

西藏“一江两河”地区水力侵蚀的时空分异规律

李浩然^{1,2}, 郝连安³, 张秀梅^{1,2}, 王晨光^{1,2}, 张怡捷^{1,2}, 马波^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业
国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院,
陕西 杨凌 712100; 3.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: [目的] 对西藏自治区“一江两河”地区土壤侵蚀强度及其时空分异规律进行分析, 为该地区土壤侵蚀防治与生态治理提供科学依据。[方法] 基于降雨、数字高程模型 DEM、土壤、植被及土地覆被等数据, 利用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 及空间信息技术 (GIS) 等方法估算研究区 1995、2005、2015 和 2020 年的土壤侵蚀模数并进行土壤侵蚀强度分级, 分析“一江两河”地区土壤侵蚀强度时空变化特征, 阐明水土流失面积变化规律。[结果] ①“一江两河”地区平均土壤侵蚀模数为 30.35 t/(hm²·a), 随时间呈先增加后降低的总体趋势, 且土壤侵蚀模数呈减少趋势的区域面积逐年增加。②研究区土壤侵蚀强度呈西高东低的趋势, 以轻度和微度为主, 面积比例总和达 70% 及以上, 各等级土壤侵蚀面积转移以中度侵蚀→轻度侵蚀为主。③流域内水土流失面积比例总体呈现减小趋势, 谢通门县、拉孜县为侵蚀风险较高的区域。[结论] “一江两河”地区土壤侵蚀具有较强的时空分异性, 中部地区土壤侵蚀风险较高, 水土保持治理亟需加强。

关键词: “一江两河”地区; 土壤侵蚀; 时空格局; RUSLE 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0291-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 李浩然, 郝连安, 张秀梅, 等. 西藏“一江两河”地区水力侵蚀的时空分异规律[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 291-301. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.030; Li Haoran, Hao Lianan, Zhang Xiumei, et al. Temporal and spatial variation of soil erosion in Yarlung Zangbo, Nyangqu and Lhasa rivers area of Xizang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 291-301.

Temporal and Spatial Variation of Soil Erosion in Yarlung Zangbo, Nyangqu and Lhasa Rivers Area of Xizang Autonomous Region

Li Haoran^{1,2}, Hao Lianan³, Zhang Xiumei^{1,2}, Wang Chenguang^{1,2}, Zhang Yijie^{1,2}, Ma Bo^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3.Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: [Objective] The intensity of soil erosion and its spatial and temporal variation in the Yarlung Zangbo, Nyangqu and Lhasa rivers (referred as “YNL rivers”) area of Xizang Autonomous Region were analyzed in order to provide a scientific basis for soil erosion control and ecological management in the area. [Methods] Rainfall, digital elevation model (DEM), soil, vegetation, and land cover data were acquired and used with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Geographic Information System (GIS) to estimate the soil erosion modulus in the study area in 1995, 2005, 2015, and 2020, and to classify the intensity of soil erosion. By analyzing the spatial and temporal variation characteristics of soil erosion intensity in the YNL rivers area, the variation pattern of soil and water loss area was determined. [Results] ① The average soil erosion modulus in the YNL rivers area was 30.35 t/(hm²·a). The modulus initially

收稿日期: 2023-03-05

修回日期: 2023-06-04

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”子课题“土壤侵蚀定量评价与分区防控对策”; 国家自然科学基金项目“黄土高原北部冻融作用下物理结皮特性变化对风蚀的影响机理”(XDA20040202; 42277342)

第一作者: 李浩然(1997—), 男(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 研究方向为区域土壤侵蚀风险评估。Email: 1047402863@qq.com。

通信作者: 马波(1982—), 男(回族), 陕西省汉中市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀机理与区域土壤侵蚀评价研究。Email: soilcrop@163.com。

increased and then decreased over time. The area of decreasing soil erosion modulus increased year by year. ② The intensity of soil erosion in the study area tended to be higher in the west and lower in the east. Soil erosion intensity was mainly classified as mild and slight, with the area of these two classifications accounting for 70% or more of the total area. The transfer of soil erosion area between different classifications was mainly from moderate erosion to mild erosion. ③ The proportion of soil erosion area in the watershed showed an overall decreasing trend over time, with Xietongmen and Lazi County being the areas with higher erosion risk. [Conclusion] Soil erosion in the YNL rivers area had strong spatial and temporal variation. The central region had a higher risk of soil erosion, and soil and water conservation research and practices are urgently needed for that region.

Keywords: YNL rivers area; soil erosion; spatial and temporal patterns; RUSLE model

土壤侵蚀严重威胁人类社会的安全和可持续发展,目前全球土壤侵蚀依旧严峻。2019 年世界土壤日把土壤侵蚀认定为土壤的头号威胁。中国作为世界上土壤侵蚀最严重的国家之一,据统计依然有超过 50% 的国土面积仍在遭受着土壤侵蚀的危害^[1-2]。西藏自治区“一江两河”(雅鲁藏布江、年楚河、拉萨河)地区作为中国西部典型的开发区,同时也是中国典型的生态脆弱区之一,其主要范围包括雅鲁藏布江及其两条主要支流拉萨河、年楚河的中部河谷地区。该区域地形落差较大,植被覆盖率低,加之全球气候变暖以及人类活动的影响,生态系统极为脆弱,水土流失严重^[3-5]。区域内侵蚀类型多样,以水力侵蚀、风力侵蚀和冻融侵蚀为主。其中水力侵蚀作用主要发生在拉萨河流域及雅鲁藏布江中下游山南地区,风力侵蚀主要发生在以辫状及乱流状水系极为发育的雅鲁藏布江宽谷地段,冻融侵蚀主要集中分布于雅鲁藏布江北岸高寒山区^[5-6]。严重的水土流失已经造成“一江两河”地区土地生产力退化、水利设施淤积及生态环境负担加重等危害^[3]。随着“一江两河”地区的快速发展,对于生态环境质量的要求也愈来愈高,严重的土壤侵蚀所造成的生态退化已经成为制约该地区经济发展的重要因素之一^[5,7]。因此,“一江两河”地区水土流失的有效治理,对于该地区可持续发展具有重要意义。目前,针对“一江两河”地区的土壤侵蚀研究已逐渐受到关注。同时由于高寒环境下土壤侵蚀监测较为困难导致实测资料相对较少,利用 RUSLE, CSLE 等土壤侵蚀模型对土壤侵蚀量进行计算,已经成为评估该区域土壤侵蚀状况的主要工具。Wang 等^[8]利用 RUSLE 模型对雅鲁藏布江中游的土壤侵蚀进行了估算,研究发现,虽然 2001—2015 年土壤侵蚀呈下降趋势,但由于降水量和气温的增加,到 2050 年土壤侵蚀风险可能会加剧。方广玲等^[9]以 RUSLE 与空间信息技术(GIS 和 RS)相结合的方法对拉萨河进行了土壤侵蚀特征分析,该流域中度侵蚀面积比例达 59.0%,强烈以上侵蚀面积很小,但侵蚀

