

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.042.

兰泽凡, 田小靖, 牛祎凡, 等. 基于 RUSLE 模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 20-29.

Lan Zefan, Tian Xiaojing, Niu Yifan, et al. Evaluation on Soil Erosion Based on RUSLE Model in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 20-29.

基于 RUSLE 模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价

兰泽凡¹, 田小靖¹, 牛祎凡², 赵广举^{1,3,4}, 普琼⁵, 拉巴仓决⁵, 左巴特²

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.水利部 交通运输部 国家能源局 南京水利科学研究院,
南京 210029; 5.西藏自治区水文水资源勘测局, 日喀则水文水资源分局, 西藏 日喀则 857000)

摘要: [目的] 研究雅鲁藏布江流域土壤侵蚀时空变化特征, 并分析气候和植被覆盖变化对土壤侵蚀的影响, 以期为高寒区土壤侵蚀防治、生态系统保护和水土资源开发利用提供理论支撑。 [方法] 以雅鲁藏布江流域为研究区, 采用 RUSLE 模型定量评估了 1980—2017 年流域土壤侵蚀的时空变化特征。 [结果] 1980—2017 年, 雅江流域土壤侵蚀强度整体呈现先减小后增加的趋势, 1980—1999 年年均土壤侵蚀模数波动下降, 2000—2017 年年均土壤侵蚀模数则呈现不显著上升趋势; 流域中上游地区土壤侵蚀变化较为显著, 下游地区侵蚀强度先增加后减小。 年均土壤侵蚀模数与降雨侵蚀力呈显著正相关关系, Pearson 相关系数为 0.92, 而与 NDVI 关系不显著。 不同土地利用类型中, 土壤侵蚀最强烈的是未利用地, 其次是稀疏草地, 由于其面积占比最高, 对流域总侵蚀量的贡献比超过 54%。 [结论] 降雨是影响雅江流域土壤侵蚀强度变化的主要因素, 未来土壤侵蚀防治的重点区域应为流域东部下游降雨量较大的地区, 重点防范极端降雨造成的水土流失。

关键词: 土壤侵蚀; 雅鲁藏布江流域; RUSLE; 时空变化; 气候变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0020-10

Evaluation on Soil Erosion Based on RUSLE Model in the Yarlung Zangbo River Basin

Lan Zefan¹, Tian Xiaojing¹, Niu Yifan², Zhao Guangju^{1,3,4}, Pu Qiong⁵, La Bacangjue⁵, Zuo Bate²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University,
Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute,
National Energy Administration, Ministry of Transport, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China;
5. Shigatse Branch, Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Tibet Autonomous Region, Shigatse, Tibet 85700, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal characteristics of soil erosion in the Yarlung Zangbo River basin were explored, and effects of climate and vegetation cover changes on soil erosion were analyzed, in order to provide theoretical support for soil erosion prevention, ecosystem protection, and development and utilization of water and soil resources in alpine regions. [Methods] Based on the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), the spatial and temporal change of soil erosion in the Yarlung Zangbo River basin from 1980 to 2017 was quantitatively evaluated. [Results] The soil erosion intensity in the the Yarlung Zangbo River basin showed an overall trend of first decreasing and then increasing from 1980 to 2017, the fluctuation

收稿日期: 2023-05-27

修回日期: 2023-06-26

资助项目: 中国科学院西部之光—西部交叉团队重点实验室专项 (xbzg-zdsys-202009) 和中国科学院 A 类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” (XD20040202)

第一作者: 兰泽凡 (1997—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。 E-mail: lyl@nwafu.edu.cn

通信作者: 赵广举 (1980—), 男, 河南驻马店人, 研究员, 主要从事流域水沙过程与水土保持研究。 E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

<http://stbj.paperonce.org>

of the multi-year average soil erosion modulus decreased from 1980 to 1999, while the annual average soil erosion modulus showed no significant increase trend from 2000 to 2017. The upper and middle areas of the basin had significant changes, while the erosion intensity in the lower areas increased first and then decreased. The annual average soil erosion modulus was significantly positively correlated with rainfall erosivity, with a Pearson correlation coefficient of 0.92, but not significantly correlated with NDVI. Among the different land use types, the most intense soil erosion occurred in unused land, followed by sparse grassland, which accounted for more than 54% of the total basin erosion due to its highest area ratio. [Conclusion] Rainfall is the main factor affecting the change of soil erosion intensity in the Yarlung Zangpo River basin, and the key areas for soil erosion prevention and control in the future should be the areas with relatively high rainfall in the lower reaches of eastern part of the basin, and focus on preventing soil erosion caused by extreme rainfall.

Keywords: Yarlung Zangbo River basin; soil erosion; RUSLE; spatial-temporal change; climate change

土壤侵蚀是土地退化与土壤资源减少的重要原因^[1]。土壤侵蚀不仅导致土地退化,降低土地生产力,影响农业生产和粮食安全,而且侵蚀产生的泥沙随径流输移至下游区域,造成一系列次生生态问题,如江河湖库堵塞、水环境恶化、旱涝灾害加剧等,直接影响区域生态文明建设和社会经济可持续发展。土壤侵蚀已经成为各国关注的重要环境问题之一^[2]。因此,开展流域土壤侵蚀评价,揭示气候变化环境下土壤侵蚀特征,可为应对全球气候变化背景下的水土资源开发利用提供科学依据。

青藏高原地域辽阔,不同区域气候、地形、植被、土壤等环境条件差异显著,加之多种侵蚀营力交错作用,土壤侵蚀类型多样,空间分异显著,生态系统脆弱^[3]。除滑坡和泥石流以外,暖湿地区的水蚀、河谷两岸的风蚀、高原边缘山区的重力侵蚀、高寒区的冻融侵蚀及气候变暖引起的冰雪融水侵蚀等多种侵蚀类型均广泛分布。Teng等^[4]采用RUSLE模型评估了青藏高原地区土壤侵蚀的空间分布,发现横断山脉和喜马拉雅山脉南部是土壤侵蚀最为严重的区域,且未来气候变化将加剧冰雪融化,进而导致水土流失更为严重。Jiang等^[5]评估了三江源地区的水土流失状况,结果表明区域暖湿化导致降雨侵蚀力增加,升温引起的冻融侵蚀与过度放牧致使青藏高原生态环境遭受严重破坏,区域内大面积草地退化,水土流失加剧^[6-7]。

