

福贡县土壤侵蚀时空变化及其影响因素分析

李益敏^{1,2}, 刘师旂¹, 李盈盈¹, 吴博闻¹, 计培琨¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心, 昆明 650500)

摘要:开展福贡县土壤侵蚀时空动态变化分析,对当地的水土流失防治和国土空间规划具有重要意义。研究基于降雨、土地利用、土壤和植被覆盖度等数据,采用 GIS 技术和 RUSLE 模型分析了福贡县 2002 年、2010 年和 2018 年的土壤侵蚀时空变化和影响因素。结果表明:(1) 福贡县土壤侵蚀强度主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主;2002—2010—2018 年平均土壤侵蚀模数不断下降,微度侵蚀面积不断增加,福贡县土壤侵蚀状况呈现改善趋势;(2) 福贡县土壤侵蚀严重区主要分布在怒江两岸,近 16 a 福贡县 74.73% 以上的区域土壤侵蚀强度未发生改变,整体好转,表明退耕还林等工程实施对抑制土壤侵蚀强度有一定效果;(3) 土地利用类型是福贡县土壤侵蚀的主要影响因子;各因子解释力的大小依次为:土地利用类型、植被覆盖度、年均降雨量、海拔、坡度。海拔 1 005~1 523 m、坡度 $>35^{\circ}$ 、年均降雨量 1 482~1 671 mm、植被覆盖度 <0.3 、土地利用类型为未利用地的区域被识别为高风险侵蚀区。结合福贡县实际,坡耕地应为福贡县土壤侵蚀治理的重点区域。

关键词:土壤侵蚀; RUSLE 模型; 地理探测器; 福贡县

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0057-07

Spatiotemporal Changes and Influencing Factors of Soil Erosion in Fugong County Based on GIS

LI Yimin^{1,2}, LIU Shiyi¹, LI Yingying¹, WU Bowen¹, JI Peikun¹

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Research Center of Domestic High-Resolution Satellite Remote Sensing Geological Engineering, Kunming 650500, China)

Abstract: Carrying out the analysis of the temporal and spatial dynamics of soil erosion in Fugong County is of great significance to the local soil erosion control, ecological environment construction, and land and space planning. Based on rainfall, land use, soil and vegetation coverage data, GIS technology and the RUSLE model were used to calculate the spatiotemporal changes of soil erosion in Fugong County in 2002, 2010 and 2018, and to analyze the influencing factors. The results show that: (1) the soil erosion intensities in Fugong County were mainly micro-erosion and light-erosion which accounted for more than 91% of the total area of the study area; the average soil erosion modulus from 2002 to 2010 to 2018 continued to decline, the slightly eroded area continued to increase, and the soil erosion situation in Fugong County was showing an improvement trend; (2) the severe soil erosion areas in Fugong County mainly distributed on both banks of the Salween River; in the past 16 years, more than 74% of the areas in Fugong County had not changed the soil erosion intensity; the overall improvement had shown that the implementation of projects such as returning farmland to forests had a certain effect on suppressing soil erosion intensity; (3) land use type was the dominant factor on the spatial distribution of soil erosion in Fugong County; the explanatory power of each factor decreased in order: land use type $>$ vegetation coverage $>$ average annual rainfall $>$ Altitude $>$ slope; the q value of the land use type factor was the largest, which was the dominant factor in the spatial distribution of soil erosion in Fugong County; areas with an altitude of 1 005~1 523 m, a slope of $>35^{\circ}$, an average annual rainfall of 1 482~1 671 mm, a vegetation coverage of <0.3 , and an unused land use type were identified as

收稿日期:2021-04-29

修回日期:2021-06-01

资助项目:云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目(2019FY003017);云南大学大湄公河次区域气候变化研究省创新团队项目(2019HC027)

第一作者:李益敏(1965—),女(白族),云南昆明人,研究员,主要从事 3S 技术在山地资源环境和地质灾害中的应用研究。E-mail:648119611@qq.com

high-risk erosion areas. Based on the actual situation of Fugong County, sloping farmland should be a key area for soil erosion control in Fugong County.