量所占比例较大,达到 14.3%。虽然已有部分学者对“一江两河”地区的土壤侵蚀状况进行了评估,但多集中于对单年或多年平均土壤侵蚀状况的评价,而针对不同时期的土壤侵蚀时空变化规律等研究还较为缺乏。同时由于该地区降水集中,雨强及山地径流较大,其水力侵蚀较为严重。并且由于近年气候变化的作用,该地区的植被以及降雨等发生了较大的变化,对于该地区水力侵蚀产生了较大的影响。目前关于气候变化条件下该地区水力侵蚀的时空变化特征研究较少。在全球变化和经济快速发展的背景下,深入研究和理解“一江两河”地区土壤侵蚀时空分异规律,可有力支撑该区水土流失治理和可持续发展的需求。为此,本文以“一江两河”地区为研究对象,基于 RUSLE 模型和 GIS 平台,分析 1995—2020 年土壤侵蚀模数、强度等级及水土流失面积的时空变化特征,以期为该地区土壤侵蚀防治和生态治理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

西藏自治区“一江两河”地处西藏自治区的中南部(28°60′—30°29′N, 87°4′—92°37′E),主要包括雅鲁藏布江及其两条主要支流拉萨河、年楚河的中部河谷地区,其中雅鲁藏布江贯穿地区东西,年楚河位于地区西部、雅鲁藏布江以南,拉萨河位于地区东部、雅鲁藏布江以北。该区东西长约 520 km,南北宽约 220 km,区域面积约 6.67 万 km²,涵盖拉萨市、日喀则市、山南市下辖 18 个区县。区域海拔介于 3 284~7 168 m 之间且落差较大,地形空间分异性强,南北海拔高且多山地,年楚河、拉萨河以及雅鲁藏布江周边的河谷地区海拔较低^[10]。气候属高原温带半干旱季风气候,多年平均气温为 6.82 °C,多年平均降水量约为 344.24 mm,降水主要集中在 5—9 月,占全年总降水量 90% 以上。植被类型主要以草地以及高原草甸为主^[11],耕地主要分布于河谷地带。该区总人口占西藏自治区总人口 33%,在西藏自治区的经济发

展中有重要地位^[12]。当地农业与畜牧业较为发达,但其易受自然灾害等影响,抵抗外部风险的能力较弱^[13]。在较为匮乏的自然资源背景、经济发展及人口增长的压力之下,出现了过度开垦、过度放牧等问题,进一步加剧了当地的土壤侵蚀^[5]。

1.2 数据来源与处理

本研究采用的数据主要有降雨、数字高程模型 DEM、土壤、归一化植被指数 (NDVI) 及土地覆被等 (表 1)。NDVI 数据为美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 全球监测与模型研究组 (Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS) 发布的 NOAA AVHRR 数据集和 NASA 陆地过程分布式数据档案中心 (The Land Processes Distributed Active Archive Center, LP DAAC/NASA) 提供的 EOS MODIS NDVI 数据集。本研究采用的 AVHRR GIMMS NDVI 3g V1 半月时段为 198201—201512, 空间分辨率为 8 km; MODIS MOD13Q1 的 16 d 数据时段为 200002—202112, 空间分辨率 250 m。每月和每年的 NDVI 采用了最大值合成法 (Maximum value composites, MVC), 以进一步消除云雾、大气等因素的干扰, 提高数据的精度。GIMMS NDVI 与 MODIS NDVI 数据的重叠时段为 200002—201512, 基于以上时段建立逐月数据的线性关系, 并将此线性关系应

用到 GIMMS NDVI 198201—200001 时段, 得到新的时段数据, 以完成上述 2 种数据的集成^[14-15]。利用两个数据间的线性拟合关系调整了 198201—200003 的 GIMMS NDVI 数据, 并与 200004—202112 MODIS NDVI 数据结合 ($NDVI_{MODIS} = 1.0357 NDVI_{GIMMS} - 0.0231$, $R^2 = 0.770$), 形成新的 1982—2021 年时间序列 NDVI 数据。

降雨数据采用 1986—2020 年逐月降水数据, 来自于 WorldClim 的 Global climate and weather data 数据 (1960—2018 年) 和 ERA5_Land 逐月平均降水量及平均气温数据 (1986—2020 年)。WorldClim 逐月降水量及气温数据集由东英吉利大学气候研究室的 CRU-TS-4.03 降尺度而来, 并使用 WorldClim 2.1 数据进行了偏差校正^[16-17]。ERA5_Land 数据集是陆面应用中最先进的全球再分析数据集之一, 分辨率为 9 km (1950 至今)。本研究中主要采用 WorldClim 的 CRU 降尺度数据, 其分辨率为 4.5 km, 时间序列为 198601—201812, 但缺乏 201901—202012 数据。而 ERA5_land 降水数据与 CRU, CMFD 等其他数据间在时间趋势上表现出高度的一致性, 但是整体偏高^[18]。因此, 可借鉴 NDVI 数据融合的方法, 将 WorldClim 198601—201812 与 ERA5-land 201901—202012 调整为 198601—202012 时间序列降水数据 ($PRE_{CRU} = 0.466 PRE_{ERA5}$, $R^2 = 0.971$)。

表 1 研究使用的基础数据信息

Table 1 Basic data information used in study

数据名称	时间分辨率	空间分辨率	格式	数据来源
GIMMS NDVI	16 d	8 km	栅格	AVHRR GIMMS NDVI 3g V1 (https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/)
MODIS NDVI	16 d	250 m	栅格	MODIS MOD13Q1 (http://modis.gsfc.nasa.gov/data)
降水量	逐月	4.5 km	栅格	WorldClim-Historical monthly weather data (https://www.worldclim.org)
降水量	逐月	9 km	栅格	ERA5-Land (https://www.ecmwf.int/en/era5-land)
数字高程模型	—	90 m	栅格	SRTM 90 m Digital Elevation Database v4.1 (https://cgiasi.community/data/srtm-90-m-digital-elevation-database-v4~1/)
土壤数据	—	250 m	栅格	SoilGrids (www.soilgrids.org)
土地覆被数据	逐年	300 m	栅格	The Land Cover CCI (http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.shp)

土壤数据为国际土壤参考和资料中心 (International Soil Reference and Information Centre, ISRIC) 的 SoilGrids 土壤剖面数据, 空间分辨率为 250 m。与 HWSO 全球土壤数据库、中国土壤普查数据等相比, 该数据库中土壤属性数据更全、分辨率更

高, 因此更适用于 K 因子的计算^[19]。数字高程数据 DEM 为 SRTM 90 m Digital Elevation Database v4.1, 由美国太空总署 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 联合测量, 是计算坡度坡长因子的主要数据来源之一。土地覆被数据采用了欧洲航天局 1992—

2020 年 The Land Cover CCI 土地覆被数据(空间分辨率 300 m)。土地利用分类系统参照欧洲航天局提供的分类标准将研究区地类重分类为农地、林地、草地、水域、灌木林地、稀疏植被、湿地、居民地、裸地、水域和冰川/雪地等。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤侵蚀模型 采用修正的通用土壤侵蚀模型(RUSLE)模拟计算该区 1995, 2005, 2015 和 2020 年土壤侵蚀模数, 以期探讨该区土壤侵蚀潜在风险及时空分异规律。RUSLE 模型的具体形式为:

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

式中: A 为土壤流失模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; L 为坡长因子, 无量纲; S 为坡度因子, 无量纲; C 为作物与

覆盖因子, 无量纲; P 为水土保持措施因子, 无量纲。

1.3.2 降雨侵蚀力因子 R 值 根据逐月降雨量估算降雨侵蚀力 R 因子, 采用章文波提出的简易模型进行计算。该方法针对逐月降雨数据进行了参数优化, 以包含西藏自治区拉萨气象站的 66 个气象站资料进行验证, 其模型决定系数达到 0.861, 计算结果精度较高^[20]。

$$R=0.183 \ 3 \times \left(\sum_{i=1}^{12} P_i^2 / P \right)^{1.995 \ 7} \quad (2)$$

