

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.018.

杨建和, 严冬春, 文安邦. 金沙江流域近十年地表变化与土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 13-20.

YANG Jianhe, YAN Dongchun, WEN Anbang. Spatiotemporal Variation Characteristics of Surface Change and Soil Erosion in Jinsha River Basin in the Past Decade[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 13-20.

金沙江流域近十年地表变化与土壤侵蚀时空变化特征

杨建和^{1,2}, 严冬春², 文安邦²

(1.中国科学院大学, 北京 100049; 2.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299)

摘要: [目的]金沙江流域是长江上游生态脆弱区和西部大开发的重要区域, 定量评价金沙江流域土壤侵蚀变化和空间分布对当地水土流失防治和生态修复保护具有重要意义。[方法]采用 CSLE 模型开展 2010—2020 年金沙江流域土壤侵蚀定量估算与分析。[结果]2010—2020 年金沙江流域变化显著的是草地面积, 净减少 6 059.7 km², 耕地面积净增加 2 294.38 km², 植被覆盖为 0.6 以上盖度面积减少 57.70%; 金沙江流域 2010 年和 2020 年土壤侵蚀模数分别为 17.06 t/(hm² · a), 24.56 t/(hm² · a)。10 年间, 侵蚀等级由低强度向高强度转变, 金沙江流域上游和中游(青海直门达至云南石鼓段和石鼓至四川屏山段)侵蚀等级由轻度向中度转移显著; 金沙江流域侵蚀强度空间分布上, 2010 年和 2020 年 8°以上坡段侵蚀量占比分别达 92.71%, 93.80%, 高程在 3 000~4 000 m 的侵蚀模数增量显著, 增幅为 63.5%。[结论]金沙江流域土地利用和植被覆盖变化引起土壤侵蚀由轻度向中度转移现象明显, 应重点关注金沙江流域各段不同坡度和海拔带土壤侵蚀变化趋势, 以期水土流失治理提供数据支撑。

关键词: 土壤侵蚀; 时空变化; 金沙江流域; 中国土壤流失方程

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0013-08

Spatiotemporal Variation Characteristics of Surface Change and Soil Erosion in Jinsha River Basin in the Past Decade

YANG Jianhe^{1,2}, YAN Dongchun², WEN Anbang²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China)

Abstract: [Objective] Jinsha River Basin is an ecologically fragile area in the upper reaches of the Yangtze River and an important area for the development of the western region. Quantitative evaluation of soil erosion change and spatial distribution in Jinsha River Basin is of great significance for local soil erosion control and ecological restoration and protection. [Methods] Chinese Soil Loss Equation (CSLE) model was used to carry out quantitative estimation and analysis of soil erosion in Jinsha River Basin from 2010 to 2020. [Results] The obvious changes in Jinsha River Basin from 2010 to 2020 were the net decrease of grassland area by 6 059.7 km², the net increase of cultivated land area by 2 294.38 km², and the decrease of vegetation coverage area above 0.6 by 57.70%. The soil erosion modulus of Jinsha River Basin in 2010 and 2020 were 17.06 t/(hm² · a) and 24.56 t/(hm² · a), respectively. In the past ten years, the erosion grade changed from low intensity to high intensity, and the erosion grade in the upper and middle reaches of Jinsha River Basin (Zhimenda in Qinghai to Shigu section in Yunnan and Shigu to Pingshan section in Sichuan) changed from mild level to moderate level. In terms of spatial distribution of erosion intensity in Jinsha River Basin, the proportion of erosion amount on the slopes with above 8° in 2010 and 2020 was 92.71% and 93.80%, respectively. The increment of erosion

收稿日期: 2022-07-06

修回日期: 2022-07-29

资助项目: 国家重点研发计划项目“长江流域典型区域产流产沙综合机制研究”(2016YFC0402301-02)

第一作者: 杨建和(1995—), 男, 云南香格里拉人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: yangjianhe@imde.ac.cn

通信作者: 严冬春(1981—), 男, 湖北宜昌人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持生态修复方面的教学研究工作。E-mail: yandc@imde.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

modulus between 3 000 m and 4 000 m was remarkable, and the increase was 63.5%. [Conclusion] The change in land use and vegetation cover in Jinsha River Basin leads to the obvious transfer of soil erosion from mild level to moderate level. We should focus on the change trend of soil erosion in different slopes and elevation zones of Jinsha River Basin in order to provide data support for soil erosion control.