Keywords:soil erosion; RUSLE model; geographical detector; Fugong County

土壤侵蚀是当前改变地貌景观的主要过程^[1-2]。水土流失使土质变差,土地退化,农业减产,加剧崩滑流地质灾害隐患发生,威胁生态环境和人类居住安全。中国是土壤侵蚀最严重的国家之一,土壤流失面积广、侵蚀程度深。据水利部公布的 2019 年全国水土流失动态监测结果,全国土壤侵蚀面积达 271.08 万 km²,主要以水蚀和风蚀为主,西部地区水土流失最为严重,约占全国总水土流失面积的 4/5^[3]。目前土壤侵蚀研究以定量评价为主,研究主要集中在坡面、流域和区域 3 个尺度上;模型主要包括经验模型和物理模型,物理模型有水蚀预报模型(WEPP)^[4]和欧洲水蚀预报模型(EROSEM)等^[5]。由于物理模型中的参数获取困难,以经验模型应用较多。运用广泛的经验模型是通用土壤流失方程(USLE)和修正的通用水土流失方程(RUSLE)^[6]。国内学者结合不同研究区域特点对 RUSLE 公式进行适当修正使其本地化^[7-8],典型且应用广泛的是刘宝元的 CLSE 模型^[9]。RUSLE 因其考虑影响因子全面、模型简单和所需数据易获取等特点受到国内外众多学者的青睐,已在中国多个地区开展相关研究并取得良好效果,如长江中下游地区^[10]、黄土高原地区^[11]、喀斯特地区^[12]和滇南山区^[13]。在土壤侵蚀影响因素研究方面,地理探测器是当前运用较为广泛的方法之一^[14-15]。地理探测器不仅可以揭示地理现象背后的驱动因子,也可以识别出地理现象的高风险区。

福贡县位于滇西北高山峡谷地区,地处气候交接区域和地震多发区,具有明显的脆弱特征^[16]。关于福贡县土壤侵蚀资料主要从云南省土壤侵蚀成果中获得^[17],难以反映小区域土壤侵蚀特征。本文以福贡县为研究区,基于福贡县 2002 年、2010 年、2018 年的遥感影像和降雨等数据,运用 RUSLE 模型开展福贡县土壤侵蚀的时空变化及其影响因子研究,并利用地理探测器探讨其驱动力因素。研究结果可为福贡县土壤侵蚀防治、生态修复、退耕还林等措施提供科学依据,也可以为国土空间合理规划提供参考。

1 研究区概况

福贡县隶属云南省怒江傈僳族自治州,地理坐标为东经 98°41′—99°02′,北纬 26°28′—27°32′,辖 1 镇 6 乡,县政府驻上帕镇(图 1)。国际河流怒江贯穿全境,境内流程 128 km。研究区为高山峡谷地区,全境为

狭长的高山峡谷地貌,地形起伏大,最高海拔 4 304 m,最低海拔 1 005 m,海拔高差达 3 299 m,地势东西高中间低,南北方向形成一个 V 字形。福贡县土壤具有垂直分布特征,除黄红壤、棕壤等常见土壤外,还有高海拔区域特有的高山灌丛草甸土。福贡县自然资源丰富,动植物种类繁多,受印度洋季风气候和太平洋季风气候以及海拔高差和复杂地形环境的影响,境内气候差异显著且存在春季和夏秋两个雨季。福贡县土层疏松,地质灾害频发,耕地、道路和桥梁受地质灾害影响严重^[18];陡坡开垦、采石、矿产资源开垦导致自然灾害频发,水土流失面积扩大,生态环境变差,阻碍当地经济发展^[19]。

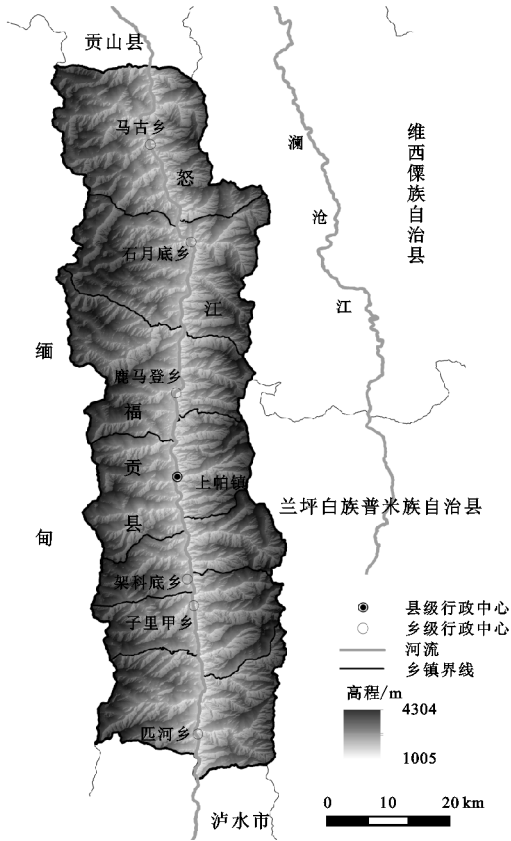


图 1 研究区区位

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

降雨数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);遥感数据来源于 2002 年、2010 年和 2018 年的 Landsat TM/OIL 影像,均为 1—2 月数据;土壤质地类型数据来源于世界土壤数据库(HWSD),数据含有土壤粉砂以及有机