式中: R 为降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; P_i 为第 i 月的降水量 (mm); P 为年降水量 (mm)。基于 1986—1995 年、1996—2005 年、2006—2015 年和 2011—2020 年平均月降水量分别计算得到 1995, 2005, 2015 和 2020 年降雨侵蚀力(图 1)。

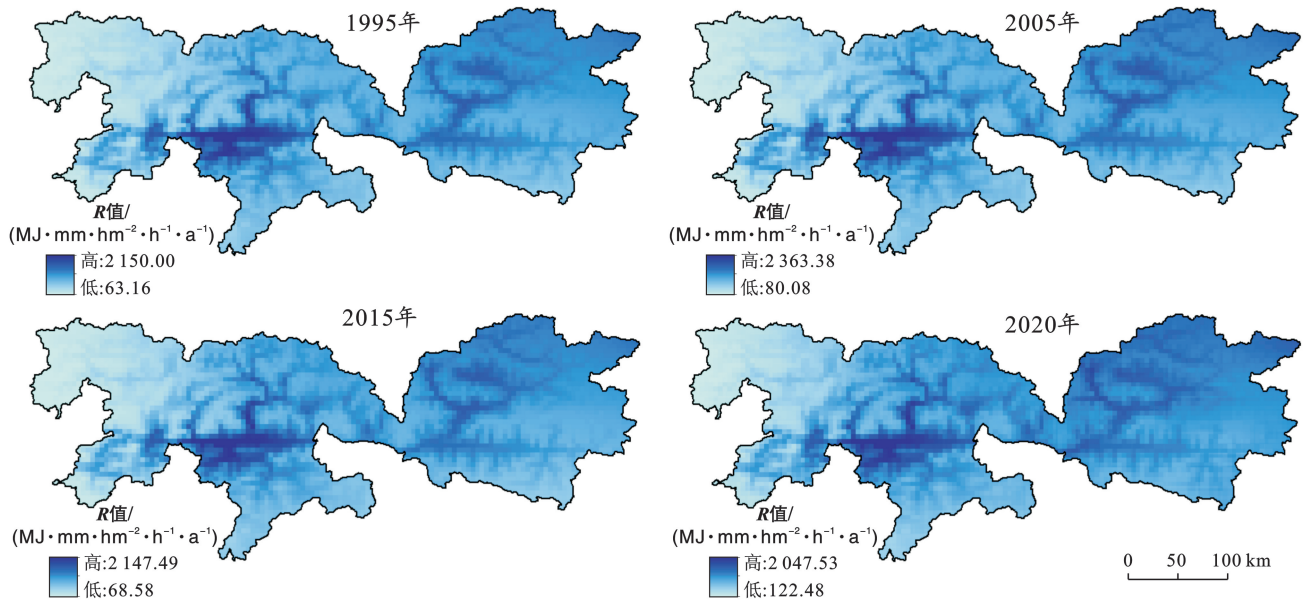


图 1 1995—2020 年“一江两河”地区降雨侵蚀力因子(R)空间分布

Fig.1 Spatial distribution of rainfall erosivity factor (R) in YNL rivers area from 1995 to 2020

1.3.3 土壤可蚀性因子 K 值 基于土壤属性数据, 采用 EPIC 模型中的土壤可蚀性因子计算方法, 该方

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \times \exp[-0.025 \ 6 \times S_{ND} \times (1 - \frac{S_{LT}}{100})] \right\} \times \left(\frac{S_{LT}}{C_{LY} + S_{LT}} \right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25 \times C}{C + \exp(3.72 - 2.95 \times C)} \right] \times \left[1.0 - \frac{0.7 \times SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)} \right] \times 0.131 \ 7$$

式中: K 为土壤可蚀性因子 [$t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; S_{AN} 为黏粒含量(%); S_{LT} 为粉粒含量(%); S_{ND} 为砂粒含量(%); C 为土壤有机碳(%); 0.131 7 为美制单位值转换公制单位的系数。本研究基于 SoilGrids 土壤数据, 采用 0—30 cm 土层的平均砂粒、粉粒、黏粒及有机碳含量进行土壤可蚀性 K 值的计算(图 2)。

法在国内外应用均较为广泛。

1.3.4 坡度坡长因子 LS 值 坡度因子 S 依据不同的坡度范围选用相应的公式计算, 其中 10° 以下采用 McCool 等^[21]的公式计算, 10° 以上采用 Liu 等^[22]的公式计算; 坡长因子 L 采用 Foster 等^[23]提出的坡长因子公式计算。

基于 DEM 数据, 采用符素华等^[24]设计的《坡度坡长因子计算工具》来实现(图 3)。

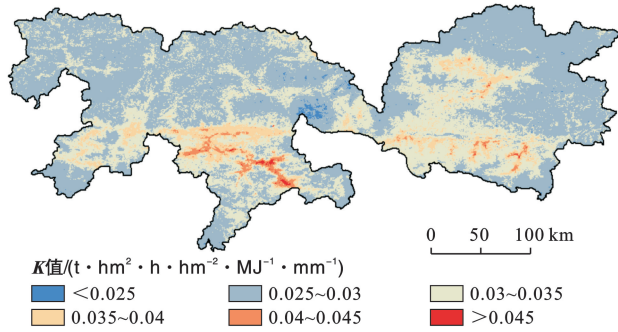


图 2 1995—2020 年“一江两河”地区土壤可蚀性因子 (K) 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil erodibility factor in YNL rivers area from 1995 to 2020

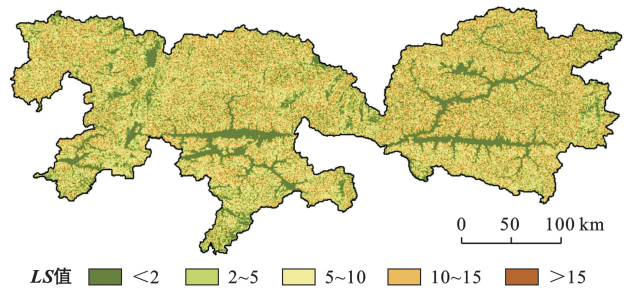


图 3 1995—2020 年“一江两河”地区坡度坡长因子 (LS) 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of slope and length factor in YNL rivers area from 1995 to 2020

$$L = (\lambda_{out}^{m+1} - \lambda_{in}^{m+1}) / [(\lambda_{out} - \lambda_{in}) \times 22.13^m] \quad (4)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中: L 为坡长因子,无量纲; S 为坡度因子,无量纲; θ 为坡度($^\circ$); λ_{out} , λ_{in} 分别为栅格出口及入口的坡长(m); m 为坡长指数,根据刘宝元等^[25]的研究结果进行取值: $m=0.2$, $\theta < 0.5^\circ$; $m=0.3$, $0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ$; $m=0.4$, $1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ$; $m=0.5$, $\theta > 3^\circ$ 。

1.3.5 植被覆盖和管理因子 C 值 由于 NDVI 与植被覆盖和管理 C 因子具有良好的非线性关系,采用 Knijff 提出的 C 因子模型进行计算^[26-27](图 4),该方法在大尺度区域计算 C 值是最有效、最实用的方法^[28-30]。

$$C = \exp\left[-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right] \quad (6)$$

