黄土高原土壤侵蚀对极端降水的响应模拟
——基于校正的ERA5-Land气象再分析数据

朱 琳[1,2], 朱清高子[2,3], 和志豪[2,4],
姚 宁[5,6], 史海静[2], 赵 刚[2], 杨希华[3,7], 于 强[2]
(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
3.澳大利亚新南威尔士州气候变化、能源、环境与水务部, 新南威尔士 帕拉马塔 2150;
4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 6.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 7.悉尼科技大学 理学院生命科学系, 新南威尔士 百老汇 2007)

摘 要: [目的]探究校正的ERA5-Land再分析降雨数据在黄土高原的适用性,明确其对降雨侵蚀力估算与侵蚀模拟的驱动效果,为区域尺度气候研究与水土保持管理提供数据支撑。[方法]基于对黄土高原复杂地形和气候梯度的分位数映射(quantile mapping, QM)校正框架,通过整合298个地面气象站点观测数据,系统校正ERA5-Land降雨数据中的高估偏差并驱动RUSLE模型,评估2001—2024年校正后的再分析数据对降雨侵蚀力估算和土壤侵蚀模拟的驱动响应。[结果]①QM方法有效校正了ERA5-Land降雨高估偏差,空间分布更接近观测值,年降雨均方根误差(RMSE)降低了72.1%,各季节降雨RMSE降低了64%以上,夏季强降雨事件的RMSE降低了40.9%。②校正后数据驱动的降雨侵蚀力与区域气候特征高度契合,夏季降雨贡献全年70%以上的降雨侵蚀力,其中强降雨(R95pTOT)占夏季月均降雨侵蚀力99%以上,极强降雨(R99pTOT)占夏季月均降雨侵蚀力的50%以上。③2001—2024年黄土高原侵蚀变化呈现"气候主导,生态调控,极端事件触发波动"的复合机制特征。年均土壤侵蚀模数为14.44 t/(hm^2·a),长期趋势下降,空间差异显著,高侵蚀带稳定分布于丘陵沟壑区和高塬沟壑区。[结论]偏差校正后的ERA5-Land再分析降雨数据在黄土高原具有良好的侵蚀建模驱动能力,可有效支撑气候变化背景下的大尺度适应性管理,为深入揭示极端降雨与土壤侵蚀之间的动态关系提供了关键的数据基础和量化工具。

关键词: ERA5-Land再分析数据; 分位数映射; 黄土高原; 极端降雨; 土壤侵蚀
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0101-14 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 朱琳, 朱清高子, 和志豪, 等.黄土高原土壤侵蚀对极端降水的响应模拟[J].水土保持通报, 2026, 46(5): 101-114. Zhu Lin, Zhu Qinggaozi, He Zhihao, et al. Simulation of soil erosion response to extreme rainfall in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(5): 101-114.
DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.016 **CSTR:** 32312.14.stbctb.2026.05.016

Simulation of soil erosion response to extreme rainfall in Loess Plateau
—Based on bias-corrected ERA5-Land meteorological reanalysis data

Zhu Lin[1,2], Zhu Qinggaozi[2,3], He Zhihao[2,4], Yao Ning[5,6], Shi Haijing[2], Zhao Gang[2], Yang Xihua[3,7], Yu Qiang[2]
(1.*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Institute of Soil and Water Conservation Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3.*New South Wales Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, Parramatta, New South Wales* 2150, *Australia*; 4.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 5.*Key Laboratory for Agricultural Soil and Water*

收稿日期: 2026-01-06 **修回日期:** 2026-04-17 **采用日期:** 2026-04-30
资助项目: 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室开放基金项目"黄土高原土壤侵蚀智能模拟器"(Z2010025001-KJ2527)
第一作者: 朱琳(2001—),女(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,研究方向为气候变化与水土保持。Email:18092145276@163.com。
通信作者: 于强(1962—),男(汉族),安徽省阜阳市人,博士,研究员,主要从事气候变化与农业生态研究。Email:yuq@nwafu.edu.cn。
杨希华(1962—),男(汉族),湖北省天门市人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀和空间遥感工作。Email:xihua.yang@dcceew.nsw.gov.au。

Engineering in Arid Area of Ministry of Education, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
6.*College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
7.*School of Life Sciences*, *Faculty of Science*, *University of Technology Sydney*, *Broadway*, *New South Wales* 2007, *Australia*)

Abstract: [Objective] The applicability of bias-corrected ERA5-Land reanalysis rainfall data on the Loess Plateau was explored, and its driving effects on rainfall erosivity estimation and erosion simulation were clarified, in order to provide data support for large-scale regional climate studies and soil and water conservation management. [Methods] Based on a quantile mapping (QM) bias-correction framework accounting for the complex topography and climatic gradients of the Loess Plateau, this study integrated observations from 298 meteorological stations to systematically correct the overestimation bias in ERA5-Land rainfall data. The corrected rainfall data was then used to drive the RUSLE model to evaluate the driving response of the corrected reanalysis data to rainfall erosivity estimation and soil erosion simulation from 2001 to 2024. [Results] ① The QM method effectively corrected the overestimation bias in ERA5-Land rainfall, and the spatial distribution became closer to observations. The RMSE decreased by 72.1% for annual rainfall, over 64% for seasonal rainfall, and 40.9% for summer heavy rainfall events. ② Rainfall erosivity derived from the corrected data aligned well with regional climate characteristics. Summer rainfall contributed over 70% of annual rainfall erosivity. Heavy rainfall events (R95pTOT) accounted for over 99% of monthly summer rainfall erosivity, while extreme rainfall events (R99pTOT) contributed more than 50%. ③ From 2001 to 2024, erosion changes on the Loess Plateau exhibited a compound mechanism characterized by climate dominance, ecological regulation, and fluctuation triggered by extreme events. The annual average soil erosion modulus was 14.44 t/(hm^2·a), showing a long-term decreasing trend with pronounced spatial differences. High-erosion areas were stably distributed in the hilly-gully region and loess tableland-gully region. [Conclusion] The bias-corrected ERA5-Land reanalysis rainfall data exhibits strong capability in driving soil erosion modeling on the Loess Plateau, effectively supporting large-scale adaptive management under climate change and providing a crucial data basis and quantitative tool for further revealing the dynamic relationships between extreme rainfall and soil erosion.