碳含量等信息;NDVI 数据来源于 MOD13Q1 数据产品 (<https://lpdaac.usgs.gov>),选取 2002 年、2010 年和 2018 年 1—12 月的数据采用最大值合成法生成;数字高程模型(DEM)来源于 ASTER GDEM V2 全球数字高程数据,分辨率为 30 m;土地利用数据是遥感影像经过辐射定标、几何校正后解译得到,对解译结果进行了野外验证。先从解译结果中随机选取 50 个样本点,到实地检验土地利用样本点准确度。验证精度达 84%,精度符合要求。其中,Landsat 遥感影像和数字高程模型数据来源于地理空间数据(<http://www.gscloud.cn/>)。所有数据栅格大小均统一为 30 m,坐标统一为:WGS_1984_UTM_47N。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤侵蚀模数计算 土壤侵蚀的预测方法很多,本文采用 RUSLE 模型计算土壤侵蚀模数和侵蚀量。其公式为:

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

式中: A 是土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 是降雨侵蚀因子 [$(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 是土壤可蚀性因子 [$(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)$]; LS 是地形因子; C 是植被覆盖因子; P 是水土保持措施因子;其中, LS , C 和 P 因子无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。 R 因子表征降雨引发土壤侵蚀现象的潜力。本研究采用杨子生^[20]在云南金沙江流域土壤侵蚀计算中修订的 R 因子计算方法。公式如下:

$$R = 0.44488M^{0.96982} \quad (2)$$

式中: M 为年降雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。 K 因子指土壤对侵蚀敏感程度水平。一般认为,质地越粗糙或者越细腻的土壤最不容易被侵蚀,质地处于中间水平程度的土壤最易受到侵蚀^[21]。公式选择 Williams 在 EPIC 模型中的方法^[22],如下:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1 - \frac{\text{SIL}}{100})]\} \\ (\frac{\text{SIL}}{\text{CAL} + \text{SIL}})^{0.3} [1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}] \\ [1.0 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})}] \quad (3)$$

式中:SAN 表示的是砂粒含量(%);SIL 是粉粒含量(%);CAL 是黏粒含量(%); C 是土壤有机碳含量%; $\text{SN1} = 1 - \frac{\text{SAN}}{100}$ 。根据前人的研究成果^[23],计算得到的 K 值为美制单位,需进行单位系数转换计算,将 K 值单位由美制单位转换为国际制单位

($K_{\text{国}}$)。单位转换系数为:

$$K_{\text{国}} = 0.1317K_{\text{美}} \quad (4)$$

式中: $K_{\text{国}}$ 为国际制单位 K 值; $K_{\text{美}}$ 为美制单位 K 值。

(3) 坡长坡度因子(LS)。 LS 是由 L (坡长)和 S (坡度)因子相乘得到,对土壤侵蚀起加速作用。坡长坡度因子值相对稳定。由于研究区位于西南土石山区,采用 McCool 等^[24] 和刘斌涛等^[25] 的计算方法计算坡度坡长因子,核心算法为:

$$L = (\frac{\gamma}{22.13})^m \quad (5)$$

$$\text{其中:} \begin{cases} m=0.5 & \alpha \geq 9\% \\ m=0.4 & 9\% > \alpha \geq 3\% \\ m=0.3 & 3\% > \alpha \geq 1\% \\ m=0.2 & 1\% > \alpha \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin(\theta) + 0.03 & \theta \leq 5^\circ \\ 16.8\sin(\theta) - 0.5 & 5^\circ < \theta \leq 10^\circ \\ 20.204\sin(\theta) - 1.2404 & 10^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ 29.585\sin(\theta) - 5.6079 & \theta > 25^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中: γ 是坡长; m 无量纲,其值取决于坡度的百分比值; θ 为坡度($^\circ$)。

(4) 植被覆盖因子(C)。 土壤侵蚀与植被覆盖度有直接的关系,植被覆盖因子取值范围为 0~1,无量纲。本文采用蔡崇法等^[26] 的方法来计算植被覆盖因子,修改公式如下:

$$C = \begin{cases} 1 & F < 10\% \\ 0.6508 - 0.3436 \lg F & 10\% \leq F < 78.3\% \\ 0 & F \geq 78.3\% \end{cases} \quad (7)$$

式中的植被覆盖度 F 由 NDVI (归一化植被指数)得到,公式如下:

$$F = \frac{(\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min})}{(\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})} \quad (8)$$

(5) 水土保持措施因子(P)。 水土保持措施因子衡量土地类型是否采取水土保持措施标准,取值范围为 0~1,不会产生土壤侵蚀的区域取 0,无任何水土保持措施的区域取 1。根据实地调查,结合前人的研究^[27],获取不同土地利用类型的水土保持措施因子值,见表 1。

2.2.2 地理探测器 地理探测器是 Wang Jinfeng^[28-29] 基于空间方差理论提出的一种分析地理现象空间异质性的新统计学方法;该模型最大的特征为无假设条件,能避免人为主观性的影响,能有效识别多因子间的关系。本文主要利用地理探测器中的因子探测器、风险探测器和交互作用探测器这 3 个模块对可能影响福贡县土壤侵蚀的 5 类因子(年

