

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0015

刘金山,倪福全,邓玉,等.岷江上游流域土壤侵蚀风险评估[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):105-112. LIU J S, NI F Q, DENG Y, et al. Risk assessment of soil erosion in the upper reaches of Minjiang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 105-112. (in Chinese)

## 岷江上游流域土壤侵蚀风险评估

刘金山<sup>1</sup>,倪福全<sup>1,2</sup>,邓玉<sup>2</sup>,李林桓<sup>1</sup>,王志刚<sup>1</sup>,周登科<sup>3</sup>,聂超<sup>2</sup>,张洋<sup>2</sup>,马捷<sup>2</sup>

(1. 四川农业大学 环境学院,成都 611130;2. 四川农业大学 水利水电学院,四川 雅安 625014;  
3. 四川农业大学 资源学院,成都 611130)

**摘要:**针对岷江上游流域侵蚀现状、特点,在拟定评价指标的基础上,运用GIS加权叠加分析法探究了岷江上游流域侵蚀风险,得出如下结论:陡坡占61.20%,年均降雨量差异较大,土壤土质疏松绵软,地震影响强度高;中度以上侵蚀风险比例为89.31%,土壤侵蚀形势严峻;中度侵蚀风险区主要分布在水网附近,与土地利用类型以及人类生产生活密切相关;重度风险区主要分布在岷江上游流域的西部、西南部和南部周边地区,与“5·12”汶川特大地震密切相关;汶川、理县为重度风险侵蚀关键治理区,黑水、茂县、松潘为中度侵蚀风险治理区。

**关键词:**岷江上游;侵蚀风险;自然因素;社会因素;汶川地震

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Risk assessment of soil erosion in the upper reaches of Minjiang River

LIU Jinshan<sup>1</sup>, NI Fuquan<sup>1,2</sup>, DENG Yu<sup>2</sup>, LI Linhuan<sup>1</sup>, WANG Zhigang<sup>1</sup>, ZHOU Dengke<sup>3</sup>, NIE Chao<sup>2</sup>, ZHANG Yang<sup>2</sup>, MA Jie<sup>2</sup>

(1. College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

3. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** According to the current situation and characteristics of soil erosion in the upper reaches of Minjiang River, after determining the assessment indexes, we used the method of Weighted Superposition Analysis to explore the erosion risk. The results are as follows: In the upper reaches of Minjiang River, steep slopes make up 61.20% of the area; annual rainfall varies significantly; the soil is loose and soft; the impact of earthquake is strong. The ratio of moderate and above erosion risk was 89.31% in the study area, indicating a serious soil erosion situation. The moderate risk areas are mainly distributed near the water network, and are closely related to land use types and human activities; the high risk areas are mainly distributed in the west, southwest and south of the upper reaches of Minjiang River, and are closely connected with the Wenchuan Earthquake. Wenchuan County and Lixian County are key management regions of high erosion risk, and Heishui County, Maoxian County, and Songpan County are management regions of moderate erosion risk.

**Key words:** the upper reaches of Minjiang River; erosion risk; natural factors; social factors; Wenchuan Earthquake

收稿日期:2018-05-01 修回日期:2018-10-26 网络出版时间:2018-11-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181108.1406.004.html>

基金项目:四川省教育厅“农村水安全”四川省高等学校工程研究中心项目(035Z1502)

作者简介:刘金山(1990—),男,四川平昌人,主要从事农业水土环境研究。E-mail:1989804574@qq.com

通信作者:倪福全(1965—),男,四川崇州人,教授,博士,主要从事水安全和农业水土环境研究。E-mail:nfq1965@163.com

土壤侵蚀(soil erosion)是土壤矿物质与有机碳一起损失的复杂过程<sup>[1-2]</sup>,对食品安全、农业生产、生态建设、社会经济发展等均有较严重的影响,是世界环境研究中的热点问题。土壤侵蚀影响因子包括自然因素和社会因素,如人类活动、降雨、地形、土地利用方式等,其中自然因素直接影响侵蚀过程,而社会因素的影响则比较复杂<sup>[3-4]</sup>。模型是当前复杂因子影响下土壤侵蚀研究的有利工具,USLE、RULSE 以及 CSLE 等土壤侵蚀模型已广泛应用于流域以及区域宏观尺度的土壤侵蚀研究工作中,遥感、GIS 技术与模型的耦合更使大范围土壤侵蚀量的计算成为可能。Pham 等<sup>[5]</sup>利用土壤流失方程 USLE 和 GIS 技术对越南中部阿萨普河流域罗伊区进行了土壤侵蚀相关的量化分析,并分析了各影响因子对土壤侵蚀的敏感性;钱庆欢等<sup>[6]</sup>基于 GIS 与 RS 技术,结合 RULSE 模型研究了北盘江流域的土壤侵蚀空间分布特征,并分析了土壤侵蚀强度变化与影响因子间的关系;Zhang 等<sup>[7]</sup>基于 CSLE 土壤侵蚀模型完成了县级采样密度与外推法间差异的比较。目前,我国对土壤侵蚀的研究主要集中在平原或低山区,干旱河谷地带涉足相对较少。岷江上游流域作为典型的河谷干旱地带和长江经济带重要水源保护区,生态系统极端脆弱、敏感<sup>[8]</sup>,侵蚀风险的评估对长江经济带生态环境保护、社会经济可持续发展具有重要的现实意义。基于土壤侵蚀学理论,以 GIS 加权叠加分析法为技术依托,以岷江上游流域为研究区,通过侵蚀风险等级图开展流域土壤侵蚀评估,旨在为该区的的水土流失提供科学依据。

