

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.003.

余恩旭, 张明芳, 蒋志魏, 等. 岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 1-10.

YU Enxu, ZHANG Mingfang, JIANG Zhiwei, et al. Spatiotemporal Dynamics of Soil Erosion and Associated Influencing Factors in the Upper Minjiang River Watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 1-10.

# 岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析

余恩旭<sup>1</sup>, 张明芳<sup>1,2</sup>, 蒋志魏<sup>1</sup>, 徐亚莉<sup>1</sup>, 邓诗宇<sup>1</sup>

(1.电子科技大学 资源与环境学院, 成都 611731; 2.电子科技大学 长三角研究院(湖州), 浙江 湖州 313001)

**摘要:**为研究岷江上游流域土壤侵蚀动态变化情况,使用通用土壤流失方程(USLE)和统计学、空间分析等方法探讨了该区域2001—2017年土壤侵蚀时空演变特征及其成因。结果表明:(1)岷江上游流域土壤侵蚀主要发生在西部、西南部、东北部和东南部。(2)土壤侵蚀模数显著减小区域主要分布在流域西部和西南部,从地形、降水和土地利用看,主要分布于海拔2 500~5 000 m、坡度大于15°、年均降水量800~1 200 mm的区域和林地侵蚀区。土壤侵蚀显著增加区域主要分布在北部和东南部,其中以中山、亚高山区域和年均降水量400~800 mm的干旱河谷区域为主。(3)土壤侵蚀状况与海拔、坡度、年降水量和植被类型在空间上呈显著正相关关系( $p < 0.05$ ),随着海拔、坡度、年降水量增加,土壤侵蚀现象越明显。(4)未利用地、草地和林地土壤侵蚀较明显,侵蚀占比(轻度及以上侵蚀面积占该类型的比例)分别为87.11%,39.75%和9.49%。(5)不同类型林地侵蚀占比由大到小为疏林地(15.04%)>针叶林(13.50%)>混交林(4.41%)>阔叶林(0.97%)。林地土壤侵蚀主要受降水和植被覆盖度影响;而灌木和草地土壤侵蚀主要受制于降水。综上,未来该区域生态恢复需要重点加强对高海拔带(>2 500 m)、坡度大于25°以及草地区域的植被恢复研究,进一步提高各类型植被水源涵养功能,开展流域土壤侵蚀分类治理,提高区域土壤侵蚀防治效果。

**关键词:**岷江上游流域; 土壤侵蚀; 动态评价; 时空特征; 植被变化

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0001-10

## Spatiotemporal Dynamics of Soil Erosion and Associated Influencing Factors in the Upper Minjiang River Watershed

YU Enxu<sup>1</sup>, ZHANG Mingfang<sup>1,2</sup>, JIANG Zhiwei<sup>1</sup>, XU Yali<sup>1</sup>, DENG Shiyu<sup>1</sup>

(1.School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2.Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou, Zhejiang 313001, China.)

**Abstract:** The Universal Soil Loss Equation (USLE), statistical and partial correlation analysis were used to examine the spatiotemporal evolution and causes of soil erosion in the upper Minjiang River watershed from 2001 to 2017 in order to understand the dynamic change of soil erosion in this region. The results showed that: (1) soil erosion mainly occurred in the west, southwest, northeast, and southeast of the study area; (2) the areas with significant decrease of soil erosion mainly distributed in forestlands and the areas with the elevation from 2 500~5 000 m, slope gradient greater than 15° and annual precipitation of 800~1 200 mm in the west and southwest; the areas with significant increase of soil erosion mainly distributed in the north and southeast of the study area; (3) soil erosion was positively correlated with altitude, slope gradient, annual precipitation, and vegetation types ( $p < 0.05$ ); (4) the soil erosion mostly distributed in undeveloped land, grassland, and woodland, and the erosion rates (the proportion of area of erosion classified as mild and above

收稿日期:2021-07-17

修回日期:2021-10-15

资助项目:国家重点研究发展计划(2017YFC0505006);国家自然科学基金项目(31770759)

第一作者:余恩旭(1996—),男,四川成都人,硕士,主要从事森林生态与3S技术研究。E-mail:enxuyu96@163.com

通信作者:张明芳(1982—),女,四川德阳人,博士,教授,主要从事生态水文信息采集与分析、流域生态恢复与规划管理等研究。E-mail:mingfangzhang@uestc.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

to each land use type) were 87.11%, 39.75%, and 9.49%, respectively; (5) the contributions of soil erosion intensities of or sparse woodland, coniferous forest, mixed forest, and broad-leaved forest to total erosion intensity were 15.04%, 13.50%, 4.41%, and 0.97% respectively; soil erosion in woodland was mainly affected by precipitation and vegetation coverage while that in shrub and grassland was mainly affected by precipitation. In conclusion, the soil erosion in the upper Minjiang River watershed had the distinct spatial and temporal variation, which was mainly determined by precipitation, topography and vegetation type. These findings can benefit the design of soil erosion control practices to protect natural environment in the upper Minjiang River watershed according to graphic and vegetation types.

**Keywords:** upper Minjiang River watershed; soil erosion; dynamic evaluation; spatiotemporal characteristics; vegetation change

土壤侵蚀会引起土地退化、土壤肥力下降、泥沙淤积和生态环境恶化等问题<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀已成为全球的重要生态环境问题,尤其在地形起伏较大的山区尤为严重<sup>[2]</sup>。岷江上游流域地处青藏高原到四川盆地的过渡带,地形起伏大,地质破碎,夏季多暴雨,易发生滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害;加之早期森林资源破坏严重,水土保持能力下降,局部土地沙化和石质化等,导致该地区水土流失严重,被列为国家级水土保持重点预防和防治区域之一<sup>[3]</sup>。与此同时,岷江上游流域作为长江上游重要水源涵养和水土保持区,是成都平原的生态围栏。该区域土壤侵蚀变化直接影响长江上游和成都平原的生态环境质量。因此,开展岷江上游土壤侵蚀的时空特征以及其成因研究十分必要,能够为相关部门治理水土流失、构筑长江上游生态安全屏障提供科学依据。

部分学者围绕岷江上游土壤侵蚀分布及驱动因素开展了相关研究<sup>[2,4-8]</sup>。根据龚雪梅的研究,1995—2014年岷江上游流域土壤侵蚀敏感性以轻度和中度为主,高度和极敏感区域主要分布在干旱河谷和高山裸土区<sup>[7]</sup>。姜琳等进一步指出2000—2010年岷江上游流域侵蚀较严重的区域主要分布在25°~45°坡度带、海拔<2 000 m和海拔4 000~5 000 m区域<sup>[2]</sup>。岷江上游流域土壤侵蚀主要受到地形、降水、土地利用、植被覆盖和人类活动的影响。据孟兆鑫等对岷江流域1995—2005年土壤侵蚀研究表明林地、草地面积之和与土壤侵蚀面积呈显著线性相关,且降水是土壤侵蚀的驱动因素之一<sup>[4]</sup>。刘金山等对岷江上游2015年土壤侵蚀风险评估结果表明中度侵蚀区域分布在水网附近,并指出土壤侵蚀与土地利用类型和人类活动关系密切<sup>[6]</sup>。但是上述研究多针对岷江上游流域某一年或短期土壤侵蚀空间分布特点和部分影响因素,尚不足以全面和系统地揭示区域土壤侵蚀的长期动态(趋势性和平稳性)、空间分布特征及其成因的区

域分异规律。本研究应用USLE模型,结合ArcGIS,SPSS等专业软件,运用相关性分析、平稳性分析、趋势分析、偏相关等方法研究岷江上游流域2001—2017年土壤侵蚀时空变化的趋势性和平稳性特征、时空分异规律及其对驱动因子尤其是植被变化的响应。本研究可为岷江上游流域土壤侵蚀分类治理、提升植被水源涵养功能、构筑长江上游生态安全屏障提供科学依据。

