

集成 RUSLE 模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集 (1981–2018) 研发

黄艳章^{1,4}, 信忠保², 高光耀^{1,4}, 马英^{3,4}, 杨丽虎^{3,4}, 宋献方^{3,4*}

1. 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085;
2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408

摘要: 青藏高原生态脆弱, 对气候变化敏感, 该区域的土壤侵蚀严重威胁泛第三极生态环境安全。面对目前青藏高原土壤侵蚀(水力侵蚀)评估差异较大的问题, 为了反映更加可信的土壤侵蚀空间分布和变化, 作者采用融合中国区域地面气象要素驱动数据集、The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) 和 ERA-Interim 的降雨数据、SoilGrids 土壤数据、90-m DEM 等数据及多种侵蚀因子实现方案(9个R因子×3个K因子×3个LS因子×3个C因子)的集成 RUSLE 模型对青藏高原 1981–2018 年土壤侵蚀进行评估, 通过“RUSLE-IC-SDR”方法与实测产沙量数据进行比较, 形成青藏高原水力侵蚀数据集。该数据集内容包括: (1) 集成模型中位数对应的 1981–2018 年、1981–1998 年、1999–2018 年多年平均的水力侵蚀数据; (2) 1981–2018 年、1981–1998 年、1999–2018 年水力侵蚀变化速率。数据空间分辨率为 100 m。数据集存储为.tif 格式, 由 26 个数据文件组成, 数据量为 12.3 GB (压缩为 6 个文件, 5.38 GB)。

关键词: 土壤侵蚀; 青藏高原; RUSLE 集成模型; 动态变化; 水力侵蚀

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.04.01>

CSTR: <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2025.04.01>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2025.06.05.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2025.06.05.V1>.

1 前言

青藏高原构造变形活跃, 地形及地表物质物理性质复杂, 且对气候变化响应敏感^[1–3]。这些独特的自然条件和剧烈的气候变化使得该地区的土壤侵蚀正在加剧^[3–7], 并形成了大范围、大面积的脆弱地表覆盖层, 成为其生态环境建设面临的巨大挑战。剧烈的土壤侵蚀将会对青藏高原的牧业管理、交通运输以及当地居民的生命财产安全构成巨大威胁。基于

收稿日期: 2025-06-03; 修订日期: 2025-11-25; 出版日期: 2025-12-24

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2019QZKK0403)

*通讯作者: 宋献方, 中国科学院地理科学与资源研究所, songxf@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 黄艳章, 信忠保, 高光耀等. 集成 RUSLE 模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集(1981–2018) 研发[J]. 全球变化数据学报, 2025, 9(4): 371–381. <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.04.01>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2025.04.01>.

[2] 黄艳章, 信忠保, 高光耀等. 集成 RUSLE 模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集(1981–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.06.05.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2025.06.05.V1>.

RUSLE 模型的青藏高原土壤侵蚀研究已获得广泛关注。然而, 由于所使用数据、侵蚀因子计算方法的不同, 不同研究评估的青藏高原水力侵蚀在量级大小、空间分布及动态变化等方面存在显著差异^[6,8-11]。这种评估结果的不一致性, 不仅阻碍了对区域侵蚀状况形成统一、可靠的认识, 也制约了精准水土保持措施的制定和生态环境管理策略的有效实施。因此, 亟需对青藏高原水力侵蚀进行精细、稳健、可靠的评估。

RUSLE 模型能够充分综合地理、气候等不同的实测资料, 而且可以直接利用遥感数据, 具有较好的适宜性, 是目前使用范围最广的土壤侵蚀模型^[12-14]。然而, 尽管基于 RUSLE 模型在青藏高原的土壤侵蚀研究已较为常见, 但以往研究多依赖于单一数据源和算法实现各侵蚀因子, 其结果存在一定的不确定性和局限性。为克服这一不足, 本研究集成多源数据与多算法方案, 构建了包含 243 种土壤侵蚀评估方案 (9 种 R 因子 \times 3 种 K 因子 \times 3 种 LS 因子 \times 3 种 C 因子) 的集成建模框架。通过融合不同数据源与算法实现的优势, 显著提高了土壤侵蚀估算的稳健性与结果可靠性, 有效降低因单一数据或单一方法所带来的偏差。这一集成策略增强了对青藏高原水力侵蚀空间分布与动态变化的精细识别能力, 生成了 1981–2018 年土壤侵蚀数据集。该数据结果为区域侵蚀热点识别、政策制定及未来情景预测提供了更为可靠的科学依据^[15]。

2 数据集元数据简介

《集成 RUSLE 模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集 (1981–2018)》^[16]的名称、作者、地理区域、数据年代、空间分辨率、数据格式、数据量、数据集组成等信息见表 1。