## 1 研究区概况

岷江上游流域(图 1)地处四川盆地向青藏高原过渡的高山峡谷地带,源于松潘县,止于都江堰市,位于 31°26'N~33°16'N,102°59'E~104°14'E,总面积 23 037 km<sup>2</sup>,高程 783~6 075 m,大部分介于 3 000~4 000 m。区域内高山耸立,江河深切,地表起伏大,分属邛崃山系和岷山山系,主要支流有小姓沟、黑水河、杂谷脑河、草坡河、鱼子溪、寿溪;下辖汶川县、理县、茂县、松潘县、黑水县等 5 县 80 个乡镇,是藏、羌、汉、回多民族聚居区,农村人口比重大,高于全省平均水平,农业从业人口比例高,平均达 74.4%;区域内山地气候垂直分布显著,植被空间异质性独特,草地、高山草甸、针叶林以及灌丛从低海拔到高海拔均有分布,土壤瘠薄,土层平均厚度仅 10~30 cm,为千枚岩残坡积物发育成的燥褐土,成分以砾石、粗沙为主,保水能力差,含水量极低;常年

日照时数 1 500~1 800 h,年均气温 10.2℃,年均降水量 725 mm;降雨季节变化明显,主要集中在汛期。上游段位于地质构造运动活跃的川西地槽区,地质构造复杂、地质活动频繁;地层以寒武系、泥盆系变质岩为主,褶皱强烈,抗侵蚀能力差,据统计岷江流域年土壤流失沙量达 5 000 万 t,占长江三峡口输沙量的 1/10<sup>[9]</sup>。人地矛盾突出,自然环境复杂、生态系统脆弱敏感、经济贫困、社会文化多元等一系列问题导致该区滑坡、水土流失、泥石流等灾害频发、多发、高发。



图 1 岷江流域上游水系、县域及气象站点分布  
Fig. 1 Distribution of rivers, counties, and meteorological stations in the upper reaches of Minjiang River basin

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

(1)高程数据来源于 ASTGTM2 提供的 30 m 分辨率 DEM,坡度、坡向利用掩膜技术从 DEM 获取。

(2)土地利用数据来源于国际地圈生物圈计划(International Geosphere Biosphere Program, IGBP)提供的 2015 年中国区域 1 km 土地利用与土地覆盖变化数据库。

(3)土壤数据来源于黑河计划数据管理中心、寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),由联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和维也纳国际应用系统研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)所构建的分辨率为 1 km 的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD);利用得到的上层土壤信息和通用土壤流失方程 USLE(Universal Soil Loss

Equation,USLE)进行  $K$  值计算,最后应用字段连接器获取。USLE 方程<sup>[10]</sup>为

$$\begin{cases} K_{USLE} = T_{csand} \cdot T_{clsi} \cdot T_{orgc} \cdot T_{hisand} \\ T_{csand} = 0.2 + 0.3 \times e^{[-0.256 \times P_{sd}(1 - \frac{P_{si}}{100})]} \\ T_{clsi} = (\frac{P_{si}}{P_{si} + P_{cl}})^{0.3} \\ T_{orgc} = 1 - \frac{0.25 \times P_c}{P_c + e^{[(3.72 - 2.95 \times P_c)]}} \\ T_{hisand} = 1 - \frac{0.7 \times (1 - \frac{P_{sd}}{100})}{(1 - \frac{P_{sd}}{100}) + e^{[-5.51 + 22.9 \times (1 - \frac{P_{sd}}{100})]}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K_{USLE}$ 为土壤可侵蚀性; $T_{csand}$ 为粗糙沙土地土壤侵蚀因子; $T_{clsi}$ 为黏壤土土壤侵蚀因子; $T_{orgc}$ 为土壤有机质因子; $T_{hisand}$ 为高沙质土壤侵蚀因子; $P_{sd}$ 为砂粒含量百分数; $P_{si}$ 为粉粒含量百分数; $P_{cl}$ 为黏粒含量百分数; $P_c$ 为有机质碳含量百分数。

(4)降雨量数据来源于相关水文和雨量观测站。

(5)“5·12”汶川特大地震土壤侵蚀影响风险图是通过震源到 80 个乡镇点的距离  $L$  进行 IDW 空间插值获取。 $L$  的计算式为<sup>[11]</sup>

$$L = R \times \arccos[\sin y_0 \sin y_i + \cos y_0 \cos y_i \cos(x_0 - x_i)] \quad (2)$$

式中: $L$ 为震源与研究点的直线距离(km); $R$ 为地球平均半径,取 6 371 km; $(x_i, y_i)$ 为第  $i$  个研究点的经纬度坐标( $^\circ$ ); $(x_0, y_0)$ 为震源的经纬度坐标( $^\circ$ )。