## 1 研究区概况

岷江上游流域(102°35′—103°56′E, 30°45′—33°09′N)位于青藏高原东南缘,横断山脉北端与川西高山峡谷东侧的结合部,包含黑水县、理县、汶川县、茂县、松潘县和都江堰市部分地区。流域面积约为2.287万km<sup>2</sup>,干流全长约337 km(图1)。该流域地处四川盆地丘陵山地过渡地带,西北高东南低,流域海拔在724~5 893 m,地形起伏较大,地貌类型较复杂。岷江上游水资源充沛,年均流量约158亿m<sup>3</sup>,丰水期(6—10月)流量占全年的75%。受地形影响,气候垂直分异明显,沿海拔梯度分布亚热带、温带、亚高山和高山寒带等多种气候<sup>[9]</sup>。夏季温凉,冬春寒冷,年均气温在5.7~13.5℃,干湿季分明,空间上降水分配不均,年均降水量约为500~850 mm。土壤种类较丰富,有高山草甸土、暗棕壤等<sup>[10]</sup>。受气候和地形影响,植被类型多样且呈现垂直分布规律<sup>[11]</sup>,森林、灌木和草甸的面积比重分别为35.38%,40.18%和24.13%<sup>[12]</sup>。岷江上游流域是典型贫困区,经济发展落后,生产生活多以传统林业和牧业为主<sup>[5]</sup>。冷杉、云杉为该地区主要的针叶林树种。建国初期,原始针叶林遭受到严重砍伐,天然林资源几近枯竭,生态系统退化严重;直到20世纪末,随着“退耕还林”和“天然林保护工程”等生态保护项目的实施,该流域生态环境逐渐恢复<sup>[13]</sup>。

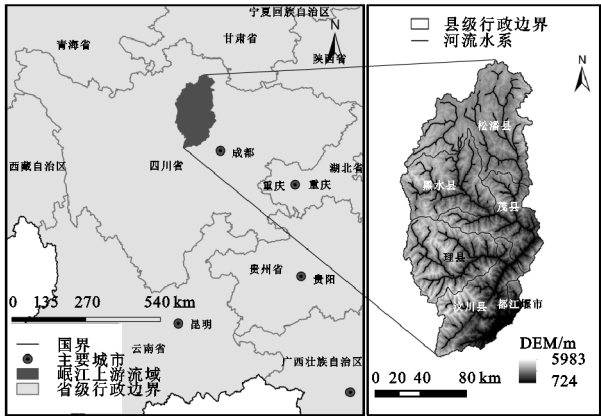


图 1 岷江上游流域区位

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与预处理

研究数据包括土地覆盖、土壤、降水、植被指数、

地形等数据,数据信息及来源见表 1。MCD12Q1 土地覆被数据用于研究不同土地利用类型/植被类型土壤侵蚀变化状况;中国科学院南京土壤研究所发布的 1 : 100 万中国土壤数据库所包含的沙粒、黏粒、粉粒、有机质含量等土壤理化信息用于土壤侵蚀模数中土壤可蚀性因子计算。基于 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成 2001—2017 年 5—9 月的空间分辨率为 1 km NDVI 月值数据用于降雨侵蚀力因子计算;DEM 数据空间分辨率为 30 m,用于地形因子计算以及不同地形条件下土壤侵蚀状况分析。降水栅格数据采用 ANUSPLIN 专业插值软件对获取的降水数据(txt 文件)进行插值得到。投影坐标统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_47N,空间分辨率统一为 500 m×500 m。

表 1 研究数据介绍

数据	空间尺度	分辨率	来源	时间长度/年
MODIS MCD12Q1	全球	500 m	<a href="https://lpdaac.usgs.gov/">https://lpdaac.usgs.gov/</a>	2001—2017
1 : 100 万中国土壤数据库	中国	矢量数据	<a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a>	1995
降水数据	四川省	逐日降水	<a href="http://data.cma.cn/">http://data.cma.cn/</a>	2001—2017
SPOT/VEGETATION NDVI	中国	1 km	<a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a>	2001—2017(5—9 月)
DEM	四川省	30 m	<a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a>	—

### 2.2 研究方法

2.2.1 土壤侵蚀模数计算 使用通用土壤流失方程计算岷江上游流域逐年土壤侵蚀模数(A),涉及降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、植被覆盖因子(C)、地形因子(LS)和水土保持措施因子(P),求取土壤侵蚀模数后按照土壤侵蚀模数分级标准(表 2)<sup>[14]</sup>进行分级。其中 LS 因子空间分布图由 SAGA GIS 软件中 Hydrology 工具生成,P 因子空间分布图根据表 3 在 ArcMap 中生成,其余各因子的计算公式和相关说明如下所示<sup>[9,15]</sup>:

$$A=R\times K\times LS\times C\times P$$

$$F=\sum_{i=1}^{12}\frac{J_i}{J} \quad R=4.17\times F-152$$

$$K=\left\{0.2+0.3\times\exp\left[-0.0256\times SD\times\left(1-\frac{SI}{100}\right)\right]\right\}\times\left(\frac{SI}{CI+SI}\right)^{0.3}\times\left[1.0-\frac{0.25\times CA}{CA+\exp(3.72-2.95\times CA)}\right]\times\left\{1.0-\frac{0.7\times\left(1-\frac{SD}{100}\right)}{\left(1-\frac{SD}{100}\right)+\exp[-5.51+22.9\times\left(1-\frac{SD}{100}\right)]}\right\}$$

$$f_c=(NDVI-NDVI_{soil})/(NDVI_{veg}-NDVI_{soil})$$

$$C=\begin{cases} 1 & f_c=0 \\ 0.6508-0.3436\times\lg(f_c) & 0<f_c\leq 78.3 \\ 0 & 78.3<f_c \end{cases}$$

式中:A 为土壤侵蚀模数[t/(km<sup>2</sup>·a)];R 为降雨侵蚀力因子[MJ/(km<sup>2</sup>·a)];K 为土壤可蚀性因子(t/MJ);LS 为地形因子;C 为植被覆盖因子;P 为水土保持措施因子,均无量纲;i 为月份;J<sub>i</sub>为月降水量;J 为年降水量(mm);SD 为沙粒含量;CI 为黏粒含量;SI 为粉粒含量;CA 为有机碳含量,单位均为(%);f<sub>c</sub>为植被覆盖度;NDVI<sub>veg</sub>为全植被覆盖像元的 NDVI 值;NDVI<sub>soil</sub>表示无植被覆盖像元的 NDVI 值;将 NDVI 统计直方图 5%所对应的值确定为 NDVI<sub>soil</sub>;NDVI 统计直方图 95%所对应的值定为 NDVI<sub>veg</sub>。

2.2.2 趋势、相关性以及平稳性检验 Pearson 相关系数方法常用来计算线性相关、相互独立、成对观测以及符合/接近正态分布的两组变量之间直线相关性<sup>[16]</sup>。Kendall 相关系数和 Spearman 相关系数是一种衡量两个变量依赖性的非参数指标。这两种方法对于数据的要求较少,不考虑数据的分布形态,适用性较广<sup>[17-18]</sup>。本研究采用上述方法检验土壤侵蚀模数与海拔、高程、年降水量等环境因子的时空相关性。使用偏相关方法分析不同类型植被(林地、灌木、草地)的土壤侵蚀模数和植被覆盖、降水之间的相关性,分别排除降水和植被覆盖度的影响。

单根检验(DF 检验)是用来检验序列平稳性的方法,本文所使用的 ADF 检验是对 DF 检验的扩充。通过建立时间序列的自回归方程,引入滞后算子构建



特征方程,根据特征根的绝对值来判断序列是否平稳,其准确性受到自回归方程精确性影响<sup>[19]</sup>。本文

使用该方法检验土壤侵蚀轻度及以上面积在时间序列上的平稳性。

表 2 土壤侵蚀模数分级标准

分级	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	<500	500~2500	2500~5000	5000~8000	8000~15000	>15000

表 3 岷江上游地区不同土地利用类型的 P 值 <sup>[15]</sup>			
类型	P 值		
	坡度<5°	坡度 5°~10°	坡度>10°
林地	0.8	0.9	1
草地	0.8	0.9	1
水域湿地	0	0	0
耕地	0.3	0.5	0.6
建设用地	0	0	0
未利用地	1	1	1