3 数据研发方法

3.1 数据来源与处理

根据 RUSLE 模型的输入因子, 研究需要降雨数据、土壤数据、数字高程 (Digital Elevation Model, DEM) 数据以及植被数据。研究使用的降雨数据包括 3 种, 分别为中国区域地面气象要素驱动数据集 (China Meteorological Forcing Data, CMFD), The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations 数据集 (CHIRPS) 和 ERA-Interim 数据^[18-20], 数据的时间尺度均为日尺度。土壤数据来源于 SoilGrids 数据集^[21], 本研究所使用的土壤数据包括土壤有机碳、基于美国农业部 (United States Department of Agriculture, USAD) 的土壤质地、土壤砂粒、黏粒、粉粒、WRB 分类等。空间分辨率为 90 m 的 DEM 数据来自美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 航天飞机雷达地形观测任务 (SRTM-90 m)^[22]。归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 数据来源于 GIMMS-NDVI-3g 和 MOD13Q1.V6 两个数据源^[23,24]。本研究为延长植被时间可用性, 并保证数据的可比性, 采用时空稳定性分析和统计降尺度技术对两个 NDVI 数据集进行了基于重叠周期 (2000 年 2 月–2015 年 12 月) 的校正^[25]。植被类型数据下载于资源环境科学数据平台的《中国 100 万植被类型空间分布数据》, 来源于《中国植被图集》^[26]。研究将所有数据空间分辨率重采样至 100 m。

表1 《集成 RUSLE 模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集（1981–2018）》元数据简表

条目	描述
数据集名称	集成 RUSLE 模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集（1981–2018）
数据集短名	SoilerosionERUSLE_1981-2018
作者信息	黄艳章, 中国科学院生态环境研究中心, yzhuang_st@rcees.ac.cn 信忠保, 北京林业大学水土保持学院, xinzhongbao@126.com 高光耀, 中国科学院生态环境研究中心, gygao@rcees.ac.cn 马英, 中国科学院地理科学与资源研究所, maying@igsnr.ac.cn 杨丽虎, 中国科学院地理科学与资源研究所, yanglihu@igsnr.ac.cn 宋献方, 中国科学院地理科学与资源研究所, songxf@igsnr.ac.cn
地理区域	青藏高原
数据年代	1981–2018 年
空间分辨率	100 m
数据格式	.tif
数据量	5.38 GB（压缩后）
数据集组成	集成模型中位数对应的 1981–2018 年、1981–1998 年、1999–2018 年多年平均的水力侵蚀数据；1981–2018 年、1981–1998 年、1999–2018 年水力侵蚀变化速率
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2019QZKK0403）
数据计算环境	Python; ArcGIS
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[17]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOS, PubScholar, CKRSC

3.2 技术路线

研究采用在大空间尺度土壤侵蚀评估中应用广泛的 RUSLE 模型，通过耦合多源数据和多种侵蚀因子计算方法，形成由 9 种降雨侵蚀力（ R ）因子、3 种土壤可蚀性（ K ）因子、3 种坡长坡度（ LS ）因子和 3 种土地覆盖与管理（ C ）因子相互组合的 243 种土壤侵蚀评估方案的集成模型。以泥沙连通性（Sediment Connectivity, IC）与泥沙输移比（Sediment Delivery Ratio, SDR）之间的密切关系进一步开展对侵蚀结果的比较，确定基于集成模型的青藏高原土壤侵蚀状况，并以评估结果中值研究青藏高原近 40 年（1981–2018 年）土壤侵蚀动态变化（图 1）。

3.3 RUSLE 集成模型的实现

RUSLE 模型是 Wischmeier 和 Smith 利用美国 30 个州长达 30 年的径流小区资料和人工降雨实验所获得的数据确立的^[27]，计算公式如下：

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中， A 是年土壤侵蚀速率（ $\text{t ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ ）， R 是降雨侵蚀力因子（ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$ ）， K