均降雨量、海拔、坡度、植被覆盖度和土地利用类型)进行定量分析。因子探测器用因子解释力(q 值)来量化 M 对属性 N 的解释程度,其值为 $0\sim 1$,数值越大说明影响因子对土壤侵蚀的解释力越强; p 值是用来判断各因子是否通过显著性检验, $p<0.05$,因子通过显著性检验;交互作用探测器是判别土壤侵蚀两个影响因子间的作用,可通过比较单一因子和多因子间的 q 值来衡量其对土壤侵蚀的影响程度;在土壤侵蚀研究中风险探测器主要用来确定易发生土壤侵蚀的影响因子数值范围。根据前人的研究^[14,29-30],将上

表 1 不同土地类型水土保持措施因子

土地利用类型	草地	耕地	林地	水体	建设用地	未利用土地	冰雪覆盖地
P	1	0.55	1	0	0	1	0

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀时空变化分析

将上述得到的土壤侵蚀各因子进行计算得到福贡县土壤侵蚀模数。福贡县平均土壤侵蚀模数为 $10.71\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,平均土壤侵蚀量为 $2.952\text{ 1}\times 10^4\text{ t}$ 。根据我国土壤侵蚀标准^[31]对福贡县土壤侵蚀强度进行分级,分别统计 3 个时期的土壤侵蚀模数平均数值、土壤侵蚀面积(表 2)。结果表明,福贡县主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,土壤侵蚀强度分布广且程度较低,3 个时期研究区的微度侵蚀和轻度侵蚀面积均占研究区土壤侵蚀强度总面积的 91%以上;中度侵蚀以上等级占土壤侵蚀强度总面积的 1%~3%;土壤侵蚀状况较轻。该区域 2002 年、2010 年和 2018 年年均土壤侵蚀模数呈现持续下降趋势,分别为 $14.39,9.12,8.62\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。2002—2018 年福贡县土壤侵蚀不同强度面积变化显著。2002 年、2010 年和 2018 年微度侵蚀面积从 1 670.23 km^2 增加至 $1\text{ 724.71 km}^2,1\text{ 933.44 km}^2$,轻度侵蚀从 846.85 km^2 下降到 $821.51\text{ km}^2,622.48\text{ km}^2$,轻度侵蚀、中度侵蚀和剧烈侵蚀面积减少趋势明显,高等级侵蚀向低等级侵蚀不断转移;强烈侵蚀和极强烈侵蚀面积先升后降。总体来看,福贡县土壤侵蚀强度以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,年均侵蚀模数逐渐变小,轻度、中度和剧烈侵蚀面积近 16 a 来明显下降;表明福贡县土壤侵蚀状况出现好转,这与国家退耕还林还草工程和国家生态文明建设息息相关。

2002—2018 年,福贡县土壤侵蚀空间分布格局大致相似,但局部差异明显(图 2)。从土壤侵蚀强度分布看,福贡县土壤侵蚀严重的地方主要分布在怒江两岸,以极强烈侵蚀和剧烈侵蚀为主,2002—2018 年怒江两岸土壤侵蚀得到缓解,图斑呈现细小化,怒江两岸北部地区极

述 5 类因子进行离散化处理,将年均降雨量和海拔用自然间断法分为 9 类,坡度分为 8 类($<5^\circ,5^\circ\sim 10^\circ,10^\circ\sim 15^\circ,15^\circ\sim 20^\circ,20^\circ\sim 25^\circ,25^\circ\sim 30^\circ,30^\circ\sim 35^\circ,>35^\circ$),植被覆盖度分成 8 类($<0.3,0.3\sim 0.4,0.4\sim 0.5,0.5\sim 0.6,0.6\sim 0.7,0.7\sim 0.8,0.8\sim 0.9,0.9\sim 1.0$),土地利用类型按照类别进行划分,为林地、草地、耕地、建设用地、水体、冰雪覆盖地、未利用土地。在 ArcGIS 中使用渔网工具对研究区进行网格划分,采样间距为 500 m,剔除异常值后共选取 14 191 个点作为计算数据。

强烈和剧烈侵蚀已基本转化为中度侵蚀以下,中南部地区还存在大面积高等级侵蚀。上帕镇以北地区人口约占福贡县总人口的 30%,人类生产活动相较于南部(匹河乡、子里甲乡、架科底乡和上帕镇)不太活跃;对各乡镇耕地面积进行统计,北部耕地面积占总耕地的 36.39%,南部耕地占总耕地的 63.61%;人类活动的活跃会加重土壤侵蚀现象。东、西部高海拔地区存在小面积高等级侵蚀,通过叠加谷歌影像可知,土壤侵蚀强度大的高海拔地区多为冰川覆盖地和荒草地交界处,这些地方坡陡,植被覆盖度低,且受到全球气候变暖影响,冰川消融后原冰川地类转化为裸土岩或荒草地,易造成土壤侵蚀加重现象。

