

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.013

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.013

朱婉菁,王克勤,宋娅丽,等.滇西北云龙县 2000—2020 年土壤侵蚀时空演变特征及影响因素[J].水土保持学报,2025,39(2):378-389.

ZHU Wanjing, WANG Keqin, SONG Yali, et al. Temporal and spatial dynamics of soil erosion and its influencing factors in Yunlong County, northwest Yunnan Province from 2000 to 2020[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 378-389.

滇西北云龙县 2000—2020 年土壤侵蚀 时空演变特征及影响因素

朱婉菁,王克勤,宋娅丽,马建刚,刘欣艺,王振超,赵洋毅

(西南林业大学水土保持学院,昆明 650224)

摘要: [目的] 研究云龙县土壤侵蚀时空变化及影响因素对发展高山峡谷区的特色农业、生态环境治理修复和防治水土流失工作都具有重要意义。[方法] 通过 GIS 手段和 RUSLE 模型,模拟研究云龙县 2000—2020 年土壤侵蚀状况的时空演变特征,分析特色农业与土壤侵蚀的关系,综合海拔、坡度、植被覆盖度、多年平均降水量和土地利用类型等影响因子,应用地理探测器模型进行土壤侵蚀影响因素的研究。[结果] 1) 2000—2020 年云龙县每隔 5 a 5 期平均侵蚀模数分别为 1 644、1 085、878、661、467 t/(km²·a), 土壤侵蚀模数呈减小趋势,总体从轻度侵蚀变为微度轻度。2) 2000—2020 年云龙县土壤侵蚀得到改善的区域面积占比约为 48.45%,土壤侵蚀程度加重面积占比为 4.23%,整体呈侵蚀等级下降好转趋势。3) 云龙县土壤侵蚀相对集中在海拔 2 000~2 500 m、坡度 15°~25°区域内。4) 云龙县典型特色农业的水土保持能力总体表现为泡核桃>林下中药材>生态绿茶>麦地湾梨。5) 云龙县土壤侵蚀影响因子驱动力大小为植被覆盖度>海拔>坡度>多年平均降水量>土地利用类型,*q* 值分别为 0.401 0、0.142 0、0.117 5、0.115 9、0.046 6,植被覆盖度和坡度之间的交互作用驱动力最强为 0.82。[结论] 云龙县 2000—2020 年土壤侵蚀整体得到有效改善,研究期间随着植被覆盖度的提高,土壤侵蚀呈减弱趋势,未来应重点关注云龙县海拔 2 000~2 500 m 和坡度 15°~25°区域内土壤侵蚀变化趋势,做好特色农业发展和坡面微地形修复工作,降低土壤侵蚀恶化风险。

关键词: 云龙县; 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 地理探测器; 时空演变

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0378-12

Temporal and Spatial Dynamics of Soil Erosion and Its Influencing Factors in Yunlong County, Northwest Yunnan Province from 2000 to 2020

ZHU Wanjing, WANG Keqin, SONG Yali, MA Jiangang, LIU Xinyi, WANG Zhenchao, ZHAO Yangyi

(College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] The investigation of temporal and spatial variations in soil erosion and its influencing factors in Yunlong County is of great significance for the advancement of featured agriculture, management and restoration of ecological environment, and soil erosion control in alpine and canyon regions. [Methods] The GIS and RUSLE model were employed to simulate the spatiotemporal evolution characteristics of soil erosion in Yunlong County from 2000 to 2020. The relationship between featured agriculture and soil erosion was analyzed. By considering influential factors such as elevation, slope, annual average rainfall, vegetation coverage, and land use type, the quantitative attribution of soil erosion was examined using a geographic probe model. [Results] 1) From 2000 to 2020, the average erosion modulus in Yunlong County exhibited a decreasing trend across five stages (each stage included five years), being 1 644, 1 085, 878, 661 and 467 t/(km²·a), respectively, and the overall soil erosion

收稿日期: 2024-09-10

修回日期: 2024-10-28

录用日期: 2024-11-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-07

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFF1302904); 国家自然科学基金项目(42067005); 云南省农业联合专项面上项目(202101BD070001-075); 云南省青年人才专项(YNWR-QNBJ-2019-215); 云南省水土保持与荒漠化防治学一流学科开放课题项目(SBK20240045)

第一作者: 朱婉菁(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: zhuwanjing240101@163.com

通信作者: 赵洋毅(1980—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: yyz301@foxmail.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

shifted from moderate to mild intensity. 2) Over the past 20 years, there was a significant increase in proportion of the area where soil erosion had been improved, with an increase of 48.45%, while the proportion of area experiencing soil erosion deterioration only increased by 4.23%, indicating an overall trend of decline and improvement in erosion grades. 3) Soil erosion in Yunlong County was predominantly concentrated within the elevation range of 2 000~2 500 m and slopes between 15°~25°. 4) The soil and water conservation capacity of typical featured agriculture in Yunlong County followed the order of pickled walnut>Chinese herbal medicine under the forest>ecological green tea>Maidiwan pear. 5) The influencing factors for soil erosion in Yunlong County ranked as the order of vegetation coverage>altitude>slope > annual average rainfall>land use type, with the corresponding q values being 0.401 0, 0.142 0, 0.117 5, 0.115 9 and 0.046 6, respectively. Notably, the interaction between vegetation coverage and slope exhibited the strongest explanatory power with a q value of 0.82. [Conclusion] Overall soil erosion in Yunlong County has shown effective improvement over a span of two decades. During this period, there had been a weakening trend in soil erosion accompanied by an increase in vegetation coverage. Future attention should be directed towards monitoring changes in soil erosion within altitudes ranging from 2 000~2 500 m and slopes between 15°~25° in Yunlong County while ensuring proper implementation of measures to develop featured agriculture and restore the microtopography on slopes to mitigate risks associated with further deterioration of soil erosion.

Keywords: Yunlong County; soil erosion; RUSLE model; geographical detector; temporal and spatial evolution

Received: 2024-09-10

Revised: 2024-10-28

Accepted: 2024-11-06

Online(www.cnki.net): 2025-01-07

土壤侵蚀是土壤及其母质在受水力、风力等外营力或外营力与人类活动综合作用下被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程,是全球最严重的土地退化问题之一^[1]。土壤侵蚀严重影响全球生态粮食安全和可持续发展,对社会、经济、农业发展和资源环境造成严重威胁^[2-4]。中国土壤侵蚀现象严重,据《2023年中国水土保持公报》^[5]显示,2023年中国存在土壤侵蚀现象的土地共有 $262.76 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占中国陆地面积的1/4以上。中国西南山区由于地形起伏大、地质构造复杂,降雨多集中于夏季,滑坡、泥石流和崩塌等自然灾害频繁,受自然因素和人为因素的影响,土壤侵蚀问题相对较为严峻^[6]。因此,高效精准地分析高原山区土壤侵蚀的变化规律和影响因素,对因地制宜地恢复山区生态环境、防治水土流失和发展高原特色农业具有重要意义。

目前,USLE和RUSLE是研究土壤侵蚀的有效方法^[7],RUSLE在USLE的基础上对其影响因子和算法都进行优化,模型结构简单合理,参数获取更方便,方法更具有适用性,评价结果更可靠^[8]。近年来,随着地理空间信息技术的飞速发展,国内外不少学者将修正通用水土流失方程与GIS技术相结合,从不同尺度进行土壤侵蚀变化模拟,监测区域土壤侵蚀时空演变趋势。例如,彭双云等^[9]基于RUSLE模型以日降雨量模型计算滇池流域1999—2014年每隔3 a的土壤侵蚀量,完成滇池流域土壤侵蚀空间分布特征和演变趋势