Keywords: soil erosion; temporal and spatial changes; Jinsha River Basin; Chinese Soil Loss Equation

土壤侵蚀是影响社会经济可持续发展的重要因素之一^[1]。土壤侵蚀不仅会降低土地生产力,还会降低林草地的保水能力,甚至发生垮塌、泥石流等灾害,泥沙流入江河会严重威胁水利设施^[2]。土壤侵蚀深受人为活动对地表破坏的驱动^[3],耕作开垦、伐林毁草、开发建设项目等造成土地利用和地表覆盖发生变化,从而改变一个流域内的产流特性,导致土壤侵蚀时空分布特征发生变化^[4-5]。开展阶段性流域尺度的土壤侵蚀定量评价作为制定水土保持生态环境治理规划的基础和前提^[6],可有效评估流域开发造成的水土流失情况,同时可为流域管理提供科学的数据支撑。

目前,国内外主流的较大流域尺度土壤侵蚀估算方法有 USLE, RUSLE 和 CSLE 模型^[7],其中 USLE, RUSLE 模型是基于美国较为平坦的地势而建立的,CSLE 模型则将 USLE, RUSLE 模型中的植被覆盖与管理因子和水土保持措施因子具体化为生物措施因子、工程措施因子和耕作措施因子,以适应中国的复杂地貌。模型的选择往往根据研究区地势,及具体数据的可获得性而定,在我国土壤侵蚀评估中已得到广泛应用与实践^[8-13]。

金沙江流域是西部大开发和长江流域生态修复保护的重要区域。目前,已建成乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等四座大型水电站,以及数量众多的小电站,流域内还有大量矿产资源和旅游资源被源源不断的挖掘和开发,交通和基建数目不断扩张,人类活动与土壤侵蚀的相互关系影响深远。然而,对金沙江流域整体性土壤侵蚀定量评价鲜有报道,大部分研究报道仅涉及流域的某一段(云南段、川西段或甘南段),且多数采用 USLE 或 RUSLE 模型,如云南境内,彭建等^[14]使用 RUSLE 评价过滇西北山区土壤侵蚀情况,陈峰等^[15]使用 RUSLE 分析滇南山区土壤侵蚀演变,陈正发等^[16]使用 RUSLE 估算云南省土壤侵蚀分布特征。四川甘肃境内,如杨青林等^[17]使用 USLE 对川西北地区进行土壤侵蚀敏感性评价,姚昆等^[18]使用 USLE 研究川西南山地土壤侵蚀动态变化,魏健美等^[19]使用 USLE 研究甘南川西北地区土壤侵蚀,蒲泓君等^[20]使用 RUSLE 进行川西南土壤侵蚀风险评价,王莉娜等^[21]使用 USLE 对甘肃省进行土壤侵蚀变化评价。由于金沙江流域南北纬跨度

大,海拔落差高,山高坡陡,耕作模式多样,USLE 或 RUSLE 模型在金沙江流域的适用性有待于进一步研究。本文考虑金沙江流域涉及高原、山区、盆地的特点,使用 GIS 技术和 CSLE 模型定量解析金沙江流域的土壤侵蚀特征,为金沙江流域水土流失防治和生态修复保护提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金沙江,是中国长江的上游,地理坐标介于东经 90.54°—104.95°和北纬 24.46°—35.78°,发源于青海省当曲,流经青藏高原、川西高原、横断山区、云贵高原、川西南山地区,在四川宜宾与岷江汇合,全长 3 496 km,海拔落差在 5 000 m 以上。金沙江流域以金沙江为主干水系,涵盖青藏高原东部和横断山脉区,向南至云贵北高原,向东至川西高原和盆地,南北纬跨度 9 度以上,流域面积约 47.32 万 km²。流域地形地貌十分复杂,众多高山深谷相间并列,峰谷高差可达 1 000~3 000 m。流域内气候时空变化大且差异显著,大气环流形势多变,冬半年(横断山脉区北段为 10 月至次年 5 月,其余地区为 11 月至次年 4 月)主要受西风带气流影响,被青藏高原分成南北两支的西风急流,其南支经过,带来大陆性的晴朗干燥天气,而流域东北部受昆明静止锋和西南气流影响,阴湿多雨;夏半年(6—9 月或 5—10 月)西风带北撤,则受海洋性西南季风和东南季风的影响,带来丰沛的降水,并由流域东南向流域西北逐趋减少。金沙江流域多年平均年降水量约 710 mm,流域下游(四川屏山至宜宾)江两侧山地年降水量约为 900~1 300 mm,相应径流深为 500~900 mm,大凉山地区年降水量可达 1 500 mm 以上,径流深 1 200~1 400 mm,中上游(青海直门达至四川屏山)主要属高山峡谷区,降水和径流垂直分布明显,江两岸山地年降水量为 600~800 mm,径流深为 400~700 mm,另外部分流域河谷地区年降水量仅有 400~600 mm,径流深仅 200~400 mm。植被类型随海拔气候变化分布有草甸、草原、针叶林、灌木、针阔混交林、阔叶林等。流域内土壤类型丰富,青藏高原地带主要为风沙土和黑毡土,川西、云贵高原主要为寒漠土、红壤、棕壤,四川盆地主要为紫色土和黄壤。