Keywords: **ERA5-Land reanalysis data**; **quantile mapping**; **Loess Plateau**; **extreme rainfall**; **soil erosion**

中国中北部的黄土高原是地球上侵蚀最严重的地区之一,其松散的风成沉积结构与高粉砂含量使其在强降雨作用下极易发生水力侵蚀[1]。作为土壤侵蚀过程中最重要的驱动因素——降雨的变化,特别是高强度极端降雨事件频率,直接改变了土壤侵蚀速率[2]。已有研究表明,极端降雨事件能够在短时间内造成剧烈地表破坏和大量土壤流失。例如,延安地区极端降雨导致梯田塌陷与滑坡,加剧了局地侵蚀过程[3];短时高强度降雨事件可贡献1/2以上的土壤流失量[4]。这些发现表明,在黄土高原侵蚀系统中,极端降雨比平均降雨量更能决定侵蚀风险水平。因此,准确刻画降雨,特别是极端降雨事件的时空特征,是提高侵蚀模拟可靠性的关键前提。而在观测站点分布稀疏,记录不连续的背景下,再分析降雨数据逐渐成为区域侵蚀研究的重要数据来源。

ERA5-Land作为由欧洲中期天气预报中心基于ERA5开发的全球陆地再分析数据集,恰好能够为相关研究提供高时空分辨率(0.1°)的月度和小时降雨数据支撑[5]。与受记录长度、仪器精度、地形和人为操作限制的站点观测以及精度取决于算法和平台设计的卫星反演不同,ERA5-Land提供了时空一致的数据集,且凭借高分辨率,频繁更新和广泛的变量覆盖,特别适用于站点稀疏或缺乏观测的地区[6]。近年来,许多研究定量评估了ERA5-Land降雨数据的准确性。结果表明,虽然这些数据通常捕捉了降雨的实际空间格局和极端事件,但普遍观察到系统性湿偏差,特别是降雨高估[7-9]。Sharifi等[10]观察到ERA5降雨数据的准确性随地形坡度增加而下降;Jiao等[11]发现ERA5存在明显的季节性偏差,夏秋季的精度通常低于春冬季。在水文建模中,若未考虑ERA5的降雨误差,可能导致模拟的降雨驱动径流与观测条件之间存在显著偏差。在目前研究中,很少有学者应用校正后的ERA5-Land再分析数据对黄土高原进行极端降雨事件模拟与水土流失评估,或者没有探究黄土高原上再分析数据中的偏差影响。近年来,分位数映射法(quantile mapping, QM)已广泛用于区域气候模型的偏差校正。Tani等[12]应用QM方法校正区域气候模型,证明了对极端降水事件模拟的显著改进。Liu Senfeng等[13]通过利用网格化卫星观测,发现QM方法有效校正了高分辨WRF模拟东南亚

地区时的系统偏差,特别是对于小雨和极端降水。更重要的是,先前已有学者将 QM 方法用于校正 ERA5-Land 数据[14]。

尽管已有研究对 ERA5-Land 降雨数据的精度进行了评估,并证实其在复杂地形区存在系统性偏差,但现有工作多集中于降雨本身的统计检验,尚缺乏对其应用在侵蚀动力计算中的效应分析。特别是在以短历时强降雨为主导的黄土高原地区,极端降雨对侵蚀过程具有非线性放大作用,再分析降雨数据的系统性误差可能显著影响侵蚀风险评估结果。本研究的创新在于将再分析降雨偏差校正、降雨侵蚀力响应和土壤侵蚀模拟贯通起来,系统揭示降雨偏差如何通过侵蚀力因子传递并影响侵蚀评估结果。具体包括:①从“降雨精度”进一步拓展到“侵蚀动力有效性”,检验 QM 校正后 ERA5-Land 是否能够恢复极端降雨主导区的降雨侵蚀力因子(R)时空结构;②揭示黄土高原土壤侵蚀对高分位强降雨事件的高度敏感性,明确极端降雨并非仅影响降水统计特征,而是通过非线性方式主导侵蚀能量释放;③在区域尺度上识别 2001—2024 年黄土高原侵蚀变化中“气候驱动—生态调节—极端事件触发波动”的复合机制,从而为数据稀缺区侵蚀风险评估提供兼具气候意义和侵蚀过程意义的分析框架。基于此,本研究拟利用中国气象数据服务中心提供的黄土高原 298 个站点的观测数据,对 ERA5-Land 再分析降雨数据应用 QM 方法校正,评估偏差校正前后 ERA5-Land 再分析降雨数据的性能,将校正后的再分析降雨数据用于降雨侵蚀力因子的估算和土壤侵蚀模拟的驱动,以期为黄土高原极端降雨事件的捕捉与水土流失管理提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄土高原位于中国北部黄河流域中上游,北起长城,南至秦岭,西抵乌鞘岭,东到太行山(33°—41°N,100°—114°E),面积约 6.24×10^5 km^2(占黄河流域的 83%),约占中国总人口的 8.5%[15]。黄土高原地形特点是西北高,东南低,多沟壑,坡度大,土壤易松散(图 1)。该地区降雨量普遍偏低,年降雨量 200~750 mm,其中 65% 集中在 7—9 月,而暴雨占年降雨总量的 70%,并集中在 6—9 月[15]。黄土高原按生态地理分区可划分为 6 个分区:黄土高塬沟壑区,沙地,农灌区,土石山区,河谷平原区,黄土丘陵沟壑区。