的分析;王欢等^[10]基于RUSLE和地理探测器对贵州省西北部的喀斯特地区进行土壤侵蚀研究发现,坡度和土地利用类型是影响此地区侵蚀分布和变化的主要因子;王志杰等^[11]运用RUSLE模型,采用空间自相关和冷热点分析方法,分析贵阳市土壤侵蚀的演变规律和热点分布特征,探究降雨和植被的相互作用对侵蚀的影响;陈晨晨等^[12]利用RUSLE模型和随机森林算法,探究澜沧江中下游流域内土壤侵蚀时空演变特征及侵蚀因子的相对重要程度。综上所述,利用RUSLE模型进行区域土壤侵蚀研究具有适用性良好和操作简便等优点,结合地理空间信息技术更有助于探究区域土壤侵蚀空间分布和演变特征,并对因地制宜制定水土保持方案有着重要的理论和实践意义。

云龙县位于澜沧江、怒江和沱江的褶皱带之中,是中国生态屏障的重要组成部分,山高谷深地形地貌复杂多样,动植物资源丰富,干湿季分明,土壤可蚀性较强,容易发生侵蚀,属于生态环境敏感脆弱的地区,研究该区域的土壤侵蚀时空变化特征及分析其影响因素,对发展高山峡谷区社会经济、生态环境治理修复和防治水土流失工作都具有重要意义^[13-14]。特色农业是现代农业发展的重点方向,不同的特色农业土壤侵蚀状况也存在差异,分析云龙县不同特色农业对土壤侵蚀的影响,有利于加强高原山区水土流失防控与特色农业的协同发展。基于此,为较全面掌握云龙县土壤侵蚀的变化规律和驱动因素,将GIS和RUSLE

模型相结合,分析 2000—2020 年云龙县土壤侵蚀状况时空变化趋势,对比不同特色农业土壤侵蚀强度的差异性,并利用地理探测器探究其影响因子,为高山峡谷区生态环境治理修复、发展高原特色农业和布设水土保持措施提供理论支撑和决策依据。

1 研究区概况

云龙县(25°28′~26°23′N,98°52′~99°46′E)位于云南省西北部(图 1),辖区总面积约 4 400.95 km²,全县包括 7 乡 4 镇,常住人口约 20.81 万,是多民族聚居县,其中白族、彝族、傈僳族和苗族的人口占全县总人口的 88%^[15]。云龙县为高山峡谷地形,地势东西高,中部低,从北往南逐渐降低,由数列陡峻高耸的山峰与峡谷相间呈平行排列,全县 90% 以上是山区,海拔高差大,为 730~3 663 m,海拔高于 2 500 m 的区域占全县面积的 50% 以上,坡耕地众多^[16-17],土壤可蚀性较强容易发生侵蚀,恢复难度大。研究区属大陆性亚热带高原季风气候,干湿季分明,水热不平衡,夏秋季湿润多雨,易造成洪涝灾害,秋冬季干旱少雨,年平均降水量 781.4 mm。云龙县河流众多,澜沧江、沱江和漕涧河等 5 大河流由北向南流经整个云龙地区,水力资源丰富^[18]。云龙县年平均气温 16.1℃,气候垂直差异明显,高山和低谷年平均气温相差可达 17℃。

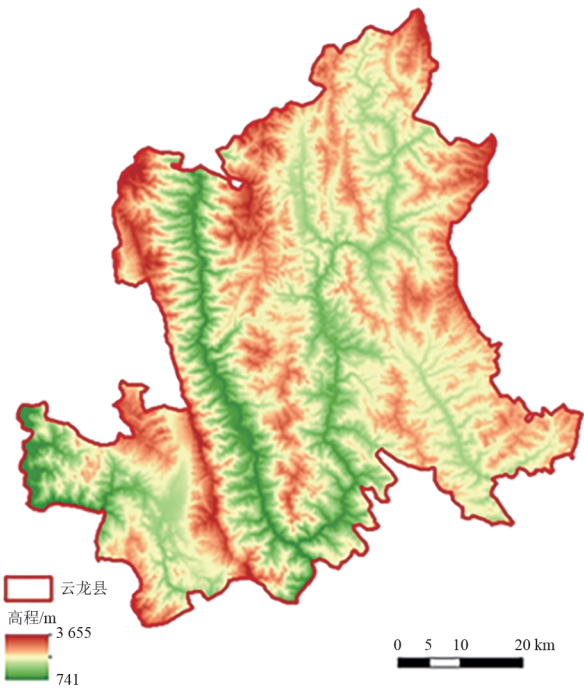


图 1 研究区概况
Fig 1 Overview of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究所用各类数据和来源见表 1。

表 1 研究区数据源

Table 1 Data source of the study area

数据类型	分辨率	来源
DEM 数据	30 m	地理空间数据云平台(http://www.Gscloud.cn)
土地利用数据	30 m	美国地质勘测局 USGS(https://earthexplorer.usgs.gov/)
土壤数据	1:100 万	世界土壤数据库(HWSD)(http://www.trade.gov/harmonized-system-hscodes)
降雨数据	1 000 m	国家地球系统科学数据中心(http://gre.geodata.cn)
NDVI 数据	250 m	美国国家航空航天局(https://ladsweb.nascom.nasa.gov)

2.2 RUSLE 模型

采用的修正通用土壤流失方程(RUSLE)是 1997 年美国农业部在通用土壤流失方程(USLE)的基础上进行修正的模型^[19]。RUSLE 模型简单直观,所需参数少、易获取,参数主要包括坡长坡度因子(*LS*)、水土保持措施因子(*P*)、土壤可蚀性因子(*K*)、植被覆盖管理因子(*C*)及降雨侵蚀力因子(*R*);且与 RS 和 GIS 结合,适用范围更广,结果可信度高,其表达式为:

$$A=RKLSCP$$
 (1)

式中:*A* 为年土壤流失量,t/(hm²·a),乘以 100 后单位转换为 t/(km²·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·mm·hm²);*C* 为植被覆盖与管理因子;*LS* 为坡长坡度因子;*P* 为水土保持措施因子;*LS*、*C*、*P* 为 0~1,单位均为无量纲。

2.2.1 降雨侵蚀力因子(*R*)

降雨侵蚀力可以反映降

雨对侵蚀的影响,降雨历时、强度和雨滴形态特征等对坡面侵蚀过程有不同作用^[20-21],各国研究学者对计算降雨侵蚀力模型进行了大量研究^[22-23],不同的计算模型得到的降雨侵蚀力因子差异较大。从研究区域来看,本文降雨侵蚀力因子(*R*)采取陈正发等^[24]对云南省降雨侵蚀力计算模型的适宜性研究成果进行计算:

$$R=5.249\left(\sum_{i=1}^{12}\frac{P_i}{P_{12}}P_i\right)^{1.205}$$
 (2)

式中:*R* 为降雨侵蚀力因子;*P*₁₂ 为年降雨量,mm;*P*_{*i*} 为第 *i* 个月的降雨量,mm。

2.2.2 土壤可蚀性因子(*K*) 土壤可蚀性因子(*K*)是反映土壤对侵蚀的敏感性^[9]。本研究具体计算模式采用 WILLIAMS 等^[25]对侵蚀—生产力评价模型(EPIC)中 *K* 值的计算方法,只需土壤有机质和砂粒、粉粒、黏粒的质量分数,计算公式为:

$$K_{EPIC} = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_i}{S_n + S_i} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25 C_0}{C_0 + \exp(3.72 - 2.95 C_0)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7 S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9 S_n)} \right] \quad (3)$$

$$S_n = 1 - \frac{S_a}{100} \quad (4)$$

式中: S_a 、 S_n 和 S_i 分别为土壤砂粒、黏粒和粉粒质量分数(%); C_0 为土壤有机质质量分数(%). EPIC 模型估算土壤侵蚀因子是美国的经验模型, 为了更符合中国的情况, 结合张科利等^[26]提出的修正模型进行校正, 公式为:

$$K = -0.01383 + 0.51575 K_{EPIC} \quad (5)$$

2.2.3 坡长坡度因子(LS) 坡长坡度因子(LS)体现地表起伏对侵蚀的影响。本文采用 LIU 等^[27]提出的公式计算坡长因子(L):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (6)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中: L 为坡长因子; m 为可变的坡长因子指数; λ 为水平投影坡长; θ 为坡度。坡度表示地表的倾斜程度, 根据云龙县陡坡面积占比大的特点, 坡度因子(S)选用刘斌涛等^[28]建立适用于西南山区的计算方法。

$$S = \begin{cases} 10.800 \sin \theta + 0.0300 & \theta \leq 5^\circ \\ 16.800 \sin \theta - 0.5000 & 5^\circ < \theta \leq 10^\circ \\ 20.204 \sin \theta - 1.2404 & 10^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ 29.585 \sin \theta - 5.6079 & \theta > 25^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度($^\circ$)。

