划分为 5 个区段

(<2 000 m, 2 000~3 000 m, 3 000~4 000 m, 4 000~5 000 m, >5 000 m), 坡度分级按5个阈值区间划分 (<5°, 5°~15°, 15°~30°, 30°~45°, >45°); 土地利用类型依据一级分类系统划分为耕地、林地、灌丛、草地、水域、冰雪、裸地及建设用地8大类; 研究区范围内世界土壤数据库土壤质地数据按照FAO-90分类系统分为Fcl(石灰质冲积土)、LPq(石质薄层土)、Cmc(3

类不同质地的钙质锥形土)、LPk(黑色石灰质薄层土)、CMd(2类不同质地的不饱锥形土)、GG(冰川)、Arl(钙质锥形土)、RGc(石灰质疏松岩性土), 共11种类型。在完成空间数据标准化预处理后, 基于ArcGIS平台构建500 m×500 m规则化格网系统, 剔除异常值后, 获取7 246个样本点, 形成符合地理探测器运算规范的数据集。

表2 影响因子交互作用类型

Table 2 Types of interaction of influencing factors

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀时空变化特征

通过运行InVEST模型SDR模块, 得到了研究区2000年、2005年、2010年、2015年、2020年共五年土壤侵蚀结果, 在ArcGIS中将土壤侵蚀图层土壤侵蚀模数的单位转换为 $t/(km^2 \cdot a)$ , 根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)<sup>[29]</sup>, 对土壤侵蚀计算结果进行强度分级, 共分为微度侵蚀[ $\leq 500 t/(km^2 \cdot a)$ ]、轻度侵蚀[ $500 \sim 2\,500 t/(km^2 \cdot a)$ ]、中度侵蚀[ $2\,500 \sim 5\,000 t/(km^2 \cdot a)$ ]、强烈侵蚀[ $5\,000 \sim 8\,000 t/(km^2 \cdot a)$ ]、极强烈侵蚀[ $8\,000 \sim 15\,000 t/(km^2 \cdot a)$ ]和剧烈侵蚀[ $\geq 15\,000 t/(km^2 \cdot a)$ ]6级。将研究区2000年、2005年、2010年、2015年、2020年平均土壤侵蚀模数、土壤侵蚀量、不同侵蚀强度下土壤侵蚀面积及占比进行统计(表3)。由表3可知5期数据中平均土壤侵蚀模数分别为3 966.1, 3 801.5, 3 651.4, 3 404.7, 4 299.6  $t/(km^2 \cdot a)$ , 从2000—2015年15年间平均土壤侵蚀模数呈明显下降趋势, 2015年相较于2000年下降14%, 但是从2015—2020年平均土壤侵蚀模数有较大增幅, 2020年相较于2015年增加26%。而侵蚀量5 a依次为8 082, 7 748, 7 714, 6 938, 8 681万t, 变化趋势和平均侵蚀模数一致, 在整体上平均侵蚀模数和侵蚀量均呈现“减少—增加”的变化趋势。从总体上看研究区以微度、轻度和中度侵蚀三者所占面积最大, 三者面积总和占比在5期土壤侵蚀数据中均超过50%。为进一步分析研究区土壤侵蚀时间变化特征, 通过将2000—2020年土壤侵蚀图层进行叠加分析, 获取了研究区20年来不同土壤侵蚀强度分级面积转移矩阵(表4)。研究区在2000—2020年

土壤侵蚀强度未发生变化的区域面积占比为82.7%, 面积为1 499.9  $km^2$ , 从中低侵蚀强度向高侵蚀强度转移的面积占比为5.03%, 面积为91.2  $km^2$ , 从高侵蚀强度向中低侵蚀强度转移的面积占比为2.36%, 面积为42.7  $km^2$ 。结合表3数据, 2020年与2000年相比较, 极强烈侵蚀与剧烈侵蚀面积占比上升, 且平均土壤侵蚀模数和总侵蚀量均有上升, 表明2020年研究区土壤侵蚀情况相较于2000年进一步恶化, 这与20年间研究区大规模工程建设破坏植被改变了原有土地利用类型有关, 例如康定机场、国道G318线、新建铁路等工程项目。

研究区2000—2020年不同土壤侵蚀强度时空分布如图2所示。2000—2020年5期不同土壤侵蚀强度空间分布基本一致, 均以微度侵蚀、轻度侵蚀和中度侵蚀为主。在空间上微度侵蚀主要分布于研究区东部植被覆盖程度较高、海拔相对较低的地区和西部部分植被覆盖较好的地区; 轻度侵蚀和中度侵蚀主要分布于中部和西部草地覆盖的区域; 强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀分布于研究区东北、西南和中部植被覆盖较少和坡度较大的区域。总体而言研究区不同侵蚀强度分布的区域变化不大, 少部分区域由中低土壤侵蚀强度转化为高土壤侵蚀强度。