式中: C 为作物与覆盖因子,无量纲; α , β 均为常数,本研究分别取值 2.5,1^[8,31]。

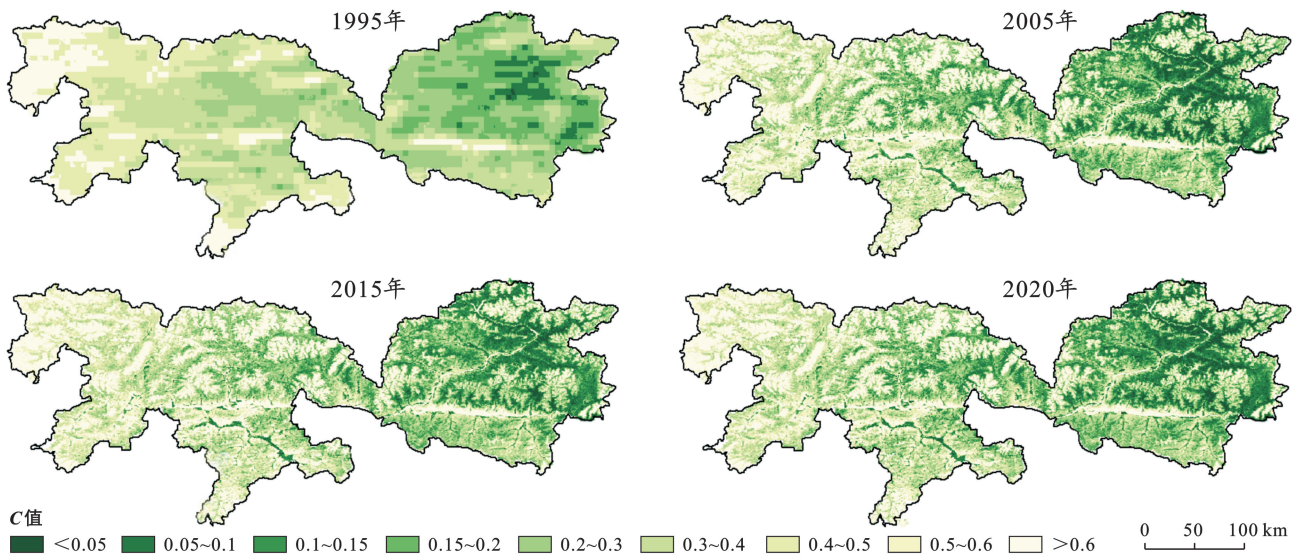


图 4 1995—2020 年“一江两河”地区覆盖与管理因子 (C) 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of coverage and management factor in YNL rivers area from 1995 to 2020

1.3.6 土壤保持措施因子 p 值 依据青藏高原土壤侵蚀相关研究^[32-34],结合土地利用图对研究区各地类进行水土保持措施因子赋值(图 5)。其中农地和林地分别赋值为 0.4 和 0.7,居民地和水域赋值为 0,草地、灌木林地、稀疏植被地、裸地和冰川/雪地等地类赋值为 1。

在 ArcGIS 平台中将计算得出的 RUSLE 模型各

因子的空间分辨率统一重采样至 250 m,相乘得出各年土壤侵蚀模数。根据《土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》,将研究区的土壤侵蚀强度划分为 5 个等级:微度[<5 t/($hm^2 \cdot a$)],轻度[$5\sim25$ t/($hm^2 \cdot a$)],中度[$25\sim50$ t/($hm^2 \cdot a$)],强烈[$50\sim80$ t/($hm^2 \cdot a$)],极强烈[$80\sim150$ t/($hm^2 \cdot a$)],剧烈[≥ 150 t/($hm^2 \cdot a$)],得到该区域土壤侵蚀强度分级图。

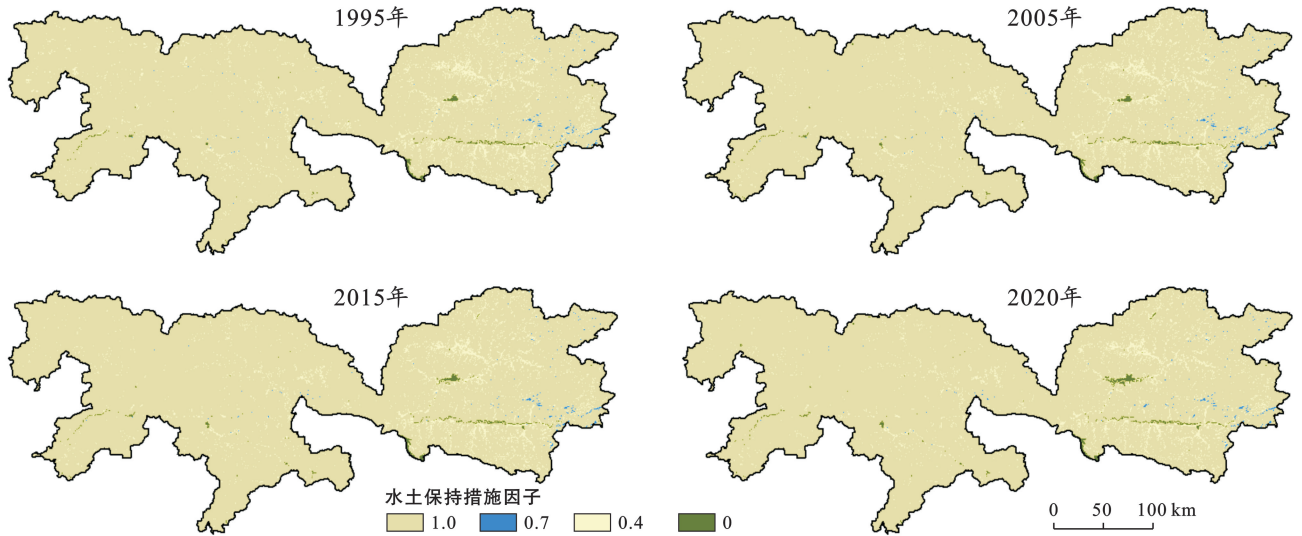


图 5 1995—2020 年“一江两河”地区水土保持措施因子空间分布

Fig.5 Spatial distribution of water and soil conservation measures factor in YNL rivers area from 1995 to 2020

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀模数变化特征

“一江两河”地区 1995, 2005, 2015 和 2020 年的平均土壤侵蚀模数分别为 30.32, 31.66, 29.79, 29.64 $t/(hm^2 \cdot a)$, 呈先增加后降低的趋势(图 6), 26 a 间土壤侵蚀模数降低了 2.24%。1995—2005 年时段内, 土壤侵蚀模数增幅为 4.40%; 2005 年以后逐渐降低, 2005—2015 年时段土壤侵蚀模数降幅为 5.10%, 而 2015—2020 年降幅仅为 0.48%, 与前一时段差异较小。拉萨河地区 1995, 2005, 2015 和 2020 年平均土壤侵蚀模数分别为 24.89, 25.80, 23.86, 23.25 $t/(hm^2 \cdot a)$, 整体趋于稳定, 26 a 间土壤侵蚀模数减少了 6.56%。其中, 1995—2005 年时段内也呈增加趋势, 增幅为 3.65%; 2005—2015 年和 2015—2020 年时段呈降低趋势, 降幅分别为 7.49% 和 2.55%。年楚河地区分别为 45.11, 52.11, 47.88, 41.70 $t/(hm^2 \cdot a)$, 26 a 间土壤侵蚀模数降低了 7.56%。其年间变化幅度较大, 1995—2005 年时段内土壤侵蚀模数增加了 15.53%; 2005—2015 年和 2015—2020 年时段则分别降低了 8.13% 和 12.91%。总体上年楚河土壤侵蚀模数高于拉萨河地区, 且年间波动也较拉萨河地区剧烈。