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀时空变化特征

据岷江上游流域 2001 年、2006 年、2011 年、2016 年土壤侵蚀分级图显示,岷江上游流域土壤侵蚀多发

生在西部、西南部、东北部和东南部,汶川县、理县、黑水县和松潘县土壤侵蚀较明显(图 2)。其中强度、极强度和剧烈土壤侵蚀主要发生在松潘县东部,黑水县东部,理县中部、北部及西部,汶川西部等地区。

据图 3A,整个流域土壤侵蚀以微度侵蚀为主,其次是轻度侵蚀、中度侵蚀和重度侵蚀,轻度及以上侵蚀面积总体变化趋势不显著( $p>0.10$ )且变化平稳( $p<0.10$ ),但年际波动明显,其中 2001 年、2004 年、2008 年、2012 年、2014 年、2015 年和 2017 年土壤侵蚀相对严重。2001—2017 年流域土壤侵蚀变化趋势的空间分异明显。17 年间土壤侵蚀模数呈显著减小的区域主要分布在流域的西部和西南部,显著增加的区域主要分布在北部和东南部(图 3B)。

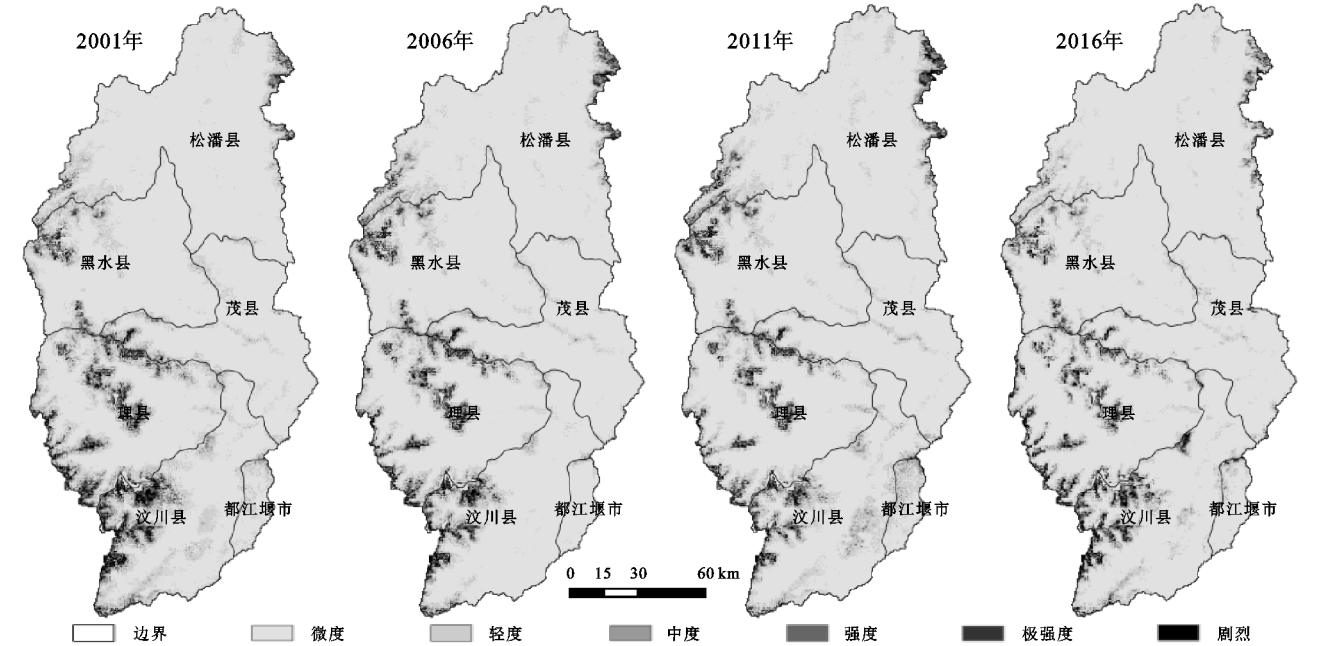


图 2 2001—2017 年岷江上游流域土壤侵蚀分级

2001—2017 年土壤侵蚀模数变化显著的区域主要集中在海拔 2 500~5 000 m 和坡度大于 15°的地区。其中 49.74%的土壤侵蚀模数显著减小( $p<0.10$ )区域位于 2 500~4 000 m 海拔带,51.18%的土壤侵蚀模数显著增大( $p<0.10$ )区域位于 4 000~5 000 m 海拔带。89.00%的土壤侵蚀模数显著减小( $p<0.10$ )区域位于坡度大于 15°的地区,与此同时,81.80%土壤侵蚀模数显著增大( $p<0.10$ )也分布在坡度大于 15°的地区(图 4)。就年均降水量看,土壤侵蚀显著减少的区域主要分布在 800~1 200 mm 降水带,土

壤侵蚀显著增加的区域主要分布在 400~800 mm 降水带,面积占比分别为 58.09%,53.81%。就土地利用类型看,土壤侵蚀显著减少的区域主要分布在林地,而显著增加的区域主要分布在草地。

3.2 土壤侵蚀时空分异规律

土壤侵蚀模数与海拔、坡度、年降水量、植被类型空间上显著相关( $p<0.05$ )(表 4),土壤侵蚀的时空分异规律明显。

3.2.1 年降水量与土壤侵蚀 2001—2017 年岷江上游年降水量呈上升趋势(图 5A),2001—2007 年整体

趋势下降,波动性较强;2008—2017 年降水量增加,增速为 170.33 mm/10 a。就各降水带内土壤侵蚀强度分布来看(图 5B),400~800 mm,800~1 200 mm、大于 1 200 mm 降水带下的轻度及以上土壤侵蚀面积占比依次增加,说明降水量越高的地带其高强度土壤侵蚀的比例越高。

17 年间,整个流域内土壤侵蚀主要发生在降水量低

的区域。400~800 mm 降水带土壤侵蚀面积占流域土壤侵蚀总面积的 67.19%,并且以微度侵蚀为主,轻度及以上侵蚀比例仅为 10.73%。800~1 200 mm 降水带土壤侵蚀面积占流域土壤侵蚀总面积的 32.14%,其中 43.77%为轻度及以上侵蚀。>1 200 mm 降水带土壤侵蚀面积最少(0.67%),其中轻度及以上侵蚀面积占 79.41%(表 5)。