#### 3.2 不同土地利用类型下的土壤侵蚀特征

将研究区2000—2020年土地利用图层叠加并分析得到研究区2000—2020年土地利用面积转移矩阵(表5)。由表5可知研究区主要以森林和草地为主要地表覆盖类型, 未发生土地利用类型变化区域面积为1 741.6  $km^2$ , 面积占比为90.9%, 发生变化的区域总面积为174.6  $km^2$ , 面积占比为9.1%, 研究区在20年间土地利用发生转移的土地利用类型面积由大到

小依次为草地(84.2 km<sup>2</sup>)、灌木(23.7 km<sup>2</sup>)、森林(23.5 km<sup>2</sup>)、裸地(19.95 km<sup>2</sup>)、冰雪(9.85 km<sup>2</sup>)、水域(7.45 km<sup>2</sup>)、农田(6.15 km<sup>2</sup>)、建设用地(0.001 km<sup>2</sup>), 其中变化最大的草地转化出0.49 km<sup>2</sup>农田、35.66 km<sup>2</sup>森林、4.27 km<sup>2</sup>灌木、3.64 km<sup>2</sup>水域、0.98 km<sup>2</sup>冰雪、32.19 km<sup>2</sup>裸地和7 km<sup>2</sup>建设用地。

表3 2000—2020年研究区土壤侵蚀统计  
Table 3 Statistics of soil erosion in study area (2000—2020)

侵蚀强度	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
微度侵蚀	593	32.4	623.8	34	622.4	34	630	34.4	598.2	32.9
轻度侵蚀	216.6	11.8	221.1	12.1	242.4	13.2	251.9	13.7	193.9	10.7
中度侵蚀	357.8	19.5	363.1	19.8	377.3	20.6	415.1	22.6	316.5	17.4
强烈侵蚀	396.9	21.7	377.9	20.6	368.6	20.1	360.8	19.7	369.7	20.4
极强烈侵蚀	242.6	13.2	220.2	12	199.2	10.9	159.4	8.7	299.3	16.5
剧烈侵蚀	26.4	1.4	27.2	1.5	23.2	1.3	16.3	0.9	38.9	2.1
平均侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	3966.1		3802.5		3651.4		3404.7		4299.6	
侵蚀量/万t	8082		7748		7714		6938		8681	

表4 2000—2020年不同土壤侵蚀强度面积转移矩阵  
Table 4 Area transfer matrix of different soil erosion intensities (2000—2020)

2000年	2020年					
	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
微度侵蚀	546.76	9.50	8.89	14.31	12.97	5.08
轻度侵蚀	16.84	168.42	6.33	1.32	0.22	0.09
中度侵蚀	5.35	28.71	272.92	8.09	0.66	0.00
强烈侵蚀	5.22	6.65	61.18	290.21	5.77	0.12
极强烈侵蚀	7.41	0.61	4.72	78.83	204.26	3.06
剧烈侵蚀	5.47	0.02	0.01	0.34	15.59	17.34

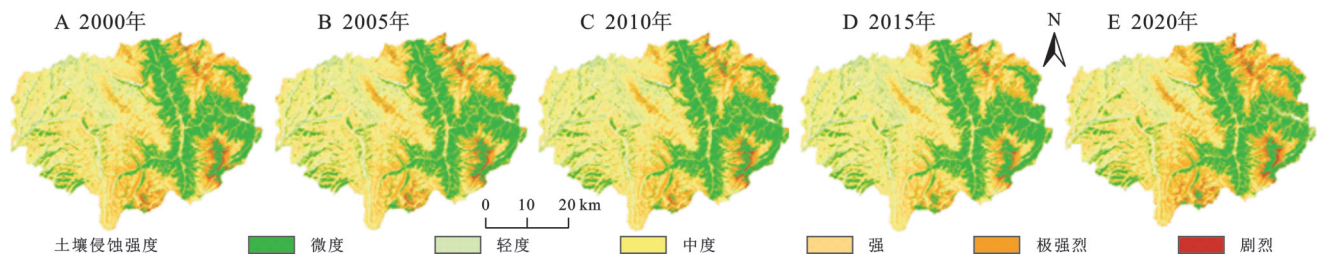


图2 研究区2000—2020年不同土壤侵蚀强度时空分布  
Fig. 2 Spatiotemporal distribution of different soil erosion intensities in study area (2000—2020)

表5 2000—2020年研究区土地利用面积转移矩阵  
Table 5 Land use area transfer matrix in study area (2000—2020)