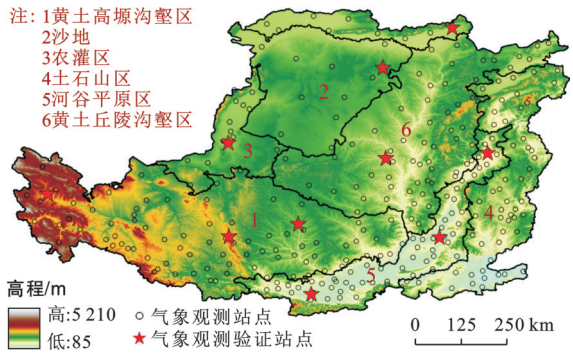


图 1　黄土高原地形及气象站点分布

Fig.1　Topography of Loess Plateau and distribution of meteorological stations

1.2　数据来源及预处理

本研究使用的主要数据及其精度和来源如表 1 所示。所有数据统一重采样至 500 m×500 m,统一投影为 WGS1984。

表 1　数据来源分析

Table 1　Analysis of data sources

数据类型	分辨率	数据来源
ERA5-Land 再分析降雨数据	0.1°, m/h	哥白尼气候变化服务(C3S)(https://cds.climate.copernicus.eu/)
中国国家地面气象站降雨数据	mm/d	国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn/)
土壤可蚀性因子(K)数据	30 m	国家科技基础条件平台:国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)
地形因子(LS)数据	90 m	国家科技基础条件平台:国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)
中国土地利用分类数据	30 m	谷歌地球引擎(GEE)(https://earthengine.google.com/)
黄土高原输沙数据	t/(km^2·a)	国家科技基础条件平台:国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)
黄土高原生态地理分区矢量	—	国家科技基础条件平台:国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)

为了评估站点降雨插值精度能否用于校正再分析降雨数据,预留了 10 个气象站作为独立验证站点,未作为样本点参与插值处理。主要基于 3 点因素确定验证站点:①站点的海拔高度;②涵盖黄土高原内不同生态地理分区;③周围站点的分布密度。但需要指出的是,黄土高原地形破碎,下垫面复杂,不同分区内部仍存在明显的小尺度空间异质性。受可用站点数量限制,10 个独立验证站更适合用于区域尺度上的独立检验,而对局部复杂地形区或强对流活跃区的降雨空间变异表征仍可能不足。

1.3 研究方法

1.3.1 薄板样条插值

薄板样条法是一种基于径向基函数的确定性插值方法，该方法能够较好地处理降水量等气象要素的空间非平稳性，并可有效反映地形等地理因子对降水空间分布的影响。具体实现为：设研究区内共有n个气象站点，其空间位置和对应降水观测值分别为

$$(x_i, y_i, z_i),\ i=1,2,3\cdots n \tag{1}$$

薄板样条插值函数可表示为：

$$f(x,y)=a_0+a_1x+a_2y+\sum_{i=1}^{n}w_i\beta(r_i) \tag{2}$$

$$r_i=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2} \tag{3}$$

$$\beta(r)=r^2\ln(r),\quad r>0 \tag{4}$$

式中：a_0，a_1，a_2为线性多项式项系数；w_i是径向基函数权重；r_i为插值点到第i个样点的距离；$\beta(r)$为薄板样条径向基函数。

1.3.2 分位数映射法

QM是一种基于统计分布匹配的偏差校正方法，具体实施方法如下。

（1）计算累积分布函数（cumulative distribution function，CDF）。选择训练期（1981—2000年）的降雨数据，将模拟和观测降雨升序排序并按1—N依次标记，分位数等于排列数除以N。日降雨量大于0.1 mm的天数被视为有效降雨日，如果样本有重复值，则仅保留具有较大分位数的样本以保持数值唯一。在随机变量的分布中，分位数与降雨值的对应关系可通过CDF表征，且CDF具有可逆性，可通过逆CDF由分位数反推对应降雨值〔公式（5）—（6）〕。由于CDF是由离散的“分位数-降雨值”对构成的离散序列描述的，如果离散序列中某个分位数的值缺失，则通过两侧相邻值的线性插值获得估计值。最后，利用训练期的降雨序列为每个像元建立月度CDF映射关系。

$$\text{quantile}=\text{CDF}(\text{value}) \tag{5}$$

$$\text{value}=\text{CDF}(\text{quantile}) \tag{6}$$

（2）构建传递函数（transfer function，TF）。本研究将校正过程划分为训练期、验证期和应用期3个阶段。训练期（1981—2000年）用于构建ERA5-Land降雨与观测降雨之间的分位数映射关系，即建立偏差校正传递函数（TF）；验证期（2001—2020年）用于利用独立时段观测数据检验该传递函数在非训练样本上的可迁移性和稳定性；应用期（2001—2024年）则是在验证结果基础上，将训练期建立的TF推广应用于后续ERA5-Land数据，以获得研究期连续一致的校正降雨序列。TF可描述为

$$\begin{aligned}\text{correct}&=\text{CDF}_{\text{obs}}^{-1}(\text{quantile})=\\&\text{CDF}_{\text{obs}}^{-1}\left[\text{CDF}_{\text{sim}}(\text{value}_{\text{sim}})\right]\end{aligned} \tag{7}$$