土壤侵蚀模数较高的区域主要集中在日喀则市桑珠孜区和南木林县, 1995—2020 年研究时段内平均侵蚀模数分别为 56.41, 44.99 $t/(hm^2 \cdot a)$; 而土壤侵蚀模数降低的区域主要分布在达孜县和桑日县, 1995—2020 年研究时段内平均侵蚀模数分别为 12.69, 17.10 $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

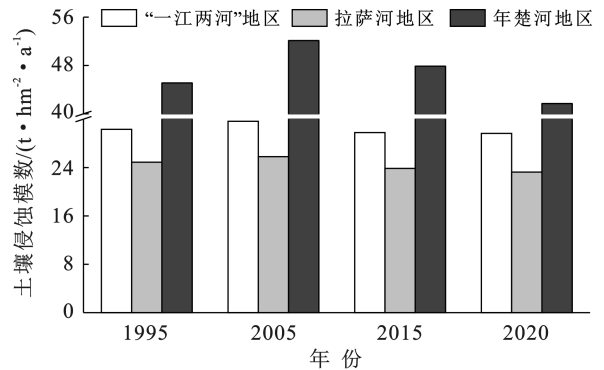


图 6 1995—2020 年“一江两河”地区土壤侵蚀模数

Fig.6 Soil erosion modulus in YNL rivers area from 1995 to 2020

图 7 为不同时段的土壤侵蚀模数差值图。“一江两河”地区 1995—2005 年、2005—2015 年和 2015—2020 年土壤侵蚀模数降低的区域面积比例分别为 65.44%, 40.86% 和 54.03%, 侵蚀模数增加的区域面积比例分别为 34.56%, 59.14% 和 45.97%。由此可知, 研究时段内土壤侵蚀模数增加的面积呈先增加后减少的趋势, 而侵蚀模数降低的面积呈现先降低后增加的趋势。1995—2005 年, 土壤侵蚀模数增加区域主要集中于研究区西部日喀则地区和东部雅鲁藏布江、拉萨河等河谷地带, 而减小区域主要集中于东部的拉萨和山南地区。侵蚀模数增加大于 10 $t/(hm^2 \cdot a)$ 的区域面积比例为 21.19%, 而侵蚀模数降幅大于 10 $t/(hm^2 \cdot a)$ 的区域面积比例为 31.60%; 两者均集中分布于研究区西部的谢通门县、拉孜县、南木林县和桑珠孜区, 说明该区域土壤侵蚀模数在此 10 a 期间变化较为剧烈。此外, 雅鲁藏布江、年楚河及拉萨河南段的河谷地带土壤侵蚀模数增加也较为剧烈, 其

中年楚河河谷侵蚀模数增加最为剧烈。2005—2015 年,土壤侵蚀模数增减区域的空间分布特征与 1995—2005 年期间相比产生了较大变化。增降幅小于 $2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的区域面积比例最大,为 27.53%,且集中分布于雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河河谷地带。而侵蚀模数增幅较大的〔增幅 $>10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 〕区域面积比例为 8.42%,主要分布于谢通门县东部和南木林县。侵蚀模数降幅较大〔降幅 $>10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 〕的区域面积比例 13.58%,主要分布于拉孜县、桑珠孜区、江孜县和白朗县;除此之外,雅鲁藏布江、年楚河及拉萨河河谷地带的土壤侵蚀模数减少也较为明显。2015—2020 年,侵蚀模数变化幅度较小的〔降幅 $<2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 〕区域面积比例 28.17%,在全域均有分布。降幅较大的区域面积比例 10.85%,主要分布于研究区西部,尤以雅鲁藏布江和年楚河河谷区最甚。侵蚀模数增幅较大的区域面积比例 12.04%,主要分布于谢通门县和南木林县北部。侵蚀模数降幅较大的区域面积比例 11.68%,主要分布于南木林县、桑珠孜区和白朗县北部。

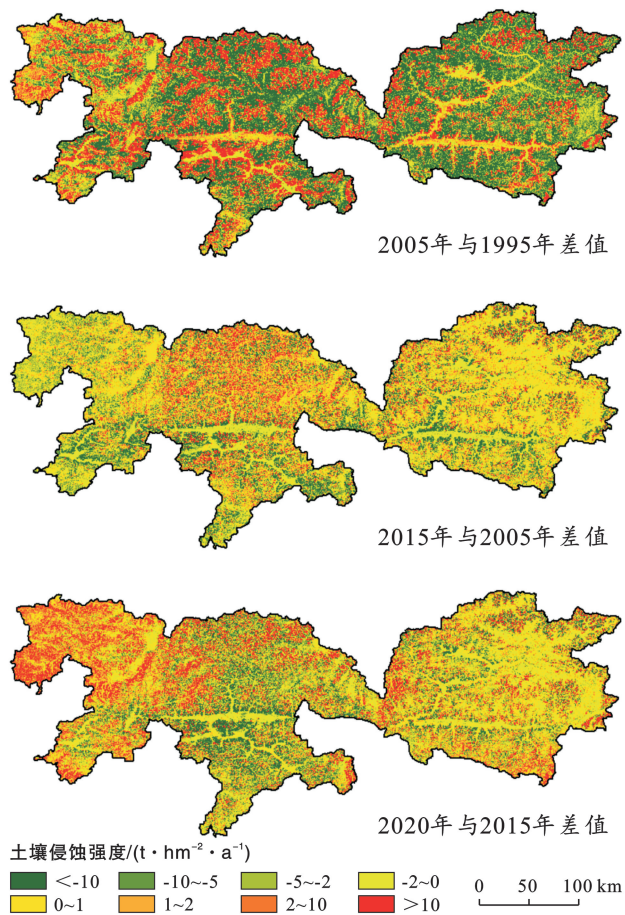


图 7 1995—2020 年“一江两河”地区不同时段土壤侵蚀模数差值

Fig.7 D-value of soil erosion modulus of different periods in YNL rivers area from 1995 to 2020

总体而言,研究区西部的日喀则地区土壤侵蚀模数在 26 a 间得到了显著降低,拉萨和山南地区土壤侵蚀模数在 2005 年之后变化幅度较小。

2.2 土壤侵蚀强度变化特征

1995—2020 年土壤侵蚀各强度等级情况如图 8 所示。不同年份的土壤侵蚀均以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,两者面积比例总和可达 70% 以上。其中,微度侵蚀面积比例由 1995 年的 21.80% 增加至 2020 年的 42.91%,轻度侵蚀面积比例则由 35.52% 减少至 26.16%。对于微度侵蚀而言,4 个研究年份 2~5 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 区间微度侵蚀面积占微度侵蚀总面积比例分别为 36.02%,26.85%,28.51% 和 27.31%,且随时间呈降低趋势。但是强烈及以上土壤侵蚀面积比例总和也较高,且年际间差异较小,分别为 19.75%,19.66%,18.62% 和 18.85%。1995—2020 年中度侵蚀和强烈侵蚀面积比例均呈降低趋势,分别由 1995 年的 22.93% 和 12.01% 降低至 2020 年的 12.09% 和 7.25%。极强烈侵蚀面积比例年际间较为接近,但呈先增加后降低的总体趋势,由 1995 年的 6.46% 增加至 2005 年的 7.74%,随后又降低至 2020 年的 7.41%。剧烈侵蚀面积在 1995—2005 年变化较大,其面积比例由 1.28% 增加至 4.89%,2005—2020 年呈缓慢减少趋势,至 2020 年面积比例降为 4.19%。