2000年	2020年							
	农田	森林	灌木	草地	水域	冰雪	裸地	建设用地
农田	2.62	1.03	0.01	4.14	0.02	0.00	0.00	0.94
森林	0.52	520.38	6.91	13.82	0.20	0.00	0.03	1.97
灌木	0.03	10.02	9.93	13.64	0.00	0.01	0.00	0.02
草地	0.49	35.66	4.27	1135.00	3.64	0.98	32.19	7.00
水域	0.00	0.18	0.01	2.34	10.92	0.63	4.20	0.00
冰雪	0.01	0.00	0.02	0.66	2.82	16.25	6.27	0.00
裸地	0.00	0.02	0.00	10.70	2.67	6.47	46.46	0.00
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

将研究区土地利用与土壤侵蚀图层相叠加,获得研究区不同土壤侵蚀强度面积与不同土地利用类型的关系,将5期数据取平均值后得到表6。由表6可知耕地、森林、灌木、草地、水体、冰雪、裸地和建设用地的关系,将5期数据取平均值后得到表6。由表6可知

发生土壤侵蚀面积占比为 0.19%, 29.39%, 1.66%, 62.26%, 1.38%, 1.40%, 3.71% 和 0%, 发生侵蚀面积最大的是森林和草地。耕地以微度侵蚀和轻度侵蚀为主, 占该土地利用类型土壤侵蚀总面积的 61% 和 31%; 森林以微度侵蚀为主, 占该土地利用类型土壤侵蚀总面积的 95%; 灌木以微度侵蚀和轻度侵蚀为主, 占该土地利用类型土壤侵蚀总面积的 61% 和 18%; 草地以轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀和极强烈侵蚀为主, 占该土地利用类型土壤侵蚀总面积的 17%, 31%, 31% 和 16%; 水体和冰雪均以微度侵蚀为主, 占各自土地利用类型土壤侵蚀总面积的 90% 和 93%; 裸地以中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀为主分别占该土地利用类型土壤侵蚀总面积的 8%, 14%, 43% 和 26%; 建设用地以微度侵蚀、轻度侵蚀和轻度侵蚀为主, 占该土地利用类型土壤侵蚀总面积的 11%, 59% 和 29%。总体上微度侵蚀主要分布于耕地、森林、水体和冰雪这 4 类土地利用类型; 轻度侵蚀主要分布于耕地、灌木、草地和建设用地; 中度侵蚀主要分布于草地、灌木、裸地和建设用地; 强烈、极强烈和剧烈侵蚀主要分布于草地和裸地。

表 6 不同土地利用类型土壤侵蚀分布  
Table 6 Distribution of soil erosion in different land use types %

类别	耕地	森林	灌木	草地	水体	冰雪	裸地	建设用地
微度侵蚀	0.12	28.04	0.21	2.68	1.25	1.30	0.16	0.00
轻度侵蚀	0.06	0.53	1.01	10.62	0.01	0.00	0.15	0.00
中度侵蚀	0.01	0.26	0.30	19.22	0.01	0.01	0.29	0.00
强烈侵蚀	0.01	0.34	0.10	19.50	0.03	0.02	0.54	0.00
极强烈侵蚀	0.00	0.22	0.03	10.06	0.06	0.04	1.61	0.00
剧烈侵蚀	0.00	0.01	0.00	0.18	0.03	0.03	0.96	0.00
合计	0.19	29.39	1.66	62.26	1.38	1.40	3.71	0.00

### 3.3 不同降雨侵蚀力下的土壤侵蚀特征

将研究区降雨侵蚀力图层与土壤侵蚀图层相叠加, 获得研究区不同土壤侵蚀强度面积与不同降雨侵蚀力的关系, 将 5 期数据取平均值后绘制成柱状堆积图(图 3)。

从图 3 可知, 整体上各降雨侵蚀力等级以微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀为主, 降雨侵蚀力不是这 4 类土壤侵蚀分布的主要驱动因素, 降雨侵蚀力极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的分布影响更加显著。在 1 级到 7 级降雨侵蚀力下, 极强烈侵蚀面积占比逐渐增大, 最高达到 30%; 在 5 级到 9 级降雨侵蚀力下剧烈侵蚀面积占比逐渐增大, 在 9 级降雨侵蚀力下剧烈侵蚀面积占比达到 9%。可见降雨侵蚀力对极强

烈和剧烈侵蚀有显著影响, 整体上呈现降雨侵蚀力增加—土壤侵蚀程度增加的趋势。在最强的 10 级降雨侵蚀力的作用下土壤侵蚀类型以微度侵蚀和轻度侵蚀为主, 10 级降雨侵蚀力分区的区域主要以茂密森林为主, 在植被茂密的区域植物的根系和叶片均会对土壤侵蚀产生有效的遏制作用<sup>[25]</sup>, 故在该分级区域内土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主。