2.2.4 植被覆盖与管理因子(C) 植被覆盖与管理因子(C)是反映植被和人为耕种模式对土壤侵蚀量的影响。 C 值越大, 表明植被覆盖和管理因素下的土壤抗蚀能力越强, 土壤侵蚀越严重, 本文采用蔡崇法等^[29]的方法计算 C 值。

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (9)$$

$$C = \begin{cases} 1 & 0 \leq f < 10.0\% \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 10\% \leq f < 78.3\% \\ 0 & f \geq 78.3\% \end{cases} \quad (10)$$

式中: f 为植被覆盖度; C 为植被覆盖与管理因子; $NDVI$ 为归一化植被指数; $NDVI_{\max}$ 为研究区归一化植

被指数的最大值; $NDVI_{\min}$ 为裸土的归一化植被指数。

2.2.5 水土保持措施因子(P) 水土保持措施因子(P)对土壤流失量起到调控作用, 取值为 $0 \sim 1$, 当 P 因子为 0 时, 表示该区域土壤侵蚀没有发生, 并且坡度越大, 水土保持措施实施的效果越好。本文根据研究区特点和其他学者^[30-31]的研究结果, 对不同区域的水土保持措施因子(P)进行赋值。把林地和未利用地赋值为 1.00 , 草地赋值为 0.80 , 水域和建设用地赋值为 0 ; 坡度 $\leq 5^\circ$ 的耕地赋值为 0.11 , 坡度 $5^\circ \sim 10^\circ$ 的耕地赋值为 0.22 , 坡度 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的耕地赋值为 0.31 , 坡度 $15^\circ \sim 20^\circ$ 的耕地赋值为 0.58 , 坡度 $20^\circ \sim 25^\circ$ 的耕地赋值为 0.11 , 坡度 $> 25^\circ$ 的耕地赋值为 0.80 。

2.3 地理探测器

地理探测器是探测因变量的空间分层异质性, 是基于因子、生态、风险和交互作用4种探测器来解释其背后驱动力的一种新的统计学方法^[32]。本研究应用地理探测器模型中的因子探测和交互作用探测研究云龙县土壤侵蚀驱动因子的驱动力及因子间的交互关系。

因子探测器主要用于探测自变量 X 对因变量 Y 空间分异的驱动力, 用 q 值表示, 公式为:

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

式中: q 为因子解释力, 值域为 $[0, 1]$, q 数值越大, 表明 X 对 Y 的驱动力越大; SSW 为层内方差之和, SST 为区域总方差; $h=1, 2, \dots, L$, 为变量 Y 或因子 X 的分类区间; N_h 和 N 分别为层 h 和全域的分区数量; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。

交互探测器用来分析2个因子间的交互作用, 即这些因子是否独立影响因变量, 或共同作用时是否加强或缩小对因变量的驱动力^[33]。双因子交互作用的判据见表2。本文将云龙县多年平均土壤侵蚀模数设为因变量, 选取海拔、坡度、土地利用类型、植被覆盖度和多年平均降水量5个因子为自变量。

3 结果与分析

3.1 模型精度验证

将云龙县2015年土壤侵蚀强度模拟计算结果与《云南省2015年土壤侵蚀调查报告》^[34]进行对比显示, 云龙县2015年土壤侵蚀面积占全县总面积的29.07%, 本研究模型计算得出云龙县2015年土壤侵蚀面积占全县总面积的32.25%, 二者相差3.18个百分点, 且本研究模拟云龙县土壤侵蚀强度空间分布与《云南省土壤侵蚀地图集》^[35]成果存在一定的差异但基本相似, 说明本研究基于RUSLE模型计算结果基本可靠。

表 2 自变量对因变量的交互作用方式

判据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \text{Max}[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

注：X1、X2 表示土壤侵蚀的影响因子。

3.2 土壤侵蚀结果与时空变化

将 RUSLE 模型计算结果参照国家水利部门颁发的《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2008)》^[36],将云龙县 2000—2020 年土壤侵蚀强度分为微度、轻度、中度、强度、极强烈和剧烈侵蚀 6 个等级。结合图 2 分析,云龙县 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年土壤侵蚀空间分异明显,微度侵蚀和轻度侵蚀的面积在全县大部分地区占比较大,微度侵蚀和轻度侵蚀区域总面积占比分别为 77.51%、86.81%、90.69%、93.61%、95.24%;2000—2020 年研究区微度侵蚀面积逐年增加,2015—2020 年极强烈和剧烈侵蚀面积少量增加,其余年份侵蚀等级面积则逐年减少,表明云龙县在 2000—2020 年水土保持效果较好。强烈、极强烈和剧烈侵蚀呈点线状分布,主要分布在澜沧江和沅江流域两岸,虽然河流两岸地势相对平缓,但受人类活动影响比较大,人们为了发展经济,砍伐植被,在陡坡上开垦种植,开挖山体修建道路和建筑,这种破坏自然资源的不合理行为,更容易发生水土流失。云龙县多年平均侵蚀总量为 4.09×10^6 t/a,平均侵蚀模数为 947 t/(km²·a),总体属于轻度侵蚀;2000—2020 年平均侵蚀模数分别为 1 644、1 085、878、661、467 t/(km²·a),2020 年平均土壤侵蚀模数与 2000 年相比下降 71.59%。从轻度侵蚀变为微度侵蚀,土壤侵蚀强度呈减弱趋势,且随着侵蚀等级的逐级增加,所占面积逐渐减少,表明该区域土壤侵蚀治理效果显著。

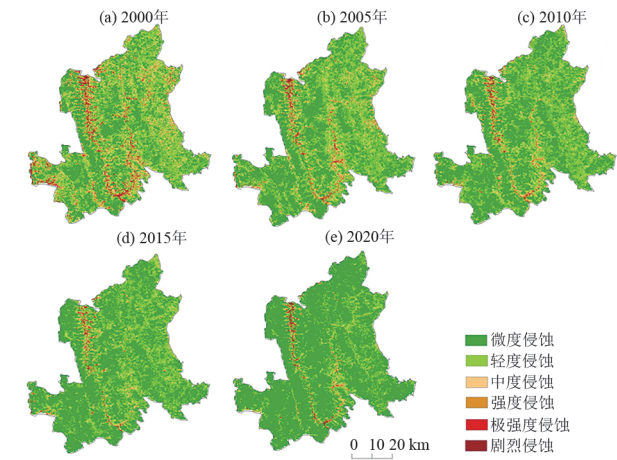


图 2 2000—2020 年云龙县土壤侵蚀强度
Fig 2 Soil erosion modulus in Yunlong County from 2000 to 2020