雅鲁藏布江地处青藏高原的南缘,是青藏高原地区最大的河流,流域气候寒冷干旱,加之自然灾害频发,生态环境脆弱,土壤侵蚀严重。尽管目前针对雅鲁藏布江流域水力侵蚀空间特征已开展了部分研究,但关于气候变化及植被覆盖对土壤侵蚀变化影响的研究仍十分有限,再者定量评估高寒区水土流失的时空分异特征^[8-11],是深入理解区域侵蚀产沙特征及主要影响因素的基础,也能够为应对气候变化导致的水

土流失及青藏高原生态系统保护提供科学依据。因此,本文以雅鲁藏布江流域为研究区,采用RUSLE模型评估该流域1980—2017年土壤侵蚀时空变化特征,分析气候变化和植被覆盖对土壤侵蚀的影响,以期为该高寒区土壤侵蚀防治、生态系统保护和水土资源开发利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江(以下简称雅江)(图1)发源于西藏西南部喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川,北靠冈底斯山,南接喜马拉雅山,位于 $82^{\circ}00'—97^{\circ}10'E$, $27^{\circ}80'—31^{\circ}02'N$,中国境内干流全长约为2 057 km,流域面积约为24.4万 km^2 ,为我国第5大河,也是世界海拔最高的河流之一^[12]。雅江流域地域辽阔,流域内地形、气候、植被等差异较大,流域由西向东横贯西藏南部,总体呈西高东低、南北高中间低的地形特征,海拔差异极大,处于143~7 261 m。受青藏高原地理位置和地形因素的影响,流域上下游气候差异明显,年平均气温 $4.7\sim 8.3^{\circ}C$,年平均最高和最低气温分别介于 $13.5\sim 16.2^{\circ}C$ 和 $-3.0\sim -1.2^{\circ}C$,温度变化剧烈;流域降水年际变化不大,多年平均降水量300~500 mm,但空间分布差异极显著且年内分配不均,部分地区夏季降水可达全年降水量的80%。流域内土壤主要是山地灌丛草原土和高山草原土,上游植被主要是高寒草原、高寒草甸及高山带植被等,中游主要为灌丛草甸,下游则主要以针叶林、阔叶林和次生植被为主^[13]。

1.2 数据来源与处理

雅江流域的降雨数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)发布的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”。本研究总计选取雅江流域及其周边邻近的27个气象站点,以气象站点1980—2017

年的逐日降雨数据计算降雨侵蚀力,并使用反距离权重法插值获得流域面降雨侵蚀力。土壤属性数据采用国家地球系统科学数据中心(<http://auth.geodata.cn/>)发布的中国土壤数据集。DEM 来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 90 m。土地利用数据来源使用中国科学院资源环境科学与数据中心,该数据基于 Landsat 卫星遥感影像,通过监督分类解译,数据结果可靠。土地利用数据包括 1990 年、2000 年和 2015 年 3 期,空间分辨率为 30 m。植被覆盖指数(NDVI)数据基于 GEE 平台,通过 1987—2017 年 Landsat5/7 的遥感影像使用最大合成法计算得到,1981—1986 年 NDVI 数据采用 GIMMS 数据产品,空间分辨率为 8 km,为保证数据空间分辨率的一致性,将其进行重采样至 100 m。

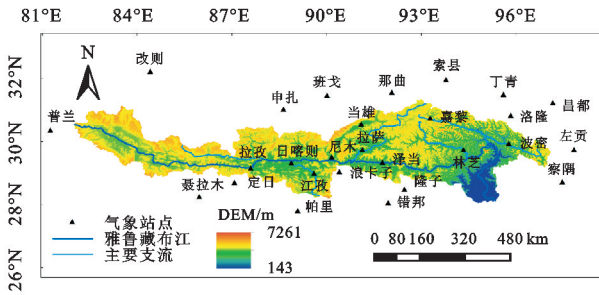


图 1 雅江流域地理位置图

Fig. 1 Geographical location of the Yarlung Zangbo River basin

2 研究方法

修正土壤流失方程(RUSLE)在国内外土壤侵蚀研究等方面应用广泛,不仅能够为不同区域水土流失评价提供有效的技术方法,而且能定量分析流域水土流失分布特征及影响因素,在不同的生态环境下开展土壤侵蚀特征评价^[14]。因此本研究采用 RUSLE 估算雅江流域的土壤侵蚀量:

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数,单位为 $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子,单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子,单位为 $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖与作物管理因子; P 为水土保持措施因子,其中 L, S, C, P 因子无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子。降雨侵蚀力反映了降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,是导致水土流失最重要的外部驱动力。根据雅江流域及其周边共 27 个气象站的日降雨资料为基础,采用章文波等^[15]提出的基于日降雨量资料的估算模型计算降雨侵蚀力:

$$R = \sum_{n=1}^{24} R_{\text{半月}} \quad (2)$$

$$R_{\text{半月}} = \alpha \sum_{i=1}^k (P_i)^\beta \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

$$\beta = 0.8363 \frac{18.177}{p_{d12}} + \frac{24.455}{p_{y12}} \quad (5)$$

式中: n 表示一年中第 n 个半月(此公式将一年划分为 24 个半月,以每月的前 15 d 为一个半月,该月内剩余天数为另一个半月); $R_{\text{半月}}$ 为半月降雨侵蚀力,单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; k 表示半月内的天数; P_i 表示半月内第 i 天的侵蚀性降雨量(规定日降雨量 ≥ 12 mm 的为侵蚀性降雨); α, β 为回归系数; P_{d12} 表示日降雨量 ≥ 12 mm 的日平均降雨量; P_{y12} 表示日降雨量 ≥ 12 mm 的年平均降雨量。

(2) 土壤可蚀性因子。土壤可蚀性是反映土壤对降雨和径流剥蚀、搬运敏感程度的一个重要指标,是影响土壤流失的重要内在因素。 K 值大小主要与土壤质地及有机质含量有关,本研究采用 Sharply 等^[16]在 EPIC 模型中提出的估算方法计算 K 因子:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right. \\ \left. \left(\frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \right. \\ \left. \left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right] \right\} \quad (6)$$

式中: S_a, S_i, C_i 分别为土壤的砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、黏粒(<0.002 mm)的含量百分比(%); S_n 为常数, $S_n = 1 - S_a/100$; C 为土壤有机碳含量(%)。

(3) 坡度和坡长因子。坡长和坡度因子是 RUSLE 模型估算土壤侵蚀量的重要地形参数,本研究采用刘宝元等^[17]在 CSLE 模型中改进的坡长因子计算公式:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 - 0.5 & 5 \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (8)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为从流域 DEM 中提取的坡长; m 为坡长指数; S 为坡度因子; θ 为坡度($^\circ$)。