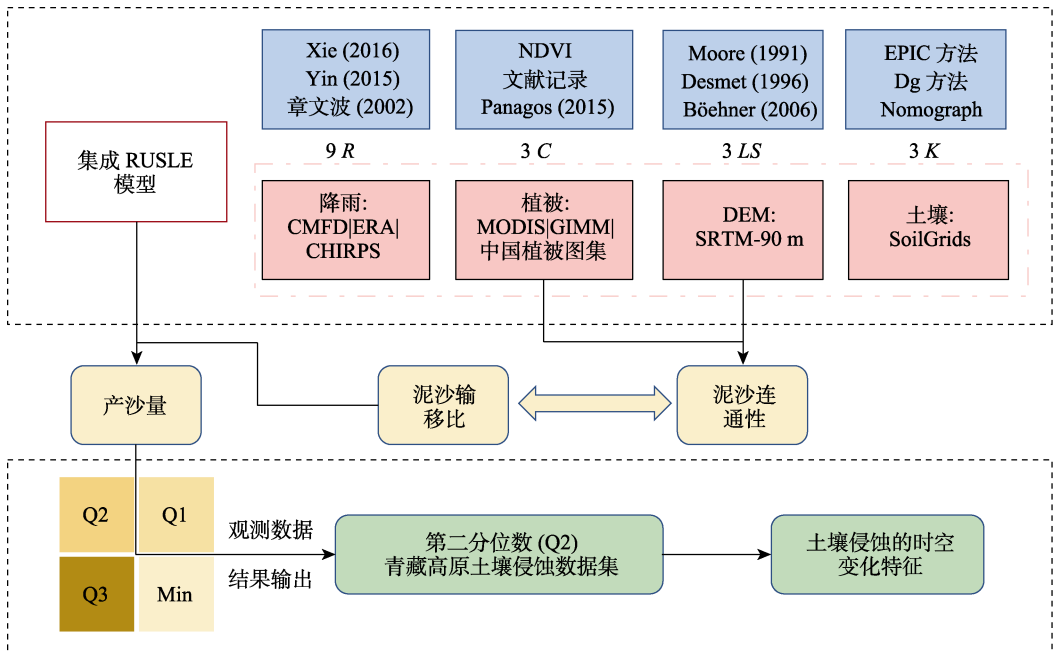


图1 数据集研发技术路线图

是土壤可蚀性因子 ($\text{Mg ha h MJ}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$), LS 是坡长坡度因子, C 是土地覆盖与管理因子, P 是土壤保持或预防措施因子。青藏高原由于恶劣的生存环境, 人为的土地开发和和管理措施相对较少^[28], 因此本研究中将 P 因子忽略 (即 P 设为 1)。

3.3.1 R 因子

R 因子的计算基于 3 个时间分辨率为日的降雨数据集: CMFD、CHIRPS 和 ERA-interim。同时采用章文波等人 (公式 2-4)、Xie 等人 (公式 5) 和 Yin 等人 (公式 6) 3 种 R 因子计算方法^[29-31]。因此共有 9 种 R 因子 (即 3 种降雨数据 \times 3 种 R 因子计算方法) 实现方案。

$$R_j = \alpha \sum_{j=1}^k (P_d)^\beta \tag{2}$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \tag{3}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \tag{4}$$

式中, R_j 为半月的降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$); k 为半月时段内的日数 (d); P_d 为日降雨量 ($>12 \text{ mm}$); P_{d12} 为日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均雨量 (mm); P_{y12} 为日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均雨量 (mm)。

$$R_{day} = 0.2686 \left[1 + 0.5412 \cos \left(\frac{\pi}{6} j - \frac{7\pi}{6} \right) \right] P_d^{1.7265} \tag{5}$$

式中, R_{day} 为日降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$); j 为月份 (1-12); P_d 为日降雨量 (mm)。其中侵蚀和非侵蚀日之间的日降雨量阈值为 9.7 mm ^[31]。

$$R_{month} = 0.077 P_{month} (P_{day})_{month} \tag{6}$$

式中, R_{month} 为月降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), P_{month} 为月降雨量 (mm), $(P_{day})_{month}$ 为该月最大日降雨量 (mm)。其中侵蚀和非侵蚀日之间的日降雨量阈值沿用 $9.7 \text{ mm}^{[31]}$ 。

3.3.2 K 因子

K 因子的计算目前比较常见的有 EPIC (公式 7)、Dg (公式 8–10)、Nomograph 等算法 (公式 11、12)^[27,32,33], 已经得到了很好的应用。根据 Tian 等人的研究及 SoilGrids 土壤数据可用性^[10], 用于计算土壤可蚀性因子的为土壤表层 0–15 cm 的数据。

$$K = 0.1317 \times \left(0.2 + 0.3 \times e^{\left[-0.0256 \times \text{San} \left(-1 - \frac{\text{Sil}}{100} \right) \right]} \right) \times \left(\frac{\text{Sil}}{\text{Cla} + \text{Sil}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25 \times \text{TOC}}{\text{TOC} + e^{(3.72 - 2.95 \times \text{TOC})}} \right] \times \left[1 - \frac{0.7 \times \text{SN}_1}{\text{SN}_1 + e^{(22.9 \times \text{SN}_1 - 5.51)}} \right] \quad (7)$$