由图 3 可知,云龙县植被覆盖率较高,森林资源丰富,是大理州林业第一大县;2000—2020 年云龙县植被覆盖率呈上升趋势,同时土壤侵蚀模数明显下降,与云龙县 2000 年全面启动退耕还林政策、2005 年实施森林生态效益补偿及 2017 年实施陡坡地生态治理有关,植被覆盖率的增加可为研究区提供较为稳定的生态环境。比较云龙县 2000—2020 年的植被覆盖率与土壤侵蚀模数(图 3)可知,二者之间呈负相关,植被覆盖率越少的地区,土壤侵蚀发生的概率越大。植被不仅能够拦截降雨,增强水分入渗,还可提高下垫面的抗冲刷能力,保护水土资源,有效减少土壤侵蚀。

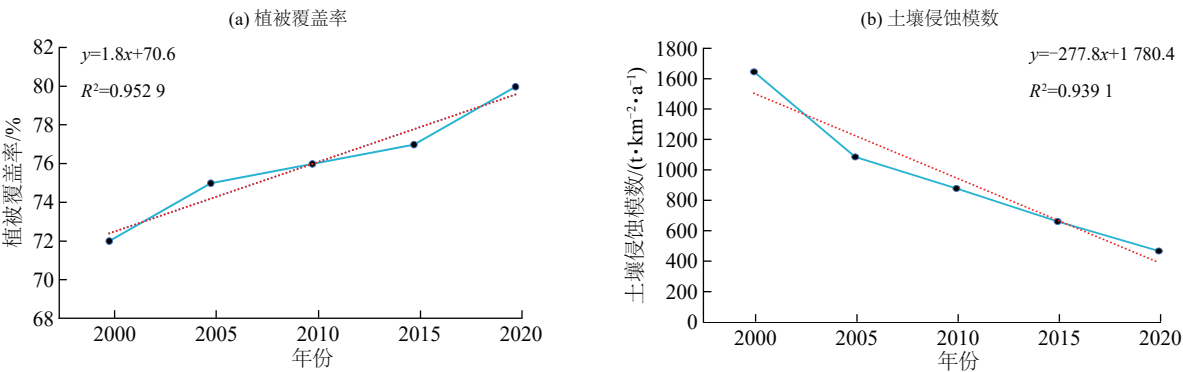


图 3 2000—2020 年云龙县植被覆盖率和平均土壤侵蚀模数
Fig 3 Vegetation coverage and average soil erosion modulus in Yunlong County from 2000 to 2020
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

对研究区2000—2020年5期数据各等级侵蚀强度面积进行统计,得到云龙县土壤侵蚀强度转移图(图4)。随着年份的增加,研究区微度侵蚀的面积越来越多,且轻度及以上侵蚀的面积越来越少,5个时段内分别有52.08%、59.59%、63.82%和70.82%的区域土壤侵蚀强度没有发生变化,2000—2005年有33.45%区域侵蚀程度得到改善,14.47%区域侵蚀程度加剧,2005—2010年有24.64%的区域土壤侵蚀等级变低,15.77%的区域侵蚀等级变高,2010—2015年有23.15%的区域侵蚀减轻,13.03%的区域侵蚀恶化,2015—2020年有21.18%的区域向低侵蚀等级转移,8.00%的区域向高侵蚀等级转移;2000—2020年面积占比约为48.45%的区域土壤侵蚀得到改善,土壤侵蚀程度加重面积占比为4.23%,未发生改变的区域面积占比约为47.32%。综上可知,2000—2020年云龙县侵蚀状况得到改善的区域明显高于土壤侵蚀发生恶化的区域,整体呈侵蚀等级下降趋势,说明整个研究区的土壤侵蚀状况已逐步得到改善,水土流失面积整体变少,水土保持措施实施效果较好。

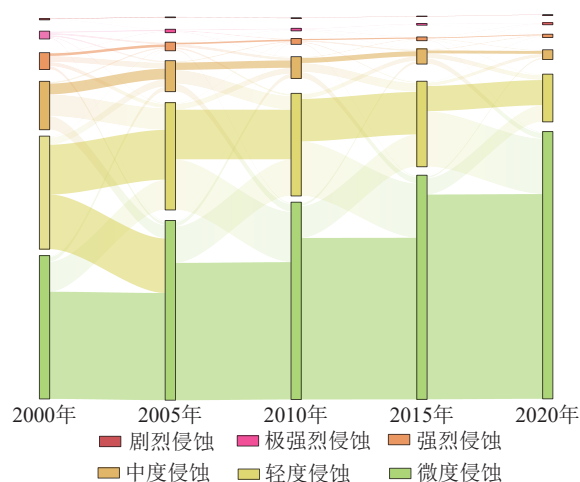


图4 2000—2020年土壤侵蚀强度转移变化

Fig. 4 Changes of soil erosion intensity from 2000 to 2020

3.3 不同海拔和坡度下土壤侵蚀强度的变化

3.3.1 海拔与土壤侵蚀 由于云龙县海拔跨度大,气候垂直差异明显,分析不同海拔带土壤侵蚀的分布情况,确定土壤侵蚀发生的重点海拔区域。将研究区划分为5个海拔梯度: <1500 、 $1500\sim2000$ 、 $2000\sim2500$ 、 $2500\sim3000$ 、 >3000 m。由图5可知,云龙县总体土壤侵蚀面积呈递减趋势,轻度及以上土壤侵蚀面积在海拔 $2000\sim2500$ m所占比例最大,其次是海拔 $2500\sim3000$ m,所占面积比例最小的是海拔 <1500 m,约占2.00%。2000—2020年海拔 <1500 、 $1500\sim2000$ 、 >3000 m轻度及以上土壤侵蚀面积比例变化不大,但也呈减小趋势;

海拔 $2000\sim2500$ 、 $2500\sim3000$ m所占比例呈断崖式下降,2020年与2000年相比,分别下降15.27%和13.81%,与县政府近年来积极开展天然林保护、森林生态效益补偿、退耕还林还草和植树造林等工程关系重大,生态保护修复工程的推进实施不仅保护云龙县的生态环境,而且还减少水土流失。

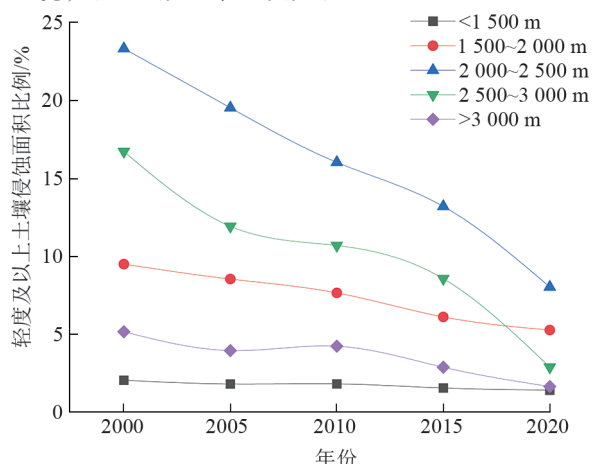


图5 2000—2020年不同海拔带轻度及以上土壤侵蚀面积比例变化

Fig. 5 Change of the proportion of area with mild and higher grades of soil erosion at different elevations from 2000 to 2020

从图6可以看出,在海拔 <2500 m的地区,各级土壤侵蚀强度都有分布,随着海拔的增高,微度侵蚀和轻度侵蚀所占各个海拔百分比达80%以上,部分原因是在低海拔地区,人口分布密集,人类为发展乱砍滥伐、毁林开荒和陡坡开垦,不合理利用土地资源,造成森林植被的减少,以及受开发修路建桥等基础设施建设的人为活动影响,土壤侵蚀强度相对较高。微度侵蚀随着海拔的增加而增加,但在海拔 >3000 m时有所减少,原因是在海拔 >3000 m的高山区,地势陡峭,人口分布较少,光热资源贫瘠,昼夜温差大,植被类型相对单一,坡面水土保持能力较弱,且高海拔地区夏季降雨充沛,受各种自然因素的影响更易产生水土流失。