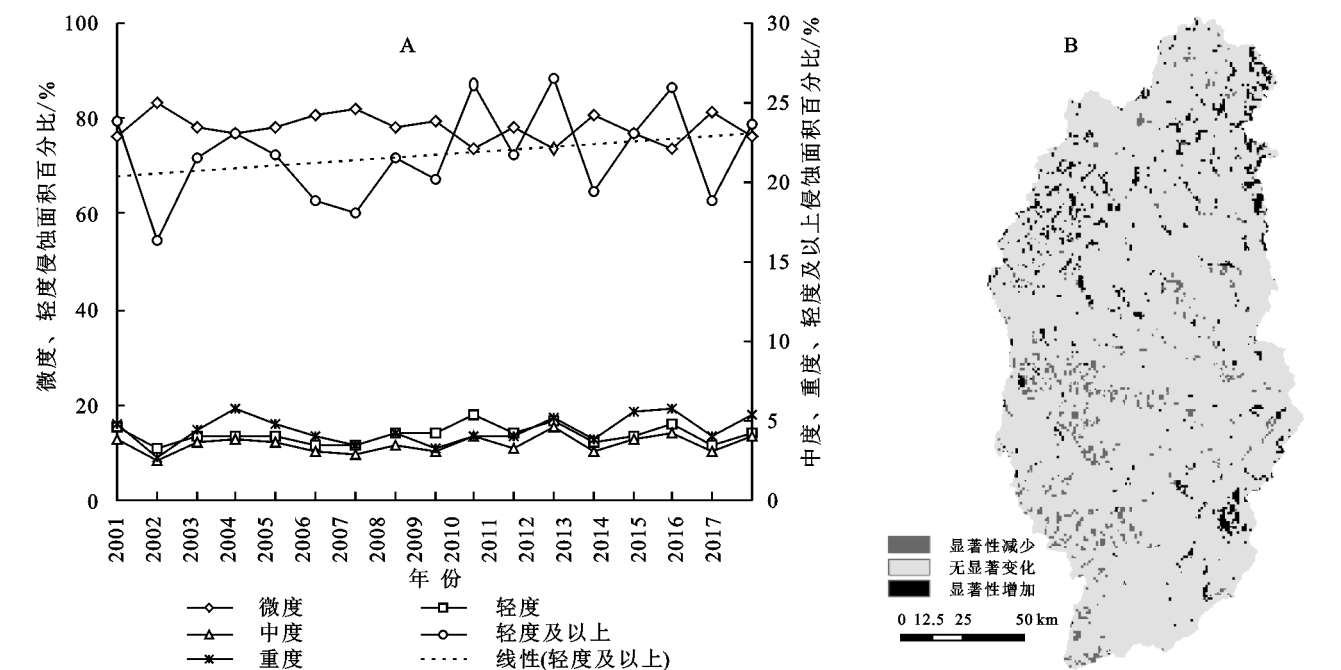


图 3 2001—2017 年不同侵蚀级别趋势及土壤侵蚀模数变化趋势空间分布

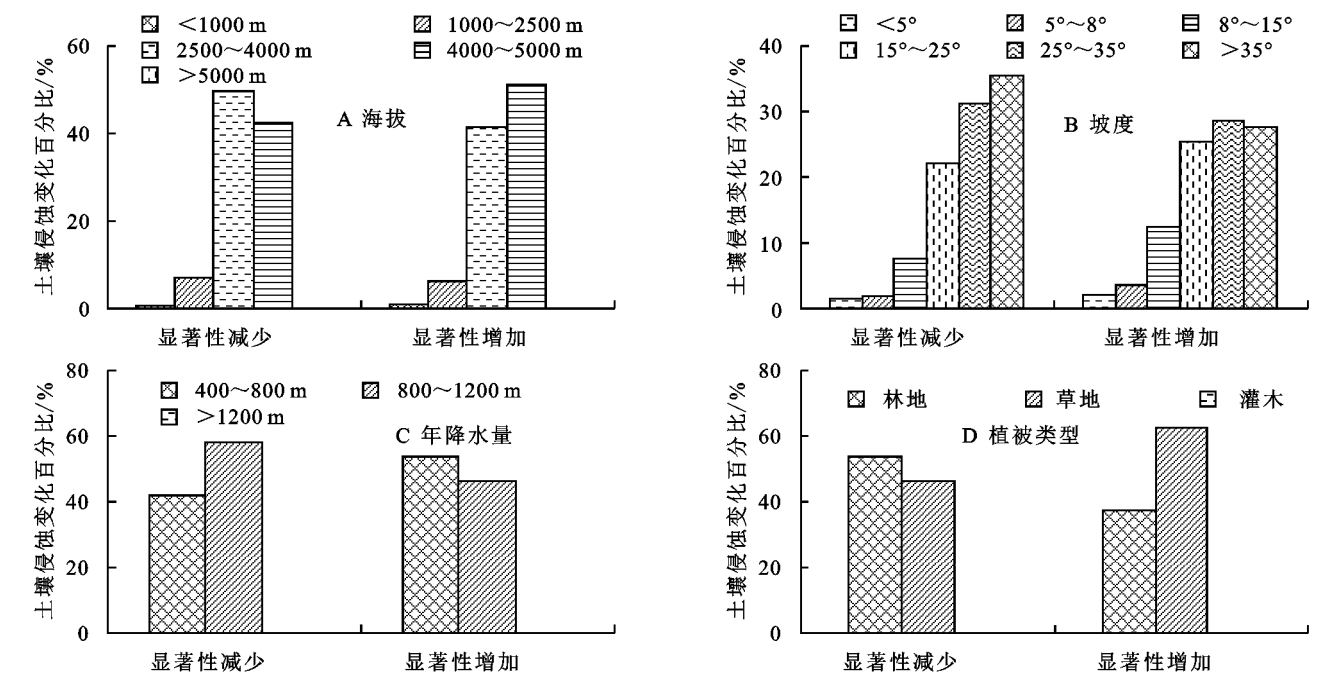


图 4 土壤侵蚀模数变化趋势分布特征

3.2.2 海拔与土壤侵蚀 据图 6A,不同海拔带小于 1 000 m(高平原),1 000~2 500 m(低山),2 500~4 000 m(中山)、和大于 4 000 m(高山亚高山),中度以上侵蚀面积分别占各海拔带面积的 0.44%,0.64%,

1.93%,29.05%。即高海拔带高强度土壤侵蚀发生比例更高。由图 6B,2001—2017 年高平原和低山地带土壤侵蚀面积无明显增减,中山地带轻度及以上侵蚀面积 17 年内减少 0.67%,相应地,高山亚高山地带

增加 1.05%。2001—2007 年,中山、亚高山地区轻度及以上土壤侵蚀面积呈减少趋势,分别减少 4.05%,0.77%。2008—2017 年,中山、亚高山地带轻度及以上侵蚀面积分别增加 1.66%,1.86%。说明 2008 年地震后,中山和高山亚高山区域土壤侵蚀面积呈持续增加趋势。

表 4 土壤侵蚀模数与环境因子的空间相关性

相关因子		Pearson 法		Kendall 法		Spearman 法	
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
土壤侵蚀模数	坡度	0.11 <sup>**</sup>	<0.05	0.04 <sup>**</sup>	<0.05	0.06 <sup>**</sup>	<0.05
	海拔	0.33 <sup>**</sup>	<0.05	0.42 <sup>**</sup>	<0.05	0.58 <sup>**</sup>	<0.05
	年降水量	0.49 <sup>**</sup>	<0.05	0.49 <sup>**</sup>	<0.05	0.67 <sup>**</sup>	<0.05
	植被类型	0.31 <sup>**</sup>	<0.05	0.42 <sup>**</sup>	<0.05	0.50 <sup>**</sup>	<0.05

注: \*\* 表示显著性  $\alpha=0.05$ 。

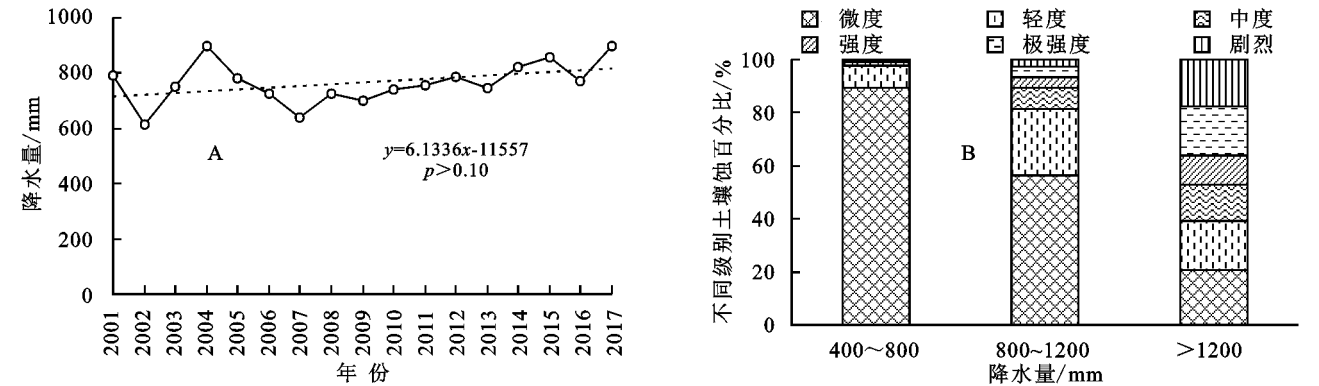


图 5 2001—2017 年岷江上游流域年际降水量变化及不同降水带土壤侵蚀强度

表 5 2001—2017 年岷江上游流域降水带与不同级别土壤侵蚀状况

降水量/ mm	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强度侵蚀		极强度侵蚀		剧烈侵蚀	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
400~800	233216.25	59.98	21980.25	5.65	3409.25	0.88	1252.50	0.32	1010.75	0.26	379.25	0.10
800~1200	70276.00	18.07	31305.00	8.05	10062.75	2.59	5126.75	1.32	5136.00	1.32	3073.75	0.79
>1200	535.25	0.14	479.00	0.12	363.75	0.09	281.50	0.07	483.50	0.12	456.75	0.12
Total	304027.50	78.19	53764.25	13.83	13835.75	3.56	6660.75	1.71	6630.25	1.71	3909.75	1.01