(4) 植被覆盖与作物管理因子。植被覆盖与作

物管理因子是土壤侵蚀的重要抑制因子,与植被覆盖度密切相关。本研究采用 Borrelli^[18]的方法计算 C 因子,结合土地利用类型和 NDVI 数据,并根据中国实际土地覆盖类型进行调整,以得到更加精准的 C 因子分布^[19]。经过对比发现该流域土地利用变化较小,在计算 C 因子时,1980—1990 年土地利用均采用 1990 年土地利用数据,1991—2000 年采用 2000 年土地利用数据,2001—2017 年则采用 2015 年土地利用数据。

耕地区域 C 因子根据经验赋值,非耕地区域则结合已有文献中各种植被覆盖类型的经验赋值,利用土地利用数据和 NDVI 数据进行计算:

$$C_{\text{NonArable}} = \min(C_{\text{NA}}) + \text{range}(C_{\text{NA}}) \times (1 - F_{\text{cover}})$$

(10)

式中: $C_{\text{NonArable}}$ 是非耕地区域的 C 因子; $\min(C_{\text{NA}})$ 是 C_{NA} 取值范围的最小值; $\text{range}(C_{\text{NA}})$ 是 C_{NA} 取值范围最大值与最小值的差; F_{cover} 是植被覆盖度,使用像元二分法计算:

$$F_{\text{cover}} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}$$

(11)

式中:NDVI 为研究区的归一化植被指数; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为研究区裸土的归一化植被指数; NDVI_{max} 是研究区归一化植被指数的最大值^[20]。

(5) 水土保持措施因子。水土保持措施是防治土壤流失的有效方式,而 P 因子能够反映水土保持措施对土壤侵蚀的影响,其值一般在 0~1 之间。无任何水土保持措施的土地利用类型取值为 1,几乎不发生土壤侵蚀的土地利用类型取值为 0。结合雅江流域土地利用状况及前人研究,确定了雅江流域不同土地

利用条件下的 P 值,其中水田、旱地及其他林地分别为 0.01,0.4,0.7,其余土地利用类型均为 1。

3 结果与分析

3.1 雅江流域降雨侵蚀力时空变化特征

雅江流域 1980—2017 年均降雨侵蚀力为 667.30 MJ·mm/(hm²·h·a),随年均降雨量起伏变化,波动范围处于 400~1 000 MJ·mm/(hm²·h·a)之间,总体呈波动上升趋势,上升速率为每 10 a 上升 9.92 MJ·mm/(hm²·h·a)。不同时段变化差异较大(图 2),1980—1992 年降雨侵蚀力波动较大,最高值在 1985 年为 937.3 MJ·mm/(hm²·h·a),最低值在 1992 年为 432.3 MJ·mm/(hm²·h·a),1993—1998 年降雨侵蚀力明显升高,1998 年降雨侵蚀力高达 947.8 MJ·mm/(hm²·h·a),2001—2009 年呈波动下降趋势,2009—2017 年降雨侵蚀力波动上升,在 2012 年、2014 年、2016 年出现 3 个递减的峰值。38 年间,雅江流域最大年降雨侵蚀力和最大年降雨量均出现在 1998 年,分别为 947.8 MJ·mm/(hm²·h·a),526.39 mm,最小值则出现在 2009 年,分别是 424.7 MJ·mm/(hm²·h·a),352.4 mm,年降雨侵蚀力与年降雨量变化趋势基本一致。Gu 等^[21]评估了青藏高原降雨侵蚀力的时空分布格局,研究表明,1980—2015 年青藏高原降雨侵蚀力呈上升趋势,降雨侵蚀力增加主要发生在青藏高原南部河谷、雅鲁藏布江流域和横断山区。影响降雨侵蚀力的主要因素是降雨量和降雨强度,本研究中流域降雨量与降雨侵蚀力有较强的相关性,这与前人的研究结果一致^[21]。

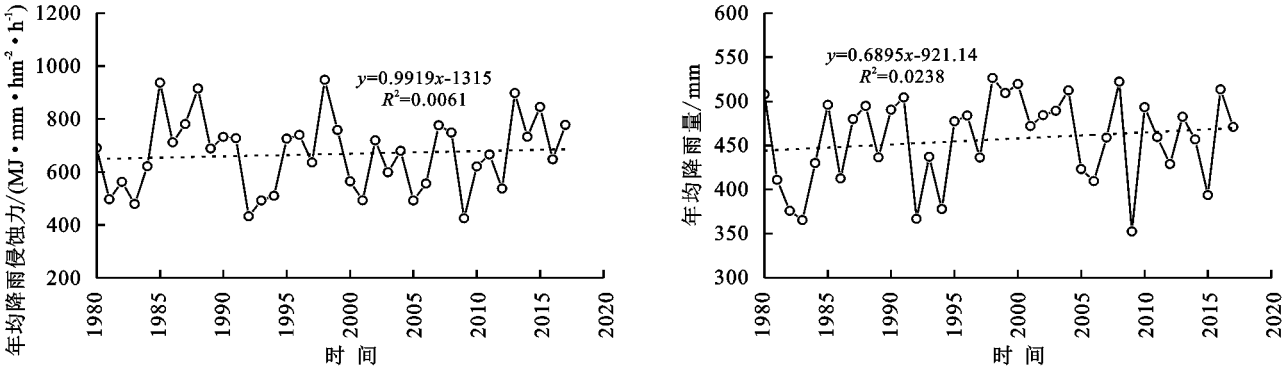


图 2 雅江流域 1980—2017 年降雨侵蚀力和年降雨量变化

Fig. 2 Annual variation of rainfall erosivity and rainfall amounts from 1980 to 2017

从空间尺度来看,雅江流域降雨侵蚀力的空间差异十分显著(图 3),流域年降雨侵蚀力呈现东部高西部低、由东向西逐渐递减的特点。流域西部雅江源头及中部地区年均降雨侵蚀力较小,雅江源头处年均降

雨侵蚀力低至 200 MJ·mm/(hm²·h·a)左右,其中普兰站的年均降雨侵蚀力仅为 233.9 MJ·mm/(hm²·h·a);流域东部雅江下游地区则具有明显高值,年均降雨侵蚀力接近 2000 MJ·mm/(hm²·h·a),

其中波密站年均降雨侵蚀力为 $1\ 805.9\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 是普兰站的 7.7 倍。

