

# 沱江流域土壤侵蚀动态变化及驱动力分析

钟旭珍<sup>1</sup>, 张素<sup>1</sup>, 吴瑞娟<sup>1</sup>, 敬远兵<sup>1</sup>, 门雷雷<sup>2</sup>, 周婷<sup>1</sup>

(1.内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641100; 2.中煤科工生态环境科技有限公司, 北京 100013)

**摘 要:**为了解沱江流域土壤侵蚀的动态演变规律及驱动机制,以沱江流域为研究区,基于 GIS 和 RS 技术,运用 RUSLE 模型测评流域 2000—2018 年的土壤侵蚀,对其时空动态演变规律进行了探索分析,并结合海拔、坡度、植被覆盖度、地形地貌、土地、降雨、GDP、人口等影响因子,借助地理探测器对其土壤侵蚀进行了定量归因研究。结果表明:(1) 沱江流域土壤侵蚀以微度侵蚀为主,主要分布于低矮的平原和坡耕地地区;2000—2018 年,微度侵蚀等级比例随时间在逐渐增大,2018 年相比 2000 年增加了 7.03%,剧烈侵蚀等级比例随时间在逐渐减小,2018 年相比 2000 年减小了 2.00%。(2) 以 2010 年为分界点,2000—2010 年和 2010—2018 年土壤侵蚀等级微度的变化稳定率都大于 75%,两个时间段内土壤侵蚀强度等级降低的范围均大于侵蚀等级升高的范围。(3) 地理探测器结果表明,不同影响因子对土壤侵蚀的解释力具有差异性,解释力最强的为坡度,达到 48.32%,因子间交互作用均能增强对土壤侵蚀的解释力,坡度与土地利用、坡度与降雨量的交互最为显著,交互作用解释力分别达到 61.58%,52.32%,风险探测表明坡度大于 35°,海拔大于 1 500 m 等起伏较大的山区是土壤侵蚀的高风险区,需重点治理。

**关键词:**GIS; 土壤侵蚀; RUSLE; 地理探测器; 沱江流域

**中图分类号:**S157

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)02-0043-07

## Analysis of Dynamic Changes and Driving Forces of Soil Erosion in Tuojiang River Basin

ZHONG Xuzhen<sup>1</sup>, ZHANG Su<sup>1</sup>, WU Ruijuan<sup>1</sup>, JING Yuanbing<sup>1</sup>, MEN Leilei<sup>2</sup>, ZHOU Ting<sup>1</sup>

(1.School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100, China;

2.China Coal Science and Engineering Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** To understand the dynamic evolution and driving mechanism of soil erosion in the Tuojiang River Basin, based on GIS and RS technology, the RUSLE model was used to evaluate the soil erosion in the basin from 2000 to 2018, and its temporal and spatial dynamic evolution was analyzed, and geodetector was used to conduct quantitative attribution research on soil erosion through combining with altitude, slope, vegetation coverage, topography, land, rainfall, GDP, population and other influencing factors. The results showed that: (1) soil erosion in the Tuojiang River Basin was dominated by slight degree, mainly distributed in low slope farmland; from 2000 to 2018, the area of slight erosion increased gradually with time, in 2018, it increased by 7.03% compared to 2000, and the area of severe erosion decreased gradually with time, in 2018, it decreased by 2.00% compared with 2000; (2) taking 2010 as the demarcation point, it could be seen that the stability rates of the slight change of soil erosion grade in 2000—2010 and 2010—2018 were greater than 75%; in the two time periods, the range of soil erosion grade reduction was greater than the range of erosion grade increase; (3) the geodetector results showed that different influencing factors had different explanatory powers for soil erosion, and the strongest explanatory power was slope, reaching 48.32%; the interaction between factors could enhance the explanatory power of soil erosion, and the interaction between slope and land use, slope and rainfall was the most significant, and the explanatory power of the interaction reached 61.58% and 52.32%, respectively; risk detection showed that mountainous areas with steep slopes greater than 35°

收稿日期:2021-03-07

修回日期:2021-03-27

资助项目:国家自然科学基金(41471452);沱江流域高质量发展研究中心项目(TJGZL2020-06);内江师范学院校级科研项目(2019YB04);中央高校基本科研业务资助项目(300102269201,300102299206,300102269205)

第一作者:钟旭珍(1990—),女,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为 GIS 与资源评价。E-mail:904213389@qq.com

通信作者:吴瑞娟(1985—),女,山西河津人,博士研究生,研究方向为 3S 技术集成及应用。E-mail:rjwu@njtc.edu.cn

and elevations greater than 1 500 m were high-risk areas of soil erosion and needed the key management.