式中, K 是土壤可蚀性因子 ($\text{Mg ha h MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); San 指砂粒 (0.05–2.0 mm) 含量 (%); Sil 指粉粒 (0.002–0.05 mm) 含量 (%); Cla 指黏粒 (< 0.002 mm) 含量 (%); TOC 指土壤有机碳含量 (%), 对于有机质含量在 4% 以上的土壤样品, 采用了 4% 的上限, 以防止对富含有机质土壤可蚀性的低估^[27,34]; $\text{SN}_1 = 1 - \text{San}/100$, 0.131,7 为单位制转换系数。

$$K = 0.1317 \times 0.0293 \left(0.65 - Dg + 0.24 Dg^2 \right) f_{\text{TOC}, \text{Cla}} \quad (8)$$

$$Dg = \sum (f_i / 100) \lg \sqrt{d_i d_{i-1}} \quad (9)$$

$$f_{\text{TOC}, \text{Cla}} = e^{-0.0021 \frac{\text{TOC}}{\text{Cla}/100} - 0.00037 \left(\frac{\text{TOC}}{\text{Cla}/100} \right)^2 - 4.02 \frac{\text{Cla}}{100} + 1.71 \left(\frac{\text{Cla}}{100} \right)^2} \quad (10)$$

式中, Dg 为几何平均粒径的自然对数; d_i 为第 i 级最大粒径 (mm); d_{i-1} 为最小粒径 (mm); f_i 为相应粒径级的质量分数 (%) (如设置黏粒的下限为 0.000,05 mm, 则含有 15% 黏粒、40% 粉粒和 45% 砂粒土壤的 Dg 等于 -3.569)。

$$K = 0.1317 \left[0.00021 M^{1.14} (12 - \text{TOC}) + 3.25 (s - 2) + 2.5 (p - 3) \right] / 100 \quad (11)$$

$$M = N_1 (100 - N_2) \quad (12)$$

式中, N_1 是粉粒加极细砂含量 (0.002–0.1 mm, %), 通常取砂粒含量的 20%^[34]; N_2 是黏粒含量 (< 0.002 mm, %); 根据 WRB 土壤分类, 通过查阅表得出土壤结构 s ; 土壤渗透性 p 根据美国农业部 (USDA) 的土壤质地分类的土壤渗透性 p 表查得; M 是与土壤质地有关的因素。

3.3.3 LS 因子

本研究 LS 值的计算采用了自动化地球科学分析系统 (System for Automated Geoscientific Analysis, SAGA) 软件中的 3 种算法^[15], 分别为 Moore、Desmet 和 Böehner 方法^[35–37]。首先需要在 ArcGIS 中对 DEM 进行填洼处理, 在 SAGA 中使用 Flow Accumulation 工具计算总流域面积 (Total Catchment Area, TCA), 使用 Flow Width and Specific Catchment Area 工具计算特定集水区面积 (Specific Catchment Area, SCA), 然后使用 SAGA 的 LS factor 直接计算 LS 因子。

3.3.4 C 因子

C 因子是政策和土地使用决策方面最重要的因素，因为它是最容易受人为控制来减少侵蚀的因子^[38]。C 因子目前的计算方式包括通过卫星遥感数据（如 NDVI、植被覆盖率等）计算（公式 13）、经验值法以及两种方法的结合（公式 14）。

$$C = \exp \left[\alpha \left(\frac{NDVI}{\beta - NDVI} \right) \right] \quad (13)$$

式中，C 为植被因子，NDVI 为归一化植被指数， α 取值为 -2， β 取值为 1。

某一土地覆盖类型的 C 因子值是这些土壤流失率的加权平均值，范围在 0 到 1 之间。这种经验值最初是通过实地实验得到的，但是通常由于不同的地区、气候等因素往往造成同种植被类型的 C 因子在某个范围内波动（表 2）。本研究第二种 C 因子计算根据前人的研究和总结，采用经验值的中值来表示某种植被类型的 C 因子^[15]。

表 2 植被类型及其对应的 C 因子文献值

编号	分类	植被类型	C 因子范围	C 因子取值
1	耕地	农田	0.15-0.2	0.175
2	林地	针叶林	0.000,1-0.003	0.001,55
3		混交林	0.000,1-0.003	0.001,55
4		阔叶林	0.000,1-0.003	0.001,55
5		灌木	灌木林地	0.01-0.15
6		稀疏灌木	0.1-0.45	0.275
7	草地	草原	0.05-0.15	0.1
8		草丛	0.05-0.1	0.075
9		草甸	0.01-0.08	0.045
10		高山植被	0.01-0.15	0.08
11	其他	水体	0	0
12		冰川	0	0
13		裸地	0.1-0.55	0.325
14		湿地	0	0