(6)水土保持措施  $P$  值图是根据本区实际情况赋值得到。赋值如下:水域赋值为 0,水田赋值为 0.035,旱地赋值为 0.37,居住建设用地赋值为 0.3,其它土地利用类型赋值为 1。

(7)植被覆盖度图层是基于 2015 年归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)计算式进行计算,并依据植被覆盖度标准获得。

(8)NDVI 计算式<sup>[12]</sup>为

$$F_c = (I_{NDV} - I_{NDV,soil}) / (I_{NDV,veg} - I_{NDV,soil}) \quad (3)$$

式中: $I_{NDV,soil}$ 为裸地的 NDVI 值; $I_{NDV,veg}$ 为高覆盖的 NDVI 值; $F_c$ 为植被覆盖度,其中:裸地 $<10\%$ 、低覆盖  $10\% \sim 30\%$ 、中低覆盖  $30\% \sim 45\%$ 、中覆盖  $45\% \sim 60\%$ 、高覆盖 $>60\%$ 。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 评估模型

采用加权平均模型<sup>[13]</sup>,公式为

$$W_i = \sum_{j=1}^n X_{ij} S_{ij} \quad (4)$$

式中: $X_{ij}$ 为第  $i$  个指标第  $j$  类等级的权重; $S_{ij}$ 为第  $i$

个指标第  $j$  类等级的赋值; $W_i$ 为第  $i$  个指标的综合得分值。

### 2.2.2 评判标准

指标体系中各指标对土壤侵蚀的影响程度不一,概括起来有正向指标和负向指标 2 类。正向指标的值越大,土地资源的维护和改善能力越强,土壤面临的侵蚀风险越小;负向指标则相反。评价标准是土壤侵蚀评价的重要参考,在遵循土地生态系统的一般规律和区域的特殊性前提下,将土壤侵蚀等级分为不敏感、轻度、中度、重度、极危险 5 类作为参照评判标准,见表 1。

表 1 土壤侵蚀评判标准  
Tab.1 Evaluation criteria of soil erosion

侵蚀级别	赋值	标准内涵
不敏感	1	生态结构十分合理,外界压力较小,土壤系统极稳定,处于可持续状态
轻度	2	生态结构比较合理、格局尚完美,外界压力较小,无生态异常,土壤系统尚稳定,生态系统可持续
中度	3	生态结构完整,具有一定的活力,外界压力较大,接近生态阈值,但敏感性强,已有少量的生态异常现象,土壤系统可维持,社会环境问题显现
重度	4	生态结构出现缺陷,系统活力较低,外界压力大,生态功能已经不能满足维持土壤系统的需要,土壤系统开始退化,社会经济发展受阻
极危险	5	自然植被斑块破碎严重,外界压力大,活力极低,生态异常大面积出现,生态系统已经受到严重破坏,土壤系统结构极不合理,残缺不全,功能丧失

### 2.2.3 去量纲化处理

土壤侵蚀风险评价中指标的性质不同,而且各有不同的计算公式,数据表达多样,需要将评价指标进行规范化、标准化处理,即去量纲化处理。通过赋值法进行去量纲化处理,将土壤侵蚀等级为不敏感、轻度、中度、重度、极危险依次赋值为 1、2、3、4、5,其中危险性最小为 1,最大为 5。

### 2.2.4 指标权重的确定

为客观评价研究区域土壤侵蚀潜在风险,尽量避免主观因素的影响,在采用特尔斐法(delphi)的基础上,运用层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)、利用 MATLAB 7.1 软件计算出评价因子的权重值,分别为:坡度 0.15、坡向 0.12、土地利用 0.04、植被覆盖度 0.05、年降水量 0.14、土壤可蚀性 0.17,汶川地震 0.21,水土保持措施 0.12。

### 2.2.5 技术手段

每幅图层数据都有自己的来源和分辨率,叠加时会可能导致图层不能重合相融,应用 GIS 加权叠加分析法获取地表土壤侵蚀的综合信息,主要包括以下 4 个步骤。

#### (1) 坐标校正

调用 ArcToolbox 工具,选择 DataManagementTools/Projections and Transportations/Raster/Define projection。图层最终投影坐标系为:WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N。

#### (2) 栅格转化

调用 ArcToolbox 工具,选择 Conversion tools/To raster/Feature to raster。指标图层文件由 Shape 格式转换为 Grid 重分类栅格图。

#### (3) 单位栅格大小调制

点击图层输出,选择 Data /Export Data,调 Export Raster Data 对话框,设置 Cell(cx,cy)大小。图层最终 Cell(cx,cy)为(100,100),TIFF 格式导出。

#### (4) 加权叠加

调用 ArcToolbox,选择 Spatial Analyst Tools/Overlay/Weighted overlay,加载图层和输入相应的权重,设置 Evaluation scale 1 to 5 by 1,完成叠加分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 图层赋值结果