**Keywords:** GIS; soil erosion; RUSLE; geodetector; Tuojiang River Basin

土壤侵蚀是指发生在外营力作用条件下的土体迁移过程<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀严重影响了工农业的正常发展,造成土壤肥力下降、致使生态环境恶化、破坏了水利交通工程设施等<sup>[2]</sup>。目前全球土壤侵蚀形势严峻,我国土壤侵蚀现状也不容乐观,有研究表明我国土壤侵蚀面积高达 32%,四川省约有 24.90% 的地区存在土壤侵蚀现象,研究土壤侵蚀的原因和演变规律,有效地进行防治,保护生态环境已经成为全球关注的焦点<sup>[3]</sup>。

对土壤侵蚀的研究主要是将 RS 和 GIS 技术与数学模型相结合进行,常用方法如通用侵蚀方程(USLE)<sup>[4-7]</sup>、修正通用方程(RUSLE)<sup>[8-10]</sup>、水蚀预报模型(WEPP)<sup>[11-13]</sup> 和中国土壤流失方程(CSLE)等<sup>[14-15]</sup> 众多计算模型,其中修正通用方程(RUSLE)是具有统一规范性的国际上应用较为广泛的模型,具有结构简明、计算因子含义明显的特点。然而,由于不同区域间的复杂性和特殊性以及研究方法的多样性,特别是针对属于丘陵地形的沱江流域,仍然存在一些问题需要进一步探索。例如对土壤侵蚀较为典型的地区研究较多,而对于丘陵、坡耕地等地区的土壤侵蚀研究较少;对土壤侵蚀的现状研究较多而对于其影响因素归因的研究较少,而由王劲峰等<sup>[16]</sup> 提出的地理探测器是用于探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法,近年来广泛应用于自然科学、社会科学、环境科学和人类健康等方面。目前已有少数学者将其用于水土流失驱动力的探测,并取得了良好的效果,得到了学者们的认可,如陈锐银等<sup>[15]</sup> 基于 CSLE 模型及地理探测器对四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀进行研究;黄硕文等<sup>[17]</sup> 运用 RUSLE 模型及地理探测器分析河南省近 10 a 来土壤侵蚀时空变化及归因;王欢等<sup>[18]</sup> 基于地理探测器研究不同喀斯特地貌形态类型区的土壤侵蚀定量归因等。

针对沱江流域,《四川水土流失综合治理蓝图绘就》中将其划定为国家级水土流失重点治理区,同时也是长江上游重要生态屏障最大的环境风险带。2018 年,《中共四川省委关于全面推动高质量发展的决定》将沱江流域综合环境治理作为四川省“十三五”时期全面推动高质量发展的重要组成部分,但目前,极少有人研究沱江流域的水土流失,更没有人基于地理探测器研究其土壤侵蚀的驱动因子。综合以上分析,研究基于 RUSLE 模型完成沱江流域 2000—2018 年土壤侵蚀模数定量计算与分级,对其时空动态演变规律进行分析,并借助地理探测器对土壤侵蚀

进行定量归因研究,有利于了解流域内土壤侵蚀状况,为改善流域生态环境及对该国家级水土流失重点治理区的防治工作提供参考依据。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

沱江流域位于长江上游,四川省中部,坐标为(103°40′—105°50′E,28°53′—31°41′N),范围涉及德阳、成都、资阳、内江、自贡、泸州、重庆等 11 个地市,其东南部为重庆市的荣昌县、大足县、双桥区等区县,总面积约 2.79 万 km<sup>2</sup>,是四川省人口密度最大、城市分布最密集、经济社会最发达的地区,经济总量占全省的 30.8%,人口占全省的 26.2%,有全省经济发展“金腰带”之称。流域气候属于亚热带湿润气候,多年平均气温在 17℃ 左右。流域形状瘦长,地形以丘陵平原为主,地势由西北向东南倾斜,起伏较小,植被覆盖的空间差异大,流域内森林覆被率仅 6.1%,为四川各河中最低者。近年来,由于以城市化为主的人类经济社会活动影响的加剧、气候变化以及人口增长,引发了植被退化、水土流失等一系列生态问题<sup>[19]</sup>,沱江流域长期是四川省环境治理的重点区域,开展该流域土壤侵蚀时空演变及定量归因研究,有利于了解流域生态环境状况,并进行有针对性地生态整治。

### 1.2 数据来源

研究数据主要有:(1) 研究区 1:10 万土地利用类型矢量数据、1:100 万中华人民共和国地貌图集、中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集、中国人口、GDP 空间分布 km 格网数据集等,来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>);(2) 研究区数字高程模型(DEM),空间分辨率 30 m,来源于地理空间数据云平台;(3) 2000—2018 年沱江流域及周边地区 28 个基础气象站的各月累计降雨量,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);(4) 1:100 万中国土壤数据库,来源于中国科学院南京土壤所;(5) 其他数据。研究区河流矢量图、行政区划界线、社会经济要素等,来源于中国科学院资源环境科学数据中心及《四川省统计年鉴》。

## 2 研究方法

### 2.1 RUSLE 模型

土壤侵蚀是指土壤及成土母质被水力、风力、冻融或重力等外力作用下,土壤物理结构或化学成分发

生破坏、搬运等的过程<sup>[20]</sup>。研究采用修正通用土壤侵蚀方程 RUSLE,该模型的表达式如下:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中:  $A$  为土壤侵蚀量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ,乘以 100 后单位转换为  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)]$ ;  $LS$  为坡长坡度因子;  $C$  为植被覆盖因子;  $P$  为水土保持因子;  $LS, C, P$  为无量纲。

为保证各因子在 GIS 中叠加重合,研究将各因子图层统一设置为 Albers 投影系统,空间分辨率均为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