注: 表示某降水量范围某一侵蚀级别占流域总侵蚀面积百分比

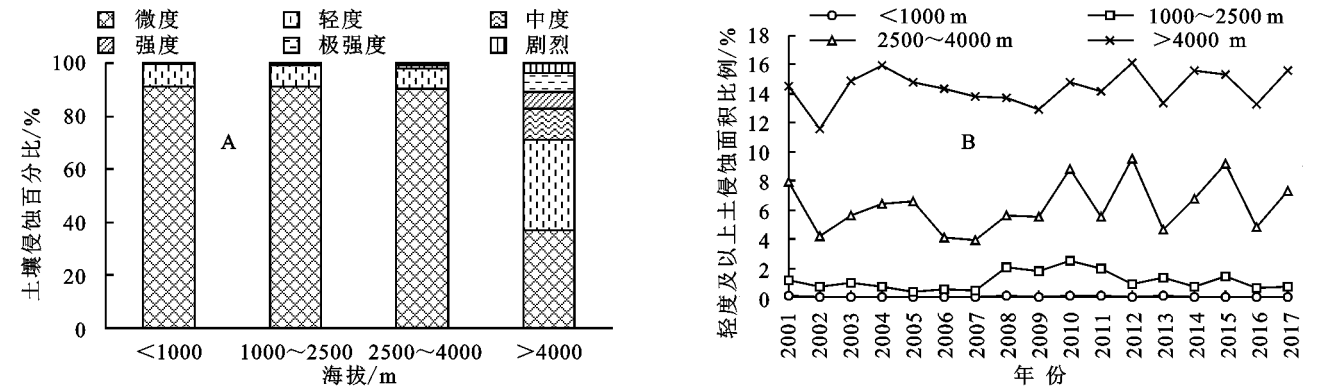
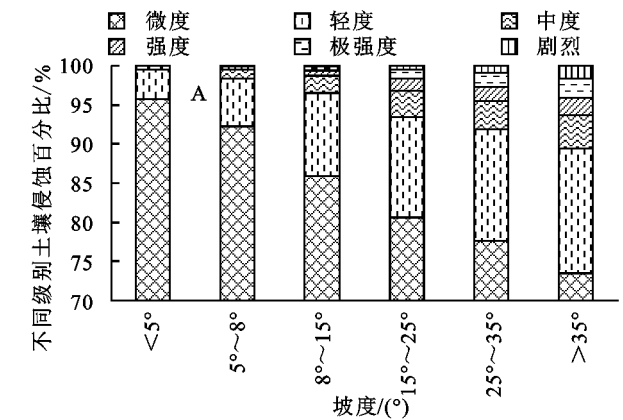


图 6 2001—2017 年岷江上游流域不同海拔带土壤侵蚀强度及比例变化

3.2.3 坡度与土壤侵蚀 据图 7A,坡度小于 5°,5°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°,大于 35°地区轻度及以上侵蚀面积占各坡度带比例分别为 4.22%,7.76%,14.10%,19.38%,22.38%,26.45%,其中轻度及以上侵蚀集中发生在坡度大于 15°地区,并随着坡度增大高强度土壤侵蚀占比逐渐加大。

据图 7B,2001—2017 年,坡度小于 15°地带土壤侵蚀变化不明显,坡度大于 15°地带土壤侵蚀变化趋势明显,其中 15°~25°,25°~35°坡度带轻度及以上侵蚀面积分别增加 0.40%,0.10%,大于 35°坡度带轻度及以上侵蚀面积减少 0.75%。2001—2007 年 15°~25°,25°~35°,大于 35°坡度带土壤侵蚀状况呈转好趋势,轻度及以上侵蚀面积分别减少 0.75%,1.63%,3.04%。2008—2017 年 15°~25°,25°~35°,大于 35°

坡度带土壤侵蚀加剧,各坡度带轻度及以上侵蚀面积



分别增加 0.86%, 0.90%, 0.05%。

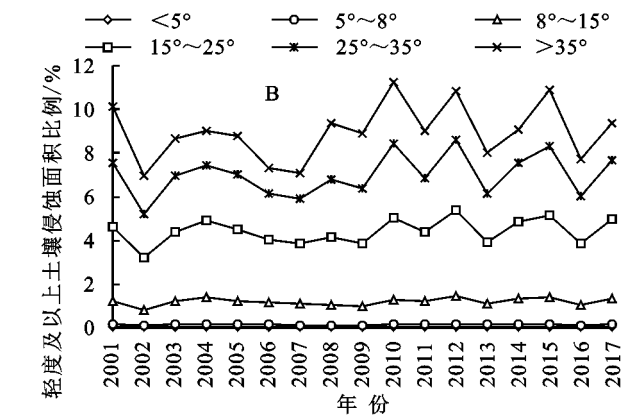


图 7 2001—2017 年岷江上游流域不同坡度土壤侵蚀强度及比例变化

3.2.4 土地利用与土壤侵蚀 据图 8A,岷江上游流域土壤侵蚀主要发生在未利用地、草地、林地,而耕地、建设用地、水域湿地面积在该流域占比较少,且以微度侵蚀为主(99%以上),其中耕地土壤侵蚀区域仅有 0.68%发生轻度及以上退化。就每种土地利用类型内发生较强土壤侵蚀的情况看,轻度及以上侵蚀程度未利用地(87.11%)>草地(39.75%)>林地(9.49%)。由图 8B 看出,17 年间,草地轻度及以上土壤侵蚀呈上升趋势,2017 年较 2001 年增加 1.87%;2001—

2007 年草地土壤侵蚀有明显改善,轻度及以上侵蚀面积下降 0.55%,但 2008—2017 年侵蚀面积明显上升,增加 2.25%。2001—2017 年林地、未利用地土壤侵蚀面积无明显增减。

由图 9 看出,不同林地类型发生轻度及以上土壤侵蚀面积占比由大到小分别为疏林地(15.04%)>针叶林(13.50%)>混交林(4.41%)>阔叶林(0.97%),说明疏林地易发生土壤侵蚀,针叶林、混交林次之,而阔叶林土壤侵蚀程度相对较低。

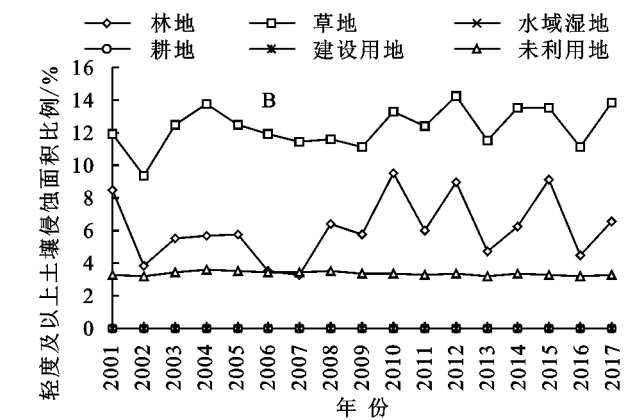
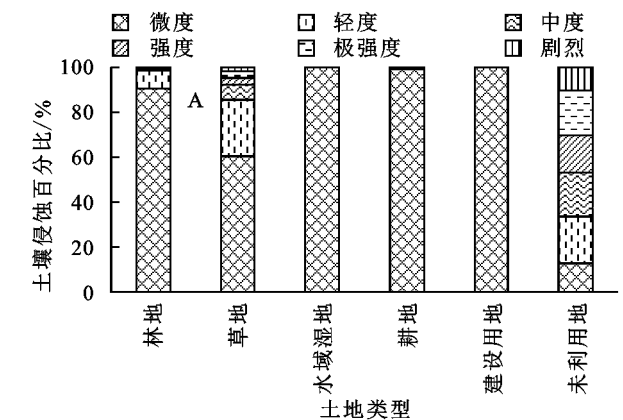