表 2 不同年份土壤侵蚀强度面积

侵蚀强度	2002 年	2010 年	2018 年
	面积/ km^2	面积/ km^2	面积/ km^2
微度侵蚀	1 670.23	1 724.71	1 933.44
轻度侵蚀	846.85	821.51	622.48
中度侵蚀	83.76	55.93	68.88
强烈侵蚀	26.21	38.73	33.37
极强烈侵蚀	45.02	74.67	64.70
剧烈侵蚀	84.37	40.89	33.57
年均侵蚀模数/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	14.39	9.12	8.62

为了更好地揭示福贡县土壤侵蚀空间变化,通过 ArcGIS 的空间叠加分析得到福贡县土壤侵蚀强度时空变化转移矩阵表(表 3)。2002—2010 年土壤侵蚀在微、轻和中度侵蚀强度间转化明显,有 210.78 km^2 的轻度侵蚀转化为微度侵蚀, 26.11 km^2 的中度侵蚀向轻度侵蚀转化;低侵蚀强度转化为高侵蚀强度的面积为 278.80 km^2 ,高侵蚀强度转化为低侵蚀强度的面积为 384.01 km^2 。2010—2018 年土壤侵蚀强度的转化和 2002—2010 年相似,有 316.78 km^2 的轻度侵

蚀面积向微度侵蚀转化;低侵蚀强度转化为高侵蚀强度的面积为 236.69 km²,高侵蚀强度转化为低侵蚀强度的面积为 449.37 km²。2002—2010 年强烈侵蚀和极强烈侵蚀强度面积增加 42.17 km²,增幅达 59.20%;通过对强烈和极强烈侵蚀中各地类所占面积比重进行统计,发现强烈和极强烈侵蚀等级中耕地是所有土地利用类型中面积占比最多的地类。

叠加土地利用类型图、坡度图以及这两个土壤侵蚀等级分布图进行统计后得到图 3。由图可知:坡度>25°的耕地在强烈侵蚀和极强烈侵蚀中的面积变化主导着强烈侵蚀和极强烈侵蚀整体面积变化。坡度>25°的耕地中侵蚀等级的差异性主要受到所在区域的降雨、耕作水平、耕作方式和作物类型的影响。总体来看,2002—2018 年 74.73%以上的区域土壤侵蚀强度没有变化;低侵蚀强度转化为高侵蚀强度的比率小于高侵蚀强度转化为低侵蚀强度,侵蚀强度的转化主要集中在微度、轻度和中度。