2.1.1 降雨力侵蚀因子 降雨侵蚀力能较客观地描述出降雨对地区土壤侵蚀的影响作用。研究利用 Wischmeier 模型完成沱江流域降雨侵蚀力的计算,并采用反距离权重插值模型完成其空间插值。Wischmeier 表达式如下:

$$R=\sum_{i=1}^{12}1.735 \times 10^{1.5 \times \lg \frac{P_i^2}{P}-0.8188} \tag{2}$$

式中:  $R$  为降雨侵蚀力;  $P_i$  为月降雨量;  $P$  为年降雨量。

2.1.2 土壤可侵蚀因子 土壤可侵蚀性是驱动土壤发生侵蚀变化的内因,不同类型的土壤因为粒径、黏性和化学成分等存在差异,其可侵蚀性也存在明显的不同。土壤类型不同,  $K$  值不同。  $K$  值越大,土壤越容易受到侵蚀,  $K$  值越小,则土壤受侵蚀的可能性越小。研究使用 1 : 100 万中国土壤数据,采用 EPIC 模型<sup>[21]</sup>完成  $K$  因子的计算。

$$K=[0.2+0.3\text{e}^{-0.0256\text{SAN}(1-\text{SIL}/100)}] \times (\frac{\text{SIL}}{\text{CLA}+\text{SIL}})^{0.3} \times \left[1.0-\frac{0.25C}{C+\text{e}^{(3.72-2.95C)}}\right] \times 1.0-\frac{0.7\text{SNI}}{\text{SNI}+\text{e}^{(-5.51+22.9\text{SNI})}} \tag{3}$$

式中:  $\text{SAN}$  为砂粒含量%;  $\text{SIL}$  为粉粒含量%;  $\text{CLA}$  为黏粒含量%;  $C$  为有机质含量%;  $\text{SNI}=1-\text{SAN}/100$ 。

2.1.3 坡度坡长因子 地形是影响区域土壤侵蚀类型和强度形成与变化的主要因素之一。通常情况下,地势平缓的地区坡度和坡长值相对较小,土壤侵蚀程度也相对较轻。坡长因子  $L$  和坡度因子  $S$  一般基于 DEM 进行提取。本研究采用刘宝元等<sup>[21]</sup>提出的坡长模型完成该地区坡长因子的计算,表达式如下:

$$L=(\frac{\lambda}{22.13})^m, m=\begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \tag{4}$$

坡度因子的计算采用刘斌涛等<sup>[23]</sup>针对西南山地区提出的  $10^\circ \sim 25^\circ$  范围的  $S$  修正模型完成,模型如下:

$$S=\begin{cases} 10.8\sin\theta+0.3 & (\theta \leq 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta-0.5 & (5^\circ < \theta \leq 10^\circ) \\ 20.204\sin\theta-0.1204 & (10^\circ < \theta \leq 25^\circ) \\ 29.585\sin\theta-5.6079 & (\theta > 25^\circ) \end{cases} \tag{5}$$

式中:  $L$  和  $S$  分别为坡长和坡度因子;  $\lambda$  为坡长;  $\theta$  为坡度;  $m$  为坡度计算指数。

2.1.4 植被与水土保持因子 植被覆盖管理因子是一项用于描述植被覆盖状况对土壤侵蚀综合影响作用强弱的指标,水土保持因子是表示实施专门水土保持措施后的土壤流失量与未实施任何专门措施而种植时的土壤流失量之比,  $C$  和  $P$  的值大小变化均在  $0 \sim 1$ 。

研究基于区域相似性,根据相关研究成果<sup>[24-27]</sup>,结合区域特征,确定沱江流域地表植被覆盖因子  $C$  和水土保持因子  $P$  的经验值(表 1)。将不同土地利用类型的  $C$  值和  $P$  值在 ArcGIS 10.2 中赋值于土地利用类型矢量属性表中,然后利用要素转栅格功能转为栅格数据,得到流域植被覆盖因子和水土保持因子栅格图。

表 1 沱江流域各土地利用类型的 CP 因子赋值

土地利用类型	水田	旱地	有林地	灌木林地	疏林地	其他林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	河渠	湖泊	水库坑塘	滩地	城镇	农村居民点	交通建设用地	裸土地	裸岩石砾地
$C$ 值	0.310	0.600	0.060	0.020	0.037	0.060	0.035	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.200	0.200	0.000	0.000
$P$ 值	0.350	0.550	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000

2.2 地理探测器

地理探测器即 Geographical Detector,简称 Geo-detector,是一种统计工具,可以探测地理现象的空间分异性并揭示其背后驱动力,既适用于点数据,也适用于面数据,对于面数据一般要先进行重分类和离散化处理。其包括 4 个探测器<sup>[16]</sup>。

因子探测器,用于探测因变量  $Y$  的空间分异性,

及某个因素  $X$  对因变量  $Y$  空间分布的解释力,其大小可用  $q$  值来度量( $0 \leq q \leq 1$ ),本研究中,若某影响因子的  $q$  值越接近于 1,说明该因子对土壤侵蚀的解释力越强,反之越弱<sup>[16-18]</sup>。

交互探测器用于识别不同因子之间的交互作用,即评估两个因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量的解释力,或这些因子对因变量  $Y$  的影响是相