流域降雨量分布和降雨侵蚀力空间分布规律大致相同, 西部源头地区年降雨量仅在 200 mm 左右, 中游日喀则、拉萨等地年降雨量增加至 400 mm 左右, 下游波密、林芝以南等地则在 700 mm 左右, 降雨

量丰沛, 降雨侵蚀力也较大。这主要是由于流域东部地区受印度洋西南季风影响, 水汽充沛, 降水量大, 降雨侵蚀力较强; 而西部地区深处内陆, 受喜马拉雅山、念青唐古拉山东段阻隔, 季风的影响较小, 水汽到达有限, 再加上高海拔和低温影响, 降水稀少, 降雨侵蚀力较弱^[11,22-23]。

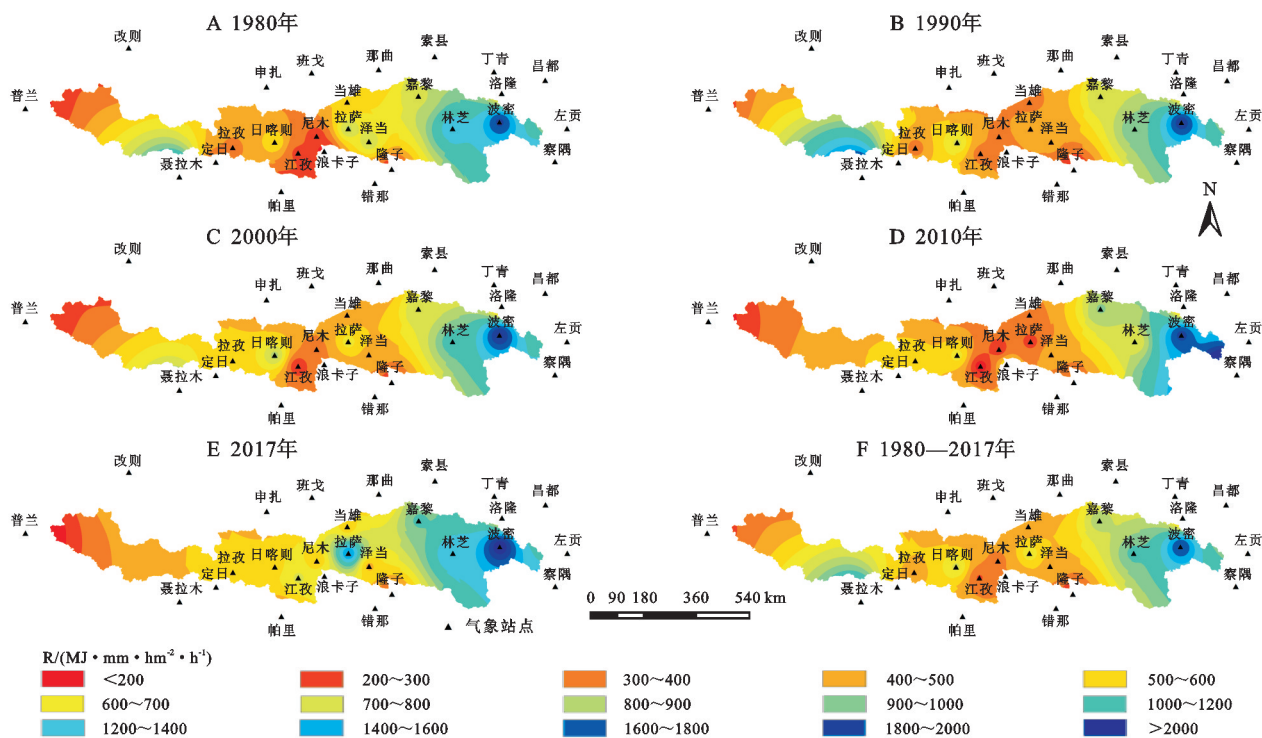


图 3 雅江流域 1980—2017 年均降雨侵蚀力空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of rainfall erosivity in the Yarlung Zangbo River basin from 1980 to 2017

3.2 雅江流域植被覆盖度时空变化特征

植被是土壤侵蚀动态变化的主要影响因素之一。雅江流域 1981—2017 年均 NDVI 值和植被覆盖度总体呈上升趋势, 这与其他研究^[24]结果基本一致, 表明雅鲁藏布江流域植被覆盖状况逐渐改善。同时, 流域植被覆盖度的变化大致可以按 2000 年前后分为两个阶段(图 4)。2000 年之前年均植被覆盖度呈较为显著的波动上升趋势, 而 2000 年之后的年均植被覆盖度则具有不显著下降趋势, 且波动更加明显。

针对 NDVI 空间变化分布, 将雅江流域 NDVI 划分为 5 个等级(表 1), 低植被覆盖($0 \sim 0.2$], 中低植被覆盖($0.2 \sim 0.4$], 中等植被覆盖($0.4 \sim 0.6$], 中高植被覆盖($0.6 \sim 0.8$] 和高植被覆盖($0.8 \sim 1$)^[25]。整体上看, 雅江流域 NDVI 值呈现从上游到中游再到下游逐渐增大的空间分布特征(图 5), 这与左德鹏等^[25]和 Li 等^[26]研究结果相一致, 上、中、下游 NDVI 均值分别为 0.27, 0.38, 0.57, 流域上中游地区土地覆被类型主要为永久性冰川积雪、草地、山地灌丛草原等, 中

低植被覆盖和中等植被覆盖分布广泛, 占流域总面积的 80% 左右。下游地区则主要是高山植被、灌丛和针叶林等, NDVI 值相对较高, 尤其是林芝东南部地区。全流域植被状况呈现好转趋势, 低植被覆盖、中低植被覆盖所占面积和比例逐渐减小, 中等、中高和高植被覆盖所占面积及比例则逐渐增加, NDVI 均值变化较明显的区域主要分布在中游及下游地区, 占流域总面积的 7.19%; 流域上游 NDVI 均值变化趋势中增加比例占 49.72%, 中游和下游 NDVI 变化趋势增加比例分别占 41.09% 和 53.78%。雅江流域植被分布与地形和海拔具有一定的相关关系, 且具有很大的空间差异性^[27]。上游大部分地区位于雪线以上或山谷边缘, 不少地区长年覆盖积雪, 海拔高, 植被生长稀疏, 故 NDVI 多为低值区; 中游地区多分布草原草甸植被, 而下游地区海拔较低, 气温较高, 降水丰沛, 植被生长条件较好, NDVI 值较高^[28-29]。