1.2 数据来源

降雨数据来源于中国气象数据网,收集了金沙江流经的5个省份(包括青海省、西藏自治区、云南省、贵州省、四川省)共计168个县级气象站点的1981—2010年逐年降雨量。土壤数据为土壤质地和土壤有机碳含量,以1:100万世界土壤数据库(HWSD)为基础数据。DEM数据来自地理遥感生态网中下载的ALOS卫星的30 m分辨率数据产品。NDVI(归一化植被指数)数据是利用Landsat卫星遥感影像解译而来,通过地理遥感生态网下载30 m分辨率的2010年和2020年两期NDVI数据。土地利用数据主要依托地理国情监测云平台,是由Landsat卫星30 m分辨率遥感影像,结合中国土地利用通过人机交互目视解译而来,本研究分别下载了2010年和2020年的土地利用类型数据。

1.3 土壤侵蚀模型

本研究采用中国土壤流失方程CSLE模型^[22],比起USLE和RUSLE等模型,CSLE模型中含有更具体的植被覆盖、工程措施、耕作措施因子,更能体现不同时期地表变化下的土壤侵蚀情况,其计算表达式为:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A 表示年均土壤流失量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; R 表示降雨侵蚀力因子 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; K 表示土壤可侵蚀性因子 $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; L 表示坡长因子,无量纲; S 表示坡度因子,无量纲; B 表示生物措施因子,无量纲; E 表示工程措施因子,无量纲; T 表示耕作措施因子,无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。降雨侵蚀力其内涵是降雨所导致的土壤侵蚀发生的一种潜在能力,主要跟当地降雨量有关。考虑到研究主要是考量受人类活动影响的植被覆盖和土地利用等地表结构变化下的土壤侵蚀情况,为此用于计算降雨侵蚀力的降雨数据统一只使用1981—2010年的多年平均降雨量。参考《水土流失计算导则》基于年降雨资料的降雨侵蚀力计算方法:

$$R = 0.067 P_d^{1.627} \quad (2)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; P_d 为年降雨量 (mm) 。

(2) 土壤可侵蚀性因子 K 。土壤可侵蚀性简而言之为土壤被冲蚀、搬运的难易程度,主要跟当地的土壤质地有关,计算模型使用认可度较高且被广泛应用的基于土壤质地中不同土壤颗粒含量计算的EPIC模型^[23],并将 K_{EPIC} 换算成国际通用单位 $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$,即:

$$K_{\text{EPIC}} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \times [\text{SIL}/(\text{CLA} + \text{SIL})]^{0.3} \times \{1 - 0.25C/[C + \exp(3.72 - 2.95C)]\} \times$$

$$\{1 - 0.75(1 - \text{SAN}/100)/[(1 - \text{SAN}/100) + \exp[-5.51 + 22.9(1 - \text{SAN}/100)]]\}$$

$$K = 0.1317 \cdot K_{\text{EPIC}} \quad (3)$$

式中: SAN , SIL , CLA 分别为砂粒 $(0.05 \sim 2.0 \text{ mm})$ 、粉粒 $(0.002 \sim 0.05 \text{ mm})$ 、黏粒 $(< 0.002 \text{ mm})$ 含量 $(\%)$; C 为有机碳含量 $(\%)$ 。

(3) 坡长因子 L 。坡长因子求算的原理是某一坡长的坡地上土壤流失量与标准小区坡长 (22.13 m) 的坡地上土壤流失量之比,采用土壤侵蚀研究中孔亚平^[24]提及的坡长因子公式:

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (4)$$

式中: λ 为坡长,坡长被定义为地面上一点沿水流方向到其流向起点的最大地面距离在水平面的投影长度,本研究的坡长基于DEM计算。 m 为坡长指数,根据刘宝元^[25]和江忠善^[26]等研究的坡长指数依据坡度进行取值,如下:

$$m = \begin{cases} 0.1 & \theta < 5^\circ \\ 0.2 & 5^\circ \leq \theta < 15^\circ \\ 0.3 & 15^\circ \leq \theta < 25^\circ \\ 0.4 & 25^\circ \leq \theta < 35^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 35^\circ \end{cases} \quad (5)$$

(4) 坡度因子 S 。坡度因子定义为某一坡度小区单位面上的土壤侵蚀量与标准小区坡度单位面积上的土壤侵蚀量之比,计算方法借用刘宝元^[27]和刘斌涛^[28]等的公式:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta \leq 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ < \theta \leq 10^\circ \\ 21.204 \sin \theta - 1.2404 & 10^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ 29.585 \sin \theta - 5.6079 & \theta > 25^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中: S 为坡度因子值; θ 为坡度。

(5) 生物措施因子 B 。通常指在一定条件下有植被覆盖或实施田间管理的土壤流失总量与同等条件下清耕的连续休闲地土壤流失总量之比。本文根据植被覆盖情况结合土地利用类型进行 B 因子计算,具体赋值情况参照《流域管理项目土壤侵蚀监测评价手册》和《第一次水利普查成果丛书》进行赋值计算,如表1、表2所见。