3.3.2 坡度与土壤侵蚀 坡度是影响土壤侵蚀的重要因素,云龙县山高坡陡,地势较为陡峭,最高坡度达到 61° ,全县 $<15^\circ$ 的区域仅占21%,将坡度划分为5个等级: $0\sim15^\circ$ 、 $15^\circ\sim25^\circ$ 、 $25^\circ\sim35^\circ$ 、 $35^\circ\sim45^\circ$ 、 $>45^\circ$,得到各土壤侵蚀等级在不同坡度下的占比分布情况(图7)。结果表明,2000—2020年云龙县土壤侵蚀主要发生在 $>15^\circ$ 坡面上;微度侵蚀主要在 $0\sim25^\circ$ 分布,此区间占微度侵蚀总面积最多;轻度侵蚀和中度侵蚀主要在 $15^\circ\sim35^\circ$ 分布;强度侵蚀主要在 $25^\circ\sim45^\circ$ 分布,占强度侵蚀总面积75%;极强度侵蚀和剧烈侵蚀主要发生在 $>25^\circ$ 的坡面上,在 $35^\circ\sim45^\circ$ 占比最多。不

同坡度等级主导的侵蚀强度存在差异,随着坡度的增加,极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的平均占比也越来越多,

35°~45°面积占比达到45%以上。结果表明,随着坡度等级的增加,土壤侵蚀强度的等级也在增加。

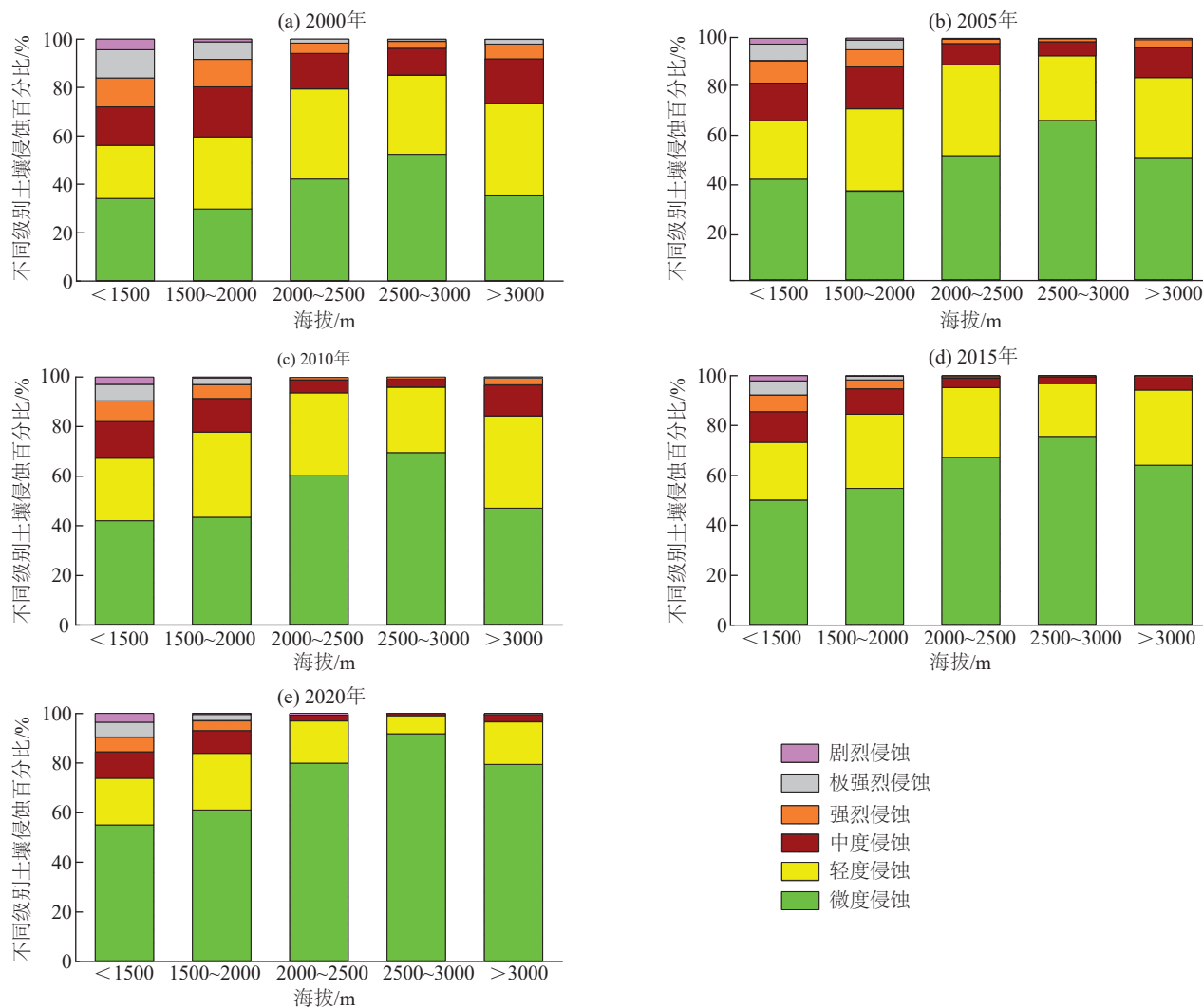


图 6 2000—2020 年各级海拔带土壤侵蚀百分比

Fig. 6 Percentages of soil erosion of each grade at different elevations from 2000 to 2020

对比不同坡度下平均土壤侵蚀模数变化情况(表 3)可知,2000—2020 年平均土壤侵蚀模数均随坡度等级的增加而增加,在 $>45^\circ$ 坡度带平均土壤侵蚀模数达到最大,坡度越陡,土壤越容易被破坏剥蚀,平均土壤侵蚀模数也越大,土壤侵蚀强度等级也越高;比较 2000 年和 2020 年的平均土壤侵蚀模数,在相同坡度下明显降低,且下降比例均 $>50\%$,2000—2020 年云龙县平均土壤侵蚀模数明显变小,2020 年各坡度带的平均土壤侵蚀模数均为 20 a 中最低。坡度通过改变坡面的产流条件,影响坡面土壤流失量,应将 25° 以上的耕地进行退耕还林还草,坡度 $<25^\circ$ 的区域通过工程措施进行微地形改造,调整耕地的坡度,将坡耕地变为梯田种植,控制土壤侵蚀的发生,降低土壤侵蚀强度和土壤侵蚀量,保护土地资源。

3.4 高原特色农业与土壤侵蚀

近年来,云龙县依托其独特的地理位置、立体气

候条件和自然资源大力发展高原特色农业,全县典型特色农业分别为苗尾乡麦地湾梨、关坪乡林下中药材、宝丰乡生态绿茶和漕涧镇的泡核桃等。土地利用类型的差异影响区域土壤侵蚀,不同特色农业的土壤侵蚀状况也存在差异,梳理归纳云龙县 4 个乡镇特色农业,初步整体分析在特色农业种植下对各乡镇土壤侵蚀产生的影响,对云龙县苗尾乡、关坪乡、宝丰乡和漕涧镇 2020 年各个等级土壤侵蚀强度面积进行统计,得到云龙县不同乡镇轻度及以上土壤侵蚀占各个乡镇总面积百分比(图 8)。

总体来看,苗尾乡的土壤侵蚀问题最严重,剧烈侵蚀面积占比最大,轻度及以上土壤侵蚀面积占比也最大。苗尾乡主要种植麦地湾梨,特点是特晚熟耐储存,种植麦地湾梨需要疏松透气、排水性强和有机质高的土壤,麦地湾梨地的植被覆盖度相对较小,且疏松透气的土壤比较容易造成水土流失;土壤侵蚀程度最小的