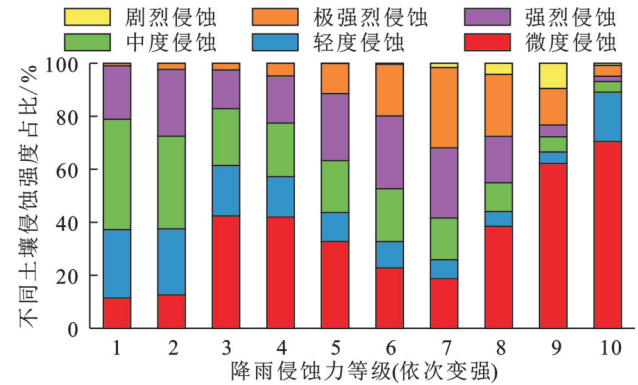


图 3 不同降雨侵蚀力分级内土壤侵蚀强度占比  
Fig. 3 Proportion of soil erosion intensity at different rainfall erosivity grades

### 3.4 不同高程分级下的土壤侵蚀特征

将高程分级图层与土壤侵蚀图层进行叠加并分析, 取平均值之后得到不同坡度分级下土壤侵蚀情况(图 4)。研究区内土壤侵蚀最严重的高程分级分别是 2 000~3 000 m, 3 000~4 000 m 和 4 000~5 000 m, 土壤侵蚀的面积占全区土壤侵蚀面积依次为 7.66%, 38.12%, 50.94% 和 2.88%。在 2 000~3 000 m 分级内, 以微度侵蚀为主, 占全区侵蚀面积的 6.35%; 3 000~4 000 m 分级内, 以微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀和极强烈侵蚀为主, 占全区侵蚀面积的 19.1%, 4.5%, 6.9%, 5% 和 1.8%; 在 4 000~5 000 m 分级内, 以微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀和极强烈侵蚀为主, 占全区土壤侵蚀面积的 6.5%, 7.3%, 12.8%, 15.1% 和 9.6%, 在该分级内剧烈侵蚀的面积是所有分级中最高的, 占全区土壤侵蚀面积的 0.8%; 在 >5 000 m 分级内土壤侵蚀面积以轻度侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀为主, 占全区土壤侵蚀面积的 1.36%, 0.6% 和 0.6%。

### 3.5 不同坡度分级下的土壤侵蚀特征

将研究区内的坡度分级图层与土壤侵蚀图层进行叠加并分析, 由于 5 期土壤侵蚀数据与坡度分级数据叠加结果较为接近, 故将结果取平均值之后得到不同土壤侵蚀强度在不同坡度分级下的土壤侵蚀情况(图 5)。

由图 5 可知, 研究区土壤侵蚀面积最大的坡度分级是 5°~15°, 15°~30° 和 30°~45°, 土壤侵蚀面积占比

依次为 19.49%, 42.29% 和 29.57%, 在  $<5^\circ$  和  $>45^\circ$  的坡度分级内, 土壤侵蚀面积占比较小, 分别为 2.64% 和 5.83%。在  $<5^\circ$  坡度分级内, 以轻度侵蚀和微度侵蚀为主, 两者面积占全区土壤侵蚀面积的 3%; 在  $5^\circ\sim 15^\circ$  坡度分级内, 以轻度侵蚀、微度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀为主, 占全区土壤侵蚀面积的 8% 和 7.3%; 在  $15^\circ\sim 30^\circ$  坡度分级内, 以轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀和极强烈侵蚀为主, 占全区土壤侵蚀面积的 12.1%, 11%, 13.4%, 3.5% 和 0.1%;  $30^\circ\sim 45^\circ$  坡度分级内, 以微度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀和极强烈侵蚀为主, 占全区土壤侵蚀面积的 14.5%, 1.4%, 5.5%, 6.9% 和 0.7%;  $>45^\circ$  的坡度分级内以极强烈和剧烈土壤侵蚀为主, 占全区土壤侵蚀面积的 1.6% 和 0.5%。