3.3 雅江流域土壤侵蚀时空变化特征

结合不同时期土地利用分布等数据分别计算雅

江流域逐年土壤侵蚀模数(图 6)。结果表明,雅江流域土壤侵蚀强度整体呈现先减小后增加的趋势,1980—1999 年均土壤侵蚀模数波动下降,在 1985 年和 1998 年出现两个高值,分别为 984.35 t/(km² · a)和 887.28 t/(km² · a),最低值出现在 1992 年,为 410.30 t/(km² · a);2000—2017 年均土壤侵蚀模数则呈

现不明显上升趋势,从 2000 年的 551.27 t/(km² · a)增加至 2017 年的 708.33 t/(km² · a),增加了 28.5%,其中 2013 年出现递增的峰值,为 893.12 t/(km² · a)。流域土壤侵蚀强度变化趋势与年均降雨侵蚀力的变化趋势具有明显的一致性,与植被覆盖度变化趋势相反,研究结果与 Teng 等^[4]的研究较为相似。

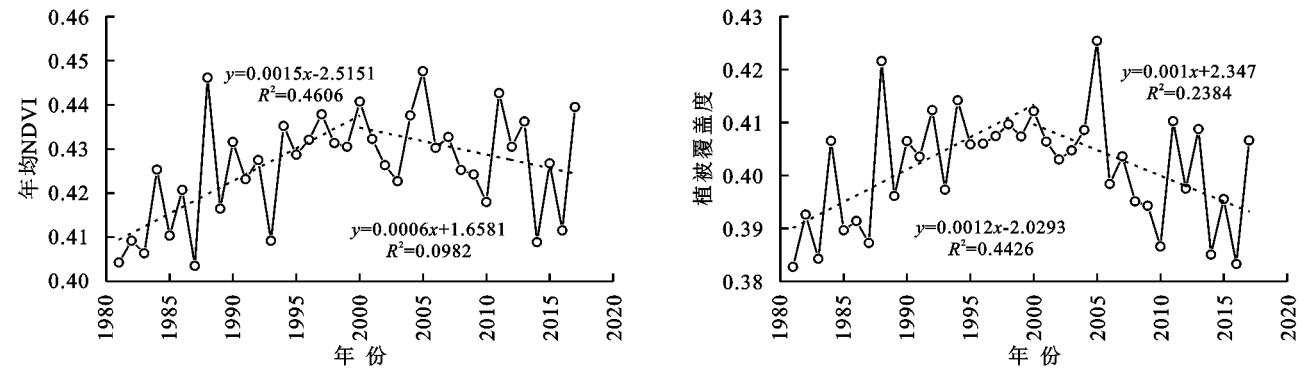


图 4 雅江流域 1981—2017 年 NDVI 和植被覆盖度变化

Fig. 4 Variation of NDVI values and FVC in the Yarlung Zangbo River basin from 1981 to 2017

表 1 雅江流域植被覆盖状况分级

Table 1 Classification of NDVI in the Yarlung Zangbo River basin

等级	NDVI	1981 年		1990 年		2000 年		2017 年	
		面积/10 ⁴ km ²	比例/%	面积/10 ⁴ km ²	比例/%	面积/10 ⁴ km ²	比例/%	面积/10 ⁴ km ²	比例/%
I	0~0.2	3.46	14.09	1.85	7.55	1.26	5.12	1.08	4.40
II	0.2~0.4	12.98	52.93	12.80	52.17	11.50	46.90	10.89	44.40
III	0.4~0.6	6.46	26.34	7.12	29.03	8.33	33.96	7.86	32.04
IV	0.6~0.8	1.59	6.49	2.70	11.02	2.82	11.52	3.58	14.60
V	0.8~1	0.04	0.15	0.06	0.23	0.61	2.50	1.12	4.56

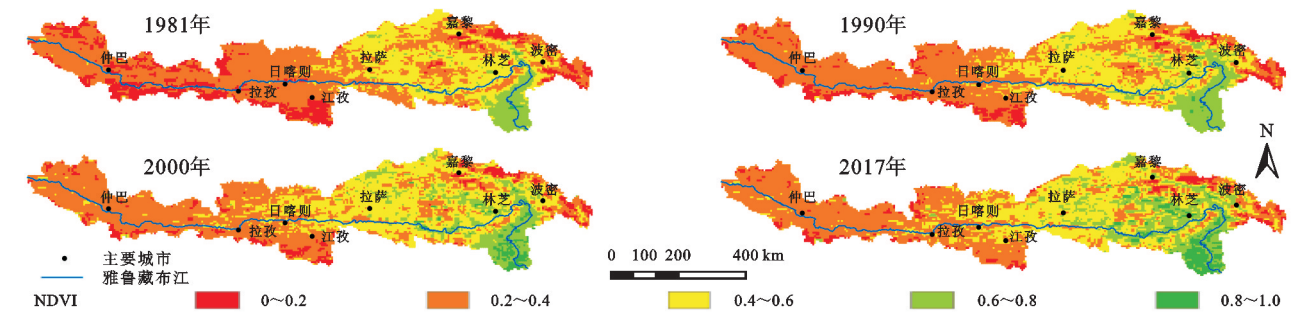


图 5 NDVI 值及其空间分布变化

Fig. 5 NDVI values and its spatial change distribution in the Yarlung Zangbo River basin from 1981 to 2017

以雅江流域 1990 年、2000 年和 2015 年土壤侵蚀状况为例进行分析(图 7),其年均土壤侵蚀模数分别为 639.90,551.27,591.83 t/(km² · a),由于流域整体侵蚀强度较低,所以将土壤侵蚀强度按照侵蚀模数划分为 5 个等级(表 2)。侵蚀模数<100 t/(km² · a)(I级)的区域所占比例最大,1990 年、2000 年和 2015 年分别为 68.14%,68.48%,68.11%;其次是>2 000 t/(km² · a)(V 级)区域,且 I 和 V 两级侵蚀区域所占比例之和均在 78%以上。具体而言,侵蚀模数在 1 000~2 000 t/(km² · a)之间(IV 级)的区域所占比