是漕涧镇,轻度及以上土壤侵蚀强度面积占比仅为 7.64%,泡核桃是高大的落叶乔木,根系发达固土能力强,泡核桃能够在山区干旱贫瘠的土壤中生长,可以跟各种灌木草本共同生长,植被覆盖度相对较高,泡核桃地的枯落物较多,可以延缓地表径流的产生,泡核桃地的水土保持能力更强;宝丰乡主要种植生态绿茶,土壤侵蚀强度较高,同样生态绿茶的种植条件也需要土壤土层湿润深厚,土壤土质疏松、有机质丰富和排水性良好,多雨湿润的气候条件有利于云龙绿茶生长,因此,

宝丰乡生态绿茶生长的气候土壤环境也容易造成水土流失;关坪乡微度和轻度侵蚀面积占比最多,水土流失情况不严重,关坪乡林地资源丰富适宜种植中药材,主要种植重楼、木香、金银花和续断等林下中药材。经研究分析,云龙县典型特色农业的水土保持能力总体表现为泡核桃>林下中药材>生态绿茶>麦地湾梨,未来应重点保护生态绿茶和麦地湾梨特色产业种植地的生态环境,立足资源优势的同时防控该区域水土流失,促进高原特色农业的可持续发展。

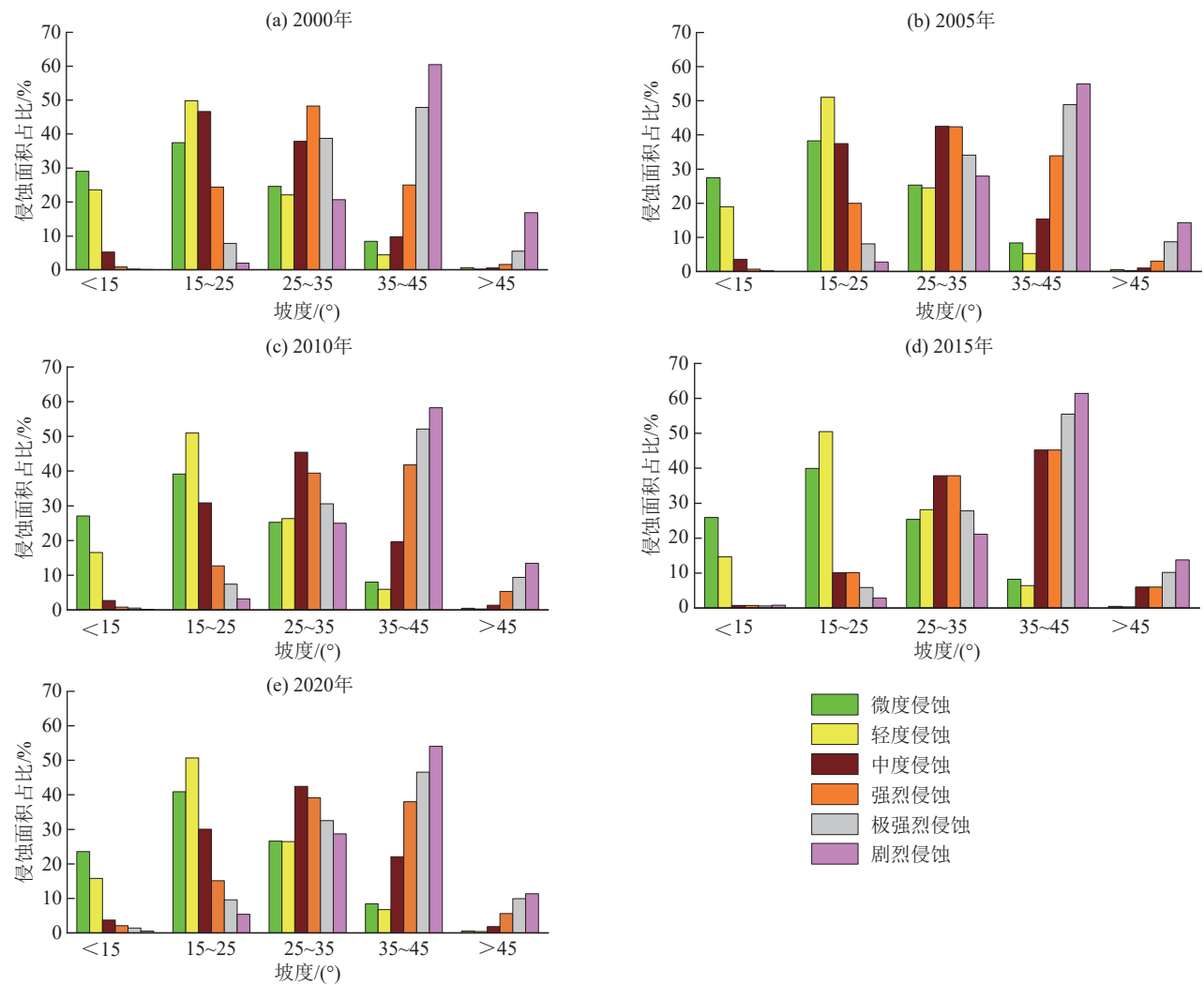


图 7 2000—2020 年不同坡度下土壤侵蚀强度分布

Fig. 7 Distribution of soil erosion intensity at different slopes from 2000 to 2020

表 3 2000—2020 年不同坡度平均土壤侵蚀模数变化

Table 3 Changes of average soil erosion modulus at different slopes from 2000 to 2020

坡度/(°)	面积/km ²	土壤侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)				
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
<15	914.79	440.95	306.92	249.53	182.93	136.06
15~25	1 770.91	1 389.55	933.75	717.06	535.69	347.23
25~35	1 160.69	2 107.41	1 359.52	1 089.93	815.68	560.43
35~45	392.06	3 498.72	2 266.51	2 014.03	1 550.81	1 238.46
>45	28.37	5 428.11	3 829.14	3 429.53	2 805.13	2 709.53

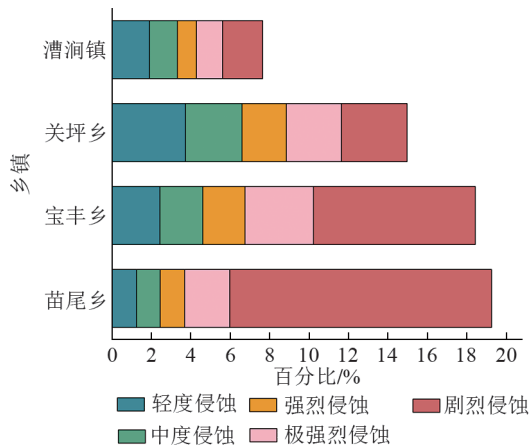


图 8 2020 年不同乡镇轻度及以上土壤侵蚀占各乡镇总面积百分比

Fig. 8 Percentages of area with mild and higher grades of soil erosion in the total area of different townships in 2020

3.5 土壤侵蚀驱动因子分析

3.5.1 因子探测器 利用因子探测器探究云龙县土

表 4 土壤侵蚀影响因子解释力

Table 4 Explanatory power of the influencing factors of soil erosion

驱动因子	海拔(X1)	坡度(X2)	多年平均降水量(X3)	植被覆盖度(X4)	土地利用类型(X5)
q	0.142 0	0.117 5	0.115 9	0.401 0	0.046 6
p	0	0	0	0	0