互独立的<sup>[16]</sup>,其交互方式见表 2<sup>[17]</sup>。通过交互探测器,可探究不同影响因子交互作用时对土壤侵蚀空间分布的影响。

表 2 地理探测器交互作用方式

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

风险探测器用于判断 2 个子区域间的属性均值是否有显著的差别,可用于识别土壤侵蚀高风险区域<sup>[17]</sup>。生态探测器则是用于比较 2 个因子对属性 Y 的空间分布的影响是否有显著的差异,以 F 统计量来衡量,可比较影响因子对土壤侵蚀空间分布的影响是否有显著差异<sup>[15]</sup>。

研究选取了海拔、坡度、植被覆盖度、地形地貌、GDP、人口、土地、降水 8 个因子作为土壤侵蚀的影响因子,分别为  $X_1-X_8$ ,土壤侵蚀为 Y,作为地理探测器的数据输入。由于这些因子及土壤侵蚀都是连续变量,而地理探测器的输入数据要求为类别数据,根据王劲峰等<sup>[16]</sup>提出的数据离散化方法,首先对这些连续变量进行重分类处理,将海拔按照  $<500\text{ m}$ ,  $500\sim1\,000\text{ m}$ ,  $1\,000\sim1\,500\text{ m}$ ,  $>1\,500\text{ m}$  分为 4 类;坡度按照  $<5^\circ$ ,  $5^\circ\sim10^\circ$ ,  $10^\circ\sim15^\circ$ ,  $15^\circ\sim20^\circ$ ,  $20^\circ\sim25^\circ$ ,  $25^\circ\sim30^\circ$ ,  $30^\circ\sim35^\circ$ ,  $>35^\circ$  分为 8 类;植被覆盖度按照  $<0.3$ ,  $0.3\sim0.4$ ,  $0.4\sim0.5$ ,  $0.5\sim0.6$ ,  $0.6\sim0.7$ ,  $0.7\sim$

$0.8$ ,  $0.8\sim0.9$ ,  $0.9\sim1$  分为 7 类;地形地貌使用《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》中的类别编号,分为 24 类;GDP、人口数据是来源于中国科学院资源环境数据云平台的由徐新良<sup>[28]</sup>处理的空间分布 km 网格数据,为栅格数据类型,利用 GIS 裁剪出沱江流域范围的 GDP、人口 km 格网栅格数据,再运用 GIS 重分类功能,将其等间距分为 8 类作为地理探测器的输入变量;土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类;降雨量等间距分为 9 类;土壤侵蚀强度按照土壤强度侵蚀分级标准分为 6 类。接下来通过 ArcGIS 创建渔网,设置其间隔为 1 000 m,得到研究区共 26 530 个点,运用 Spatial Analyst—提取分析—采样工具,输入栅格为所有重分类的 X 和 Y,采样点为研究区渔网点,将自变量和因变量的值提取到点,对数据进行筛选,去掉小于 0 的值,最后得到 22 487 个点,作为地理探测器输入数据。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀计算结果

根据 RUSLE 模型各因子计算方法,得到各因子计算结果,运用 ArcGIS 10.2 栅格计算器,将各因子相乘,得到沱江流域土壤侵蚀模数,并将单位转换为  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,同时参照水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—96)规定的分级指标<sup>[29]</sup>,将该地区 2000—2018 年土壤侵蚀分为微度、轻度、中度、强度、极强烈和剧烈 6 个等级(图 1)

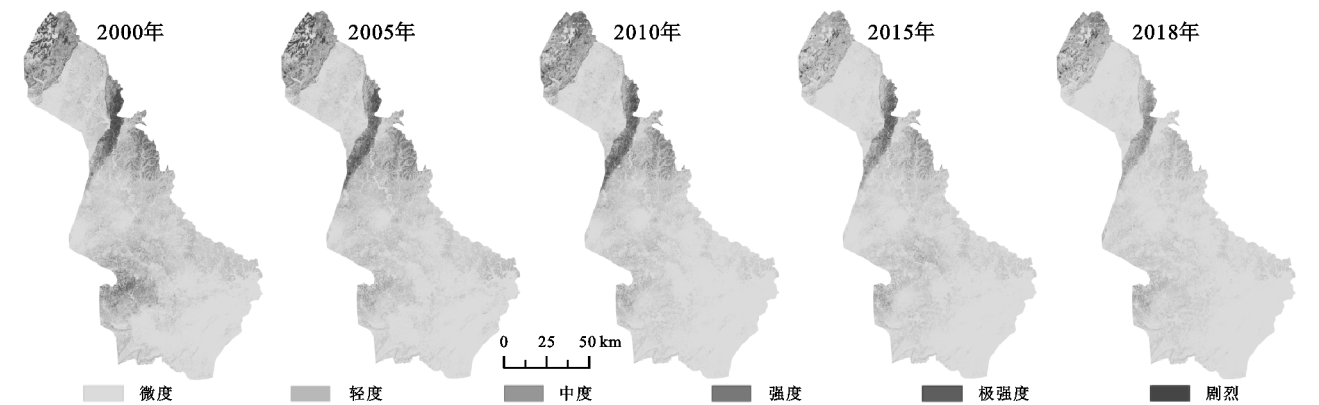


图 1 沱江流域 2000—2018 年土壤侵蚀强度等级

3.2 土壤侵蚀时空变化特征

表 3 为沱江流域 2000—2018 年土壤侵蚀各等级栅格数比例,可以看出流域主要以微度侵蚀为主,占比均大于 50%,主要分布在低矮的平原和丘陵等耕地地区,且微度侵蚀比例随时间在逐渐增大,2018 年相比 2000 年增加了 7.03%,其中 2010 年微度侵蚀比例相比 2005 年有所减少,主要转化为了轻度侵蚀,原因主要是 2010 年降雨侵蚀力相对较大,另外考虑到