式中：CDF_{sim}，CDF_{obs}分别代表模拟降雨和观测降雨的CDF。

本研究采用基于统计分布匹配的QM方法，其核心前提是再分析降雨数据相对于观测数据的系统偏差在时间上具有一定稳定性，即偏差结构在训练期与后续时期之间不存在突变性改变。验证期（2001—2020年）的检验结果表明，校正后的ERA5-Land降雨在年尺度、季节尺度及极端降雨分位阈值上均显著优于校正前结果，说明训练期建立的TF在后续时期具有较好的可迁移性，因此认为可进一步用于2001—2024年ERA5-Land降雨序列的校正与侵蚀模拟分析。

1.3.3 极端降雨指数

为了表征研究区的极端降雨事件，我们对每个网格单元计算了气候变化检测与指数专家组推荐的两个基于百分位数的极端降雨指数：R95pTOT和R99pTOT（表2）。

表2 极端降雨指数及其定义[16]

Table 2 Extreme rainfall indices and their definitions[16]

极端降雨指数	指标描述	计算方法	单位
R95pTOT	第95分位以上降雨事件的累积降雨。如果w代表研究期的湿日数，则设RR_{wj}代表湿日w的日降雨量（RR≥1.0 mm），$RR_{wn}95$为湿日降雨量的第95分位	$R95p_j=\sum_{w=1}^{w}RR_{wj}$，$RR_{wj}>RR_{wn}95$	mm
R99pTOT	第99分位以上降雨事件的累积降雨。如果w代表研究期的湿日数，则设RR_{wj}代表湿日w的日降雨量（RR≥1.0 mm），$RR_{wn}99$为湿日降雨量的第99分位	$R99p_j=\sum_{w=1}^{w}RR_{wj}$，$RR_{wj}>RR_{wn}99$	mm

1.3.4 RUSLE模型

修订通用土壤流失方程是一个广泛使用的土壤侵蚀模型，用于预测土壤侵蚀速率和评估水土保持措施的效果。RUSLE模型的核心是计算5个主要因子，它们的组合可以预测年平均土壤流失量。RUSLE的基本公式为

$$A=R\cdot K\cdot LS\cdot C\cdot P \tag{8}$$

式中：A为单位面积上的年平均土壤流失量〔t/(hm^2·a)〕；

R为降雨侵蚀力因子〔MJ·mm/(hm²·h·a)〕; K为土壤可蚀性因子〔t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)〕; LS为地形因子(无量纲); C为植被覆盖和管理因子(无量纲); P为水土保持因子(无量纲)。

(1) 降雨侵蚀力因子(R因子)。本研究采用一种利用日降雨量数据估算降雨侵蚀力的通用方法,具体计算公式为

$$R_{\mathrm{day}}=\alpha\left(P_d\right)^{\beta} \tag{9}$$

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \tag{10}$$

$$\beta=0.8363+\frac{18.144}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \tag{11}$$

式中:R_{day}为日降雨侵蚀力; P_d为日降雨量,要求其值≥12 mm,否则以0计算; α,β为模型待定参数; P_{d12}为日雨量≥12 mm的日平均雨量; P_{y12}为日雨量≥12 mm的年平均雨量。通过累积日降雨侵蚀力到半月降雨侵蚀力来最终得到年降雨侵蚀力。

(2) 土壤可蚀性因子(K因子)。本研究直接使用来自国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心提供的30 m分辨率的黄土高原土壤侵蚀K因子,考虑到黄土高原相对稳定的物理化学性质,将研究期内黄土高原的K因子设为常数。

(3) 地形因子(LS因子)。本研究直接使用来自国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心提供的90 m分辨率的黄土高原土壤侵蚀LS因子,考虑到黄土高原长期内无显著的地形变化,将研究期内黄土高原的LS因子设为常数。

(4) 植被覆盖和管理因子(C因子)。以往研究大多基于光合植被(photosynthetic vegetation, PV)或绿色植被指数(如NDVI)估算C因子,忽略了非光合植被(non-photosynthetic vegetation, NPV)的作用,导致估算不准确。本研究采用了一种结合PV和NPV的植被覆盖率(fractional vegetation cover, FVC)与月降雨侵蚀力计算C因子的新方法[17]。

$$\mathrm{TC}=f_{\mathrm{PV}}+f_{\mathrm{NPV}} \tag{12}$$

$$\mathrm{SLR}_i=\begin{cases}1 & (\mathrm{TC}<5\%)\\ \mathrm{e}^{-0.0418\times(\mathrm{TC}_i-5)} & (\mathrm{TC}\geqslant 5\%)\end{cases} \tag{13}$$

$$C_i=\mathrm{SLR}_i\times\frac{\mathrm{EI}_i}{\mathrm{EI}_t} \tag{14}$$

$$C=\sum_{i=1}^{12}C_i \tag{15}$$

式中:f_{PV}表示光合植被覆盖率; f_{NPV}表示非光合植被覆盖率; TC表示植被总覆盖率,取值范围在0%~100%。SLR_i表示第i月的土壤流失比,当TC小于5%时,SLR被取值为1。C_i为第i月的月植被覆盖管理因子; EI_i为该月的月降雨侵蚀力; EI_t为年内总降雨侵蚀力,各月C_i(12个月)累计值为年度C因子。

(5) 水土保持措施因子(P因子)。P因子取值范围为[0,1]。本研究采用中国30 m土地利用分类数据(CLCD),参照前人研究的P值计算方法,按照相关土地利用类型进行P因子赋值,结果详见表3[18],未引入2001—2024年梯田、淤地坝及其他工程措施的逐年动态空间数据。因此,本研究中的P因子更侧重表征区域静态或准静态的人类管理背景,而未刻画工程措施随时间演变的实际过程。

表3　土地利用类型P因子赋值

Table 3　P factor assignment for land use types

土地利用与覆盖类别	P值
耕地	0.5
林地	0.8
灌木	0.8
草地	0.9
人造地表	0
水体	0
裸地	1
湿地	1
永久性积雪	1

1.3.5　评估指标

为评估QM校正方法的准确性,本研究采用相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)这3个指标对结果进行分析比较。各指标的计算方法为