依据相关的侵蚀标准,参照表 2 进行分级,获得指标图层赋值(见图 2)。

### 3.2 单因子分析

坡度对土壤侵蚀的影响主要通过影响土壤入渗实现,表现为入渗量随坡度的增大而减小,坡度越大,径流量越大,产生的土壤侵蚀量也越大。据中国农业区划委员会颁发的《土地利用现状调查技术规程》对坡度分为五级,即 $\leq 2^\circ$ 、 $2^\circ \sim 6^\circ$ 、 $6^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $> 25^\circ$ 。岷江上游流域的坡度范围介于  $0 \sim 77.55^\circ$ ,其中陡坡( $> 25^\circ$ )面积为 14 099.39  $\text{km}^2$ ,比例为 61.20%。除北部极小块区域外,岷江上游的坡度均较陡,对土壤侵蚀影响较大。

坡向通过影响土壤水分和日照时数对土壤侵蚀产生作用。据山南水北为阳的原则划分,侵蚀程度通常为:阳坡 $>$ 平地 $>$ 阴坡。阳坡面积为 8 541.20  $\text{km}^2$ ,约占 37.08%;平地面积 1.15  $\text{km}^2$ ,仅占 0.01%;阴坡比重大,约占 62.92%。其中,平地主要分布在河网附近,与人类生活生产密切相关。

表 2 指标分级与赋值

Tab. 2 Grading and assignment of indexes

指标	分级	比例/ %	面积/ $\text{km}^2$	重分类 侵蚀级别	赋值	
坡度/ $^\circ$	0~2	0.32	73.70	不敏感	1	
	2~6	1.66	382.49	轻度	2	
	6~15	10.15	2 338.49	中度	3	
	15~25	26.67	6 142.93	重度	4	
	>25	61.20	14 099.39	极危险	5	
坡向 <sup>[14]</sup>	北	11.46	2 640.04	不敏感	1	
	东北、西北、东、西	51.46	11 854.61	轻度	2	
	平面	0.01	1.15	中度	3	
	东南、西南	25.35	5 840.80	重度	4	
	南	11.72	2 700.40	极危险	5	
土地 利用 <sup>[15]</sup>	有林地	16.25	3 743.44	不敏感	1	
	灌木林	21.72	5 003.50			
	疏林地	5.78	1 332.11			
	其它林地	0.24	54.40			
	高覆盖度草地	12.93	2 978.87			
	中覆盖度草地	38.22	8 804.29			
	低覆盖度草地	2.08	479.32			
土地 利用 <sup>[15]</sup>	河渠	0.01	2.94	轻度	2	
	湖泊	0.08	19.11			
	水库坑塘	0.01	2.94			
	永久性冰川雪地	0.08	19.11			
	土地 利用 <sup>[15]</sup>	沼泽地	0.03	7.35	中度	3
		裸土地	0.02	4.41		
		裸岩石质地	0.04	8.82		
		城镇用地	0.02	4.41		
		农村居民点	0.06	13.23	重度	4
		平原水田	0.01	1.47		
山地旱地		2.32	535.20			
丘陵旱地		0.01	1.47			
平原旱地		0.02	4.41			
>25 $^\circ$ 坡地旱地		0.07	16.17	极危险		
年均 降雨量/ $\text{mm}$ <sup>[16-17]</sup>	488~600	23.28	5 362.64	不敏感	1	
	601~700	16.20	3 730.98	轻度	2	
	701~800	15.46	3 562.94	中度	3	
	801~1000	28.72	6 616.79	重度	4	
	1001~1237	16.34	3 763.65	极危险	5	
土壤可 侵蚀性 K	0.120~0.130	1.55	357.10	不敏感	1	
	0.131~0.142	22.65	5 217.95	轻度	2	
	0.142~0.153	0.25	56.43	中度	3	
	0.153~0.164	26.39	6 080.45	重度	4	
	0.164~0.175	49.16	11 325.06	极危险	5	
植被 覆盖度/ %	60~92	87.33	20 117.50	不敏感	1	
	45~60	5.32	1 224.84	轻度	2	
	30~45	3.54	814.51	中度	3	
	43 038	3.55	818.61	重度	4	
	1.6~10	0.27	61.55	极危险	5	
地震影 响因子 L/ $\text{km}$	164.21~204.47	21.51	4 955.15	不敏感	1	
	123.95~164.21	22.22	5 118.73	轻度	2	
	83.69~123.95	21.75	5 010	中度	3	
	43.43~83.69	20.82	4 795.40	重度	4	
	3.17~43.43	13.71	3 157.71	极危险	5	
水土保 持措施 P	0	0.19	44.11	不敏感	1	
	0~0.035	0.01	1.47	轻度	2	
	0.035~0.3	0.08	17.64	中度	3	
	0.3~0.37	2.42	557.25	重度	4	
	1	97.31	22 416.52	极危险	5	