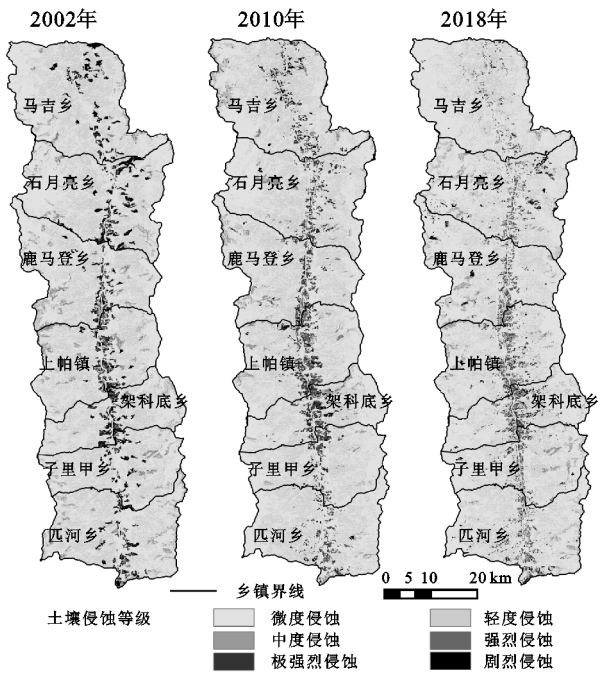


图 2 2002—2018 年福贡县土壤侵蚀强度空间分布

表 3 2002—2010 年、2010—2018 年、2002—2018 年福贡县土壤侵蚀强度转移矩阵							km ²
时期	侵蚀程度	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
2002—2010 年	微度侵蚀	1425.21	153.10	26.13	14.77	36.08	14.94
	轻度侵蚀	210.78	610.37	9.89	3.44	1.89	10.48
	中度侵蚀	39.82	26.11	14.35	1.94	0.31	1.23
	强烈侵蚀	4.45	5.80	2.74	10.33	2.61	0.28
	极强烈侵蚀	13.08	0.63	1.72	6.76	21.12	1.71
	剧烈侵蚀	31.37	25.50	1.10	1.49	12.66	12.25
2010—2018 年	微度侵蚀	1539.72	123.52	23.98	8.50	19.24	9.75
	轻度侵蚀	316.78	464.57	22.91	2.68	3.83	10.74
	中度侵蚀	20.85	15.99	14.23	1.99	1.63	1.24
	强烈侵蚀	12.55	4.29	4.65	12.49	4.05	0.70
	极强烈侵蚀	31.48	2.32	1.55	7.23	30.16	1.93
	剧烈侵蚀	12.06	11.79	1.56	0.48	5.79	9.21
2002—2018 年	微度侵蚀	1510.97	88.58	20.26	11.85	26.80	11.77
	轻度侵蚀	333.77	485.32	13.12	1.67	3.19	9.78
	中度侵蚀	35.60	17.69	27.15	1.02	0.78	1.52
	强烈侵蚀	5.82	3.64	5.49	9.64	1.34	0.28
	极强烈侵蚀	17.09	0.74	2.07	7.32	17.26	0.54
	剧烈侵蚀	30.19	26.51	0.79	1.87	15.33	9.68

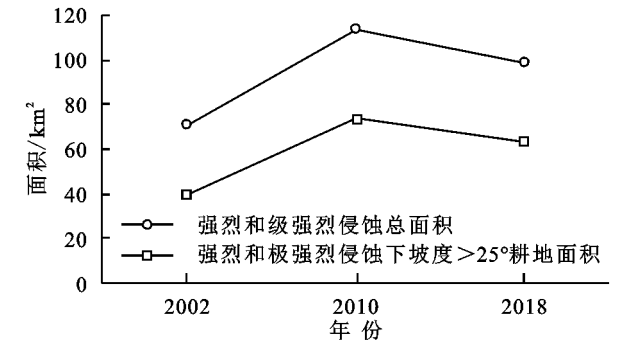


图 3 侵蚀等级面积与坡耕地面积关系

3.2 土壤侵蚀影响因素分析

基于地理探测器中的因子探测器探讨各个影响

因子对土壤侵蚀空间分异特征的解释力 q 值和显著性检验值(p 值)(表 4)。结果表明,选取的影响因子的 p 值均小于 0.05,各个影响因子对土壤侵蚀的分布有明显的作用。福贡县各因子的贡献力大小依次为:土地利用类型、植被覆盖度、年均降雨量、海拔、坡度。土地利用类型的 q 值最高,贡献率为 63.28%,表明土地利用类型对土壤侵蚀的贡献最大,是主导因子;坡度的 q 值最小,贡献率为 0.17%,对福贡县土壤侵蚀影响程度最小。上述的自然和人为因素共同影响着福贡县土壤侵蚀的空间分布。其中,土地利用类型比海拔和年均降水量的 q 值高,说明人类工程活动

对福贡县的土壤侵蚀影响显著。

交互探测器的结果显示(表 5),不同土壤侵蚀影响因子交互后的解释力大于单个因子。土地利用类型因子和其他因子叠加均排在第一,具有较强的解释力;其中,坡度因子和土地利用类型因子叠加 q 值最高,意味着不同的坡度和土地利用类型间土壤侵蚀程度具有明显的区别。土地利用类型因子和植被覆盖度因子交互作用的 q 值是 0.670 3,植被覆盖度单因子 q 值是 0.027 4,证明了实施退耕还林还草工程的重要性,因此改善土壤侵蚀现象可通过对(坡)耕地和未利用土地进行生态修复,植树种草,从而增加林草地的面积,提高植被覆盖度,减少地表径流,增强下渗能力,抑制土壤侵蚀的发生。

表 4 各影响因子的 q 值和 p 值

因子	海拔	坡度	年均 降雨量	植被 覆盖度	土地利用 类型
q 值/%	1.37	0.17	1.61	2.74	63.28
p 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 5 土壤侵蚀影响因子交互作用下的 q 值

因子	海拔	坡度	年均 降雨量	植被 覆盖度	土地利用 类型
海拔	0.0137	0.0214	0.0196	0.1241	0.6648
坡度		0.0017	0.0235	0.1175	0.7092
年均降雨量			0.0161	0.1344	0.6855
植被覆盖度				0.0274	0.6703
土地利用类型					0.6328

风险探测器计算的结果可对土壤侵蚀高风险区域进行识别。海拔 1 005~1 523 m、坡度 $>35^{\circ}$ 、年均降雨量 1 482~1 671 mm、植被覆盖度 <0.3 ,土地利用类型为未利用土地的区域为福贡县的高风险区。植被覆盖度的高风险地区在 <0.3 的区间内,叠加土