(6) 工程措施因子 E 。工程措施因子其内涵是当各条件与标准小区一致的情况下,实施工程措施下的土壤流失量与标准小区土壤流失量之比。由于金沙江流域幅员辽阔无法细分石坎或土坎等较细的工程措施,本研究以常见的梯田形式作为工程措施,同时考虑金沙江流域地势差异明显的特性,参考金沙江流域青藏高原、云贵川西高原和川西盆地的耕地地形,耕作习惯资料,依据《生产建设项目土壤流失量测算导则》对流域上段、中段、下段的不同耕地进行相应赋值(见表3)。

表1 林、草、灌木B值

植被盖度	林、草地盖度				
B因子	<20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	≥80%
林地B值	0.100	0.080	0.060	0.020	0.004
草地B值	0.450	0.240	0.150	0.090	0.043

植被盖度	灌木盖度				
B因子	<30%	30%~45%	45%~60%	60%~75%	≥75%
灌木B值	0.250	0.200	0.150	0.120	0.100

表2 其他地类B值

土地利用类型	B值
耕地	0.470
建筑地	0.353
贫瘠	0.230
水域、冰雪地、湿地	0.000

(7) 耕作措施因子 T 。耕作措施因子其内涵是其他条件一致为前提,采取某种耕作措施的土壤流失量与同等条件下没有采取耕作措施的土壤流失量之比。本研究依据《区域水土流失动态监测技术规范

(试行)》中全国轮作区名称及代码对 T 因子赋值,研究区所包含的耕作区与对应 T 值见表4,其他地类均赋值为 1.000。

表3 不同工程措施E值

水土保持工程措施	E值
水平梯田	0.100
坡式梯田	0.414
隔坡梯田	0.347
波浪式梯田	0.414
无水土保持工程措施	1.000

表4 各耕作区T值

耕作区	T因子值
青藏高原喜凉作物一熟轮歇区	0.272
藏东南川西河谷地喜凉作物一熟区	0.410
贵州高原水田旱地两熟一熟区	0.425
西南中高原山地旱地二熟一熟水田二熟区	0.429
云南高原水田旱地二熟一熟区	0.422
滇黔边境高原山地河谷旱地一熟两熟区	
四川盆地水旱二熟兼三熟区	
盆西成都平原水田麦稻两熟区	

2 结果与分析

2.1 十年地表变化情况

本研究主要从与土壤侵蚀有关的土地利用和植被覆盖两个角度分析地表变化。首先对 2010 年和 2020 年的土地利用情况进行矩阵分析,见表 5。从土地利用面积减少量来看,2010—2020 年草地面积减少量最多,耕地和森林次之,其中,草地转移情况主要有 3 404.90 km²草地转移为耕地,3 062.44 km²草地转移为森林,4 283.69 km²草地转移为贫瘠。从土地利用面积增加量分析,2010—2020 年耕地面积增加量最多,其次是森林,耕地的增加面积主要由森林、草地转移而来,森林的增加面积主要由草地、耕地和灌木转移而来。总体上,2010—2020 年耕地面积净增加 2 294.38 km²,森林面积净增加 2 133.07 km²,灌木面积净减少 542.19 km²,草地面积净减少 6 059.7 km²,水域面积净增加 105 km²,贫瘠地面积净增加 1 910.78 km²,建筑地面积净增加 158.65 km²。

将 2010 年、2020 年的两期植被覆盖度(图 1)进行重分类,并进行分区统计得到不同覆盖度下面积比

例如表 6 所示,2010 年植被覆盖度在 0.6~0.8 的占比最大,0.6 以上盖度面积占比为 65.44%,2020 年植被覆盖度在 0.4~0.6 的占比最大,0.6 以上盖度面积占比为 27.68%。显然,2010—2020 年覆盖度较高的植被面积在减少,0.6 以上覆盖度面积减少 57.70%。

综上所述,金沙江流域 10 年间地表变化明显,耕地、森林、贫瘠、水域和建筑地面积都有所增加,耕地面积增量最高,而灌木和草地面积锐减,草地面积减少量最高,森林面积的增加量远不及灌木和草地面积的减少量,说明植被覆盖度减弱,主要是覆盖度较高的草地面积减少严重。

2.2 土壤侵蚀模数与侵蚀强度变化

在 GIS 平台对 CSLE 各因子进行地图代数运算得到 2010 年和 2020 年的土壤侵蚀模数(图 2),结果显示,2010 年金沙江流域土壤侵蚀模数介于 0~870.75 t/(hm²·a),平均侵蚀模数为 17.06 t/(hm²·a)。根据地势从青海当曲至青海直门达划为流域上上游,平均土壤侵蚀模数 10.20 t/(hm²·a);直门达至云南石鼓为流域上游,平均土壤侵蚀模数 19.34 t/(hm²·a);石鼓至四川屏山为流域中游,平均土壤侵蚀模数 21.32

t/(hm²·a);屏山至四川宜宾为流域下游,平均土壤侵蚀模数 7.50 t/(hm²·a)。2020 年金沙江流域土壤侵蚀模数介于 0~895.46 t/(hm²·a),平均侵蚀模数为 24.56 t/(hm²·a),其中流域上上游平均土壤侵蚀模数 14.00 t/(hm²·a),流域上游平均土壤侵蚀模数 30.37 t/(hm²·a),流域中游平均土壤侵蚀模数