注:为了更好的区分 K 值动态变化,保留 3 位有效数字。

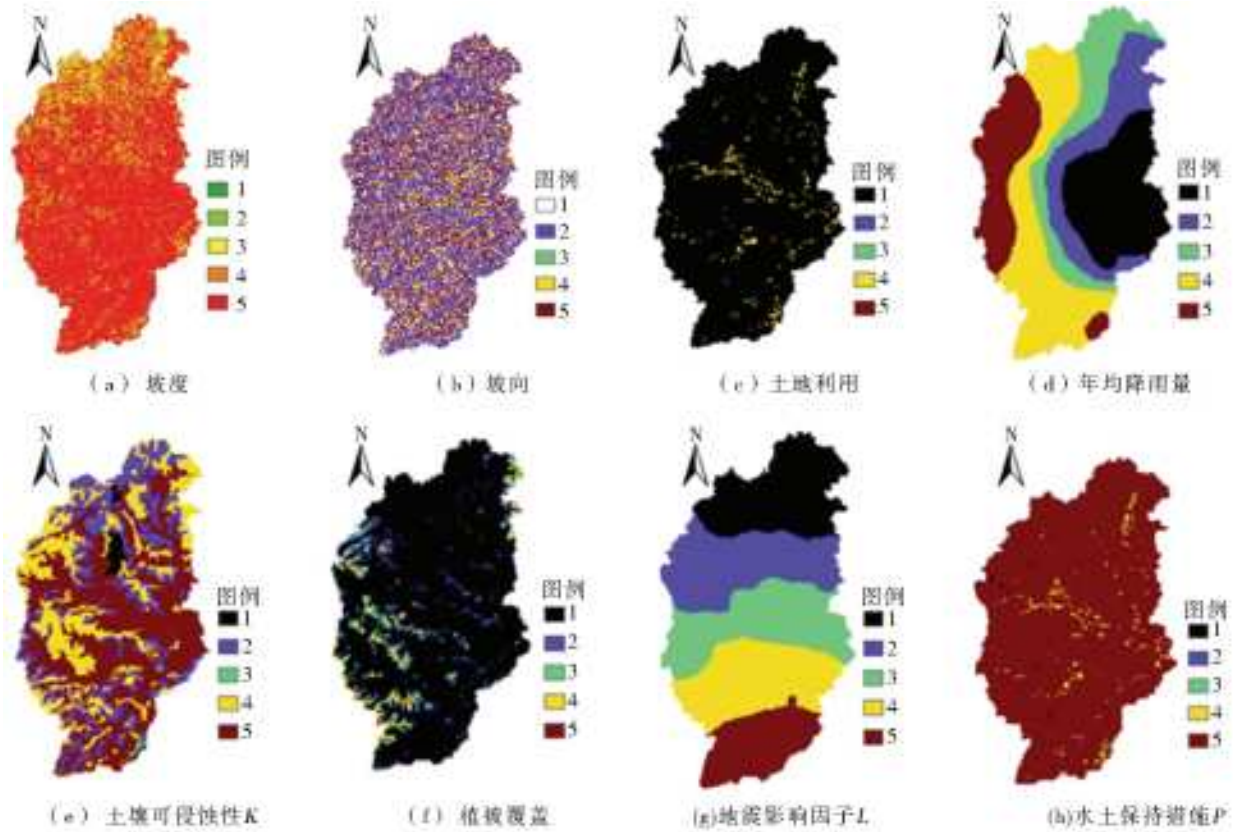


图2 指标图层赋值

Fig. 2 Layer assignment of indexes

土地利用类型与植被覆盖度、人类活动关系密切,植被覆盖度越低,人类活动越频繁,土壤发生侵蚀的风险越大<sup>[18-19]</sup>,其中人类活动为主要影响因素。 $>25^\circ$ 坡地旱地面积为 16.17 km<sup>2</sup>,占比为 0.07%,不仅人类活动剧烈、植被覆盖度低,而且是国家禁止耕作的坡耕地,土壤侵蚀风险最大;城镇用地、农村居民点、平原水田、山地旱地、丘陵旱地、平原旱地人类活动较剧烈,总面积为 560.19 km<sup>2</sup>,占比为 2.43%,主要分布在河网附近;沼泽地、裸土地、裸岩石质等未利用土地面积为 20.58 km<sup>2</sup>,主要零散分布在研究区北部,影响其侵蚀的主要因素为植被覆盖度低;河渠、湖泊、水库坑塘等是人类生产生活的水源地,面积为 44.1 km<sup>2</sup>,由于为降水汇集的地方,因此会对其周边造成一定的侵蚀;有林地、灌木林、疏林地、其它林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地等为岷江流域上游主要土地利用类型,比重大,占 97.22%,不仅受到植被的保护,而且人类活动较少,土壤侵蚀小。总之,土地利用对土壤侵蚀的影响主要位于河网附近。

降雨主要通过影响径流的大小影响土壤侵蚀程度。一般而言,湿润区 $>$ 干旱区。岷江流域上游湿润区的总面积为 13 943.38 km<sup>2</sup>,占 60.53%,主要分布在西部、南部地区,从北到南、从西至东,年

均降水量逐渐减小,年均差异较大,介于 488~1 237 mm。

土壤可蚀性  $K$  是评价土壤对侵蚀的敏感程度和进行土壤侵蚀预报的重要参数<sup>[20-21]</sup>。岷江上游土壤类型共计 30 种,主要为始成土、淋溶土、薄层土、普通泽泻、松软潜育土、粗骨土、普通灰色森林土、普通黑土、岩石露头、水体等 10 大类,其中始成土、淋溶土、薄层土面积分别为 3 060、8 555、10 335 km<sup>2</sup>,占比分别为 13%、38%、45%,这 3 种类型的土壤土质疏松绵软,降雨条件下易发生土壤侵蚀;岷江上游的  $K$  值介于 0.120~0.175,大于 0.164 的  $K$  值比例 49.16%,主要分布在河网附近。