第三种 C 因子计算方法采取 Panagos 等的方法^[38]，结合赋值方法和土地覆盖度进行计算。

$$C = \min(C_{landuse}) + \text{Range}(C_{landuse})(1 - F_{cover}) \quad (14)$$

$\min(C_{landuse})$ 是该土地利用类型先前研究的最低值， $\text{Range}(C_{landuse})$ 是指该土地利用类型先前研究所有值的范围， F_{cover} 是植被覆盖度。植被覆盖度越大，C 值越小。各植被类型的赋值根据 Panagos 等和 Majhi 等的方法^[38,39]，并结合青藏高原相关研究综合得到（表 2）。

3.4 数据分析

3.4.1 突变点分析

本研究使用 R 语言中的“cpm”包，应用 Kolmogorov-Smirnov 检验来识别土壤侵蚀在时间序列中的突变点。突变点累计数量迅速增加的终止年份被用作土壤侵蚀时间序列的突

变点,该年份为前期和后期的分界年。与此同时,中国实施的最广泛的植被恢复项目——“退耕还林还草工程”和“退牧还草工程”于1999年启动,这可以作为印证统计方法识别出的突变点的证据^[40]。

3.4.2 土壤侵蚀趋势

采用基于像元的线性最小二乘回归计算年土壤侵蚀量的变化趋势^[40]。

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (15)$$

式中, $Slope$ 是对应变变量 x 时间序列的变化速率; x_i 是第 i 年对应的 x 变量; i 是从1到 n 的整数。

3.5 数据输出

本研究采用“RUSLE-IC-SDR”方法计算了集成模型最小、第一分位数(Q1)、第二分位数(Q2)和第三分位数(Q3)侵蚀结果对应的产沙量。从水利部门(13个)和文献记录(11个)收集的24个水文测量站的观测产沙量数据与集成模型产沙量进行比较,用于最适结果的输出。比较结果(图2)表明,集成模型Q2的评估的泥沙产量与水文站的观测结果更一致($R^2=0.81$, $RMSE=7.04$, $NSE=0.81$)。因此,集成模型的中位数将作为最终输出的数据集。

4 数据结果

4.1 数据集组成

《集成RUSLE模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集(1981–2018)》内容包括:(1)集成模型中位数对应的1981–2018年、1981–1998年、1999–2018年多年平均的水力侵蚀数据(单位: $t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$);(2)1981–2018年、1981–1998年、1999–2018年水力侵蚀变化速率(单位: $t\ ha^{-1}\ yr^{-1}\ yr^{-1}$)。数据空间分辨率为100 m。数据集储存为.tif格式。

4.2 侵蚀空间分布及变化

青藏高原1981–2018年多年平均土壤侵蚀速率为 $5.91 \pm 2.29\ t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$,即每年有 $1,526 \pm 591\ Tg$ 的土壤发生水力侵蚀。在空间上,土壤侵蚀速率较高的区域主要分布在雅鲁藏布江中上游的日喀则、下游的林芝,以及川西、青藏高原东部和帕米尔高原。而柴达木盆地和羌塘高原的土壤侵蚀速率最低(图3)。

根据突变点分析和“退耕还林还草”工程实施的时间,作者将1999年作为土壤侵蚀变化的转折点(图4),分为前期(1981–1998年)和后期(1999–2018)两个时期。青藏高原土壤侵蚀表现为增加趋势(图4a和5a),后期土壤侵蚀速率显著高于前期($P=9.5e-5$),但前期快速增加的趋势有所缓解(前期趋势为 $0.075\ t\ ha^{-1}\ yr^{-1}\ yr^{-1}$;后期趋势为 $0.013\ t\ ha^{-1}\ yr^{-1}\ yr^{-1}$)(图4a)。在前期,雅鲁藏布江中游和青藏高原东南部土壤侵蚀趋势增加(图5b);相反,后期这些地区的土壤侵蚀开始降低(图5c),土壤侵蚀加剧主要集中在青藏高原西部和东部,整个青藏高原土壤侵蚀缓解的面积扩大了65.6%(图5c)。