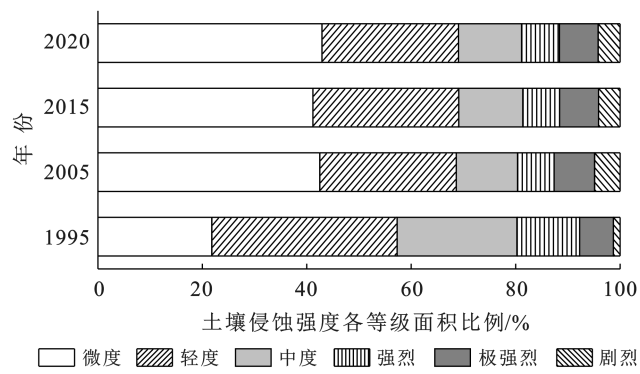


图 8 1995—2020 年“一江两河”地区土壤侵蚀强度各等级面积比例

Fig.8 Proportion of soil erosion intensity at different levels in YNL rivers area from 1995 to 2020

1995—2020 年土壤侵蚀强度均呈现西高东低的空间分布特征,总体而言日喀则地区土壤侵蚀强度远高于拉萨市和山南市(图 9)。“一江两河”地区微度侵蚀面积比例最高的区域分布于研究区达孜县、桑日县和墨竹工卡县,且面积随时间均呈增加趋势,1995—2020 年分别由 30.03%,32.35% 和 25.93% 增加至 73.19%,66.68% 和 66.51%。极强度侵蚀面积比例最大的区域主要分布于桑珠孜区、南木林县、江孜县和白朗县。其中极强烈侵蚀面积平均比例分别

为 13.39%, 11.66%, 10.43% 和 10.08%, 且随时间呈降低趋势, 分别由 1995 年的 15.93%, 12.77%, 10.04% 和 10.27% 降低至 2020 年 12.29%, 10.70%, 9.18% 和 9.16%。剧烈侵蚀面积比例较大的区域主要分布于桑珠孜区和南木林县, 平均比例分别为 11.39% 和 7.45%; 其中, 桑珠孜区随时间呈增加后降低的趋势, 南木林县随时间呈增加趋势。桑珠孜区 1995—2005 年剧烈侵蚀面积比例由 9.84% 增加至 13.64%, 至 2020 年降低至 9.95%; 南木林县剧烈侵蚀面积比例则由 1995 年的 2.04% 逐渐增加至 2020 年的 9.33%。总体而言, “一江两河”地区强烈及以上的土壤侵蚀主要发生在西部, 轻度及以下的土壤侵蚀主要发生在东部。剧烈侵蚀主要集中于桑珠孜区, 其次为南木林县。而东部的达孜县、墨竹工卡县和桑日县土壤侵蚀

主要以微度和轻度侵蚀为主, 土壤侵蚀风险较小。

拉萨河地区土壤侵蚀强度以微度和轻度侵蚀为主。其中, 微度侵蚀面积随时间呈显著增加趋势, 由 1995 年的 24.32% 上升至 2020 年的 61.46%。中度侵蚀面积比例由 23.30% 降低至 6.81%。强烈及以上侵蚀面积比例较小, 面积合计比例由 1995 年的 14.33% 降低至 2020 年的 14.19%。年楚河地区以微度、轻度和中度侵蚀为主。其中, 微度和轻度侵蚀面积呈增加趋势, 分别由 1995 年的 17.95% 和 21.83% 增加至 2020 年的 29.83% 和 27.38%; 但是中度侵蚀面积呈降低趋势, 面积比例由 23.39% 减少至 15.09%。强烈及以上侵蚀面积比例较大且呈降低趋势, 由 1995 年 36.83% 增加至 2020 年的 27.71%, 主要以极强烈侵蚀面积增加为主。

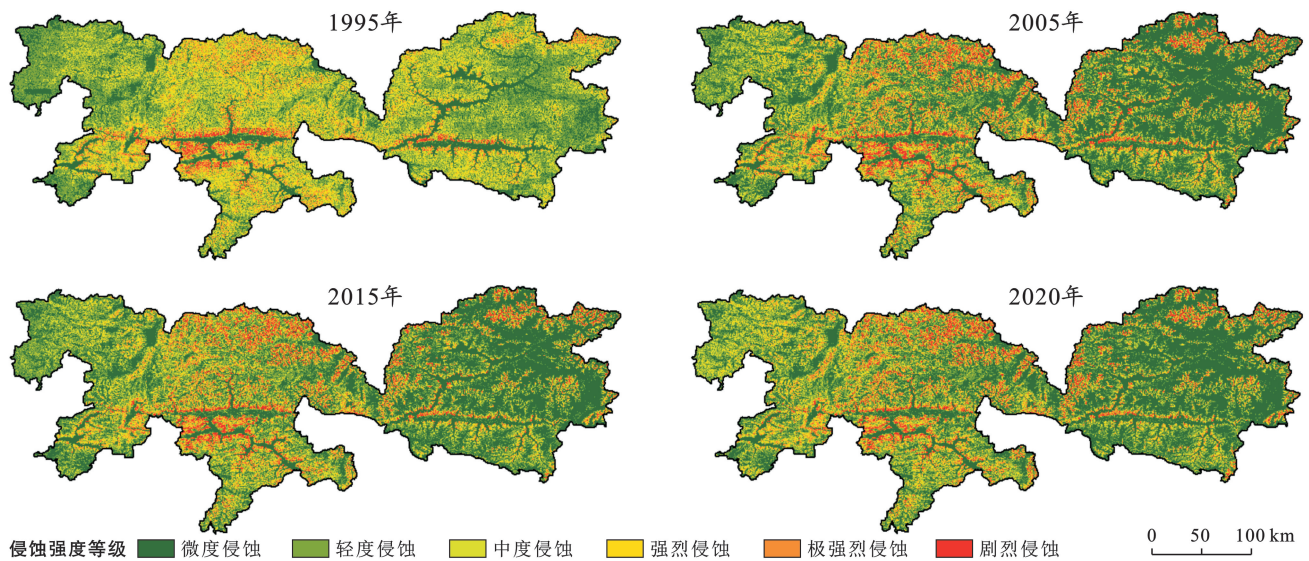


图 9 1995—2020 年“一江两河”地区土壤侵蚀空间分布

Fig.9 Spatial distribution of soil erosion from 1995 to 2020 in YNL rivers area

1995—2020 年各等级土壤侵蚀面积转移流向如图 10 所示。1995—2005 年各等级土壤侵蚀面积转移的主体为轻度侵蚀→微度侵蚀, 其次为轻度侵蚀→中度侵蚀、中度侵蚀→轻度侵蚀/强烈侵蚀、强烈侵蚀→极强烈侵蚀/剧烈侵蚀。上述 10 a 为“一江两河”地区土壤侵蚀变化最复杂剧烈的时期。2005—2015 年主要表现为微度侵蚀→轻度侵蚀、轻度侵蚀→微度/中度侵蚀、中度侵蚀→轻度侵蚀。2015—2020 年主要表现为轻度侵蚀→微度侵蚀、中度侵蚀→轻度侵蚀。