表 6 不同土地利用类型土壤侵蚀平均模数及面积占比

土地利用类型	建设用地	草地	林地	耕地	未利用土地	冰雪覆盖地	水体
平均土壤侵蚀强度/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	0.00	21.34	4.69	89.32	511.79	0.00	0.00
面积占比/%	0.45	5.62	80.54	5.05	0.47	7.24	0.63

3 讨论

影响福贡县土壤侵蚀的因子较多。福贡县地形复杂且起伏大,东边有高黎贡山西边有碧罗雪山,降水强度大且有双雨季,多因子间协同作用构成土壤侵蚀的空间格局。其中,土地利用类型是福贡县土壤侵蚀的主控因素,坡耕地应成为土壤侵蚀治理的重点区域。

区域土壤侵蚀的变化特征与国家政策和人类生态环境保护意识密切相关。陡坡垦殖是福贡县土壤侵蚀严重的一个主要原因,福贡县坡度 $>25^{\circ}$ 的国土面积占总国土面积的 78%。福贡县自实施退耕还林

壤侵蚀分布图和植被覆盖度分布图发现,植被覆盖度越大对土壤侵蚀的抑制作用越明显。土地利用类型中未利用土地为最易发生土壤侵蚀的地类,平均土壤侵蚀强度为 511.79 $t/(km^2 \cdot a)$,也是各影响因子中 q 值最高;福贡县的未利用土地主要以裸土地为主,环境差、植被覆盖度低且未采取任何水土保持措施。当坡度大于 35° 时,易发生土壤侵蚀;坡度越陡发生土壤侵蚀的风险就越高,当坡度达到一定阈值时树木可能因自身产生的重力产生倾斜姿态无法存活,树木存活率低,植被覆盖度低,相应的土地利用类型为草地或未利用土地,固土能力差,降雨直接冲刷地面,导致侵蚀量增加。在雨量相对丰富、植被覆盖度较低的地区,流水对坡面土壤作用强烈,易发生水土流失现象。

土地利用类型因子是该研究区土壤侵蚀的主要影响因子,不同土地利用类型的土壤侵蚀强度有差别。对福贡县各个土地利用类型的土壤侵蚀平均模数和面积占比进行比较分析(表 6);根据平均侵蚀强度大小,土地利用类型依次排列为未利用地、耕地、草地、林地、建设用地、水体和冰雪覆盖地。未利用土地面积占比为 0.47%,大多分布在福贡县高海拔地区,小部分在怒江沿岸分布,均未采取水土保持措施。水体、冰雪覆盖地和建设用地因在 P 因子中赋值均为 0,则认为这 3 种地类在一定程度上对土壤侵蚀无作用。林地和草地的植被覆盖度较高,侵蚀强度较小。耕地面积占比为 5.05%,土壤侵蚀平均模数为 89.32 $t/(km^2 \cdot a)$,主要分布在怒江沿岸,是人类活动的集中区。结合地理探测器分析结果和福贡县土地利用类型面积占比和分布情况,坡耕地应为福贡县土壤侵蚀治理的重点区域,需要继续实施退耕还林政策。

还草工程和生态文明建设以来,实施效果较好,有效减少了坡耕地,土壤侵蚀得到一定缓解。坡度 $>25^{\circ}$ 的耕地面积在总国土面积中的占比由 2002 年的 4.51%减少到 2010 年的 4.21%至 2018 年的 3.47%。继续开展的第二轮退耕还林政策中,一些零星分布,质量较差的农田不应划入基本农田保护范围。对坡耕地进行合理规划,宜农则农,宜林则林,积极探索生态环境可持续发展和经济发展的平衡点,结合退耕还林政策推动高山峡谷地区草果、云黄连、漆树等特色林业发展,实现以林致富;还可发挥怒江独特自然景观和民族文化优势,打造特色旅游品牌。

福贡县为高山峡谷区,生态环境脆弱,修路、开矿等人类干扰和地质灾害发生对生态环境影响较大,水土保持任务艰巨。怒江州“美丽公路”项目于2017年8月开工,途经福贡县,沿线的生态环境遭到一定破坏,会加剧土壤侵蚀现象,公路沿线及影响区应作为国土空间生态修复的重要区域,确定公路保护区边界,防止开矿采石造成水土流失或地质灾害。

4 结论

(1) 福贡县2002—2010—2018年的土壤侵蚀强度主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,均占研究区土壤侵蚀强度面积的91%以上,其他侵蚀等级较少。三年的年均土壤侵蚀模数分别为14.39,9.12,8.62 t/(km²·a),模数持续下降,土壤侵蚀呈现改善趋势。

(2) 福贡县土壤侵蚀严重的地方主要分布在怒江两岸。通过土壤侵蚀转移矩阵可知,近16 a福贡县74%以上的区域土壤侵蚀强度没有发生改变;2002—2018年低侵蚀强度转换为高侵蚀强度的比率小于高侵蚀强度转换为低侵蚀强度的比率。福贡县总体土壤侵蚀现象出现好转,土壤侵蚀区域得到有效抑制。