植被是陆地生态系统中不可缺少的一部分,植被覆盖度的增加能够有效减缓土壤的侵蚀。岷江上游植被覆盖度在 60%~92% 的面积为 20 117.50 km<sup>2</sup>,占比 87.33%,低覆盖度主要位于研究区西部,可能与地震造成的植被破坏密切相关。

“5·12”汶川特大地震不仅对汶川县造成了很大的破坏,对周边县区也产生了很大的影响,特别是在地表岩土介质结构松散、坡度陡峻的山区影响尤其甚<sup>[22-23]</sup>。高玉峰等<sup>[24]</sup>通过对地震危险性概率分析计算发现:当潜在震源区中心点离场点距离很近时,潜在震源区面积越小,地震烈度、地震动峰值加速

度越大,其破坏性越强,据此原理,以震源为固定点,以 80 个乡镇为场点,通过距离  $L$  进行地震影响程度探究。岷江上游 80 个乡镇点距震源中心点的距离介于 3.17~204.47 km,最近为汶川县的漩口镇,最远为松潘县的山巴乡。受“5·12”汶川特大地震”影响划分的中度、重度、极危险面积分别为 5 010.4 795.40、3 157.71 km<sup>2</sup>,其中汶川、理县南部、茂县东部是地震影响最大的县域,主要位于岷江上游的南部。

水土保持措施(soil and water conservation

practice)  $P$  能够有效减少水土流失,是土壤侵蚀过程中的一个重要影响因子<sup>[25]</sup>,其值在 0~1,当采取水保措施有效控制土壤侵蚀时  $P$  取 0,在未采取任何水保措施时  $P$  取 1。岷江上游水土保持措施差,其中极危险地区面积为 22 416.52 km<sup>2</sup>,采取保护措施的区域主要位于河网附近。

### 3.3 多因子分析

将各单因子进行加权叠加分析,得到岷江上游土壤侵蚀风险空间分布(图 3)。岷江上游的土壤侵蚀风险类型主要为轻度、中度、重度 3 类。

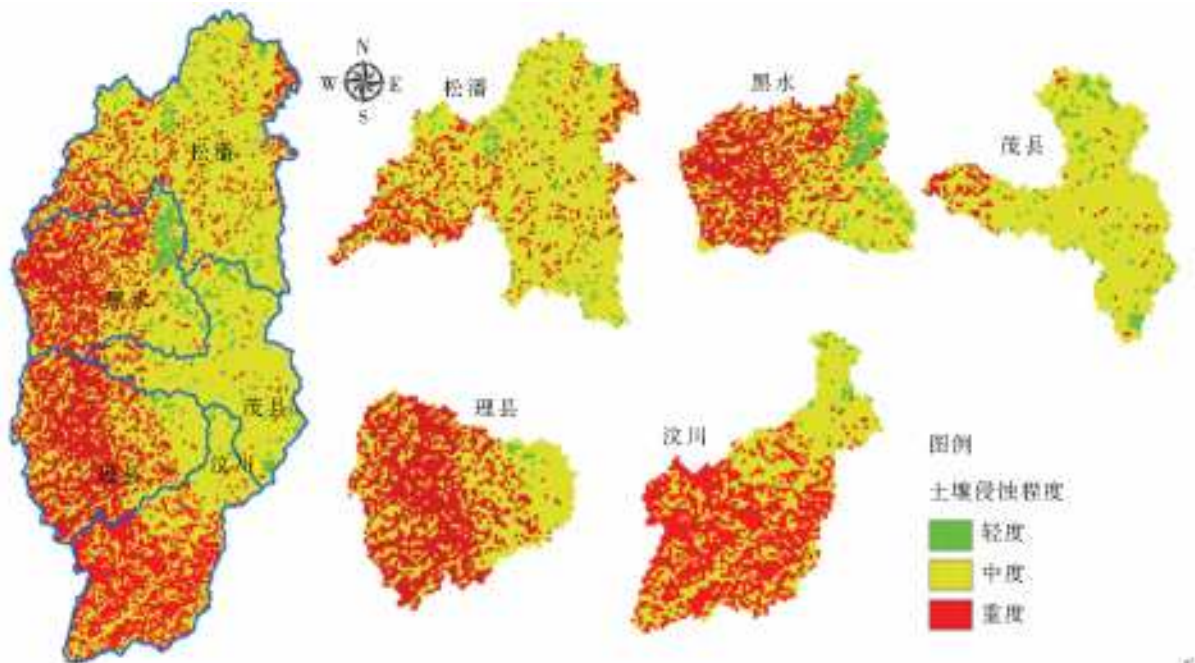


图 3 岷江上游流域土壤侵蚀风险

Fig. 3 Risk of soil erosion in the upper reaches of Minjiang River

重度风险区主要分布于岷江上游的西部、西南部和南部周边地区,面积约 5 158.33 km<sup>2</sup>,占 22.39%,其中汶川、理县所占比例分别为 11.86%、8.71%,侵蚀面积分别为 2 731.16、2 005.67 km<sup>2</sup>,几乎覆盖整个县域,为重度风险侵蚀关键治理地区。主要因为该区域坡度陡,植被覆盖度低,降水量大,且离“5·12”汶川特大地震震源近等。