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X-\overline{X}\right)\left(X_{\mathrm{obs}}-\overline{X}_{\mathrm{obs}}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X-\overline{X}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(X_{\mathrm{obs}}-\overline{X}_{\mathrm{obs}}\right)^2}} \tag{16}$$

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|X-X_{\mathrm{obs}}\right| \tag{17}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(X-X_{\mathrm{obs}}\right)^2} \tag{18}$$

式中:当进行单点验证时; n为降雨次数,当计算黄土高原范围内指标时, n为格点数; X为模拟降雨量或订正降雨量; $\overline{X}$为模拟平均值或订正平均值; X_{obs},$\overline{X}_{\mathrm{obs}}$分别为观测降雨及其算术平均值。

评估RUSLE模型的性能时,选取2006—2012年15个支流水文站实测输沙量(换算为侵蚀模数)对RUSLE模型计算的对应支流的土壤侵蚀模数进行验证,验证结果除相关系数外还采用Nash系数(NSE)及显著性来反映。

$$\mathrm{NSE}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y-Y_{\mathrm{obs}}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{\mathrm{obs}}-\overline{Y}_{\mathrm{obs}}\right)^2} \tag{19}$$

式中：n为观测次数；Y_{obs}为观测值；Y为模型模拟值；$\overline{Y}_{obs}$为观测值的平均值。

2 结果与分析

2.1 站点插值精度验证

由于站点日降雨数据获取截至2020年，所以本研究对2001—2020年ERA5-Land降雨数据校正结果进行分析。将288个站点插值结果和原始ERA5-Land降雨数据分别与验证站点进行对比分析，结果如表4所示，插值降雨效果更优，与观测降雨的一致性更高。具体来看，插值降雨与各站点的相关系数R均大于0.78，有7个站点超过0.85，而ERA5-Land模拟降雨与各站点的相关系数R整体介于0.60～0.75，相关性明显低于插值数据。与此同时，插值降雨在MAE和RMSE上均显著优于ERA5-Land数据，误差控制效果更理想。因此，插值降雨数据具有良好的可靠性和准确性，与站点观测值的吻合度高，误差处于可接受区间，可作为可靠的基准参考。

表4 降雨插值、模拟值和观测比较的验证结果

Table 4 Validation results of comparison of rainfall interpolation, simulated values and observations

地理分区	验证站点	RMSE/(mm·d^{-1})		MAE/(mm·d^{-1})		R	
		TSP	ERA5-Land	TSP	ERA5-Land	TSP	ERA5-Land
黄土高塬沟壑区	西宁市	2.00	2.60	0.69	1.04	0.86	0.71
	庆阳市	2.49	3.92	0.62	1.27	0.89	0.73
	六盘山地区	2.25	3.61	0.75	1.45	0.90	0.75
沙地和农灌区	呼和浩特市	2.79	3.46	0.61	0.99	0.83	0.72
	鄂尔多斯市东胜区	2.94	3.80	0.66	1.02	0.78	0.64
	吴忠市	1.55	2.29	0.31	0.58	0.82	0.68
土石山区和河谷平原区	太原市南郊	2.13	3.99	0.42	1.18	0.91	0.68
	临汾市	2.00	4.21	0.39	1.18	0.93	0.69
	武功县	2.47	6.34	0.50	2.14	0.91	0.65
黄土丘陵沟壑区	子洲县	2.74	4.55	0.54	1.16	0.88	0.66

注：TSP代表插值降雨数据；RMSE为均方根误差；MAE为平均绝对误差；R为相关系数。下同。

2.2 ERA5-Land数据的校正与评估

2.2.1 年均与季节尺度降雨校正效果

从年均降雨分析（图2），黄土高原的降雨空间分布呈现由北向南的明显递增梯度，原始ERA5-Land模拟降雨存在明显系统性高估现象，尤其在黄土高塬沟壑区、河谷平原区及农灌区。经过QM校正的ERA5-Land模拟结果更符合实际的年降雨量空间分布特征，其年均降雨量与观测数据吻合度显著提升。具体来看，原始ERA5-Land模拟区域年均降雨量为562.19 mm，站点插值观测的年均降雨量为449.01 mm，数据集整体高估了约25.2%。ERA5-Land模拟降雨呈现极端空间变异性：633个网格单元（约占总数的2%）超过1 000 mm，最大值达1 523.83 mm，远高于观测最大值990.82 mm。经QM校正后ERA5-Land数据显示年均降雨量为440.76 mm，仅16个网格单元（约占总数的0.05%）超过1 000 mm，年降雨量的空间相关系数从0.82提高到0.95，MAE和RMSE显著下降，分别从0.32 mm/d和0.43 mm/d降至0.09 mm/d和0.12 mm/d，精度均提升了约72%（表5）。

从季节性降雨分析（图3），观测降雨插值在整个黄土高原上各季节日均降雨量分别为0.83，2.64，1.28和0.14 mm/d，黄土高原降雨季节分配极不均衡，夏季集中、冬春稀少。原始ERA5-Land数据存在显著季节性高估偏差，对区域侵蚀模拟准确性影响突出，而QM方法针对各季节降雨的校正结果表明，春季原始模拟日均降雨量1.09 mm/d，较观测值高估31.3%，校正后降至0.85 mm/d，RMSE降低64.7%，空间相关系数从0.86提升至0.93；夏季作为降雨最集中且侵蚀驱动关键期，原始数据模拟日均降雨量3.07 mm/d，较观测值高估16.29%，且在黄土高塬沟壑区、河谷平原区高估尤为明显，校正后日均降雨量调整为2.58 mm/d，RMSE降低65.4%，空间相关系数从0.78大幅提升至0.94；秋季原始数据模拟日均降雨量1.69 mm/d，高估32.03%，校正后降至1.22 mm/d，RMSE降低69.8%；冬季原始数据模拟日均降雨量0.29 mm/d，是观测值的约2.1倍，校正后降至0.17 mm/d，RMSE降低77.8%，有效修正了冬季降雨的虚假高估信号。