2008 年汶川地震,研究区北部岷山一带植被覆盖、地形地貌等受到影响,从研究结果可以看出到 2010 年土壤侵蚀改善程度不明显,微度侵蚀面积减少,但随着震后重建和恢复,研究区土壤侵蚀得到逐步改善,特别从图 1 可以看出,岷山一带改善较为明显,说明植被恢复及水土保持治理措施具有成效;剧烈侵蚀的比例随时间在逐渐减小,2018 年相比 2000 年减小了 2.00%,该侵蚀等级主要分布在西北部的岷山、中部

的龙门山等海拔较高的山地地区；中度及以上侵蚀等级整体上都在随时间减小,说明沱江流域土壤侵蚀逐渐得到改善,尤其是岷山、龙门山地区土壤侵蚀改善明显,这主要是因为水土保持措施的实施。

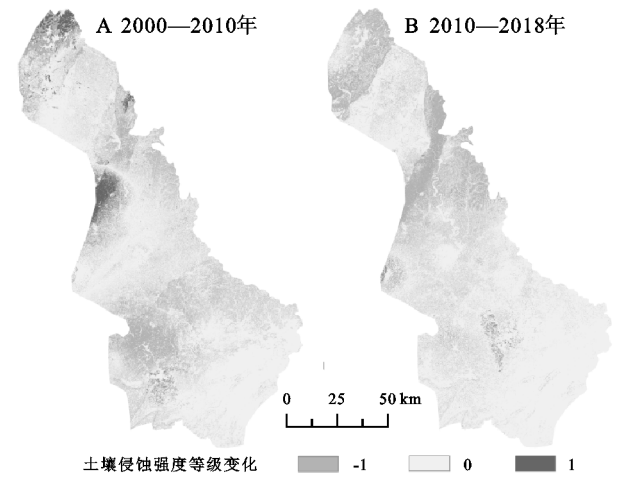
借助 IDRISI 软件的 CA-Markov 模型,以 2010 年为时间分界点,得到 2000—2010 年和 2010—2018 年土壤侵蚀面积转移矩阵(表 4—5),并利用 ArcGIS 空间分析 Combine 功能,分析各阶段土地的空间分布变化(图 2)。

表 4 2000—2010 年沱江流域土壤侵蚀强度转移矩阵

年份	侵蚀强度	2010 年					
		微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
2000 年	微度	0.7853	0.2120	0.0020	0.0005	0.0001	0.0001
	轻度	0.3684	0.5553	0.0631	0.0080	0.0035	0.0017
	中度	0.0374	0.5708	0.2493	0.1012	0.0359	0.0054
	强度	0.0396	0.3989	0.2791	0.1524	0.1042	0.0258
	极强度	0.0274	0.1424	0.5270	0.1356	0.1273	0.0404
	剧烈	0.0145	0.1471	0.2212	0.2640	0.1980	0.1552

表 5 2010—2018 年沱江流域土壤侵蚀强度转移矩阵

年份	侵蚀强度	2018 年					
		微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
2010 年	微度	0.8173	0.1776	0.0038	0.0007	0.0003	0.0002
	轻度	0.4366	0.5372	0.0213	0.003	0.0013	0.0006
	中度	0.0367	0.6232	0.3000	0.0357	0.0022	0.0022
	强度	0.0198	0.1595	0.6031	0.1694	0.0454	0.0029
	极强度	0.0176	0.0701	0.1931	0.5172	0.1883	0.0137
	剧烈	0.0166	0.0722	0.0494	0.0943	0.3391	0.4284



注:0 代表土壤侵蚀强度等级不变,1 代表土壤侵蚀强度等级升高,-1 代表土壤侵蚀强度等级降低。

图 2 沱江流域土壤侵蚀强度变化

2000—2010 年沱江流域微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈侵蚀的稳定率分别为 78.53%,55.53%,24.93%,15.24%,12.73%,15.52%,2010—2018 年稳定率分别为 81.73%,53.72%,30.00%,16.94%,18.83%,42.84%。从表中可以分析到大部分土壤侵

表 3 沱江流域 2000—2018 年不同土壤侵蚀等级面积比例 %

侵蚀等级	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
微度侵蚀	69.39	73.40	70.97	75.44	76.42
轻度侵蚀	20.84	18.28	21.70	19.21	18.62
中度侵蚀	4.20	4.08	4.05	2.76	3.02
强度侵蚀	1.71	1.44	1.64	1.15	1.09
极强度侵蚀	1.54	1.22	1.05	0.91	0.51
剧烈侵蚀	2.33	1.59	0.58	0.52	0.33

蚀强度向更低等级转变,2000—2010 年有 36.84%的轻度侵蚀转变为微度侵蚀,57.08%的中度侵蚀转变为轻度侵蚀,39.89%的强度侵蚀转变为轻度侵蚀,52.70%的极强度侵蚀转变为中度侵蚀,26.40%的剧烈侵蚀转变为强度侵蚀。2010—2018 年有 43.66%的轻度侵蚀转换为微度,62.32%的中度转为轻度,60.31%的强度转为中度,51.72%的极强度转为强度,33.91%的剧烈转为极强度。