27.45 t/(hm²·a),流域下游平均土壤侵蚀模数 10.40 t/(hm²·a)。显然,十年间流域上游和中游,即青海直门达至云南石鼓段和石鼓至四川屏山段土壤侵蚀模数变化最明显,分别由 19.34 t/(hm²·a)上升至 30.37 t/(hm²·a)、由 21.32 t/(hm²·a)上升至 27.45 t/(hm²·a),侵蚀等级由轻度向中度转变。

表 5 金沙江流域 2010 年、2020 年土地利用转移矩阵

年份	2020 年							总计	减少量
	耕地	森林	灌木	草地	水域	贫瘠	建筑		
2010 年	耕地	30589.69	2301.43	245.02	1790.72	176.84	3.07	105.06	4622.15
	森林	2923.92	141198.80	1101.00	148.11	1.09	0.01	1.67	4175.79
	灌木	561.38	926.97	2735.75	926.23	0.71	0.05	0.00	2415.34
	草地	3404.90	3062.44	527.14	256273.80	240.92	4283.69	66.32	11585.40
	水域	25.93	12.61	0.00	224.77	2571.26	184.38	4.28	451.96
	贫瘠	0.27	5.41	0.00	2435.71	117.99	13201.40	1.05	2560.42
	建筑	0.13	0.00	0.00	0.17	19.42	0.00	487.45	19.73
	总计	37506.22	147507.66	4608.91	261799.50	3128.23	17672.60	665.82	—
增加量	6916.53	6308.86	1873.16	5525.70	556.96	4471.20	178.38	—	—

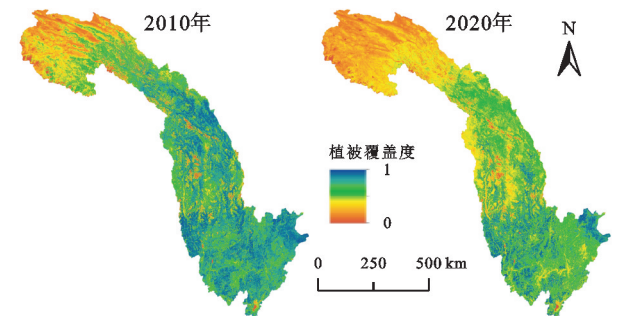


图 1 金沙江流域 2010 年、2020 年植被覆盖度
依据土壤侵蚀分类分级标准进行土壤侵蚀强度

分级,如图 3 所示,2010—2020 年金沙江流域上游和中游土壤侵蚀强度变化明显,为明确 10 a 间各侵蚀强度等级间的变化,进行了土壤侵蚀强度转移矩阵(表 7)。由表可知,2010 年向 2020 年土壤侵蚀强度转移中,微度侵蚀向轻度侵蚀转移 41.53%,轻度侵蚀向中度侵蚀转移 66.03%,中度侵蚀向强烈侵蚀转移 29.08%,强度侵蚀向极强度侵蚀转移 27.80%,极强度侵蚀向剧烈侵蚀转移 11.00%,总体呈现低强度向高强度转移。

表 6 金沙江流域 2010 年、2020 年植被覆盖情况

年份	参数	植被覆盖度				
		<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
2010	面积/km ²	4394.78	77371.65	87673.73	217934.92	102847.67
	面积占比/%	0.90	15.78	17.88	44.46	20.98
2020	面积/km ²	11365.18	152680.17	190477.60	123256.66	12443.15
	面积占比/%	2.32	31.14	38.86	25.14	2.54