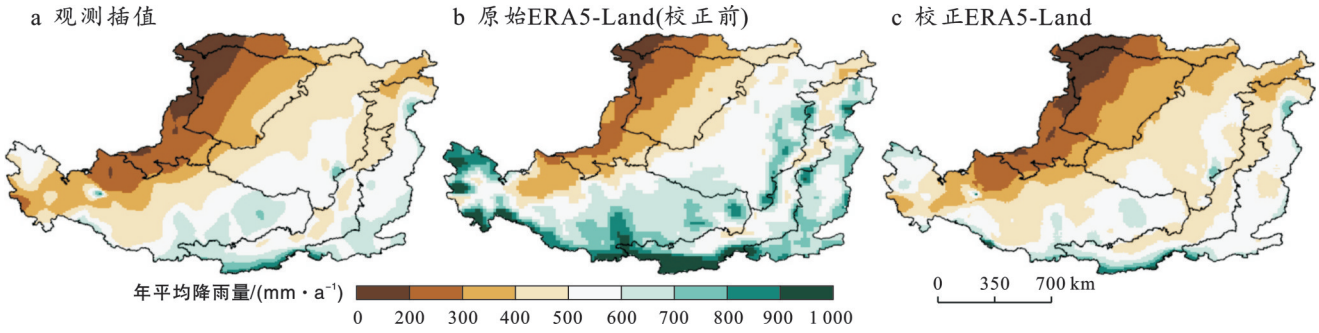


图 2　验证期内黄土高原年平均降雨量

Fig.2　Annual average rainfall on Loess Plateau during validation period

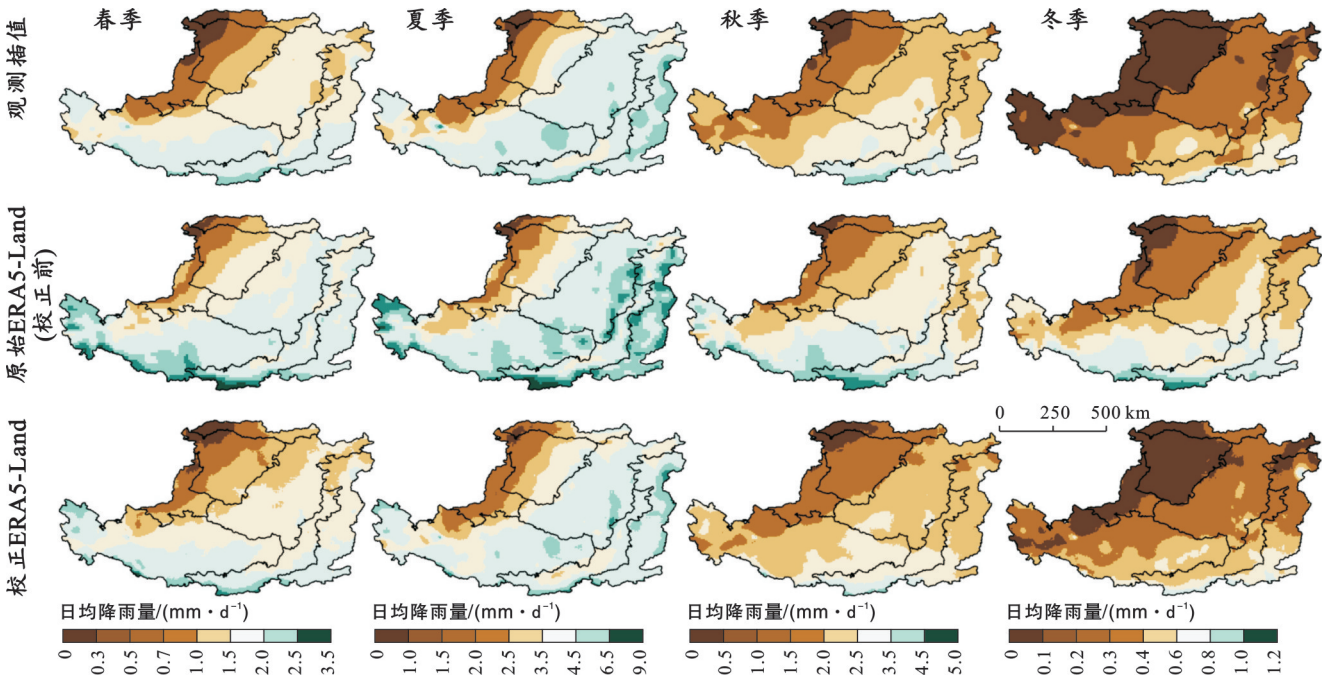


图 3　验证期黄土高原的季节性日均降雨量观测插值、ERA5-Land 校正前和校正后空间分布

Fig.3　Spatial distribution of seasonal daily average rainfall over Loess Plateau for observed interpolation, ERA5-Land before correction and ERA5-Land after correction during validation period

表 5　ERA5-Land 降雨数据验证指标(校正前后)

Table 5　Validation indicators for ERA5-Land rainfall data (before and after correction)

验证期	RMSE/(mm·d⁻¹)		MAE/(mm·d⁻¹)		*R*		精度提升/%
	校正前	校正后	校正前	校正后	校正前	校正后	
春季	0.34	0.12	0.27	0.08	0.86	0.93	64.7
夏季	0.78	0.27	0.50	0.20	0.78	0.94	65.4
秋季	0.53	0.16	0.41	0.13	0.83	0.96	69.8
冬季	0.18	0.04	0.15	0.03	0.75	0.93	77.8
全年	0.43	0.12	0.32	0.09	0.82	0.95	72.1