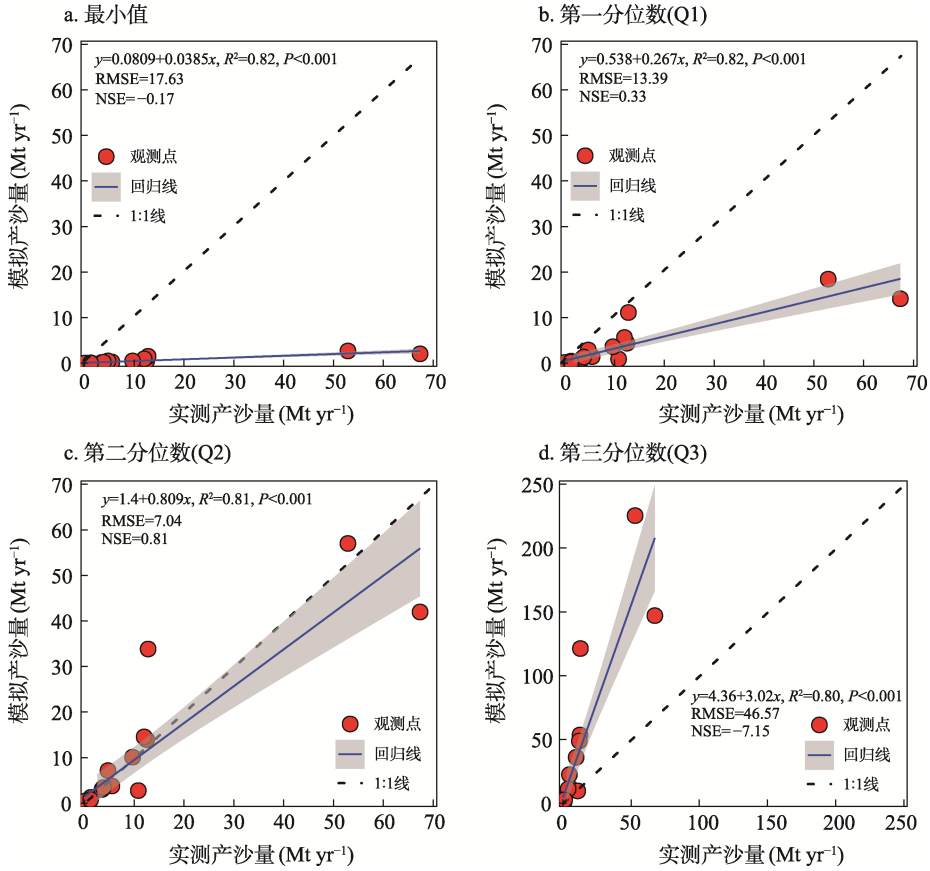


图2 实测产沙量与集成模型侵蚀结果对应的产沙量的比较图

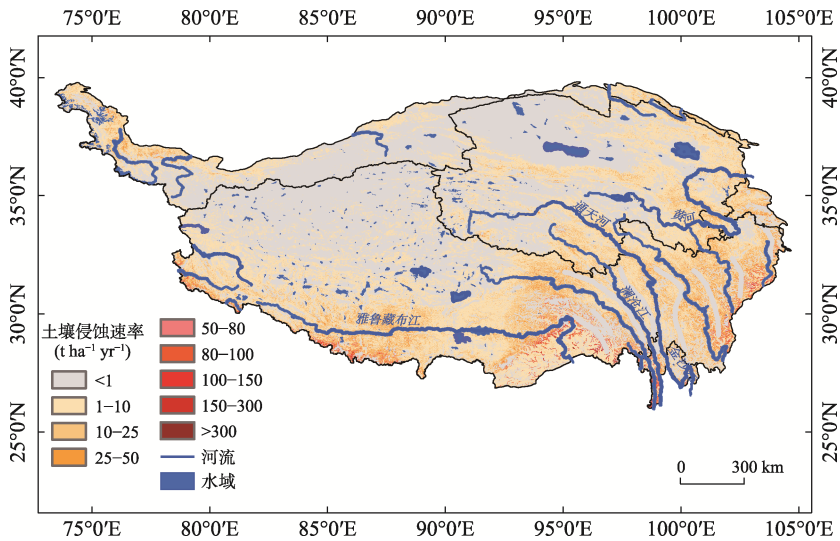


图3 1981-2018年青藏高原平均土壤侵蚀速率的空间分布图 (本图基于审图号为GS(2019)1822的标准地图制作, 底图无修改)