3.5.2 交互探测器 交互探测可以评估 2 种因子共同作用时对土壤侵蚀分布的影响是增强、削弱,还是相互独立^[37]。云龙县各因子通过交互探测器进行分析(图 9)可知,5 种因子间不存在独立作用,各因子间交互作用的驱动力均存在增强作用,双因子增强包括海拔∩植被覆盖度和海拔∩多年平均降水量,其他因子间的交互作用均为非线性增强。植被覆盖度∩坡度对云龙县土壤侵蚀的驱动力最大,为 0.82,其次是植被覆盖度与多年平均降水量,交互作用的解释力为 0.56。当陡坡的植被覆盖度较低,遇到降雨时,植被稀疏根系不发达,水源涵养能力有限,不能有效拦截地表径流和泥沙,土壤流失加剧;植被覆盖度与其他 4 种影响因子的交互作用驱动力 q 值均达 0.40 以上,大于其他 4 种影响因子之间交互作用的驱动力,植被覆盖度高的区域土壤侵蚀程度较低,植被覆盖度与土壤侵蚀呈负相关。海拔、坡度、年平均降水量和土地利用类型与植被覆盖度共同作用时驱动力均出现增强,但单独作用时驱动力却不高。植被覆盖度与地形环境因子共同作用时比其单独作用时驱动力更高的原因是海拔、坡度和降水量的变化均可直接影响植物生长发育,且地表植被能够抑制土壤侵蚀的发生。

壤侵蚀影响因子的驱动力(表 4)。各影响因子的驱动力存在差异, q 值越小,说明因子对土壤侵蚀空间分异性的驱动力越弱,反之亦然。所选 5 个影响因子 $p < 0.05$,都通过显著性检验,影响因子驱动力最大的是植被覆盖度, q 值为 0.401 0,其他因素从大到小分别为海拔、坡度、多年平均降水量和土地利用类型。植被覆盖度的驱动力最强,在单因子驱动土壤侵蚀方面具有显著效应,说明植被的覆盖度对土壤侵蚀空间分布起显著作用。土壤侵蚀的主要影响因子也包括海拔、坡度、多年平均降水量和土地利用类型,云龙县海拔落差大,陡坡较多,夏季易出现降雨时间长强度大的暴雨,降雨时空分布不均,容易加大土壤侵蚀的面积和加深侵蚀的程度;海拔、坡度、多年平均降水量和植被覆盖度 4 个因子的驱动力 q 值都 > 0.10 ,而土地利用类型的驱动力最弱, q 值 < 0.05 。可知土壤侵蚀空间分布格局变化的主要驱动因素包括地形因子和环境因子,人为因子影响较小。

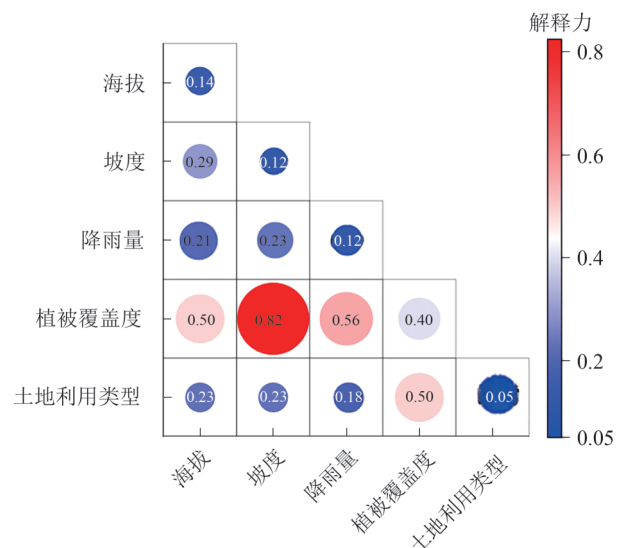


图 9 交互探测器结果

Fig. 9 Results of the interactive detector

4 讨论

云龙县位于云南省西北部,地形地貌复杂多样,属于生态环境敏感脆弱的高山峡谷区,是我国生态屏障的重要组成部分。全县贫困人口多,受教育程度普遍较低,整体劳动素质不高,为追求短期效益过度开垦、放牧,破坏生态环境,水土流失现象严重,对水土保持的认识不足,水土保持任务艰巨。研究云龙县土

壤侵蚀时空变化特征、影响因素和特色农业区的土壤侵蚀状况,对发展高山峡谷区特色农业、保护利用自然资源和防治水土流失都具有非常重要的意义。云龙县2000—2020年土壤侵蚀状况整体得到有效遏制,2020年平均土壤侵蚀模数与2000年相比较下降71.59%,研究期间低等级侵蚀相对稳定,高等级侵蚀变化较大,土壤侵蚀状况得到改善的面积多于恶化的面积,全县土壤侵蚀强度从轻度侵蚀变为微度侵蚀,水土流失面积和强度也逐年减小,说明研究区退耕还林政策、公益林生态补偿项目和陡坡地生态治理项目等政策实施效果较好。海拔和坡度是影响云龙县土壤侵蚀的重要因素,海拔2 000~3 000 m和坡度 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 是土壤侵蚀发生的重点区域,坡度越陡,越容易发生侵蚀现象,侵蚀强度等级也越高。良好的生态环境是高原山区特色农业可持续发展的基础,土壤侵蚀是制约高原山区特色农业发展的重要原因之一,分析高原特色农业与土壤侵蚀的关系,能够为更好地构建适宜当地实际情况的水土保持型特色农业发展模式提供理论基础,为农民增加收入和促进高原山区经济发展提供方向。影响云龙县土壤侵蚀的因子较多,植被覆盖度对研究区土壤侵蚀的影响程度最大,海拔、坡度和降水量次之,人为因子对云龙县土壤侵蚀的影响较少,且地形环境因子叠加驱动力均增强,植被覆盖度 $\cap$ 坡度解释力最强。地表植被不仅可以拦截降雨、减少地表径流,还能提高下垫面的抗冲刷能力,保持水土资源,减缓土壤侵蚀的产生。掌握云龙县土壤侵蚀的变化规律、驱动因素和特色农业区的土壤侵蚀状况能够为云龙县的水土保持工作和特色农业发展提供方向,因此在今后开展水土保持工作时,遵循自然客观规律,宜林则林,宜农则农,宜草则草,重点改善下垫面植被覆盖情况,对坡面进行微地形改造,减轻坡面因降雨分布不均导致的土壤侵蚀,加强海拔2 000~2 500 m、坡度 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 和植被覆盖度较低区域的水土流失治理。生态绿茶和麦地湾梨种植区域的土壤侵蚀情况较严重,应重点关注该区域的水土保持防治工作,政府部门应加大对农业生态环境的监督管理力度,加大对群众宣传特色农业种植区水土保持重要性的力度,强化水土保持意识,减少因人为措施导致的农业水土流失。

本研究采用RUSLE模型,其各因子在选择不同的计算方法中会产生误差,降雨侵蚀力因子的计算未选择精度较高的日降雨模型,且未考虑1 km分辨率的降雨数据,不能准确反映云龙县高山区的降雨特征,总体上计算精度还不够。今后研究中应采用更高分辨率的日降雨数据计算降雨侵蚀力因子,提高计算精

度。文中只简单探讨特色农业差异对区域土壤侵蚀产生的影响,并未深入研究区域其他因素对土壤侵蚀的影响;在结果验证方面也存在不足。本文将云龙县2015年土壤侵蚀强度模拟计算结果与《云南省2015年土壤侵蚀调查报告》^[34]和《云南省土壤侵蚀地图集》^[35]进行简单的对比验证,不够充分完整。在后续相关研究中,应收集云龙县径流小区土壤侵蚀的实测数据,将实测数据与模拟数据进行对比验证,并根据收集到的实测数据对RUSLE模型的各个因子进行有效修正,提高模型在高原山区应用的准确性和可信度。

5 结论

1) 云龙县多年平均土壤侵蚀总量为 4.09×10^6 t/a,平均侵蚀模数为947 t/($\text{km}^2\cdot\text{a}$),总体属于轻度侵蚀,2000—2020年每隔5 a 5期平均侵蚀模数分别为1 644、1 085、878、661、467 t/($\text{km}^2\cdot\text{a}$)。