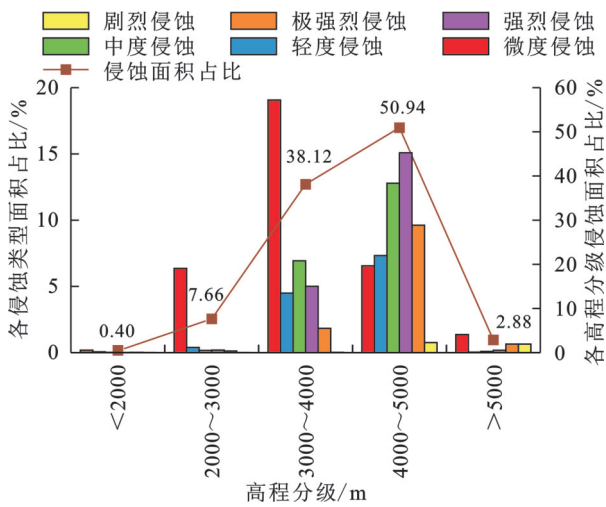


图 4 研究区土壤侵蚀在不同高程分级下分布

Fig. 4 Distribution of soil erosion at different elevation levels in study area

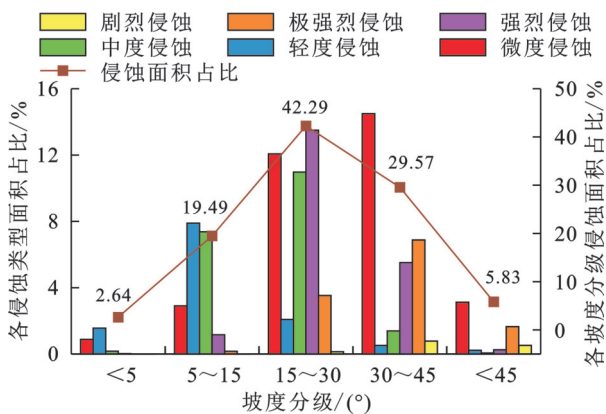


图 5 研究区土壤侵蚀在不同坡度分级下分布

Fig. 5 Distribution of soil erosion in different slope grades in study area

### 3.6 不同土壤质地内的土壤侵蚀特征

将土壤质地图层与土壤侵蚀图层进行叠加并分析, 结果取平均值之后得到不同土壤质地类型内土壤侵蚀情况(图 6)。在 LPq, CMc1, CMc2, CMc3, LPk 和 RGc 土壤质地类型内土壤侵蚀类型以微度、轻

度为主, 两类土壤侵蚀面积占比超过 60%, 其中 LPk 类型内微度侵蚀面积占比达到 87.4%。中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀主要分布于 FLc, CMd1, CMd2, GG 和 ARl 土壤质地类型, 在这 5 种土壤质地类型内微度侵蚀和轻度侵蚀面积总和占比均不超过 50%。其中 CMd1 和 ARl 土壤质地类型内中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积和占比最大, 依次为 80%, 76%; 剧烈侵蚀主要分布在 ARl 类型, 剧烈侵蚀面积占 ARl 类型内所有土壤侵蚀面积的 8.3%。整体上各类型的土壤侵蚀面积在不同土壤质地类型内有显著差异, 主要分为微度侵蚀、轻度侵蚀占比较高的 LPq, CMc1, CMc2, CMc3, LPk, RGc 土壤质地类型和中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀占比较高的 FLc, CMd1, CMd2, GG, ARl 土壤质地类型, 说明土壤质地对研究区不同类型土壤侵蚀分布有一定的影响。

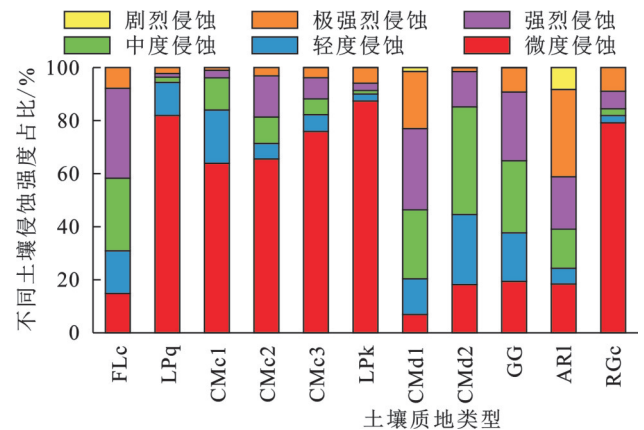


图 6 不同土壤质地类型内土壤侵蚀强度占比

Fig. 6 Proportion of soil erosion intensity within different soil texture types

### 3.7 基于地理探测器的土壤侵蚀驱动因素探测

研究区各土壤侵蚀强度在不同坡度、不同高程和不同土地利用类型下有显著空间分布上的异质性, 为探究研究区土壤侵蚀驱动因素, 地理探测器单因子探测分析结果见表 7, 各因子  $p$  值均  $< 0.05$ , 通过显著性检验, 说明 5 个因子对土壤侵蚀的分布均具有影响。

地理探测器单因子探测分析表明单因子对土壤侵蚀分布解释力( $q$ )20 a 平均值为土地利用(64%)>高程分级(34%)>土壤质地(25%)>降雨侵蚀力(22%)>坡度分级(17%)。其中土地利用类型对土壤侵蚀的解释力最强, 可见土地利用类型是研究区土壤侵蚀最主要的驱动因素, 说明人类活动对区域土壤侵蚀有显著影响。

同时在地理探测器中也对土地利用类型( $X_1$ )、降雨侵蚀力( $X_2$ )、高程分级( $X_3$ )、坡度分级( $X_4$ )和土壤质地( $X_5$ )进行交互探测, 各因子间交互结果见图 7。