中度侵蚀风险区主要位于研究区东部,面积约 15 416.34 km<sup>2</sup>,占 66.92%,主要分布于黑水、茂县、松潘县域内,主要因为该区域土地肥沃,人口聚集,生产生活扰动性大,且离“5·12”汶川特大地震”震源相对较远。

轻度侵蚀风险地区分布零散,面积约 2 462.66 km<sup>2</sup>,占 10.69%,主要分布于松潘县域内高程大的冰川地区以及水域、岩石地区,面积 2 337.44 km<sup>2</sup>。

岷江上游中度风险及以上的比例约为 89.31%,说明研究区整体土壤侵蚀风险较高。

## 4 结 语

(1) 总体而言,岷江上游流域坡度较陡,陡坡占 61.20%,年均降雨量差异较大,土壤土质疏松绵软,“5·12”汶川特大地震影响强度高。

(2) 岷江上游中度以上侵蚀风险比例为 89.31%,土壤侵蚀形势严峻。

(3) 汶川、理县为重度风险侵蚀关键治理区,黑水、茂县、松潘为中度侵蚀风险治理区。

(4) 中度侵蚀风险区主要分布在水网附近,与土地利用类型以及人类生产生活密切相关;重度风险区主要分布在岷江上游的西部、西南部和南部周边地区,与地震密切相关。

本文克服了区域侵蚀风险评估中以行政区域为评价单元时常将相关指标在空间上“强制平均”的缺点,可以获得指定尺度的风险情况;研究方法简捷高效,为类似问题的处理提供了借鉴。

## 参考文献(References):

- [1] WEI S,ZHANG X,MCLAUGHLIN N B,et al. Impact of soil water erosion processes on catchment export of soil aggregates and associated SOC [J]. *Geoderma*, 2017,294 :63-9. DOI:org/10.1016/j.geoderma.2017.01.021.
- [2] GUERRA A J T,FULLEN M A,SHOKR M S,et al. Slope processes,mass movement and soil erosion:A review[J]. *Pedosphere*, 2017, 27 (1): 27-41. DOI: 10.1016/S1002-0160(17)60294-7.
- [3] 蔡卓杰,卢远,谢坤坚. 广西人类活动对土壤侵蚀的影响[J]. *中国水土保持*,2017(2):51-53. (CAI Z J,LU Y,XIE K J. Effects of human activities on soil erosion in Guangxi [J]. *China Soil and Water Conservation*, 2017,2: 51-53. (in Chinese)) DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2017.0042.
- [4] FANG N F,WANG L,SHI Z H. Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China [J]. *Journal of Hydrology* , 2017, 552: 387-395. DOI:org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.048.
- [5] PHAM T G,DEGENER J,KAPPAS M. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin:Central Vietnam[J]. *International Soil and Water Conservation Research*,2018,6(2):99-110. DOI.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001.
- [6] 钱庆欢,白晓永,周德全,等. 基于 RULSE 模型的北盘江流域土壤侵蚀研究[J]. *人民珠江*,2018,39(2):19-25. (QIAN Q H,BAI X Y,ZHOU D Q,et al. Study on soil erosion in the North Pan River basin based on RULSE model [J]. *People's Pearl River*,2018,39 (2): 19 -25. (in Chinese)) DOI: 11.3969/ j. issn. 1001-9235.2018.02.005.
- [7] ZHANG H,ZHANG R,QI F,et al. The CSLE model based soil erosion prediction:Comparisons of sampling density and extrapolation method at the county level [J]. *Catena*,2018,165(4):465-472. DOI.org/10.1016/j.catena.2018.02.007.
- [8] 陈金月,王石英. 岷江流域上游生态环境脆弱性评价[J]. *长江流域资源与环境*,2017,26(3):471-479. (CHEN J Y,WANG S Y. Assessment of eco-environmental vulnerability in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze River basin*, 2017, 26 (3): 471-479. (in Chinese)) DOI:10.11870/cjlyzyyhj201703018.
- [9] 伏耀龙. 岷江上游干旱河谷区土壤质量评价及侵蚀特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012. (FU Y L, Soil quality assessment and erosion characteristics in the arid valley area of the upper reaches of Minjiang River [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University,2012. (in Chinese))
- [10] WANG B,ZHENG F,GUAN Y. Improved USLE-K factor prediction:A case study on water erosion areas in China[J]. *International Soil & Water Conservation Research*,2016,4 (3) :168-176. DOI:org/10.1016/j.iswcr.2016.08.003.
- [11] 张艳芳. Android 手机 Web 地图服务的应用设计 [D]. 南昌:南昌大学,2010. (ZHANG Y F. Application design of Android mobile phone Web map service [D]. Nanchang: Nanchang University,2010. (in Chinese)) DOI:10.7666/d.y1657049.
- [12] YANG H,LUO P,WANG J,et al. Ecosystem evapotranspiration as a response to climate and vegetation coverage changes in northwest Yunnan, China [J]. *Plos One*, 2015, 10(8): 1-17. DOI: 10.1371/journal.pone.0134795.
- [13] ZHANG L B,PENG F,LONG M,et al. Identifying source camera using guided image estimation and block weighted average[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2017, 48: 471-479. DOI:org/10.1016/j.jvcir.2016.12.013.
- [14] 王维芳,尹铭昕,李国春,等. 基于 GIS 的土壤侵蚀潜在危险性评价 [J]. *森林工程*, 2014, 30 (3): 1-5. (WANG W F,YI M X,LI G C,et al. Potential risk assessment of soil erosion based on [J]. *GIS forest engineering*,2014, 30 (3): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-005X.2014.03.002.
- [15] 董起广,韩霁昌,张卫华,等. 延安市土地利用与土壤侵蚀关系研究[J]. *人民黄河* ,2016 ,38 (4) :79-81. (DONG Q G,HAN J C,ZHANG W H,et al. Study on the relationship between land use and soil erosion in Yanan [J]. *Yellow River*,2016,38 (4):79-81. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2016.04.018.
- [16] 王玉,曹丽华,石玉晶. 基于 ArcGIS 的山东省降雨量与土壤侵蚀相关性分析[J]. *城市建设理论*研究,2013 (24):6-10. (WANG Y,CAO L H,SHI Y J. Correlation analysis of rainfall and soil erosion in Shandong Province based on ArcGIS[J]. *Theoretical Study of Urban Construction*,2013(24):6-10. (in Chinese))
- [17] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬. 黔西高原侵蚀性降雨特征分析[J]. *水土保持研究* ,2016 ,23 (2) :39-43. (GU J R,ZHANG X Q,GU L B. Analysis of erosive rainfall in Qianxi Plateau [J]. *Soil and Water Conservation Research*,2016, 23 (2): 39-43. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.02.008.
- [18] MENG X Y,WANG H,WU Y P,et al. Investigating