例呈先增加后减少的趋势,从 1990 年的 9.00%增加至 2000 年的 9.86%,随后减少至 2015 年的 8.85%;而>2 000 t/(km² · a)(V 级)的区域所占比例在 1990—2000 年降低了 1.43%,在 2000—2015 年则增加了 1.26%。从空间分布上看,侵蚀模数>2000 t/(km² · a)的区域主要分布在雅江中上游河谷、年楚河上游、雅江中下游林芝以及拉萨河流域,表明这些区域土壤侵蚀较为严重,与已有研究结果相一致^[10,30];谢通门县、南木林县、嘉黎县、墨竹工卡县、林周县、察隅县等地人为活动频繁,植被覆盖地区盖度

低,年均降雨量较大,加之高山冰川融水形成大量的地表径流,故侵蚀相对较强烈^[31]。

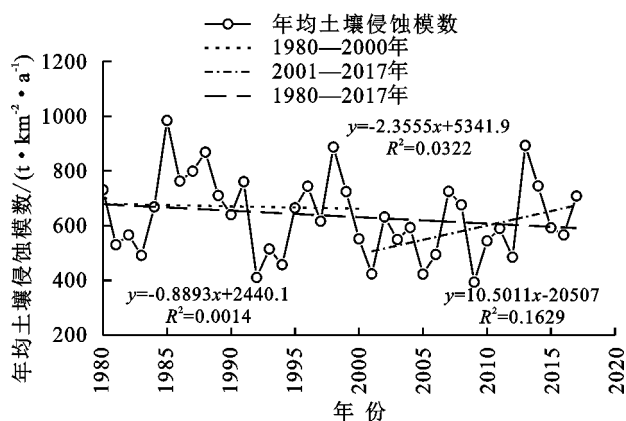


图 6 雅江流域 1980—2017 年均土壤侵蚀模数变化

Fig. 6 Variation of soil erosion modulus in the Yarlung Zangbo River basin from 1980 to 2017

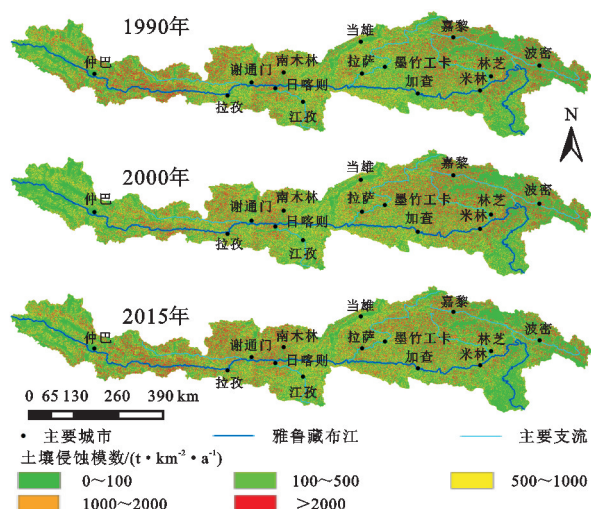


图 7 雅江流域 1990 年、2000 年和 2015 年土壤侵蚀状况

Fig. 7 Soil erosion intensity in the Yarlung Zangbo River basin in 1990, 2000 and 2015

表 2 雅江流域土壤侵蚀强度分级

Table 2 Classification of soil erosion intensity in the Yarlung Zangbo River basin

等级	侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	1990 年		2000 年		2015 年	
		面积/ $10^4 km^2$	比例/%	面积/ $10^4 km^2$	比例/%	面积/ $10^4 km^2$	比例/%
I	<100	16.65	68.14	16.74	68.48	16.65	68.11
II	100~500	1.36	5.56	1.35	5.54	1.36	5.57
III	500~1000	1.22	5.00	1.28	5.25	1.30	5.34
IV	1000~2000	2.20	9.00	2.41	9.86	2.16	8.85
V	>2000	3.01	12.30	2.66	10.87	2.96	12.13

土地利用是人类活动影响土壤侵蚀最直接的方式,不同土地利用类型发生土壤侵蚀的方式不同,对于侵蚀的影响也有显著差异^[32]。雅江流域主要土地利用类型可分为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用土地 6 类。其中草地面积最大,占比达到 60.60% 以上,其次是未利用土地占比在 18.91% 左右,草地、未利用土地和林地 3 种土地类型总占比在 94.10% 以上。对比 1990 年、2000 年、2015 年土地利用数据发现,雅江流域土地利用类型并未发生明显变化,但各类型本身的土壤侵蚀状况呈现出不同的变化趋势(表 3)。

不同土地利用类型中,土壤侵蚀最强烈的是未利用地,其次是草地;对土壤侵蚀贡献最多的则是草地,贡献比例超过 54%。流域内草地面积较大,产生土壤侵蚀量也较多,已有研究结果^[8]同样表明草地是雅江流域土壤侵蚀发生的主要土地利用类型。1990—2000 年,未利用地的年均土壤侵蚀模数由 1 129.7 $t/(km^2 \cdot a)$ 降低至 879.4 $t/(km^2 \cdot a)$,侵蚀量减少了 1 159.42 万 t ,减幅最大为 22.16%;草地的年均土壤侵蚀模数由 587.1 $t/(km^2 \cdot a)$ 减至 494.8 $t/(km^2 \cdot a)$,侵蚀量减少了 1 375.61 万 t ,减幅为 15.77%,未利用地和草地土壤侵蚀状况的好转是流域平均侵蚀模数减小的主

导因素。2000—2015 年,未利用土地的年均土壤侵蚀模数由 879.4 $t/(km^2 \cdot a)$ 增加至 958.9 $t/(km^2 \cdot a)$,侵蚀量增加了 371.19 万 t ,增幅为 9.11%;草地的年均土壤侵蚀模数由 494.8 $t/(km^2 \cdot a)$ 增加至 583.4 $t/(km^2 \cdot a)$,侵蚀量增加了 1 309.02 万 t ,增幅为 17.91%,未利用地和草地土壤侵蚀的加剧导致流域平均侵蚀模数略有上升。林地土壤侵蚀模数的变化与未利用地和草地相反,呈现先增加后减小的趋势;耕地的年均土壤侵蚀模数不断下降,但趋势不显著。

整体而言,雅江流域土壤侵蚀模数呈现先减后增的趋势,主要受降雨侵蚀力和植被覆盖度变化影响^[33]。随着降雨侵蚀力的增加,土壤侵蚀模数也在增加,二者具有显著线性关系(图 8),Pearson 相关系数为 0.92,表明降雨侵蚀力与土壤侵蚀模数显著正相关。相比之下,整个流域 NDVI 值与土壤侵蚀模数不具有明显相关性,但流域部分地区如米林、波密等地植被状况较好,能够抵消一部分降雨侵蚀力造成的侵蚀强度增大。从典型年特征来看,2000 年流域年均降雨侵蚀力低于 1990 年和 2015 年,且植被覆盖度高于 1990 年和 2015 年,所以 2000 年的侵蚀强度最低;空间分布上,流域东部下游部分地区年均降雨侵