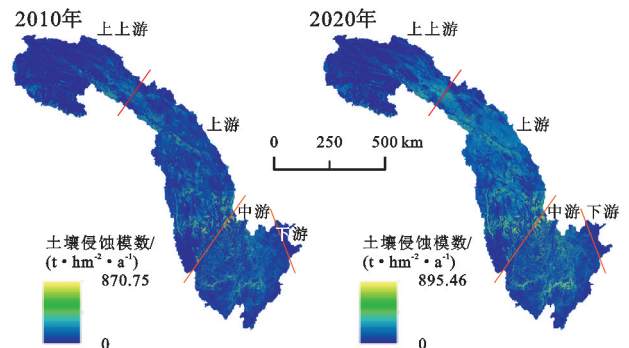


图 2 金沙江流域土壤侵蚀模数空间分布

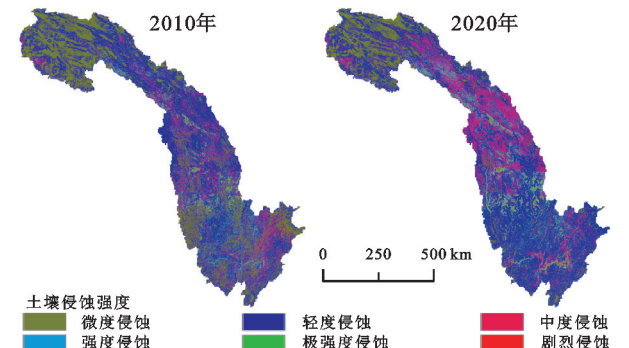


图 3 金沙江流域 2010 年、2020 年土壤侵蚀强度空间分布

表 7 金沙江流域 2010—2020 年土壤侵蚀强度转移矩阵 km²

年份	2020 年						总计
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	
2010 年	微度	97796.64	73308.87	3367.36	1336.48	550.52	176516.94
	轻度	3272.79	132605.03	56249.96	7814.09	650.39	200820.26
	中度	400.22	3267.63	40332.96	18972.48	1903.22	65230.98
	强度	208.40	1072.18	1077.14	14297.04	6540.43	23530.30
	极强度	170.00	474.87	233.50	602.35	7504.91	10096.85
	剧烈	33.66	216.70	325.80	169.67	170.18	2066.74
	总计	101881.71	210945.28	101586.72	43192.11	17319.65	478262.07

2.3 不同坡段土壤侵蚀变化特征

为进一步分析土壤侵蚀在不同坡度下的分布情况,参照《土壤侵蚀分类分级标准》将流域坡度分为 0°~5°,5°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°, >35°,共 6 个坡段,对 2010 年和 2020 年的土壤侵蚀模数按不同坡度提取(表 8)。结果显示,随坡度的增加侵蚀模数不断增大,呈正相关。10 年间,侵蚀模数的增幅与

坡度也呈正相关,其中 0°~5°坡段土壤侵蚀模数增幅最少,只增加了 20%,大于 35°坡段的土壤侵蚀模数增幅最大,由 25.85 t/(hm²·a)增至 39.09 t/(hm²·a),增加 51.22%。从土壤侵蚀量来看,两期土壤侵蚀量占比较高坡段均处在 8°以上,侵蚀量占比分别达到了 92.71%,93.80%,2020 年 6 个坡段对应的土壤侵蚀量均高于 2010 年对应坡段土壤侵蚀量。

表 8 金沙江流域不同坡度段土壤侵蚀变化

坡度/ (°)	面积/ 万 hm ²	面积 占比/%	2010 年			2020 年			10 年土壤侵蚀 模数变化/%
			平均土壤侵蚀模数/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ 万 t	侵蚀量 占比/%	平均土壤侵蚀模数/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ 万 t	侵蚀量 占比/%	
0~5	1009.27	19.43	3.20	3229.66	3.65	3.84	3875.60	3.05	+20
5~8	411.09	7.91	7.83	3218.83	3.64	9.75	4008.13	3.15	+24.52
8~15	851.07	16.39	15.20	12936.26	14.63	20.91	17795.87	13.98	+37.57
15~25	1183.27	22.78	22.08	26126.60	29.55	32.04	37911.97	29.79	+45.11
25~35	1080.22	20.80	23.95	25871.27	29.26	35.09	37904.92	29.79	+46.51
>35	658.89	12.69	25.85	17032.31	19.27	39.09	25756.01	20.24	+51.22

注:“+”表示增加。

2.4 不同高程带土壤侵蚀变化特征

由于研究区海拔跨度大,进而分析了不同高程带土壤侵蚀分布情况。将流域划分为 7 个高程梯度(<500 m,500~1 000 m,1 000~2 000 m,2 000~3 000 m,3 000~4 000 m,4 000~5 000 m,>5 000 m)。如图 4 所示,流域上上游高程在 4 000 m 以上,流域上游高程为 3 000~5 000 m,流域中游大部分高程为 1 000~3 000 m,流域下游高程 500~1 000 m 为主。由表 9 可知,侵蚀模数与高程带并无直接线性关系,2010 年在 3 000~4 000 m 高程带平均土壤侵蚀模数最低,主要涉及流域上游和中游段,2020 年小于 500 m 高程带土壤侵蚀模数最低,2010 年和 2020 年在 1 000~2 000 m 高程带平均土壤侵蚀模数均最高,涉及流域中游和下游段。在 4 000~5 000 m 高程带土壤侵蚀量最高,涉及了金沙江流域的上游和上上游,2010 年和 2020 年分别侵蚀了 43 173.19 万 t 和 65 740.99 万 t,占比为 48.70%和 51.53%。从各高程带十年侵蚀模数变化

来看,增幅由大到小的高程带依次为 3 000~4 000 m,4 000~5 000 m,2 000~3 000 m,500~1 000 m,1 000~2 000 m,>5 000 m,<500 m,由此推断金沙江流域上游和中游段土壤侵蚀强度增加最为明显。