表 7 单因子探测结果

Table 7 Single factor detection results

驱动因子	土地利用类型( $X_1$ )	降雨侵蚀力( $X_2$ )	高程分级( $X_3$ )	坡度分级( $X_4$ )	土壤质地( $X_5$ )
2000年	0.63	0.22	0.34	0.17	0.24
2005年	0.64	0.24	0.33	0.16	0.24
2010年	0.64	0.21	0.36	0.16	0.25
2015年	0.63	0.22	0.33	0.17	0.24
2020年	0.64	0.24	0.36	0.18	0.26

根据图 7 对 5 个年份的不同因子交互分析可得:当降雨侵蚀力( $X_2$ )、高程分级( $X_3$ )、坡度分级( $X_4$ )和土壤质地( $X_5$ )和土地利用类型( $X_1$ )交互时,对土壤侵蚀分布格局均为双因子增强影响。双因子交互探测分析表明当各因子间相互作用时对研究区土壤侵蚀的解释力均有增强, $q$ 值明显增大,其中土地利用类型和坡度分级因子相互作用时对研究区土壤侵蚀的解释力最强( $q=78\%$ )。坡度分级单因子的解释力为 17%,但是在和其他因子相互作用时解释力显著增大,与高程分级因子、降雨侵蚀力因子和土地利用因子相互作用时五年平均解释力为 41%,27%和 78%,与土地利用类型因子相互作用时解释力提升了 4.5 倍。土地利用类型是影响土壤侵蚀空间分布的主要因素。此外,坡度分级和土地利用类型的交互作用的解释力最强,解释力达到了 0.78,表明研究区需要重点关注坡度大和植被覆盖程度较低的地区。

## 4 讨论

降水对地面的冲击和地表径流的冲刷是引起土壤侵蚀的因素,坡度对冲击和冲刷有较大影响,研究区地处四川盆地与青藏高原过渡地带,地形起伏较大、相对高差和坡度较大。研究区土壤侵蚀强度呈现坡度越大侵蚀强度越高的特点,这与王猛等<sup>[6]</sup>在西南地区的土壤侵蚀研究结论相同,坡度越大,土壤侵蚀强度越大,这是山地丘陵地区土壤侵蚀普遍的特征。在降水和坡度共同作用下,坡度越大降水对坡面的冲击力越大,产生的径流流速也越大,坡面的产沙率也因此提升,造成表面土层松弛、土壤更深层的侵蚀,最后导致土壤侵蚀加剧<sup>[30]</sup>。

不同土地利用类型内的中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积占比由低到高依次为森林、冰雪、水体、耕地、灌木、建设用地、草地和裸地,该结果与大多数研究的结论一致<sup>[6,12]</sup>,森林覆盖的区域土壤侵蚀强度较低,对比草地,森林覆盖植被的根系更加复杂和发达,对森林覆盖区域的土壤保持能力更强,也可以更好地抵抗径流的冲刷影响,相对地,裸地的土质松散、难以留存水分,地表径流系数大,故裸地的土壤侵蚀强度较高。