图 8 2001—2017 年岷江上游流域不同土地利用类型土壤侵蚀强度及面积比例变化

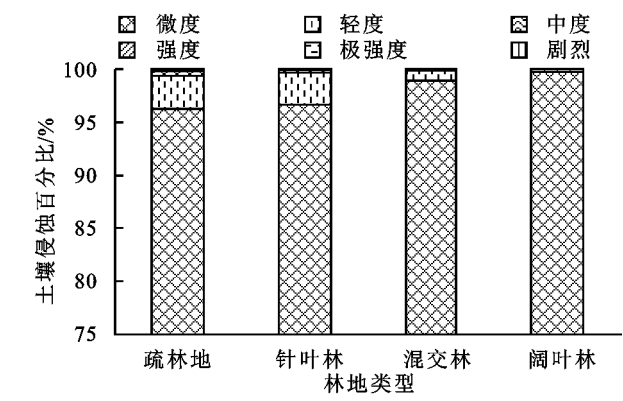


图 9 不同林地类型土壤侵蚀强度

3.3 土壤侵蚀对长期植被变化响应

由图 10 看出,2001—2017 年岷江上游流域林地、灌木和草地的 NDVI 总体均呈现显著增加的趋势( $p <$

0.05),且变化过程大致相同。2001—2007 年 3 种植被类型 NDVI 呈上升趋势,受 2008 年汶川地震影响,2008—2010 年 NDVI 有明显下降,2010 年后植被逐渐恢复,3 种植被类型 NDVI 呈不同程度的上升趋势。

分别对各植被类型的土壤侵蚀模数  $A$  与年降水量 PRE,NDVI 进行偏相关分析,结果见表 6。林地土壤侵蚀模数  $A$  与 NDVI 呈显著负相关( $r = -0.66, p < 0.05$ );林地、灌木和草地土壤侵蚀模数  $A$  与年降水量 PRE 呈显著正相关( $r = 0.73, p < 0.05$ ;  $r = 0.64, p < 0.05$ ;  $r = 0.95, p < 0.05$ ;  $r = 0.92, p < 0.05$ )。说明林地土壤侵蚀主要受到植被覆盖和降水的影响,而灌木和草地土壤侵蚀则主要受到降水的影响。



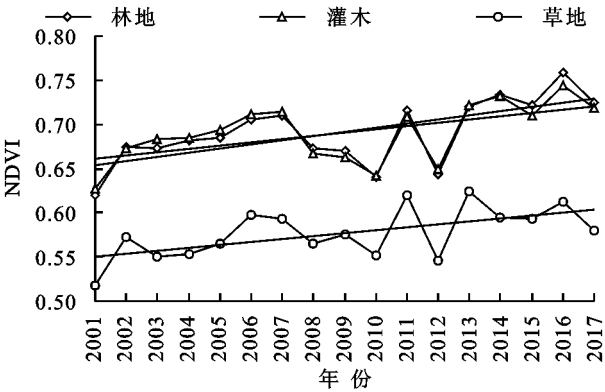


图 10 不同植被类型 NDVI 变化趋势

表 6 土壤侵蚀模数与年降水量和 NDVI 偏相关分析

植被类型	变量	控制变量	<i>r</i>	<i>p</i>
林地	A, NDVI	PRE	-0.66 **	<0.05
灌木			-0.08	>0.10
草地			-0.22	>0.10
林地	A, PRE	NDVI	0.73 **	<0.05
灌木			0.64 **	<0.05
草地			0.95 **	<0.05

注:A 表示土壤侵蚀模数;PRE 表示年降水量; \*\* 表示显著性  $\alpha=0.05$ 。

4 讨论

4.1 土壤侵蚀空间分布规律及成因

研究结果表明岷江上游流域土壤侵蚀模数多年平均值为 801.60 t/(km<sup>2</sup>·a),与四川省水土重点防治区土壤侵蚀模数多年均值接近<sup>[20]</sup>;并且本研究 2010 年、2017 年流域平均土壤侵蚀模数计算结果与刘佳<sup>[21]</sup>研究结果也基本一致。岷江上游流域土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主,其次是轻度侵蚀、中度侵蚀和重度侵蚀。总体而言土壤侵蚀呈恶化趋势,总体结果与相似区域研究基本相近<sup>[9,22-25]</sup>。尽管使用数据的来源、空间分辨率以及计算方法的不同会造成相同区域同一时间段内识别结果的差异<sup>[2,9,21]</sup>,本研究识别出的土壤侵蚀分级空间分布与姜琳、邓兵、祝聪等<sup>[2,15,26]</sup>得出的总体规律基本一致。该流域断裂发育较多,地质构造活动较活跃,地表破碎程度较大,并且分布有大面积典型干旱河谷生态脆弱区<sup>[27]</sup>。受地形地貌、降水、植被覆盖、地质活动以及人类活动的影响,土壤侵蚀分布的时空异质性较高。

岷江上游流域土壤侵蚀主要分布在年降水量低的海拔干旱河谷区。该流域约 20.8% 的区域为干旱河谷(1 300~2 200 m),植被类型以干旱河谷灌丛为主,植被覆盖度低,裸露地表比例较大,雨季极易发生大面积土壤侵蚀<sup>[15,21]</sup>。由于总体降水量低,该区域土壤侵蚀主要以微度和轻度侵蚀为主。而高海拔

区域,降水量高,植被类型以阔叶林和暗针叶林为主,植被覆盖度较高,林冠层和枯落物层对降水具有较强的截留作用,能够有效地减少土壤侵蚀,土壤侵蚀分布面积较小。但是在高海拔、高降水区域,土壤侵蚀以高强度土壤侵蚀为主,与王猛等<sup>[28]</sup>研究结果一致。水土流失通常与侵蚀雨量呈极显著的线性关系<sup>[29]</sup>,降水通过影响径流大小从而影响土壤侵蚀程度<sup>[6]</sup>。由于该流域高海拔地区山高坡陡,集中高强度降水(集中发生在 6—10 月,多为大到暴雨)快速汇集产生径流,极易发生泥石流、滑坡。地表若缺乏有效植被覆盖,极易引发高强度土壤侵蚀<sup>[30-31]</sup>。

就地形而言,随着海拔和坡度上升,土壤侵蚀程度越大,该结果与何兴元<sup>[9]</sup>、邱国玉<sup>[32]</sup>等的研究结果一致。岷江上游流域植被分布随海拔变化呈现垂直差异,海拔由低到高主要分布的植被为干旱森林和灌丛(1 300~2 600 m)、针阔混交林和针叶林(1 800~3 900 m)、高山灌丛(3 600~4 300 m)和高山草甸(>4 300 m)<sup>[33]</sup>。据研究表明,林地、草地、灌木土壤保持能力/强度由大到小分别为林地>灌木>草地<sup>[34-36]</sup>。高海拔 4 000~5 000 m 地区由于多高山裸土以及荒草地,土壤保持能力差,加之海拔 3 800~4 200 m 地区大部分地层属于第四系,其结构松散,颗粒较细,在地质运动和集中强降雨冲刷下高海拔地区更易发生侵蚀<sup>[2,31]</sup>。与此同时,岷江上游流域约 50% 区域坡度大于 45°,地势陡峭,河谷深切。由于土壤入渗量随坡度增大而减小,地表产流量随之增大,加之重力作用随坡度增加不断增强,水力侵蚀效果越明显,进而导致坡度大的区域土壤侵蚀量越大<sup>[6,15,37]</sup>。