2) 2000—2020年云龙县土壤侵蚀得到改善的区域面积占比约为48.45%,土壤侵蚀程度加重面积占比为4.23%,未发生改变的区域面积占比约为47.32%,整体呈侵蚀等级下降好转的趋势。

3) 云龙县土壤侵蚀发生的重点区域在海拔2 000~2 500 m、坡度 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 及植被覆盖度较低的区域。

4) 云龙县典型特色农业的水土保持能力总体表现为泡核桃>林下中药材>生态绿茶>麦地湾梨。

5) 土壤侵蚀强度影响因子的驱动力从大到小分别为植被覆盖度、海拔、坡度、多年平均降水量、土地利用类型, q 值分别为0.401 0、0.142 0、0.117 5、0.115 9、0.046 6;植被覆盖度和坡度之间交互作用对土壤侵蚀的驱动力最大为0.82,其次是植被覆盖度与多年平均降水量交互作用的驱动力为0.56。

参考文献:

- [1] 刘璐,郭月峰,姚云峰,等.十大孔兑上游土壤侵蚀空间分布及动态变化[J].水土保持研究,2021,28(4):34-41.
LIU L, GUO Y F, YAO Y F, et al. Spatial distribution and dynamic change of soil erosion in ten tributaries[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 34-41.
- [2] FAYAS C M, ABEYSINGHA N S, NIRMANE 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.
- [3] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. Nature Communications, 2017, 8(1):e2013.
- [4] CHI W F, ZHAO Y Y, KUANG W H, et al. Impact of

- cropland evolution on soil wind erosion in Inner Mongolia of China[J]. *Land*, 2021, 10(6): e583.
- [5] 赵蒙恩, 闫庆武, 刘政婷, 等. 鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(6): 1819-1831.
- ZHAO M E, YAN Q W, LIU Z T, et al. Analysis of temporal and spatial evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(6): 1819-1831.
- [6] ALEWELL C, MEUSBURGER K, BRODBECK M, et al. Methods to describe and predict soil erosion in mountain regions[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 88(2/3/4): 46-53.
- [7] 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 R E, QI S, LAI J L, 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.
- [8] 金丽娟, 许泉立. 基于 RUSLE 模型的四川省土壤侵蚀敏感性评价及时空演化分析[J]. *生态科学*, 2023, 42(6): 19-32.
- JIN L J, XU Q L. Sensitivity assessment of soil erosion and its spatio-temporal evolution analysis in Sichuan province based on RUSLE[J]. *Ecological Science*, 2023, 42(6): 19-32.
- [9] 彭双云, 杨昆, 洪亮, 等. 基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 138-146.
- PENG S Y, YANG K, HONG L, et al. Spatio-temporal evolution analysis of soil erosion based on USLE model in Dianchi Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(10): 138-146.
- [10] 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.
- [11] 王志杰, 柳书俊, 苏娜. 喀斯特高原山地贵阳市 2008—2018 年土壤侵蚀时空特征与侵蚀热点变化分析[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 94-102.
- WANG Z J, LIU S J, SU Y. Spatial-temporal characteristics of soil erosion and erosion hotspots in Guiyang City of Karst Plateau mountainous region in 2008—2018[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 94-102.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 赵杰翔. 以盐为媒: 对云南省云龙县盐业发展与民族交往交流交融的历史考察[J]. *中央民族大学学报(哲学社会科学版)*, 2023, 50(5): 156-166.
- ZHAO J X. Salt as a medium: A historical investigation of the development of the salt industry and ethnic exchanges and integration in Yunlong County, Yunnan Province[J]. *Journal of Minzu University of China (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2023, 50(5): 156-166.
- [14] 钟宁桦, 连方舟, 解咪, 等. 产业与就业的结构性失衡: 基于滇西边境山区云龙县的案例分析[J]. *中国软科学*, 2022(9): 39-49.
- ZHONG N H, LIAN F Z, XIE M, et al. Structural imbalance between industry and employment—Based on the case analysis of Yunlong County in western Yunnan [J]. *China Soft Science*, 2022(9): 39-49.
- [15] 陈林杨, 蒙真铖, 尹志洪, 等. 云南大理云龙县药用植物多样性研究[J]. *中药材*, 2023, 46(4): 835-840.
- CHEN L Y, MENG Z C, YIN Z H, et al. Study on diversity of medicinal plants in Yunlong County, Dali, Yunnan [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2023, 46(4): 835-840.
- [16] 苏跃龙. 云南省大理州云龙县区域概况、区域污染现状及防治对策研究[J]. *低碳世界*, 2022, 12(2): 16-18.
- SU Y L. Study on regional survey, current situation of regional pollution and prevention countermeasures in Yunlong County, Dali Prefecture, Yunnan Province [J]. *Low Carbon World*, 2022, 12(2): 16-18.
- [17] 董锐宽. 云南云龙县白芸豆种植生产现状、存在问题与发展建议[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(25): 115-116.
- DONG R K. Present situation, existing problems and development suggestions of white kidney bean planting and production in Yunlong County, Yunnan Province [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2023, 43(25): 115-116.
- [18] 王洁青, 周训, 李晓露, 等. 云南兰坪盆地羊吃蜜温泉水化学特征与成因分析[J]. *现代地质*, 2017, 31(4): 822-831.
- WANG J Q, ZHOU X, LI X L, et al. Hydrochemistry and formation of the yangchimi hot spring in the Lanping Basin of Yunnan [J]. *Geoscience*, 2017, 31(4): 822-831.
- [19] YODER D, LOWN J. The future of RUSLE: Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50: 484-489.
- [20] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 147-154.
- LI G F, ZHENG F L, LU J, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural*

- Machinery, 2015, 46(4): 147-154.
- [21] EFTHIMIOU N. Evaluating the performance of different empirical rainfall erosivity (R) factor formulas using sediment yield measurements[J]. Catena, 2018, 169: 195-208.
- [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] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193.
- [24] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 209-219.
- CHEN Z F, SHI D M, HE W, et al. Spatial-temporal distribution and trend of rainfall erosivity in Yunnan Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 209-219.
- [25] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A system of erosion-sediment yield models[J]. Soil Technology, 1997, 11(1): 43-55.
- [26] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- ZHANG K L, PENG W Y, YANG H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 7-13.
- [27] 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.
- [28] 刘斌涛, 宋春风, 史展, 等. 西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J]. 中国水土保持, 2015(8): 49-51.
- LIU B T, SONG C F, SHI Z, et al. Correction algorithm of slope factor in universal soil loss equation in earth-rocky mountain area of Southwest China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(8): 49-51.
- [29] 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.
- [30] 魏健美, 李常斌, 武磊, 等. 基于USLE的甘南川西北土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 31-37.
- WEI J M, LI C B, WU L, et al. Study on soil erosion in northwestern Sichuan and southern Gansu (NSSG) based on USLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 31-37.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.
- PENG W F, ZHANG D M, LUO Y M, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1758-1776.
- [34] 云南省水利厅. 云南省2015年水土流失调查结果[EB/OL]. (2017-05-16)[2024-08-25]. https://wcb.yn.gov.cn/html/2017/zuixingonggao_0516/40493.html.
- Yunnan Provincial Water Resources Bureau. Soil and water loss survey results in Yunnan Province in 2015 [EB/OL]. (2017-05-16)[2024-08-25]. https://wcb.yn.gov.cn/html/2017/zuixingonggao_0516/40493.html.
- [35] 云南省水利水电科学研究院. 云南省土壤侵蚀地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2020.
- Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Science. Soil erosion atlas of Yunnan Province [M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2020.
- [36] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—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: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [37] 张自正, 张蕾, 孙桂英, 等. 清江流域生态系统服务权衡时空效应及驱动因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 1051-1062.
- ZHANG Z Z, ZHANG L, SUN G Y, et al. Spatial and temporal effect and driving factors of ecosystem service trade-off in the Qingjiang River Basin, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 1051-1062.