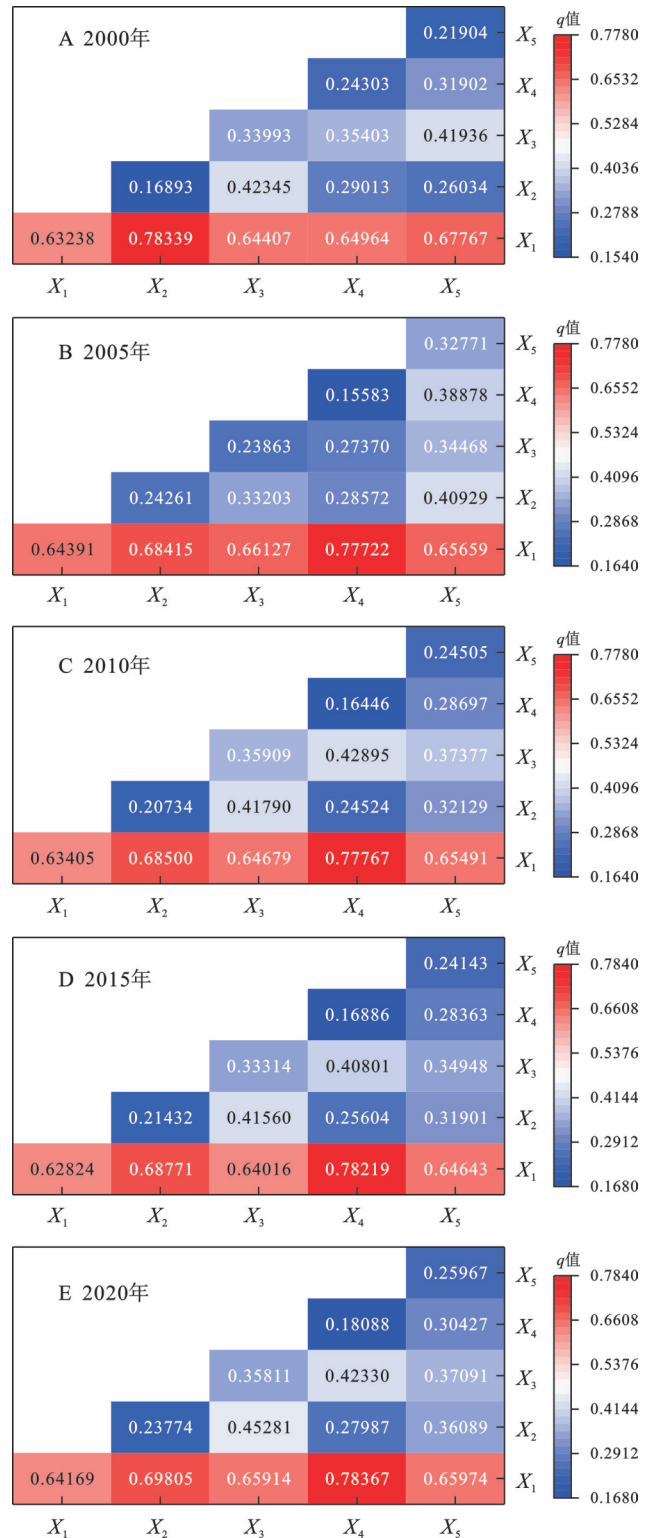


图 7 各因子间交互结果

Fig. 7 Interaction results between factors

研究区 2000—2020 年不同土地利用类型面积变化较小,人类涉及的建设用地占全区面积较小,故研究区土壤侵蚀主要受自然因素的影响。地理探测器的结果也显示研究区各因子之间有显著的交互作用,土地利用、降雨侵蚀力、高程和坡度之间的交互作用都能显著增强对研究区土壤侵蚀的解释力。研

究区内草地对土壤侵蚀贡献最高,同时草地覆盖的区域内土壤侵蚀强度也不一致。研究区未来的水土流失治理应当控制草地覆盖区域的过度放牧行为,避免草本植物地表覆盖程度不高导致的水土流失;对森林覆盖区域加强保护;加强裸地的植被恢复和陡坡减缓。

## 5 结论

(1) 研究区土壤侵蚀强度在空间上显著分异,东部森林区以微度侵蚀为主,中西部草地区以轻度、中度侵蚀为主,而植被覆盖较少的高海拔、陡坡区域以强烈、极强烈和剧烈侵蚀为主。

(2) 研究区在2000年、2005年、2010年、2015年和2020年的平均土壤侵蚀模数分别为3 966.1 t/(km<sup>2</sup>·a), 3 802.5 t/(km<sup>2</sup>·a), 3 651.4 t/(km<sup>2</sup>·a), 3 404.7 t/(km<sup>2</sup>·a)和4 299.6 t/(km<sup>2</sup>·a),呈现先下降后上升的变化趋势。

(3) 不同土壤侵蚀强度在不同坡度和高程分级下也表现出空间异质性。土壤侵蚀强度随坡度和海拔的增加而升高,坡度15°~30°范围内土壤侵蚀面积最大,占42.29%;海拔4 000~5 000 m范围内土壤侵蚀面积最大,占50.94%。

(4) 土壤侵蚀影响因子的解释力从大到小依次为土地利用类型(64%)、高程(34%)、土壤质地(25%)、降雨侵蚀力(22%)、坡度(17%)。其中,土地利用类型对侵蚀格局具有主导作用,不同土地利用类型的土壤侵蚀强度由高到低依次为裸地、草地、灌木地、建设用地、耕地、水体、冰雪和森林。