蚀力较大,且未利用地分布较多,故土壤侵蚀强度较大。因此,雅江流域影响土壤侵蚀强度变化的最主要因子是降雨,与 Wang 等^[33]的降雨是造成土壤侵蚀主导因素的研究结果一致,未来土壤侵蚀防治的重点区域应为未利用地和草地,尤其是流域东部降雨量较大的区域,重点防范大雨暴雨造成的水土流失。

表 3 雅江流域不同土地利用类型的土壤侵蚀强度

Table 3 Soil erosion intensity of different land use types in the Yarlung Zangbo River basin									
土地利用类型	土壤侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)			侵蚀量/10 ⁴ t					
	1990 年	2000 年	2015 年	1990 年	比例/%	2000 年	比例/%	2015 年	比例/%
耕地	220.9	213.9	208.2	74.91	0.48	72.38	0.54	69.52	0.48
林地	460.1	560.6	361.6	1644.13	10.49	2010.00	14.88	1295.81	8.96
草地	587.1	494.8	583.4	8724.43	55.65	7348.82	54.42	8657.84	59.84
未利用地	1129.7	879.4	958.9	5232.97	33.38	4073.55	30.16	4444.74	30.72

注:在计算土壤侵蚀模数时,认为水体和建设用地不发生侵蚀。

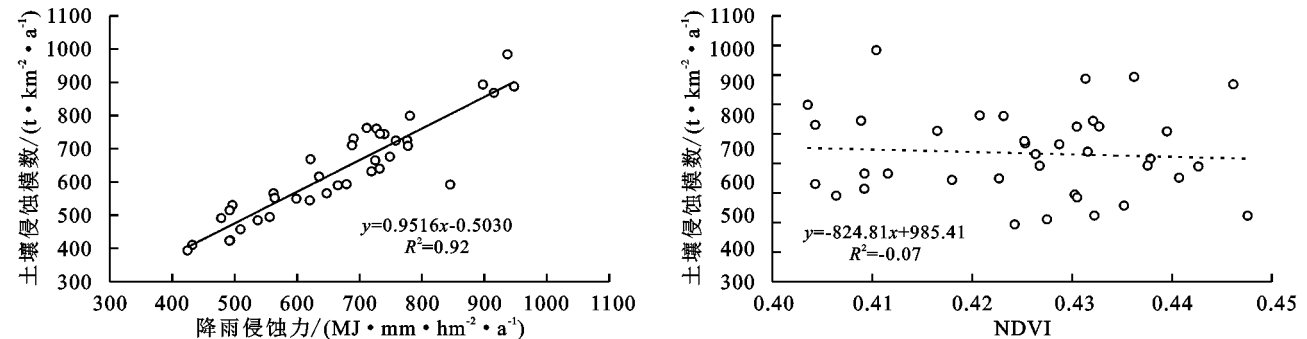


图 8 雅江流域降雨侵蚀力及植被覆盖度与土壤侵蚀模数关系

Fig. 8 The relationship between soil erosion modulus and rainfall erosivity and NDVI in the Yarlung Zangbo River basin

4 结论

本文以雅鲁藏布江流域为研究区,采用 RUSLE 模型定量评估了 1980—2017 年流域土壤侵蚀的时空变化特征,分析了气候和植被覆盖变化对土壤侵蚀的影响,主要结论如下:

- (1) 雅江流域大部分地区年降雨侵蚀力呈波动上升趋势,特别是流域东部地区增加显著;流域内降雨侵蚀力的空间差异十分显著,呈现东部高西部低、由东向西逐渐递减的特点。
- (2) 雅江流域 1981—2017 年均 NDVI 值和植被覆盖度总体呈上升趋势,表明流域植被覆盖状况逐渐改善。以 2000 年为界,NDVI 于 1981—2000 年呈波动上升,2001—2017 年呈不显著下降趋势。
- (3) 雅江流域土壤侵蚀强度整体呈先减小后增加的趋势,1980—1999 年均土壤侵蚀模数波动下降,2000—2017 年均土壤侵蚀模数则呈现不明显上升趋势;流域整体土壤侵蚀强度呈先减小后增加的趋势,下游部分地区侵蚀强度则呈现相反趋势。
- (4) 雅江流域侵蚀强度<100 t/(km²·a)面积所占比例最大,各年份均在 68%以上;土壤侵蚀最强烈的区域为未利用地,其次是草地,草地的土壤侵蚀

占总侵蚀量的 54%以上。流域土壤侵蚀模数与降雨侵蚀力具有显著正相关关系,而与 NDVI 值相关关系不显著。

因此,雅江流域影响土壤侵蚀强度变化的最主要因子是降雨,未来土壤侵蚀防治的重点区域应为未利用地和草地,尤其是流域东部降雨量较大的区域,重点防范极端降雨造成的水土流失。

参考文献(References):

[1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. Global and Planetary Change, 2003,39(1):111-126.

[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.

Wang Z L. Analyses of affecting factors of soil erosion and its harms in China[J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(4):32-36.

[3] 陈同德,焦菊英,王颢霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.

Chen T D, Jiao J Y, Wang H L, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica,2020,57(3):547-564.