2.3 土壤流失面积变化特征

“一江两河”地区 1995, 2005, 2015 和 2020 年水土流失面积比例分别为 78.20%, 57.52%, 58.83% 和 57.09%, 总体上呈逐渐减小的趋势(图 11)。其中拉萨河地区水土流失面积比例分别为 75.68%, 38.91%,

40.68% 和 38.54%; 年楚河地区分别为 82.05%, 74.55%, 73.66% 和 70.17%。拉萨河和年楚河地区水土流失面积也随时间呈减小趋势, 且年楚河地区的水土流失面积高于拉萨河地区。在空间分布上, 白朗县、江孜县、南木林县、谢通门县和桑珠孜区的水土流失面积最高, 是侵蚀风险较高的区域; 26 a 间平均水土流失面积比例分别为 73.88%, 73.34%, 73.15%, 72.13% 和 72.02%。5 个区县的水土流失面积比例随时间均呈降低趋势, 南木林县降幅最大(23.28%), 谢通门县降幅最小(8.10%)。位于研究区东部的达孜县、桑日县和墨竹工卡县的水土流失面积较小, 土壤侵蚀风险较小。1995—2020 年平均水土流失面积比例分别为 38.50%, 42.32% 和 43.61%, 且随时间均呈降低趋势, 其降幅分别为 60.68%, 50.74% 和 54.79%, 是土壤侵蚀改善最为显著的区县。

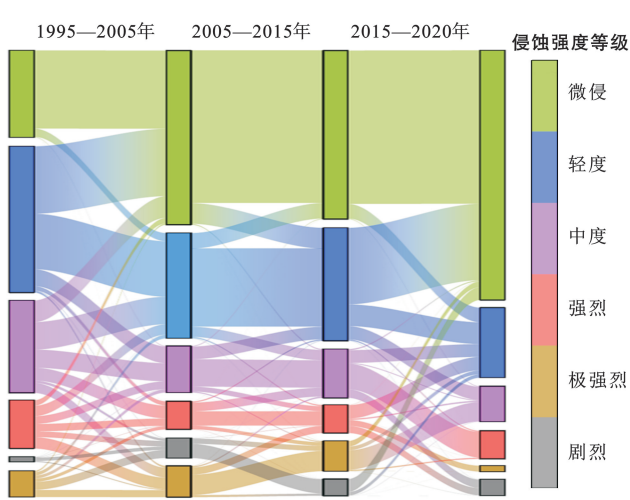


图 10 1995—2020 年“一江两河”地区土壤侵蚀强度等级的面积转移桑基图

Fig.10 Area transfer of soil erosion intensity grade from 1995 to 2020 in YNL rivers area

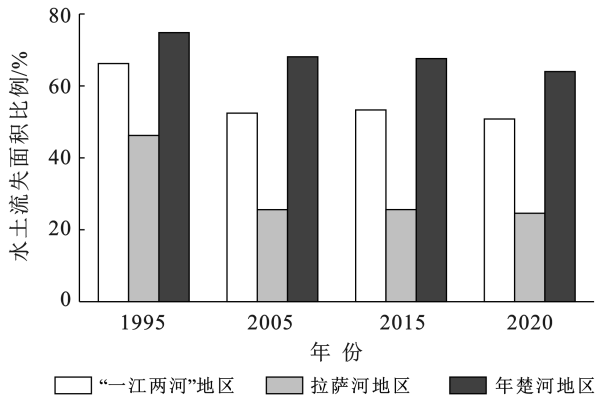


图 11 1995—2020 年“一江两河”地区不同时段水土流失面积比例

Fig.11 Proportion of soil and water loss area of different periods YNL rivers area from 1995 to 2020

3 讨论

“一江两河”地区是西藏自治区的经济、文化中心,也是重要的粮食产区,但该区地形地貌复杂多变、水土流失严重;加之气候变化和人类活动的加强,使其成为土壤侵蚀潜在变化的核心关注区之一。本研究基于 RUSLE 模型评估了不同时期“一江两河”地区的土壤侵蚀状况,结果显示,该区的土壤侵蚀强度呈现西高东低的空间分布特征,且主要发生在雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河等河谷地带,土壤侵蚀风险较高,这与张鹏等^[5]、Wang 等^[8]的研究结果一致。Wang 等^[8]估算的 2001—2015 年“一江两河”地区的平均土壤侵蚀模数为 29.1 t/(hm²·a),轻度侵蚀以上水土流失面积比例 63.62%。本研究 1995—2020 年平均土壤侵蚀模数为 30.35 t/(hm²·a),轻度侵蚀以上水土

流失面积比例 62.91%,与 Wang 等^[8]的研究结果较为接近。对其子区域而言,方广玲等^[9]估算的拉萨河流域 2010 年土壤侵蚀模数为 30.76 t/(hm²·a),且以中度侵蚀为主。本研究针对拉萨河 2005 和 2015 年估算的土壤侵蚀模数分别为 25.80 和 23.86 t/(hm²·a),且以微度侵蚀为主。本研究结果略低于上述结果,其原因有可能是研究的年份不同和土壤侵蚀因子计算方法及数据源不同。由于高寒的特殊自然环境,青藏高原的气象、水文、土壤侵蚀等监测资料较为稀缺,因此本研究未对 RUSLE 模型估算结果进行验证,在后续的研究中还需对土壤侵蚀模型模拟结果进行必要的精度验证。与此同时,采用不同的土壤侵蚀模型和不同的数据源,对土壤侵蚀强度估算结果影响较大。因此有必要针对数据源精度、模型估算及结果校验等方面进行系统研究,为开发适用于青藏高原的土壤侵蚀预测模型提供技术支撑。

总体而言,“一江两河”地区水土流失面积呈降低趋势,但其侵蚀模数在 26 a 间却表现出先增加后减小的趋势。土壤侵蚀面积和侵蚀模数表现出降低趋势的原因可能是由于青藏高原地区实施了一系列生态环境保护工程,例如保护湿地、坡改梯、植树造林、引水灌溉、生态移民等,逐步恢复了生态系统的结构与功能,提高生态系统的稳定性,降低了土壤侵蚀模数和土壤侵蚀面积^[35-36]。其中 1995—2005 年土壤侵蚀模数表现出增加的趋势,这可能是 1995—2005 年人类活动强度增加所致。有研究表明,1995—2005 年,该地区灯光指数增加迅速,而灯光指数能够在一定程度上反映人类活动的强弱。人类活动的强度快速增加可能是导致这一时期土壤侵蚀模数增加的原因^[7]。

4 结论

(1) “一江两河”地区土壤侵蚀强度呈西高东低的趋势,整体以微度和轻度侵蚀为主,但是研究区西部以强烈及以上侵蚀为主。

(2) 1995—2020 年,“一江两河”地区土壤侵蚀模数呈先增大后降低的趋势。1995—2005 年土壤侵蚀变化最剧烈,2005—2020 年土壤侵蚀呈稳步降低趋势。

(3) “一江两河”地区水土流失面积在 26 a 间显著降低,土壤侵蚀状况得到明显改善。拉萨河地区土壤侵蚀状况整体优于年楚河地区,雅鲁藏布江和年楚河河谷区土壤侵蚀状况改善最为显著;谢通门县、南木林县、白朗县和江孜县等日喀则市所辖县区的土壤侵蚀风险较高,土壤侵蚀防治亟需加强。

参考文献 (References)