(5) 土地利用类型、降雨侵蚀力、高程、坡度和土壤质地5个因子交互作用增强了对研究区土壤侵蚀的解释力,其中土地利用与坡度因子的交互作用解释力最强,达到78%。

### 参考文献(References):

- [1] 陈正发,龚爱民,宁东卫,等.基于RUSLE模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.  
Chen Z F, Gong A M, Ning D W, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient loss in Yunnan Province based on RUSLE Model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 7-14.
- [2] Wuepper D, Borrelli P, Finger R. Countries and the global rate of soil erosion [J]. Nature Sustainability, 2020, 3(1): 51-55.
- [3] Zhou L, Wang X, Wang Z, et al. The challenge of soil loss control and vegetation restoration in the karst area of southwestern China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(1): 26-34.
- [4] 蒋忠诚,李振炜,罗为群,等.西南岩溶区水土流失研究进展与展望[J].中国水土保持科学,2024,22(3):1-11.  
Jiang Z C, Li Z W, Luo W Q, et al. Research progress and prospect of soil and water leakage in karst areas of Southwest China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(3): 1-11.
- [5] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2011,31(21): 6353-6362.  
Fan F D, Wang K L, Xiong Y, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in Karst Regions, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [6] 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.
- [7] 姚文艺.我国侵蚀产沙数学模型研究评述与展望[J].泥沙研究,2011(2):65-74.  
Yao W Y. Review and prospect of Chinese soil erosion and sediment yield mathematic models [J]. Journal of Sediment Research, 2011(2): 65-74.
- [8] Laflen J M, Flanagan D C. The development of US soil erosion prediction and modeling [J]. International Soil and Water Conservation Research. 2013 Sep 1;1(2):1-11.
- [9] Rymaszewicz A, Mockler E O, Sullivan J, et al. Assessing the applicability of the revised universal soil loss equation (RUSLE) to Irish Catchments [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 367: 99-105.
- [10] 纪昕雨,于悦,张思帆,等.基于CSLE模型的大连市果园土壤侵蚀特征研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2024,48(3):117-124.  
Ji X Y, Yu Y, Zhang S F, et al. The spatio-temporal characteristics of soil erosion in orchards of Dalian City based on the CSLE model [J]. Journal of Nanjing Forestry University: (Natural Sciences Edition), 2024, 48(3): 117-124.
- [11] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The european soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544
- [12] 韩晶,崔金芳,杨威,等.基于InVEST模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析[J].水土保持研究,2022,29(5):32-39.  
Han J, Cui J F, Yang W, et al. Analysis of soil erosion

- change and driving factors in low hilly areas based on InVEST model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 32-39.
- [13] 张晓敏, 张东梅, 王莉, 等. 降雨、积雪以及土地利用复合影响下的额尔齐斯河流域土壤侵蚀分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 104-111.  
Zhang X M, Zhang D M, Wang L, et al. Soil erosion analysis in the Irtysh River Basin under the combined effects of rainfall, snow cover and land use[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 104-111.
- [14] 王兰, 李小娟, 和继军, 等. 基于InVEST模型的山东省临沂市土壤保持能力时空变化及其影响因素[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(1): 337-345, 356.  
Wang L, Li X J, He J J, et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of soil conservation capacity in Linyi City of Shandong Province based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(1): 337-345, 356.
- [15] 孟祥嵩, 杨新兵, 赵迎雪, 等. 基于InVEST模型的白洋淀上游大清河流域土壤侵蚀和土壤保持功能时空变化规律[J]. *林业与生态科学*, 2025, 40(1): 41-50, 63.  
Meng X S, Yang X B, Zhao Y X, et al. Temporal and spatial patterns of soil erosion and soil conservation functions in the upper Baiyangdian Daqing River Basin based on the InVEST model[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2025, 40(1): 41-50, 63.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.  
Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [17] 薛笑薇, 苗蔚, 欧延静, 等. 基于水文水力学水生态结合法的大渡河生态流量研究[J]. *生态学报*, 2024, 44(15): 6487-6498.  
Xue X W, Miao W, Ou Y J, et al. Study on Ecological Flow of Dadu River based on combined hydrology-hydraulics-water ecology method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15): 6487-6498.
- [18] 陈同德, 焦菊英, 王颖霖, 等. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 547-564.  
Chen T D, Jiao J Y, Wang H L, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 547-564.
- [19] 李淑媛. 三江源区退化高寒草甸坡面径流和侵蚀产沙特征研究[D]. 西北农林科技大学, 2022.  
Li S Y, Study on the characteristics of slope runoff and sediment yield of degraded alpine meadow in the Three-River headwaters region [J]. Northwest A&F University, 2022.
- [20] 林慧龙, 郑舒婷, 王雪璐. 基于RUSLE模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价[J]. *草业学报*, 2017, 26(7): 11-22.  
Lin H L, Zheng S T, Wang X L. Soil erosion assessment based on the RUSLE model in the Three-Rivers Headwaters area, Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(7): 11-22.
- [21] Yang J, Huang X. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019 [R]. *Earth System Science Data Discussions*, 2021.
- [22] 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.
- [23] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [J]. *Transactions of the Asae*, 1984, 27(1): 129-144.
- [24] 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.
- [25] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(16): 4461-4472.  
Feng Q, Zhao W W. The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [26] 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 Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [27] 马春玲, 焦峰, 王飞, 等. 中国USLE/RUSLE因子研究[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 430-436.  
Ma C L, Jiao F, Wang F, et al. Review of studies on factors of USLE/RUSLE in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 430-436.
- [28] 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 基于GIS和RUSLE模型的山地环境水土流失空间特征定量分析: 以四川泸定县为例[J]. *地球与环境*, 2013, 41(6): 669-679.  
Deng H, He Z W, Chen Y, et al. The spatial features of soil erosion in mountain environment based on GIS and RUSLE: a case study in Sichuan Luding [J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(6): 669-679.
- [29] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and Gradation of soil erosion: SL190-2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [30] 赵长兴. 高寒矿区不同植被恢复方式下细沟侵蚀及土壤质量特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2024.  
Zhao C X. Study on the rill erosion and soil quality characteristics under different vegetation restoration modes in Alpine Mines [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024.