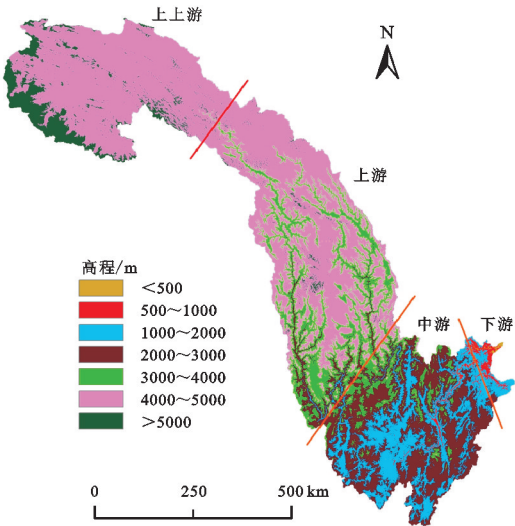


图 4 金沙江流域高程空间分布

表 9 金沙江流域不同高程带土壤侵蚀变化

高程/m	面积/ 万 hm ²	面积 占比/%	2010 年			2020 年			10 年侵蚀 模数变化/%
			平均土壤侵蚀模数/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ 万 t	侵蚀量 占比/%	平均土壤侵蚀模数/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ 万 t	侵蚀量 占比/%	
<500	7.78	0.16	20.09	156.30	0.18	22.00	171.16	0.13	+9.50
500~1000	41.79	0.80	19.84	829.11	0.94	26.17	1093.64	0.86	+31.91
1000~2000	521.32	10.03	22.99	11985.15	13.52	29.59	15425.86	12.09	+28.71
2000~3000	904.12	17.40	18.61	16825.67	18.98	24.67	22304.64	17.48	+32.56
3000~4000	715.96	13.78	13.67	9787.17	11.04	22.35	16001.70	12.54	+63.50
4000~5000	2725.58	52.46	15.84	43173.19	48.70	24.12	65740.99	51.53	+52.27
>5000	279.06	5.37	21.10	5888.17	6.64	24.56	6853.71	5.37	+16.40

注:“+”表示增加。

3 结论与讨论

(1) 金沙江流域 2010—2020 年土地利用和植被覆盖发生明显变化。耕地面积增量最多,净增加 2 294.38 km²,主要由森林、草地转移而来。草地面积减量最多,净减少 6 059.7 km²,草地主要转移为耕地、贫瘠地和森林。10 年间,植被覆盖度减弱,覆盖度较高的面积减少严重,0.6 以上盖度面积减少 57.70%。有研究显示金沙江流域植被覆盖受气温和降水驱动的区域分别占总面积的 32.627%和 28.265%^[29],说明植被覆盖还有很大一部分是受人为活动的影响,在流域高海拔带可以考虑放牧,流域低海拔带考虑耕地扩张和森林保护行为,以及开发建设项目导致植被覆盖发生变化。

(2) 金沙江流域 2010 年和 2020 年平均土壤侵蚀模数分别为 17.06 t/(hm²·a),24.56 t/(hm²·a),呈增加趋势,其中流域上游,即青海直门达至云南石鼓段土壤侵蚀模数变化明显,由 19.34 t/(hm²·a)上升到了 30.37 t/(hm²·a)。整个流域侵蚀强度等级分析结果总体呈现低强度向高强度转移,显著表现为微度侵蚀向轻度侵蚀转移 41.53%轻度侵蚀向中度侵蚀转移 66.03%,中度以上转移量相对较低。

(3) 金沙江流域不同坡段和高程带土壤侵蚀特征变化明显。总体上,土壤侵蚀模数随坡度的增加而递增,2010—2020 年土壤侵蚀模数增幅随坡度的增加而增大,高程在 1 000~2 000 m 的平均土壤侵蚀模数均最高,涉及流域中游和下游,即云南石鼓至四川宜宾。10 年间,侵蚀模数变化增幅最大的高程带为 3 000~4 000 m,该高程带处于流域上游和中游。

本项研究在土壤侵蚀模型选择上,使用 CSLE 模型要优于 RUSLE 模型,金沙江流域地貌、海拔、气候、耕作模式差异明显,CSLE 模型中各因子更能具

体代表不同地区的情况,在计算坡度坡长因子时,使用适合西南土石山区的高坡度分段公式,以适宜流域山高坡陡的现象,所以计算结果较为合理。另外,有研究表明生物措施因子 B 是中国土壤流失方程(CSLE)中最敏感的因子,土地利用类型为影响土壤侵蚀的主控因子,土地利用方式是土壤侵蚀空间异质性的主要驱动力^[30-31]。因此,研究中统一使用了 1981—2010 年 29 个时间序列的年均降雨量,从植被覆盖和土地利用变化出发,目的是排除降雨因素,揭示十年地表变化造成的土壤侵蚀变化特征。