土地利用类型的差异也是造成流域土壤侵蚀空间分异明显的重要因素之一。岷江上游流域发生较强土壤侵蚀的 3 种土地利用类型主要为未利用地、草地和林地。未利用地多为裸地,其植被稀疏、极易受到降水的侵蚀。虽然林地、草地均具有固结土壤表层,滞留水分,减少水土流失的能力<sup>[8]</sup>,但是森林植被覆盖度相对较高,且根系较草地更发达粗壮,使得森林生态系统具有更高的稳定性<sup>[38]</sup>,林地土壤保持能力更强。相关研究也表明,林地、草地、未利用地土壤保持能力由大到小依次为林地>草地>未利用地(裸地)<sup>[35-36,39]</sup>。因此,岷江上游流域各土地利用类型发生土壤侵蚀程度由大到小依次为未利用地>草地>林地,基本与多数研究结果一致<sup>[2,21,40]</sup>。森林植被枯落物层能延缓坡面径流产生,降低坡面径流流速,在一定程度上减少坡面产流产沙<sup>[41]</sup>。岷江上游流域不同林分枯落物储量大致表现为阔叶林>针阔混交林>针叶林<sup>[42-45]</sup>,枯落物储量越大,在一定程度上减少地表



径流能力越强。岷江上游流域针叶林主要分布在海拔 3 500~4 500 m,阔叶林、混交林分布在海拔 2 500~3 500 m<sup>[10]</sup>,呈现明显地带差异,高海拔地区更易发生土壤侵蚀。此外,由于不同林地类型下表层土壤抗蚀性表现为阔叶林>针阔混交林>针叶林<sup>[46-49]</sup>,疏林地水土保持能力很低,同时由于林冠层稀疏,强降雨下容易发生溅蚀,因此研究区不同林型土壤侵蚀程度差异表现为疏林地>针叶林>混交林>阔叶林。

#### 4.2 土壤侵蚀长期动态及成因

2001—2017 年岷江上游流域土壤侵蚀呈缓慢增加趋势,与年降水量的变化大致相同。因此降水是影响不同植被覆盖区域土壤侵蚀的主要因子<sup>[50]</sup>。但不同时段影响因子有所差异。2001—2007 年,各个海拔带、坡度带和土地利用类型的土壤侵蚀变化基本与降水年际波动一致。尽管该时段林地、灌丛、草地植被指数均呈增加趋势,但并未对土壤侵蚀起到明显的减缓作用<sup>[2]</sup>。2008—2017 年该地区大暴雨极端天气频发,降水量呈显著增加的趋势,同时岷江上游流域地处龙门山断裂带,地质运动较活跃,尤其是受 2008 年汶川地震影响,大面积植被遭受破坏,同时在流域高海拔区域孕育了相当丰富的固体松散物和堆积物,叠加陡峻的地势条件,为岷江上游流域次生地质灾害(泥石流、滑坡等)频繁发生提供了有利条件。受地质灾害和降水等因素的共同作用,流域土壤侵蚀呈逐年上升趋势<sup>[51]</sup>,但趋势性弱于降水量的变化。其中以高海拔带(>2 500 m)、坡度大于 25°以及草地为主的地区土壤侵蚀增加趋势最为明显。值得注意的是,2008—2017 年林地和灌丛 NDVI 呈明显增加趋势,而草地 NDVI 增加速度弱于上述两种土地利用类型。由此可见,天然林保护工程、退耕还林以及震后植被修复工程,显著提高了林地和灌丛的植被覆盖度<sup>[52]</sup>,对林地和灌丛区土壤侵蚀的控制起到了较好的效果,有效减缓了降水和地质灾害对土壤侵蚀的增加作用。由于草地大量向林地转移<sup>[21]</sup>,且草地结构简单易受干扰,因而草地植被恢复力度较林地和灌丛弱,其土壤侵蚀防止作用提升效果则不明显。

综合而言,岷江上游流域一系列植被恢复工程对土壤侵蚀控制起到了一定积极的作用,但并未从总体上遏制土壤侵蚀增加的趋势。因此,未来该区域生态恢复的重点为进一步研发林地、灌丛和草地水源涵养功能提升的恢复措施。尤其是需要加强对高海拔带(>2 500 m)、坡度大于 25°以及草地区域的植被恢复研究,进一步提高各类型植被水源涵养功能,减少区域土壤侵蚀。

不过本研究针对性分析单因子与土壤侵蚀之间

关系,对于不同因子之间的交互作用的考虑尚有欠缺。根据相关人员<sup>[53-55]</sup>在渭河流域、子午岭地区、天山北坡中段山区和杨凌示范区的研究表明植被覆盖度、造林面积、降雨、海拔、坡度、土壤类型、人类活动等影响因子变化对土壤保持变化均起交互增强作用。王猛等对西南地区土壤侵蚀影响因子进行交互作用分析也得出两两因子之间交互协同作用表现为非线性增强或相互增强,其中坡度和盖度交互作用最大<sup>[28]</sup>。因此,在今后的研究中使用更高分辨率的数据并且可加强因子之间交互作用的研究,提升研究结果的完整性和精确度。

## 5 结 论

岷江上游流域轻度及以上土壤侵蚀区域主要分布在理县、汶川县、黑水县和松潘县。土壤侵蚀模数与海拔、坡度、年降水量和植被类型在空间上显著相关,表现为随海拔(坡度或年降水量)增加,土壤侵蚀程度增加。林地、草地、未利用地为岷江上游发生土壤侵蚀的主要土地利用类型,轻度及以上侵蚀程度表现为未利用地>草地>林地,不同林地类型土壤侵蚀程度表现为疏林地>针叶林>混交林>阔叶林。2001—2007 年,各个海拔带、坡度带和土地利用类型的土壤侵蚀变化基本与降水年际波动一致。2008—2017 年受地质灾害和降水等因素的共同作用,流域土壤侵蚀呈逐年上升趋势,其中以高海拔带(>2 500 m)、坡度大于 25°以及草地为主的地区土壤侵蚀增加趋势最为明显。天然林保护工程、退耕还林以及震后植被修复工程,显著提高了林地和灌丛的植被覆盖度,有效减缓了降水和地质灾害对土壤侵蚀的增加作用。而草地植被恢复力度较林地和灌丛弱,其土壤侵蚀防止作用提升效果则不明显。