- [1] 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.
Wang Zhanli. Analyses of affecting factors of soil erosion and its harms in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 32-36.
- [2] 孙承恩. 世界的土壤侵蚀与水土保持[J]. 中国水土保持, 1982(5): 29-33.
Sun Cheng'en. Soil erosion and soil and water conservation in the world [J]. Soil and Water Conservation in China, 1982(5): 29-33.
- [3] 欧阳琰, 沈渭寿, 杨凯, 等. 近 20 a 雅鲁藏布江流域冻融侵蚀演变趋势[J]. 山地学报, 2014, 32(4): 417-422.
Ouyang Yan, Shen Weishou, Yang Kai, et al. The trend of freeze-thaw erosion in Yarlung Zangbo River Basin in nearly twenty years [J]. Mountain Research, 2014, 32(4): 417-422.
- [4] 王作堂. 西藏“一江两河”地区生态环境地质问题与防治对策[J]. 四川地质学报, 2005, 25(1): 16-18.
Wang Zuotang. Ecologic and environmental geological problems and control countermeasures in Yarlung Zangbo-Nyang Qu-Lhasa-Rivers Region, Xizang [J]. Acta Geologica Sichuan, 2005, 25(1): 16-18.
- [5] 张鹏, 格桑卓玛, 范建容, 等. 西藏“一江两河”地区土壤侵蚀现状及分布特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 49-53.
Zhang Peng, Gesangzhuoma, Fan Jianrong, et al. Soil erosion status and distribution characteristics in the “One River and Two Streams” Region in Tibet [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 49-53.
- [6] 嘎玛石达. 西藏“一江两河”地区水土流失治理探讨[J]. 西藏科技, 2021(10): 9-11.
Gemashida. Discussion on soil erosion control in “one river and two rivers” area of Tibet [J]. Xizang Science and Technology, 2021(10): 9-11.
- [7] 赵忠旭, 张燕杰, 潘影, 等. 夜间灯光数据支持下西藏人类活动强度变化对生态系统调节服务的影响[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(7): 1544-1554.
Zhao Zhongxu, Zhang Yanjie, Pan Ying, et al. Changes in human activity intensity and influence on ecosystem regulating services: A study of Tibet based on night light data [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(7): 1544-1554.
- [8] Wang Li, Zhang Fan, Fu Suhua, et al. Assessment of soil erosion risk and its response to climate change in the Mid-Yarlung Tsangpo River region [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 607-621.
- [9] 方广玲, 香宝, 赵卫, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 6-12.
Fang Guangling, Xiang Bao, Zhao Wei, et al. Study on soil erosion in Lasa River Basin based on GIS and RUSLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 6-12.
- [10] 陶娟平, 王宇坤, 刘峰贵, 等. 西藏一江两河地区耕地垦殖强度影响因子及其临界值确定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 239-246.
Tao Juanping, Wang Yukun, Liu Fenggui, et al. Identification and determination of its critical values for influencing factors of cultivated land reclamation strength in region of Brahmaputra River and its two tributaries in Tibet [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 239-246.
- [11] 杨志刚, 牛晓俊, 张伟华, 等. 西藏一江两河地区植被变化及其与气候因子的相关性分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(7): 141-146.
Yang Zhigang, Niu Xiaojun, Zhang Weihua, et al. Vegetation change and its correlation with climatic factors in Yarlung Zangbo River, Nyangqu River and Lhasa River Region of Tibet [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(7): 141-146.
- [12] 刘玉洁, 代粮, 张婕, 等. 资源承载力监测: 以西藏“一江两河”地区为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1699-1713.
Liu Yujie, Dai Liang, Zhang Jie, et al. Research on monitoring resource carrying capacity: Taking Three-Rivers Region in Tibet as an example [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(7): 1699-1713.
- [13] 李彩瑛, 阎建忠, 花晓波, 等. 青藏高原“一江两河”地区农牧民家庭生计脆弱性评估[J]. 山地学报, 2018, 36(6): 930-941.
Li Caiying, Yan Jianzhong, Hua Xiaobo, et al. Household-level livelihood vulnerability assessment in the YNL River region of the Tibetan Plateau, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(6): 930-941.
- [14] Li Jingjing, Peng Shouzhong, Li Zhi. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 260-270.
- [15] Ma Bo, Wang Shanshan, Mupenzi C, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes in the Upper White Nile River [J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3648.
- [16] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [17] Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 623-642.
- [18] 温婷婷, 郭英香, 董少睿, 等. 1979—2017 年 CRU, ERA5, CMFD 格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. 干旱

- 区研究, 2022, 39(3):684-697.
- Wen Tingting, Guo Yingxiang, Dong Shaorui, et al. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017 [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(3):684-697.
- [19] 杨苗苗. 全球土壤可蚀性因子(K)计算与砾石影响分析[D]. 陕西 西安: 西北大学, 2022.
- Yang Miaomiao. Calculation of soil erodibility factor (K) on a global scale and analysis of the effect of rock fragments on soil erodibility factor [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwest University, 2022.
- [20] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1):35-41.
- Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. *Resources Science*, 2003, 25(1):35-41.
- [21] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5):1387-1396.
- [22] Liu Baoyuan, 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.
- [23] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction [J]. *Transactions of the ASAE*, 1974, 17(2):305-309.
- [24] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5):105-110.
- Fu Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5):105-110.
- [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.
- Liu Baoyuan, Bi Xiaogang, Fu Suhua. *Beijing Soil Loss Equation* [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [26] Van der Knijff J M, Jones R, Montanarella L. Soil Erosion Risk: Assessment in Europe [M]. European Soil Bureau, European Commission Brussels, 2000.
- [27] Knijff J, Jones R J A, Montanarella L. Soil Erosion Risk Assessment in Italy [R]. Brussels: European Soil Bureau, 1999.
- [28] Van Leeuwen, Willem J D, Geoff S. Vegetation Dynamics and Soil Erosion Modeling Using Remotely Sensed Data (MODIS) and GIS [C]. 10 th Biennial USDA Forest Service Remote Sensing Applications Conference, Salt Lake City, 2004.
- [29] Teng Hongfen, Liang Zongzheng, Chen Songchao, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635:673-686.
- [30] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 资源科学, 2012, 34(7):1240-1247.
- Chen Long, Xie Gaodi, Zhang Changshun, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion in Lancang River basin [J]. *Resources Science*, 2012, 34(7):1240-1247.
- [31] 胡林. 高寒地区水蚀发育机理及公路边坡水蚀生态防控技术研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2016.
- Hu Lin. Study on development and mechanism of water erosion and ecological water erosion control technology of highway slope in cold region [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2016.
- [32] 孟祥冬, 曾奕, 方怒放. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀速率的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5):25-32.
- Meng Xiangdong, Zeng Yi, Fang Nufang. Effects of topography and land use on soil erosion rate in loess hilly and gully region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5):25-32.
- [33] 郭明明, 王文龙, 康宏亮, 等. 黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22):138-146.
- Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Effect of natural vegetation restoration age on slope soil anti-scourability in gully region of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(22):138-146.
- [34] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5):374-381.
- Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979—2014 [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(5):374-381.
- [35] 安宝晟, 姚檀栋, 郭燕红, 等. 拉萨河流域典型区域保护、修复、治理技术示范体系[J]. 科学通报, 2021, 66(22):2775-2784.
- An Baosheng, Yao Tandong, Guo Yanhong, et al. Protection, restoration, and governance technology demonstration system in the typical regions of the Lhasa River basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(22):2775-2784.
- [36] 张懿锂, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27):2865-2875.
- Zhang Yili, Liu Linshan, Wang Zhaofeng, et al. Spatial and temporal characteristics of land use and cover changes in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27):2865-2875.