影响土壤侵蚀程度的因素主要有气候、地形、土壤、植被,对于金沙江流域而言,气候和土壤是不受人类控制而发生土壤侵蚀的潜在因素,需要讨论的是耕垦、毁林开荒、设施建设、过度放牧等人为活动下改变了地形和植被覆盖等因素造成土壤侵蚀加剧的问题。通过研究结果,可以看到近 10 年金沙江流域草地退化严重,耕地和建筑扩张明显,植被覆盖度减弱,这可能与人为过度放牧和开发建设等行为有关。人类的开发建设,如修建高速公路、修建大型水电站等都会一定程度上改变原有的地形地貌,地形发生变化意味着坡度的大小、坡长、坡形等随之发生改变,这直接决定了土壤侵蚀对地表径流的响应,除了开发建设造成地形改变还会破坏植被,加之耕地扩张,过度放牧等行为使草地面积减少,导致土壤失去了天然的保护屏障。以上这些行为是造成 2010—2020 年金沙江流域出现土壤侵蚀由低强度向高强度转移的主要原因,目前,轻度侵蚀向中度侵蚀转移量最多,需要警惕未来进一步加剧的风险。

由于尚无定量评价冻融侵蚀的方法^[32],本研究只估算了水力侵蚀,尚未考虑金沙江源头存在冻融侵蚀的现象。可见估算水力、冻融等混合侵蚀地块的土壤侵蚀模型已成为亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] Wang Z J, Jiao J Y, Su Y, et al. The efficiency of large-scale afforestation with fish-scale pits for revegetation and soil erosion control in the steppe zone on the hilly Loess Plateau[J]. *Catena*, 2014, 115:159-167.
- [2] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(4):32-36.
- [3] Guo S, Zhu Z, Lyu L. Effects of climate change and human activities on soil erosion in the Xihe River Basin, China[J]. *Water*, 2018, 10(8):1085-1099.
- [4] 王永立, 范广洲, 周定文, 等. 我国东部地区 NDVI 与气温、降水的关系研究[J]. *热带气象学报*, 2009, 25(6):725-732.
- [5] 赵峰, 范海峰, 田竹君, 等. 吉林省中部不同土地利用类型的土壤侵蚀强度变化分析[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2005, 35(5):661-666.
- [6] Ali S. Evaluation of the Universal Soil Loss Equation in semi-arid and sub-humid climates of India using stage dependent C-factor[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 78(5):422-427.
- [7] V Bagarello, C, D Stefano, et al. Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models[J]. *Catena*, 2017, 155:10-19.
- [8] 周璟, 张旭东, 何丹, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 的武陵山区小流域土壤侵蚀评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(4):468-474.
- [9] 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.
- [10] 陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4):73-79.
- [11] 王凯, 夏燕秋, 马金辉, 等. 基于 CSLE 和高分辨率航空影像的孤山川流域土壤侵蚀定量评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1):26-32.
- [12] 马亚亚, 王杰, 张超, 等. 基于 CSLE 模型的陕北纸坊沟流域土壤侵蚀评价[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(6):95-102.
- [13] 顾治家, 谢云, 李鹭, 等. 利用 CSLE 模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11):49-56.
- [14] 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: 以云南省丽江市为例[J]. *山地学报*, 2007, 25(5):548-556.
- [15] 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.
- [16] 陈正发, 龚爱民, 宁东卫, 等. 基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6):7-14.
- [17] 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.
- [18] 姚昆, 周兵, 何磊, 等. 川西南山区 2000—2018 年土壤侵蚀时空动态变化特征[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4):224-230.
- [19] 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.
- [20] 蒲泓君. 川西南干热河谷土壤侵蚀风险评价: 以 2000—2015 年为例[J]. *农业与技术*, 2022, 42(11):112-114.
- [21] 王莉娜, 李文龙, 王素芳, 等. 基于遥感和 USLE 模型的 2000—2010 年甘肃省土壤侵蚀变化评价[J]. *草业科学*, 2016, 33(2):176-183.
- [22] Liu B, Zhang K, Yun X. An empirical soil loss equation [C]// *Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference*, Beijing, China, 2002.
- [23] Williams J R, Dyke P T, Jones C A. *Epic: A model for assessing the effects of erosion on soil productivity* [J]. *Developments in Environmental Modelling*, 1983, 5:553-572.
- [24] 孔亚平, 张科利, 曹龙熹. 土壤侵蚀研究中的坡长因子评价问题[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(4):43-47.
- [25] 刘宝元, 毕小刚, 符素华. *北京土壤流失方程* [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [26] 江忠善, 郑粉莉. 坡面水蚀预报模型研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1):66-69.
- [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.
- [29] 张顾萍, 陈国民, 邵怀勇, 等. 近 16 年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7):1638-1648.
- [30] 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.
- [31] 陈羽璇. 基于 GIS 和 CSLE 模型的珠江流域土壤侵蚀评价与制图[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [32] 陈同德, 焦菊英, 王颖霖, 等. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3):547-564.