#### 参考文献:

- [1] 陈世发.基于 GIS 的亚热带山地土地利用与土壤侵蚀关系研究:以粤北山区为例[J].干旱区资源与环境,2015,29(2):80-85.
- [2] 姜琳,边金虎,李爱农,等.岷江上游 2000—2010 年土壤侵蚀时空格局动态变化[J].水土保持学报,2014,28(1):18-25,35.
- [3] 赵芹,唐瑶蔚,杜鹃.四川省水土保持监测点优化调整方案探讨[J].四川水利,2019,40(4):127-130.
- [4] 孟兆鑫,邓玉林,刘武林.基于 RS 的岷江流域土壤侵蚀变化及其驱动力分析[J].地理与地理信息科学,2008,24(4):57-61.
- [5] 李辉霞,周红艺.岷江上游地区水土流失危险度评价[J].中国水土保持,2009(10):22-24,64.
- [6] 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.
- [7] 龚雪梅,冯文兰,郑杰,等.岷江上游土壤侵蚀敏感性评价[J].干旱区资源与环境,2017,31(9):68-74.
- [8] 刘艳锋,陈学华,贺秀斌,等.岷江上游土壤侵蚀与土地利用的耦合关系研究[J].西北林学院学报,2009,24(5):161-165,185.
- [9] 何兴元,胡志斌,李月辉,等. GIS支持下岷江上游土壤侵蚀动态研究[J].应用生态学报,2005,16(12):2271-2278.
- [10] 邓力濠,张明芳,师嘉祺,等.岷江杂谷脑流域典型天然林和人工林林地水文效应研究[J].西南林业大学学报:自然科学,2021,41(3):45-52.
- [11] 师嘉祺,余恩旭,徐亚莉,等.气候变化下西南亚高山森林景观恢复效果模拟预测:以岷江杂谷脑河上游流域为例[J].应用与环境生物学报,2021,27(3):716-724.
- [12] 管亚兵,杨胜天,赵长森,等.2000年以来岷江上游地区MODIS/NDVI动态变化[J].山地学报,2018,36(3):345-353.
- [13] Yu E, Zhang M, Xu Y, et al. The development and application of a GIS-based tool to assess forest landscape restoration effects on water conservation capacity [J]. Forests, 2021,12(9):1291.
- [14] 水利部.土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,:SL190-2007,2008.
- [15] 邓兵.区域生态服务价值关键参数遥感反演研究:以岷江上游地区为例[D].成都:成都理工大学,2016.
- [16] Sedgwick P. Pearson's correlation coefficient[J]. BMJ: British Medical Journal (Online), 2012, 345.
- [17] Zar J. Significance testing of the spearman rank correlation coefficient [J]. Journal of the American Statistical Association, 1972,67(339):578-580.
- [18] Yadolah D. The concise encyclopedia of statistics[M]. New York:Springer, 2008.
- [19] 管河山,周丹.平稳性检验方法的有效性研究[J].南华大学学报:社会科学版,2016,17(1):63-68.
- [20] 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.
- [21] 刘雨佳.岷江上游土地利用变化与土壤侵蚀遥感研究[D].成都:成都理工大学,2020.
- [22] 高军.岷江上游典型生态系统土壤保持功能研究[D].北京:中国科学院生态环境研究中心,2008.
- [23] 康磊,刘世荣,刘宪钊.岷江上游景观格局与土壤侵蚀变化:以杂古脑流域为例[J].水土保持通报,2019,39(1):23-28,325.
- [24] 杨青林,丁鹏凯,仙巍,等.川西北地区土壤侵蚀敏感性评价[J].人民长江,2018,49(10):30-35.
- [25] 朱军,李益敏,蒋德明.基于GIS和RUSLE的高山峡谷区土壤侵蚀研究:以云南省泸水县为例[J].水土保持通报,2016,36(3):277-283,370.
- [26] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].生态学报,2019,39(5):1583-1594.
- [27] 张永旺.岷江上游泥石流活动区对干旱河谷面积变化的响应[D].四川绵阳:西南科技大学,2018.
- [28] 王猛,王鹤松,姜超,等.基于RULSE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.
- [29] 吕甚悟,李君莲.降雨及土壤湿度对水土流失的影响[J].土壤学报,1992,29(1):94-103.
- [30] Li L, Li J, Yu R. Characteristics of summer regional rainfall events over Ili River Valley in Northwest China [J]. Atmospheric Research, 2020,243:104996.
- [31] 张建平,樊宏,叶延琼.岷江上游土壤侵蚀及其防治对策[J].水土保持学报,2002,16(5):19-22.
- [32] 邱国玉.基于RS和GIS的川西南天然林区植被覆盖变化及土壤侵蚀演变[D].成都:四川农业大学,2018.
- [33] 师嘉祺.岷江上游杂谷脑流域森林景观恢复对关键生态功能的影响[D].成都:电子科技大学,2020.
- [34] 胡胜,曹明明,刘琪,等.不同视角下InVEST模型的土壤保持功能对比[J].地理研究,2014,33(12):2393-2406.
- [35] 陈童尧,贾燕锋,王佳楠,等.基于InVEST模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J].干旱区研究,2020,37(1):150-159.
- [36] 袁志芬.基于InVEST模型的四川省宝兴县生态系统服务功能动态评估[D].湖南湘潭:湖南科技大学,2014.
- [37] 徐茂其,张大泉.川中丘陵土壤水力侵蚀及防治对策[J].水土保持学报,1992,6(4):35-42.
- [38] 康琳琦,周天财,干友民,等.1984—2013年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征[J].应用与环境生物学报,2018,24(2):245-253.
- [39] 常畅,王耕.基于InVEST模型的碧流河流域土壤保持功能研究[J].国土与自然资源研究,2019(4):8-10.
- [40] 何莎莎,朱文博,崔耀平,等.基于InVEST模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):426-439.
- [41] 许洪娇,胡海波,初磊,等.香樟林地枯落物的截流减沙效应分析[J].中国水土保持科学:中英文,2021,19(2):86-91.
- [42] 程良爽.岷江上游山地森林/干旱河谷交错带不同植被水源涵养效益[D].成都:四川农业大学,2010.
- [43] 吴永波,郝奇林,薛建辉,等.岷江上游主要森林群落枯落物量及其持水特性[J].中国水土保持科学,2009,7(3):67-72.
- [44] 马志良,赵文强,刘美,等.岷江源头区乔灌交错带地被物和土壤持水能力[J].水土保持学报,2018,32(5):146-150.
- [45] 田雨,周晓波,周燕,等.茂县大沟流域典型植被群落的水源涵养能力[J].四川林业科技,2014,35(1):14-17.

- 454/455(1):123-130.
- [12] 张怡,丁迎盈,王大安,等.坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):25-29.
- [13] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等.东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J].土壤学报,2015,52(3):489-498.
- [14] 尹哲睿.黑龙江省拜泉县侵蚀沟分布的时空格局及影响因素研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
- [15] 王计磊,李子忠.东北黑土区水力侵蚀研究进展[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):389-397.
- [16] 张瑜,徐子棋,杨献坤,等.吉林省山地丘陵区典型坡面水土保持措施适宜性研究[J].森林工程,2021,37(6):25-33,38.
- [17] 詹敏,厉占才,信玉林.黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J].黑龙江水专学报,1998(1):40-43.
- [18] 朱伟峰,刘潇,李芳花,等.黑龙江省基于降雨的干旱时空分布及玉米灌溉需水规律研究[J].节水灌溉,2018(3):63-67,73.
- [19] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [20] 曹晓娟,谢林好,张风宝,等.沙层特性对沙盖黄土坡面产流产沙变化贡献的定量分析[J].地理学报,2019,74(5):962-974.
- [21] 郑子成,秦凤,李廷轩.不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):168-175.
- [22] 赵迎松.雨滴击溅下薄层径流对土壤团聚体破碎、迁移的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [23] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
- [24] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.
- [25] 杨海,姜月华,周权平,等.太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究[J].河海大学学报:自然科学版,2021,49(6):506-514.
- [26] 周春红,张风宝,刘宝元,等.细沟间侵蚀影响因子交互作用定量分析[J/OL].土壤学报:1-11[2022-02-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210101.1118.002.html>.
- [27] Gao B, Walter MT, Steenhuis TS, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: Theory and experiments[J]. Journal of Hydrology, 2004,295(1/4):291-304. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.03.026.
- [28] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [29] 朱秀迪.地表粗糙度对坡面侵蚀过程及泥沙分选搬运过程的影响[D].武汉:长江科学院,2017.
- [30] 安娟,陈新军,宋红丽.近地表水文条件对横坡垄作坡面褐土团聚体流失的影响[J].土壤学报,2020,57(6):1411-1421.
- [31] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(3):917-929. DOI:10.2136/sssaj2014.10.0415.
- [32] 张相,李肖,林杰,等.南方红壤丘陵区侵蚀沟道内土壤团聚体及有机碳特征[J].农业工程学报,2020,36(19):115-123.
- [33] 胡亚鲜, Nikolaus J K.利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J].土壤学报,2017,54(5):1115-1124.
- ~~~~~
- (上接第 10 页)
- [46] 周玮,查同刚,孙怀宁,等.北京八达岭地区典型林分林地土壤抗蚀性分析[J].中国水土保持科学,2016,14(4):84-93.
- [47] 刘宽梅,周秋文.典型喀斯特森林土壤的抗蚀性[J].生态学报,2020,40(2):568-577.
- [48] 任改.重庆四面山主要植物群落土壤抗侵蚀性研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [49] 于大炮,刘明国,邓红兵,等.辽西地区林地土壤抗蚀性分析[J].生态学杂志,2003,22(5):10-14.
- [50] 陈翠翠.岷江上游山地森林/干旱河谷交错带坡面径流侵蚀研究[D].成都:四川农业大学,2010.
- [51] 丁海容,李勇,闫亮,等.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:自然科学版,2013,40(6):712-720.
- [52] 田雨,方自力,谢强,等.岷江上游植被在汶川地震中的损毁及灾后恢复状况[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):735-740.
- [53] 贾磊,姚顺波,邓元杰,等.渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):305-314.
- [54] 燕玲玲,巩杰,徐彩仙,等.子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):188-197.
- [55] 常梦迪,王新军,李娜,等.基于 CSLE 模型的天山北坡中段山区水力侵蚀时空变化特征及影响因素研究[J].干旱区研究,2021,38(4):939-949.