- spatiotemporal changes of the land surface Processes in Xinjiang using high-resolution CLM3. 5 and CL-DAS; Soil temperature[J]. Scientific Reports, 2017, 7. (in Chinese)) DOI:10. 1038/s41598-017-10665-8.
- [19] MENG X, WANG H. Significance of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model(CMADS)of East Asia[J]. Water, 2017, 9(10): 765. DOI:10. 3390/w9100765.
- [20] 周宁, 李超, 琚存勇, 等. 黑龙江省土壤可蚀性 K 值特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 182-189. (ZHOU N, LI C, JU C Y, et al. Heilongjiang Province soil characteristics analysis [J]. Journal of Agricultural Engineering Value Map of k, 2015, 31(10): 182-189. (in Chinese)) DOI:10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2015. 10. 024.
- [21] 林芳, 朱兆龙, 曾全超. 延河流域三种土壤可蚀性 K 值估算方法比较[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1-5. (LIN F, ZHU Z L, ZENG Q C. Comparison of three methods for estimating soil erosion K values of Yanhe River basin [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 54(5): 1-5. (in Chinese)) DOI:10. 11766/trxb201611290469.
- [22] 丁海容, 李勇, 闫亮. 汶川地震驱动的危害链对岷江上游输沙量的影响[J]. 成都理工大学学报, 2013, 40(6): 712-720. (DING H R, LI Y, YAN L. The impact of Wenchuan earthquake driven disaster chain on the sediment transport in the upper reaches of Minjiang River [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2013, 40(6): 712-720. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1671-9727. 2013. 06. 11.
- [23] 王钧, 宇岩, 欧国强. 岷江上游汶川地震重灾区山洪灾害危险分区研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 54-60. (WANG J, YU Y, OU G Q. Flood disasters hit Minjiang River upstream of Wenchuan earthquake risk zoning research [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1): 54-60. (in Chinese)) DOI:10. 11988/ckyyb. 20150956.
- [24] 高玉峰, 谢康和, 王朝晖, 等. 潜在震源区范围的不确定性对地震危险性分析结果的影响规律[J]. 科技通报, 1999, 16(4): 259-262. (GAO Y F, XIE K, WANG Z H, et al. The influence of the uncertainty of the range of potential focal area on the results of seismic hazard analysis [J]. science and Technology Bulletin, 1999, 16(4): 259-262. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1001-7119. 1999. 04. 003.
- [25] 邬铃莉, 杨文涛, 王云琦. 基于 WEPP 模型的水土保持措施因子与侵蚀量关系研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 955-960. (WU L L, YANG W T, WANG Y Q. Study on the relationship between soil and water conservation measures and erosion based on WEPP model [J]. Soil Bulletin, 2017, 48(4): 955-960. (in Chinese)) DOI:10. 19336/j. cnki. trtb. 2017. 04. 27.

## 《南水北调与水利科技》期刊亮点之网络首发—— 科技创新成果发布的“绿色通道”

2018 年,网络首发平台开辟了优秀成果快速发表的“绿色通道”,《南水北调与水利科技》期刊首批实现了学术论文网络首发。论文经专家终审后,符合首发模版要求的论文将在 48 小时内完成发表,从此,论文发表从一年多缩至几天。将优质学术成果第一时间刊发,并在国际学术界迅速传播。

还可以配发相关文字材料、数据表格、图形文件、音视频文件等,有利于作者充分表达学术思想,同时让读者借助数字资源更加全面地理解和使用研究成果。