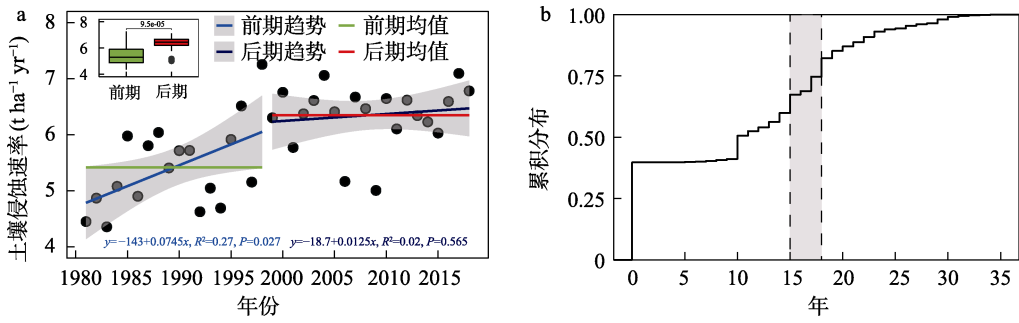


图 4 1981–2018 年青藏高原土壤侵蚀速率的时间变化图

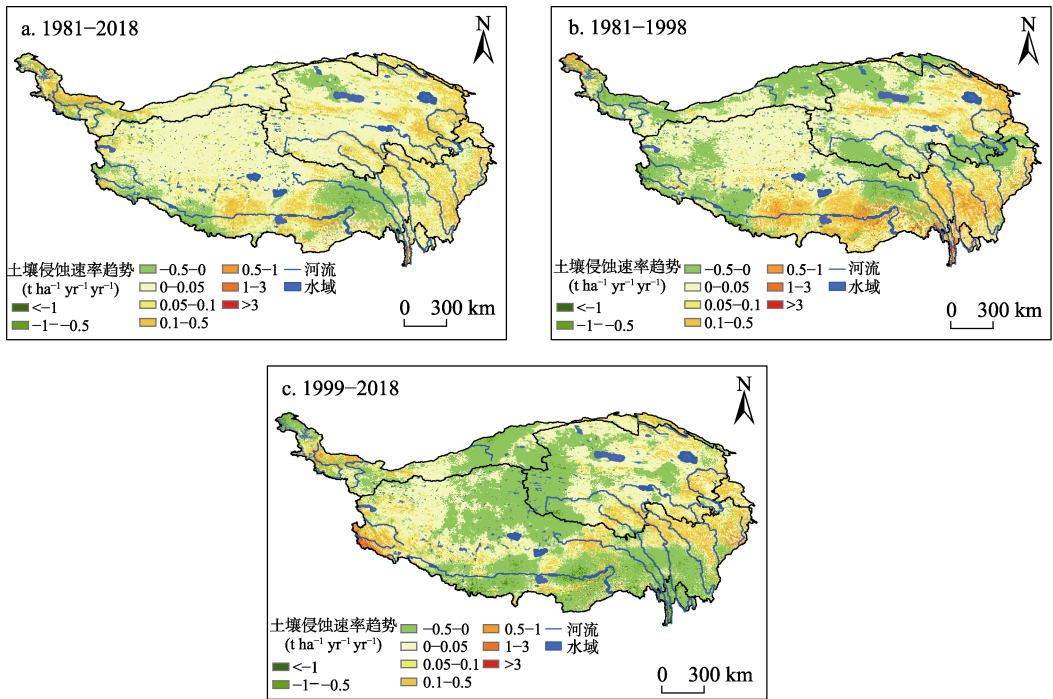


图 5 青藏高原土壤侵蚀趋势变化图

(本图基于审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作，底图无修改)

5 讨论和总结

青藏高原是我国重要生态安全屏障，生态环境极其脆弱、成土浅薄，不合理的人类活动和气候变化正在加剧青藏高原水力侵蚀。青藏高原水力侵蚀的研究为环境、生物多样性、自然资源保护提供基础认识。本研究采用集成 RUSLE 模型，耦合多源数据和多侵蚀因子计算方法，提供了更可靠的土壤侵蚀数据集；识别了土壤侵蚀变化的热点区域，发现土壤侵蚀速率较高的区域主要位于雅鲁藏布江流域和青藏高原东部；并分析了青藏高原 1981–2018 年土壤侵蚀的变化规律，发现未来青藏高原西部和东部需要重点关注土壤侵蚀的继续加剧。本研究研制的青藏高原水力侵蚀数据可以为针对性的水土保持建设提供支撑