结合图 2,2000—2010 年土壤侵蚀强度等级不变的区域主要分布在沱江流域东南部及北部岷山与龙门山之间,面积占比约为 81.00%;土壤侵蚀强度等级降低的地区主要分布在龙门山一带,面积占比约为 12.73%;土壤侵蚀强度等级升高的地区主要分布在龙泉山一带,面积占比约为 6.7%。2010—2018 年土壤侵蚀强度等级不变的区域主要分布在沱江流域东南部,面积占比约为 84.69%;土壤侵蚀强度等级降低的地区主要分布在岷山及中部等植被覆盖较高的地区,面积占比约为 12.34%;土壤侵蚀强度等级升高的地区面积占比约为 2.96%。可以看出,两个时间段内

土壤侵蚀强度等级降低的范围均大于侵蚀等级升高的范围,说明研究区土壤侵蚀整体上趋于改善。

3.3 土壤侵蚀影响因素分析

从因子探测器结果(表 6)可以看出,不同土壤侵蚀影响因子对土壤侵蚀的解释力具有差异性,其中解释力最强的为坡度,达到 48.32%,说明坡度对沱江流域土壤侵蚀具有主导性的影响,这与黄硕文等<sup>[17]</sup>对河南省土壤侵蚀定量归因的研究相似。接下来依次是地形地貌、海拔、土地利用、年降雨量、人口、植被覆盖度,解释力最小的影响因子为 GDP。沱江流域大部分地区属于低矮的平原丘陵,北部的岷山、中部龙门山和龙泉山将流域划分为山地丘陵平原相间分布几部分,这样的地形地貌从宏观上控制着地表过程的发生和发展,对土壤侵蚀也具有主导性作用,这与王欢等<sup>[18]</sup>进行的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研究相符合。说明本研究的结论相对可靠。由于沱江流域土地利用主要以耕地为主,2018 年耕地面积占比达到 78.68%,林地仅占 12.65%,从而决定整个流域的植被覆盖度较低,因此土地利用和植被覆盖对土壤侵蚀的解释力明显低于了坡

度、地形地貌和海拔。降水对土壤侵蚀也有着重要影响,对于以平原、丘陵地形为主的沱江流域,极端气候较少,降雨对土壤侵蚀的影响较为均匀,其解释力低于由地貌形态控制的坡度、海拔等。降水是否会引起水土流失,植被覆盖的拦截有重要作用,但沱江流域土地利用又以耕地为主,流域内林草地分布较少,林地和草地分布面积仅占 15%左右,要提高植被覆盖度更多的靠人类活动,但在这样宏观地形地貌和土地利用结构的控制下,即使国家实行退耕还林还草政策,对土地利用结构也主要起微调作用,所以土地利用的影响大于降水和植被覆盖。此外,土壤侵蚀的影响因素错综复杂,主要以自然因素为主,但人类社会经济活动也会对土壤侵蚀产生加剧或减缓作用,因此研究选用了人口和 GDP 两个社会经济因子来进行定量归因探讨,结果表明人口对土壤侵蚀的解释力大于 GDP,对于植被覆盖较低的沱江流域,人口活动对土壤侵蚀影响甚至大于植被覆盖的影响,这表明,在进行水土流失保护工作的时候,针对不同的地区要同时注重自然因素的影响和社会经济因素的影响,沱江流域土壤侵蚀的控制,要特别注意人类活动的影响。

表 6 土壤侵蚀因子的 p 值和 q 值

项目	人口	土地利用	坡度	GDP	植被覆盖度	年降雨量	海拔	地形地貌
q 值	0.0159	0.1212	0.4832	0.0056	0.0116	0.0731	0.2143	0.2633
p 值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

从交互作用探测器结果(表 7)可以看出,任意两个影响因子之间的交互作用对土壤侵蚀的解释力都大于单因子作用。这表明,要综合考虑各种影响因素对土壤侵蚀的影响。其中坡度与土地利用的交互作用解释力最大,达到 61.58%,意味着不同坡度下土地利用的土壤侵蚀相差悬殊。坡度与年降雨量的交互作用解释力达到 52.32%,这主要是由地貌形态决定的,沱江流域地貌形态主要由几大山脉主导,降雨量

在低矮的丘陵对土壤侵蚀的解释力较小,当与坡度交互,特别是与坡度大的地区交互时,其对土壤侵蚀的解释力则猛增。坡度与植被覆盖和年降雨量的交互作用,地貌形态与植被覆盖和年降雨量的交互作用,都明显大于植被覆盖和年降雨量的单独作用,这表明在海拔、坡度较高的地方,降雨量和植被覆盖对土壤侵蚀的解释力更大,因此,要控制沱江流域的土壤侵蚀,在地形起伏较大的地区进行植被建设是关键。