[4] Teng H F, Liang Z Z, Chen S C, 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.
- [5] Jiang C, Li D Q, Gao Y N, et al. Spatiotemporal variability of streamflow and attribution in the Three-Rivers Headwater Region, northwest China [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2016, 7(3): 637-649.
- [6] 林慧龙, 郑舒婷, 王雪璐. 基于 RUSLE 模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价[J]. *草业学报*, 2017, 26(7): 11-22.
- Lin H L, Zhen S T, Wang X L. Soil erosion assessment based on the RUSLE model in the Three-Rivers Headwaters area, Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(7): 11-22.
- [7] 邵全琴, 肖桐, 刘纪远, 等. 三江源区典型高寒草甸土壤侵蚀的 ^{137}Cs 定量分析[J]. *科学通报*, 2011, 56(13): 1019-1025.
- Shao Q Q, Xiao T, Liu J Y, et al. Soil erosion rates and characteristics of typical alpine meadow using ^{137}Cs technique in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(13): 1019-1025.
- [8] 文安邦, 刘淑珍, 范建容, 等. 雅鲁藏布江中游地区土壤侵蚀的 ^{137}Cs 示踪法研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 47-50.
- Wen A B, Liu S Z, Fan J R, et al. Soil erosion rate using ^{137}Cs technique in the middle Yarlung Zangbo [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 47-50.
- [9] 张琳, 何政伟, 陈晓杰, 等. 雅鲁藏布江中游流域水土流失动态变化[J]. *地理空间信息*, 2011, 9(4): 51-53, 190.
- Zhang L, He Z W, Chen X J, et al. Dynamic changes of soil erosion in the middle reaches of Yarlung Zangbo River [J]. *Geospatial Information*, 2011, 9(4): 51-53, 190.
- [10] 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 P, Gesang Z M, Fan J R, 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.
- [11] 刘慧, 李晓英, 肖建华, 等. 1961—2015 年雅鲁藏布江流域风蚀气候侵蚀力变化[J]. *地理科学*, 2019, 39(4): 688-695.
- Liu H, Li X Y, Xiao J H, et al. Variations of wind erosion climatic erosivity in the Yarlung Zangbo River Basin during 1961—2015 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(4): 688-695.
- [12] 张瑞, 徐宗学, 刘晓婉, 等. 1980—2015 年雅鲁藏布江流域土地利用时空演变格局分析[J]. *中国农村水利水电*, 2019(3): 106-111.
- Zhang R, Xu Z X, Liu X W, et al. Spatiotemporal characteristics of land use /cover change for the Yarlung Zangbo River Basin from 1980 to 2015 [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(3): 106-111.
- [13] 李佩君, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于地形梯度的雅鲁藏布江流域土地利用及景观格局分析[J]. *山地学报*, 2022, 40(1): 136-150.
- Li P J, Zuo D P, Xu Z X, et al. Land use /cover and landscape patterns based on terrain in the Yarlung Zangbo River Basin, China [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(1): 136-150.
- [14] 田鹏, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于改进 RUSLE 模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J]. *资源科学*, 2015, 37(4): 832-840.
- Tian P, Zhao G J, Mu X M, et al. A modified RUSLE model to estimate sediment yield in the Huangfuchuan watershed [J]. *Resources Science*, 2015, 37(4): 832-840.
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.
- Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.
- [16] Sharply A N, Williams J R, Jones C A, et al. Erosion productivity impact calculator EPIC: Model documentation [R]. Washington D C: Usda Technical Bulletin 1768, 1990.
- [17] 刘宝元, 谢云, 张科利, 等. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- Liu B Y, Xie Y, Zhang K L, et al. Soil Erosion Prediction Model [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [18] Pasquale B, David A, R Larissa R F, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2013.
- [19] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐, 等. 基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3473-3485.
- Li J L, Sun R H, Xiong M Q, et al. Estimation of soil erosion based on the RUSLE model in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3473-3485.
- [20] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159.
- Li M M, Wu B F, Yan C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing [J]. *Resources Science*, 2004, 26(4):

- 153-159.
- [21] Gu Z J, Feng D T, Duan X W, et al. Spatial and temporal patterns of rainfall erosivity in the Tibetan Plateau[J]. *Water*, 2020,12(1):200.
- [22] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J].*地球科学进展*,2012,27(5):499-509.
- Liu B T, Tao H P, Song C F, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in southwest China from 1960 to 2009[J]. *Advances in Earth Science*,2012,27(5):499-509.
- [23] 聂宁,张万昌,邓财.雅鲁藏布江流域1978—2009年气候时空变化及未来趋势研究[J].*冰川冻土*,2012,34(1):64-71.
- Nie N, Zhang W C, Deng C. Spatial and temporal climate variations from 1978 to 2009 and their trend projection over the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2012,34(1):64-71.
- [24] 李海东,沈渭寿,蔡博峰,等.雅鲁藏布江流域NDVI变化与风沙化土地演变的耦合关系[J].*生态学报*,2013,33(24):7729-7738.
- Li H D, Shen W S, Cai B F, et al. The coupling relationship between variations of NDVI and change of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet[J]. *China Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7729-7738.
- [25] 左德鹏,韩煜娜,徐宗学,等.气候变化对雅鲁藏布江流域植被动态的影响机制[J].*水资源保护*,2022,38(6):1-8.
- Zuo D P, Han Y N, Xu Z X, et al. Impact mechanism of climate change on vegetation dynamics in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Water Resources Protection*,2022,38(6):1-8.
- [26] Li H D, Li Y K, Shen W S, et al. Elevation-Dependent vegetation greening of the Yarlung Zangbo River Basin in the Southern Tibetan Plateau, 1999-2013[J]. *Remote Sensing*, 2015,7(12):16672-16687.
- [27] 韩先明,左德鹏,李佩君,等.雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J].*水利水电科技进展*,2021,41(1):16-23.
- Han X M, Zuo D P, Li P J, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2021,41(1):16-23.
- [28] 付新峰,杨胜天,刘昌明.雅鲁藏布江流域NDVI时空分布及与站点气候因子的关系[J].*水土保持研究*,2006,13(3):229-232.
- Fu X F, Yang S T, Liu C M. Spatial-temporal changes of NDVI and their relations with principal climatic factors in Yarlung Zangbo River Basin's stations[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2006,13(3):229-232.
- [29] 孟庆博,刘艳丽,鞠琴,等.雅鲁藏布江流域近18年来植被变化及其对气候变化的响应[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2021,19(3):539-550.
- Meng Q B, Liu Y L, Ju Q, et al. Vegetation changes and its response to climate change in the Yarlung Zangbo River basin in the past 18 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021,19(3):539-550.
- [30] 张建国,文安邦,柴宗新,等.西藏自治区土壤侵蚀特点及现状[J].*山地学报*,2003,21(Z1):148-152.
- Zhang J G, Wen A B, Chai Z X, et al. Characteristics and status of the soil erosion in Tibet[J]. *Journal of Mountain Science*,2003,21(Z1):148-152.
- [31] 赵健,李蓉.雅鲁藏布江流域土壤侵蚀区域特征初步研究[J].*长江科学院院报*,2008,25(3):42-45.
- Zhao J, Li R. Soil erosion and subarea characteristics in Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*,2008,25(3):42-45.
- [32] 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.
- Chen C L, Zhao G J, Mu X M, et al. Spatial-temporal change of soil erosion in Huangshui Watershed based on RUSLE model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2021,35(4):73-79.
- [33] Wang L, Zhang F, Fu S H, 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*,2017,27(1):607-621.