(3) 运用地理探测器方法分析得到土壤侵蚀影响因子解释力,其大小依次为:土地利用类型、植被覆盖度、年均降雨量、海拔、坡度;土地利用类型因子的q值最大,是福贡县土壤侵蚀的主要影响因子。识别的福贡县高风险区位于海拔1 005~1 523 m、坡度>35°、年均降雨量1 482~1 671 mm、植被覆盖度<0.3,土地利用类型为未利用土地的区域;这些地区应列为关注区,加强水土流失治理。结合福贡县实际情况,坡耕地应为福贡县土壤侵蚀治理的重点区域。

参考文献:

- [1] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [2] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.
- [3] 水利部.2019年全国水土流失动态监测结果[J].中国水土保持,2020,462(9):4.
- [4] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation[R]. Nserl Rep, 1995.
- [5] 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, the Journal of the British Geomorphological Group, 1998,23(6):527-544.
- [6] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [7] 牛俊文.国内土壤侵蚀预报模型研究进展[J].中国人口·资源与环境,2015,25(S2):386-389.
- [8] 李宏伟,郑钧濤,彭庆卫,等.国外土壤侵蚀预报模型研究进展[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S1):183-185.
- [9] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C]//Proceedings 12Th International Soil Conservation Organization Conference. Vol. Iii. Tsinghua University Press. Beijing, China, 2002.
- [10] 查良松,邓国徽,谷家川.1992—2013年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J].地理学报,2015,70(11):1708-1719.
- [11] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.
- [12] 钱庆欢,王世杰,白晓永,等.基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究[J].地理学报,2018,73(11):2135-2149.
- [13] 陈峰,李红波.基于GIS和RUSLE的滇南山区土壤侵蚀时空演变:以云南省元阳县为例[J].应用生态学报,2021,32(2):629-637.
- [14] 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.
- [15] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于GIS/CSLE的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2020,34(1):17-26.
- [16] 朱雪.基于土地利用格局的云南省福贡县生态脆弱度研究[J].生态科学,2012,31(6):661-665.
- [17] 丁剑宏.云南省土壤侵蚀[M].北京:科学出版社,2019.
- [18] 李旭,黄江成,徐慧娟,等.怒江高山峡谷区泥石流堆积扇特征分析[J].云南大学学报:自然科学版,2016,38(5):750-757.
- [19] 郝性中.滇西北土地资源合理开发利用与区域可持续发展研究[J].资源科学,2000,22(5):63-68.
- [20] 杨子生.云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J].山地学报,2002,20(S):1-9.
- [21] 田义超,黄远林,张强,等.北部湾钦江流域土壤侵蚀及其硒元素流失评估[J].中国环境科学,2019,39(1):257-273.
- [22] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences,1990,329(1255):421-428.
- [23] 周来,李艳洁,孙玉军.修正的通用土壤流失方程中各因子单位的确定[J].水土保持通报,2018,38(1):169-174.
- [24] 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.

- guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation [R]. Usda Agricultural Handbook, 1997.
- [21] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [22] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193.
- [23] 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.
- [24] Durigon V L, Carvalho D F, Antunes M A H, et al. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(2): 441-453.
- [25] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(1): 73-85.
- [26] Crema S, Cavalli M. Sed in connect: A stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity [J]. Computers & Geosciences, 2018, 111: 39-45.
- [27] Vigiak O, Borselli L, Newham L T H, et al. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio [J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 74-88.
- [28] Hassen E E, Assen M. Land use/cover dynamics and its drivers in Gelda catchment, Lake Tana watershed, Ethiopia[J]. Environmental Systems Research, 2018, 6(1): 1-13.
- [29] Nosipho Makaya, Timothy Dube, Khoboso Seutloali, et al. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability in the upper uMgeni catchment in KwaZulu Natal, South Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2019, 112: 50-57.
- [30] Yan B, Fang N F, Zhang P C, et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression[J]. Journal of Hydrology, 2013, 484: 26-37.
- [31] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 295-308.
- [32] 袁亚男. 听水河流域土地利用与植被变化对水文连通性影响研究[M]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [33] 王盛萍, 姚安坤, 赵小婵. 基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 526-533.

~~~~~

(上接第 63 页)

- [25] 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, 401(8): 49-51.
- [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.
- [27] 李益敏, 袁静, 王东驰, 等. 基于 GIS 的贡山县土壤侵蚀动态变化研究[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 8-15.
- [28] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [29] 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.
- [30] 牛丽楠, 邵全琴, 刘国波, 等. 六盘水市土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(11): 1755-1767.
- [31] 中华人民共和国水利部. SL 190-2007, 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.