表 7 土壤侵蚀因子交互作用下的 q 值

因子	人口	土地利用	坡度	GDP	植被覆盖度	年降雨量	海拔	地形地貌
人口	0.0159							
土地利用	0.1316	0.1212						
坡度	0.4908	0.6158	0.4832					
GDP	0.0305	0.1292	0.4885	0.0056				
植被覆盖度	0.0380	0.1388	0.5040	0.0284	0.0116			
年降雨量	0.0913	0.1986	0.5232	0.0941	0.1270	0.0731		
海拔	0.2181	0.2769	0.5038	0.2210	0.2284	0.2707	0.2143	
地形地貌	0.2734	0.3397	0.5160	0.2719	0.2811	0.3587	0.3082	0.2633

因子探测和交互探测表明单个因子及不同因子之间交互作用都会对土壤侵蚀产生不同影响,而通过风险探测器可探测同一影响因子不同分层间的土壤

侵蚀平均值是否有显著差异,识别土壤侵蚀的高风险区(表 8)。探测结果表明坡度>35°的区域为土壤侵蚀风险最高的地区,主要分布在北部岷山地区,对于



坡度的 8 个分层,土壤侵蚀强度随坡度等级的增加逐渐增强。土地利用的高风险区为草地,也主要分布于北部岷山地区。年降雨量和植被覆盖高风险区均主要分布于北部海拔较高起伏较大的山区,极易发生水

土流失。海拔的高风险区为>1 500 m 的地区。对于人口,高风险区主要分布于人口密度小的地区,人口少的地方主要在崎岖的山地和未利用地,这些地方都容易发生水土流失。

表 8 各影响因子侵蚀高风险区域

人口密度/ (人·km <sup>-2</sup> )	土地利用	坡度/(°)	GDP/ (万元·km <sup>-2</sup> )	植被覆盖度	年降雨量/ mm	海拔/m	地形 地貌
24.35~617.24	草地	>35	13054~17374	>0.8	574~698	>1500	大起伏中山

生态探测结果表明,坡度与土地利用、地形地貌与土地利用、地形地貌与海拔等对土壤侵蚀的影响具有显著差异,说明这几个因子主导着沱江流域是土壤侵蚀,应该充分根据流域的地貌形态,在不毁坏原始生态结构的基础上,加强对坡度大、海拔高、地形起伏大的地区的植被防护,对于坡度小的耕地、草地,应该合理调整农业产业结构和土地利用方式,种植水土保持功能更强的农作物,注重耕作区的造林防护。另外,沱江流域水域面积较广,沱江为长江的一级支流,极易发生洪涝灾害引起河流两岸水土流失,因此,应该加强河流两岸的水土保持工程,将两岸的耕地改为固坡固土更强的作物。

4 结 论

(1) 沱江流域土壤侵蚀以微度为主,土壤侵蚀强度较低的等级主要分布于低矮的坡耕地,强度及以上侵蚀区主要分布于坡度、海拔较高的地形地貌区,如岷山、龙门山、龙泉山等。微度侵蚀比例随时间在逐渐增大,2018 年相比 2000 年增加了 7.03%,剧烈侵蚀的比例随时间在逐渐减小,2018 年相比 2000 年减小了 2.00%,2000—2010 年和 2010—2018 年土壤侵蚀等级中微度的变化稳定率都大于 75%,侵蚀强度等级降低的范围均大于侵蚀等级升高的范围,说明研究区土壤侵蚀整体上趋于改善。

(2) 研究选取的 8 个影响因子对土壤侵蚀的解释力具有差异性,解释力最强的为坡度,这主要是受沱江流域特殊的地形地貌和土地利用方式影响,人口、GDP 等社会经济因素也会对土壤侵蚀产生影响,因此,在进行土壤侵蚀归因分析时,应综合考虑自然和人类社会经济活动。

(3) 因子间交互作用均能增强对土壤侵蚀的解释力,坡度与土地利用和降雨量的交互最为显著,因此应该禁止陡坡开耕及坡耕地的管理,在降雨量较大的陡坡地区应该采取相应的防治措施,减少因降雨引起的自然破坏和经济损失。在土壤侵蚀的治理工作

中,应考虑地貌类型的宏观控制作用,针对不同影响因子内部重点治理高风险区,主要为坡度大于 35°,海拔大于 1 500 m 等起伏较大的山区。

运用地理探测器进行土壤侵蚀的定量归因还处于初步探索阶段,在今后的研究中需进一步探讨各个影响因子内部对土壤侵蚀影响的差异性,为土壤侵蚀的治理提供更加准确的依据。

参考文献:

[1] 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): 138-146,305.

[2] 李海燕.土壤侵蚀危害及其防治措施研究现状[J].宁夏农林科技,2011,52(1):71-72,77.

[3] 王潇,刘汉湖,吴冰.四川境内赤水河流域上中游水土流失时空变化研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2019,38(3):70-80.

[4] 曹胜,欧阳梦云,周卫军,等.基于 GIS 和 USLE 的宁乡市土壤侵蚀定量评价[J].中国农业大学学报,2018,23(12):149-157.

[5] 夏冰,范宣梅,郭晓军,等.地震效应下的土壤侵蚀空间分布特征及分析:以九寨沟地震为例[J].中国水土保持科学,2020,18(1):79-89.

[6] 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): 138-146,305.

[7] 郭宏忠,才业锦,陈琳,等.基于 USLE 模型的重庆仙鱼小流域土壤流失减少比例评价[J].西南大学学报:自然科学版,2011,33(1):79-84.