和科学指导。

作者分工：宋献方、高光耀、信忠保和黄艳章对数据集的开发做了总体设计；黄艳章和马英设计了模型和算法；宋献方和杨丽虎对论文和数据提出了优化建议；黄艳章撰写了数据论文。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 张懿锂, 李炳元, 郑度. 青藏高原范围与界线地理信息系统数据[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2014. <https://doi.org/10.3974/geodb.2014.01.12.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2014.01.12.V1>.
- [2] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924–931.
- [3] 崔鹏, 贾洋, 苏凤环等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 985–992.
- [4] 罗利芳, 张科利, 孔亚平等. 青藏高原地区水土流失时空分异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 58–62.
- [5] Yang, Y. Y., Zhao, R. Y., Shi, Z., *et al.* Integrating multi-source data to improve water erosion mapping in Tibet, China [J]. *Catena*, 2018, 169: 31–45.
- [6] 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.
- [7] Zhang, F., Hu, Y. D., Fan, X. M., *et al.* Controls on seasonal erosion behavior and potential increase in sediment evacuation in the warming Tibetan Plateau [J]. *Catena*, 2022, 209: 105797.
- [8] Sun, J., Liu, Y., Zhou, T. C., *et al.* Soil conservation service on the Tibetan Plateau, 1984–2013 [J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2019, 109(3–4): 445–451.
- [9] Zhao, W. T., Cheng, Y. Z., Jian, J. S., *et al.* Water erosion changes on the Qinghai-Tibet Plateau and its response to climate variability and human activities during 1982–2015 [J]. *Catena*, 2023, 229(26): 107207.
- [10] Tian, Q. L., Zhang, X. P., He, J., *et al.* Potential risk of soil erosion on the Tibetan Plateau during 1990–2020: impact of climate change and human activities [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110669.
- [11] 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.
- [12] Karydas, C. G., Panagos, P., Gitas, I. Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(3): 229–250.
- [13] Batista, P. V. G., Davies, J., Silva, M. L. N., *et al.* On the evaluation of soil erosion models: are we doing enough? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 197: 102898.
- [14] 张宇婷, 肖海兵, 聂小东等. 基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 797–810.
- [15] Schürz, C., Mehdi, B., Kiesel, J., *et al.* A systematic assessment of uncertainties in large-scale soil loss estimation from different representations of USLE input factors—a case study for Kenya and Uganda [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(9): 4463–4489.
- [16] 黄艳章, 信忠保, 高光耀等. 集成 RUSLE 模型评估的青藏高原水力侵蚀数据集(1981–2018)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.06.05.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2025.06.05.V1>.
- [17] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [18] Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., *et al.* A quasi-global precipitation time series for drought

- monitoring [J/DB/OL]. *USGS Professional Paper Data*, 2014. <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0>.
- [19] 阳坤, 何杰, 唐文君等. 中国区域地面气象要素驱动数据集 v1.6(1979–2018)[DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019. <https://doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file>.
- [20] Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., *et al.* ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set [J/DB/OL]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-389-2015>.
- [21] Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink G. B. M., *et al.* SoilGrids-global gridded soil information [J/DB/OL]. *ISRIC World Soil Information*, 2017. <https://files.isric.org/soilgrids/former/2017-03-10/>.
- [22] Jarvis, A., Guevara, E., Reuter, H. I., *et al.* Hole-filled seamless SRTM data V4 [J/DB/OL]. *International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)*, 2008. <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- [23] Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., *et al.* An extended AVHRR-8 km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J/DB/OL]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485–4498.
- [24] Kamel, D., Alfredo, H., MODAPS SIPS. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid [J/DB/OL]. *NASA LP DAAC*, 2015. <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.
- [25] Lin, J. K., Guan, Q. Y., Tian, J., *et al.* Assessing temporal trends of soil erosion and sediment redistribution in the Hexi Corridor region using the integrated RUSLE-TLSD Model [J]. *Catena*, 2020, 195: 104756.
- [26] 侯学煜. 中国 100 万植被类型空间分布数据 [DB/OL]. 资源环境科学数据平台, 2001. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=122>.
- [27] Wischmeier, W. H., Smith, D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning [M]. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, 1978.
- [28] Li, S. C., Zhang, Y. L., Wang, Z. F., *et al.* Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276–286.
- [29] 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.
- [30] Xie, Y., Yin, S. Q., Liu, B. Y., *et al.* Models for estimating daily rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 547–558.
- [31] Yin, S., Xie, Y., Liu, B., *et al.* Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(10): 4113–4126.
- [32] Sharpley, A. N., Williams, J. R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation [M]. USDA Technical Bulletin, 1990.
- [33] Torri, D., Poesen, J. W. A., Borselli, L. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset [J]. *Catena*, 1997, 31(1–2): 1–22.
- [34] Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., *et al.* Soil erodibility in Europe: a high-resolution dataset based on LUCAS [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 479–480(1): 189–200.
- [35] Moore, I. D., Burch, G. J. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(5): 1294–1298.
- [36] Desmet, P., Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. *Journal Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5): 427–433.
- [37] Böhner, J., Selige, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization [OL]. In *SAGA-Analyses and modelling applications*. Goltze, 2006. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1304675/file.pdf>.
- [38] Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., *et al.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale [J]. *Land Use Policy*, 2015, 48: 38–50.
- [39] Majhi, A., Shaw, R., Mallick, K., *et al.* Towards improved USLE-based soil erosion modelling in India: a review of prevalent pitfalls and implementation of exemplar methods [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 221: 103786.
- [40] Huang, Y., Xin, Z., Gao, G., *et al.* Increasing lateral transport of soil and carbon on the Tibetan Plateau [J]. *Catena*, 2024, 239: 107901.