2.2.2　极端降雨模拟能力评估

通过比较站点观测与 ERA5-Land 校正前后在百分位值中的第 95 分位(R95pTOT 阈值,代表强降雨)和第 99 分位值(R99pTOT 阈值,代表极强降雨)来评估 ERA5-Land 在极端降雨模拟中的表现(图 4)。表 6 结果显示,原始 ERA5-Land 数据对极端降雨事件的重现能力有限,难以精准捕捉黄土高原极端降雨的实际特征。校正前模拟值与观测值在第 95 分位和第 99 分位的 *R* 值分别为 0.74 和 0.81,RMSE 分别为 1.81 和 4.00 mm/d,表明原始数据与实际观测存在明显偏差,且阈值越大偏差越大。经 QM 校正后,极端降雨的模拟精度显著提升:*R* 值分别提高至 0.89 和 0.92,数据相关性大幅增强;RMSE 则分别降至 1.07 和 3.66 mm/d,误差显著缩小,尤其是强降雨事件的 RMSE 降低了 40.9%。

2.3　ERA5-Land 校正降雨驱动的土壤侵蚀模拟

2.3.1　ERA5-Land 降雨驱动的降雨侵蚀力特征

2001—2024 年 ERA5-Land 降雨驱动的年际降雨侵蚀力整体呈上升趋势,年际变化趋势不显著,整体以波动为主(图 5)。从阶段特征看,2001—2003 年

侵蚀力处于相对高值区间，随后在2004—2008年明显下降，2010—2013年出现阶段性回升，2015—2018年为低值阶段，2019年以后侵蚀力再次增强，并在2020—2022年达到阶段性高值。整体呈现“高值-下降-波动回升-低谷-再增强”的演变格局。这表明ERA5-Land模拟的降雨过程在24 a间并未表现出显著单调变化，而是受极端降雨事件和降雨强度年际差异影响明显，侵蚀动力条件具有较强的不稳定性，表明极端或高强度降雨事件的阶段性集中是影响侵蚀力变化的主要因素。

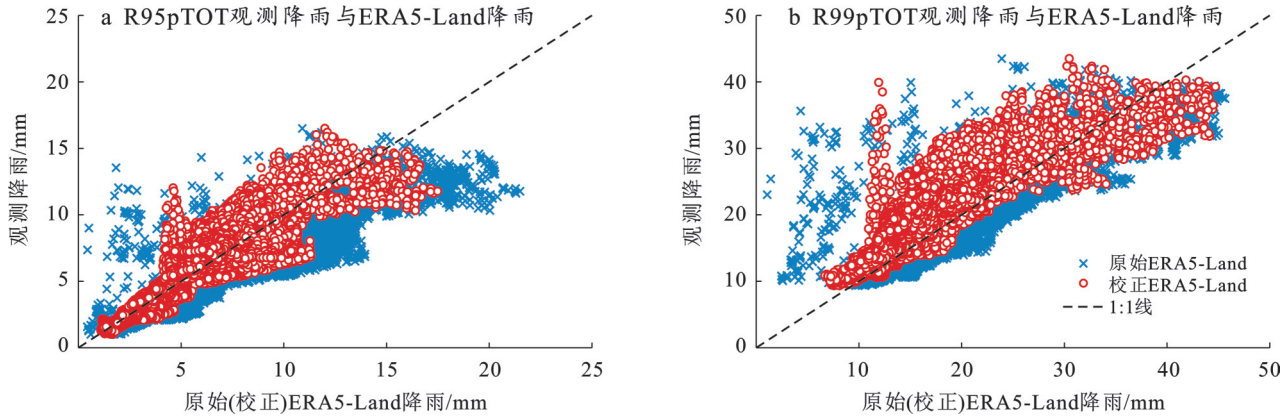


图4 第95分位(R95pTOT)和第99分位(R99pTOT)校正前后降雨量的散点图

Fig.4 Scatter plots of rainfall before and after correction at 95th (R95pTOT) and 99th (R99pTOT) percentiles

表6 ERA5-Land降雨数据(校正前后)在不同分位点下的统计性能评估

Table 6 Statistical performance evaluation of ERA5-Land rainfall data (before and after correction) at different percentiles

项目	95分位(R95pTOT)			99分位(R99pTOT)		
	R	RMSE/(mm·d^{-1})	MAE/(mm·d^{-1})	R	RMSE/(mm·d^{-1})	MAE/(mm·d^{-1})
校正前	0.74	1.81	1.29	0.81	4.00	3.20
校正后	0.89	1.07	0.88	0.92	3.66	3.15

2001—2024年ERA5-Land降雨驱动的月降雨侵蚀力呈现显著的单峰特征，与黄土高原降雨季节分布特征高度契合(图6)。6—8月是降雨侵蚀力的峰值期，月均R因子显著高于其他月份，而11月至次年3月的R因子值极低，形成“夏高冬低”的鲜明格局。其中，极端降雨对侵蚀力的贡献占据绝对主导地位：强降雨R95pTOT驱动的月均R因子，在全年各月份均占总R因子的90%以上，其中夏季贡献比例高达99%，意味着该时段几乎所有降雨侵蚀力均由强降雨事件贡献。极强降雨R99pTOT的贡献也极为突出，其月均R因子占夏季的总R因子达50%以上，表明单次极强降雨事件就能产生可观的侵蚀能量。