[8] 李佳蕾,孙然好,熊木齐,等.基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J].生态学报,2020,40(10):3473-3485.

[9] 张园眼,李天宏.基于 GIS 和 RUSLE 模型的深圳市土壤侵蚀研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(6):48-61.

[10] 胡刚,宋慧,石星军,等.基于 RUSLE 的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析[J].地理科学,2018,38(4):610-617.

[11] 刘宝元,史培军.WEPP 水蚀预报流域模型[J].水土保持通报,1998,18(5):6-12.

[12] 刘世梁,董玉红,王军.基于 WEPP 模型的土地整理对长期土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):18-22.

- 术及其应用[J].国土资源遥感,2017,29(1):1-6.
- [15] 史东梅.高速公路建设中侵蚀环境及水土流失特征的研究[J].水土保持学报,2006,20(2):5-9.
- [16] 甘枝茂,孙虎,甘锐.黄土高原地区城郊型侵蚀环境及其特征[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(2):39-43.
- [17] 蔡萱,石剑波,张莹,等.湖北省输变电工程水土流失特征研究[J].水电与新能源,2019,33(6):57-62.
- [18] 蔡萱,占海歌,石剑波,等.鄂西南及鄂中输变电工程水土流失特征研究[J].人民长江,2019,50(2):51-54,84.
- [19] 李大鸣,田顺发,张弘强,等.塔基建设对蓄滞洪区洪水演进影响评价:以蒙西—天津南输变电工程为例[J].水利水电技术,2018,49(10):28-36.
- [20] 刘卉芳,徐永年,池春青,等.云南省输变电工程水土流失特点浅析[J].水土保持研究,2008,15(2):133-135,138.
- [21] 王露露,孙中峰,朱清科.山西省输变电工程水土保持低扰动工程技术[J].水土保持研究,2013,20(3):310-315.
- [22] 樊广英,米秋菊.河北南部 500 kV 输变电工程建设中的土壤侵蚀及其防治[J].中国水土保持,2008(10):15-17.
- [23] 王晖,张家其,吴宜进,等.天门 220 kV 侨乡输变电工程水土保持监测实践[J].中国水土保持,2014(9):62-64.
- [24] 跳锋.孝感庙头 220 kV 输变电工程水土保持监测实践[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [25] 解刚,薛凤,王向东,等.水电项目水土保持生态效应评价研究[J].水利水电技术,2018,49(1):167-173.
- [26] 樊广英,米秋菊.冀南地区 500 kV 输变电工程建设中的土壤侵蚀及其防治[J].水科学与工程,2008(3):60-63.
- [27] 贺亮,李光伟,刘国东,等.500 kV 输变电工程水土流失及综合防治[J].亚热带水土保持,2007,19(4):48-51.
- [28] 丁广鑫.交流输变电工程环境保护和水土保持工作手册[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [29] 徐宪立,张科利,刘雯,等.青藏公路路堤边坡水土保持措施及效益分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(4):619-622.
- [30] 关力强.如何提高水土保持工程的造林成活率[J].河北水利,2010(4):40-40.
- [31] 张鑫,孙艳,于世江.浅谈公路建设中水土保持措施[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2009,11(1):25-27.
- [32] 侯从军.动力伞展放导引绳在特高压线路施工中的应用[J].电网与清洁能源,2011,27(8):27-33.

(上接第 49 页)

- [13] 郑粉莉,杨勤科,王占礼.水蚀预报模型研究[J].水土保持研究,2004,11(4):13-24.
- [14] 陈美淇,魏欣,张科利,等.基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J].水土保持学报,2017,31(3):16-21.
- [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] 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.
- [17] 黄硕文,李健,张欣佳,等.河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析[J].农业资源与环境学报,2021,38(2):232-240.
- [18] 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.
- [19] 尹洪.四川省邛崃市水资源供需平衡分析及可持续开发利用研究[D].成都:四川农业大学,2010.
- [20] 杨木易,赵城生,张雪,等.土壤侵蚀定量评价及防治研究:以黑龙江省望奎县为例[J].佳木斯职业学院学报,2018(9):441-442.
- [21] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the Asae, 1994,37(6):1835-1840.
- [22] 胡云华,刘斌涛,宋春风,等.基于 USLE 模型的大小凉山地区土壤侵蚀定量研究[J].水土保持通报,2016,36(4):232-236.
- [23] 刘斌涛,宋春风,史展,陶和平.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):49-51,77.
- [24] 胡云华,刘斌涛,宋春风,等.基于 USLE 模型的大小凉山地区土壤侵蚀定量研究[J].水土保持通报,2016,36(4):234-235.
- [25] 李婷,张世熔,廖明辉,等.基于 3S 和 USLE 的沱江流域中游土壤侵蚀定量评价[J].水土保持研究,2011,18(1):24-27.
- [26] 彭建,李丹丹,张玉清.基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析[J].山地学报,2007,25(5):548-556.
- [27] 黄金良,洪华生,张珞平,等.基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J].水土保持学报,2004,18(5):75-77.
- [28] 徐新良.中国 GDP 空间分布 km 网格数据集[DB/OL]. [2021-01-20]. <https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIId=33>.
- [29] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 GB/SL190—96[S].北京:中国水利水电出版社,1966.