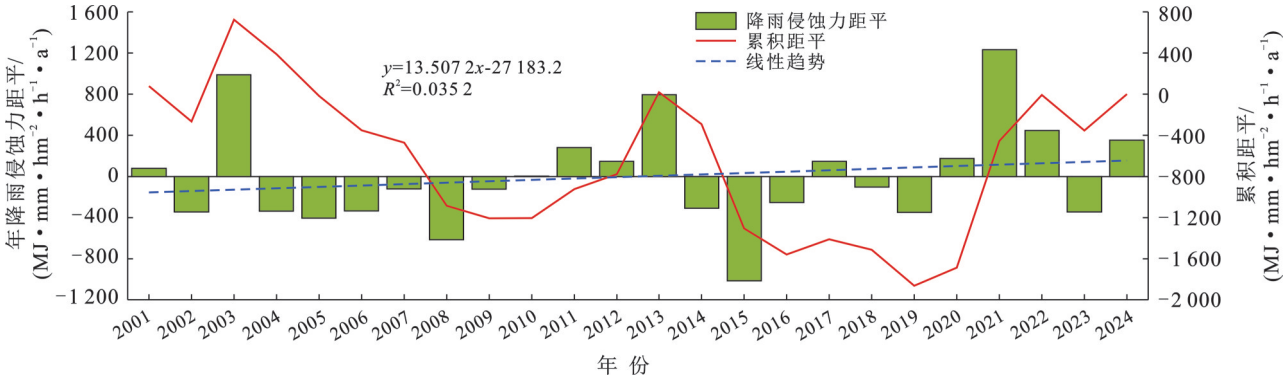


图5 黄土高原2001—2024年降雨侵蚀力变化特征

Fig.5 Variation characteristics of rainfall erosivity on Loess Plateau from 2001 to 2024

降雨侵蚀力高值主要在夏季，均值达1 157.51 MJ·mm/(hm^2·h·季)，约占年总量的70%，形成与月度分布一致的单峰季节特征(图7)。这一高贡献率与同期降雨的时空分布高度吻合，尤其与7—8月频繁发生的短时强降雨事件密切相关，空间上高值区主要集中在南部黄土高原，与夏季暴雨频发区域重叠；春季和秋季的R因子贡献分别约为8%和20%，表现出过渡性特征：空间分布显著受锋面降雨影响，

仍保持东南向西北递减的梯度,但整体数值低于夏季,且空间变异程度介于夏季与冬季之间;冬季降雨稀少且强度极低,导致R因子通常低于20 MJ·mm/(hm²·h·季),占年总量的比例不足1%,成为全年侵蚀能力最低的季节,且冬季R因子的空间变异显著降低,整个区域呈现相对均匀的低值分布,与冬季全域干旱少雨的气候特征相符。这些显著的季节差异与空间分布规律,不仅反映了降雨的季节分配与区域分布特征,更凸显了降雨强度在决定降雨侵蚀性中的主导作用,进一步证实短时强降雨事件在推动黄土高原土壤侵蚀过程中的关键作用。

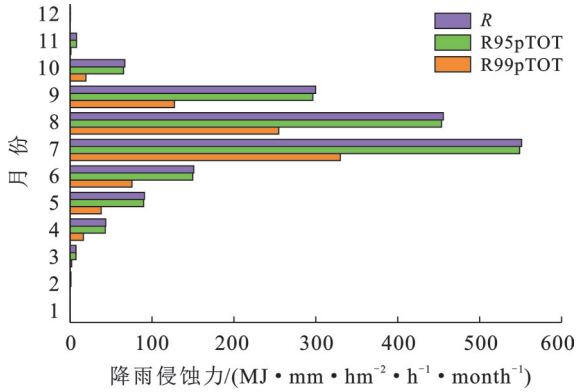


图6　黄土高原极端降雨的降雨侵蚀力(R)与总降雨侵蚀力的月度对比

Fig.6　Monthly comparison between rainfall erosivity(R) from extreme rainfall and total rainfall erosivity on Loess Plateau

2.3.2　RUSLE模型精度验证

通过2006—2012年黄河支流15个水文站的实测输沙量数据与模拟结果之间的相关系数和NSE系数,验证RUSLE模拟结果的准确性(表7)。其中,15个支流水文站与模拟结果的相关系数为0.22~0.94。其中,有9个支流的R>0.60,有8个支流具有极显著的相关性(p<0.01)。陈梨夭和龙头拐的NSE系数接近1,6个支流NSE系数介于0.3~0.7,3个支流NSE系数介于0~0.3。结果说明,基于ERA5-Land校正降雨驱动的RUSLE模型在多数验证流域能够较好反映区域侵蚀变化趋势,然而,针对部分NSE系数为负的流域,模拟值与实测值的偏差较大,其表现甚至低于观测均值的基准估计。这表明在该尺度下,RUSLE模型的适用性存在显著的空间异质性。

表7　水文站对RUSLE模型性能的验证结果

Table 7　Validation results of RUSLE model performance at hydrological stations

编号	水文站	面积/km²	相关系数	NSE
1	巴彦高勒	251 079	0.42*	0.21
2	陈梨夭	184	0.94**	0.81
3	大 宁	3 992	0.22	−9.81
4	大武口	528	0.70**	0.66
5	郭城驿	5 473	0.86**	0.64
6	后大成	4 102	0.74**	0.67
7	黄 埔	3 175	0.53*	0.16
8	会 宁	991	0.74**	−1.52
9	旧 县	1 562	0.73**	0.33
10	林家坪	1 873	0.28	−6.40
11	龙头拐	1 145	0.82**	0.74
12	清 水	689	0.31	−0.56
13	王道恒塔	3 839	0.76**	0.68
14	杨家坡	283	0.49*	0.04
15	子 长	913	0.61*	0.42

注:*,**分别表示在p≤0.05和p≤0.01水平显著相关。

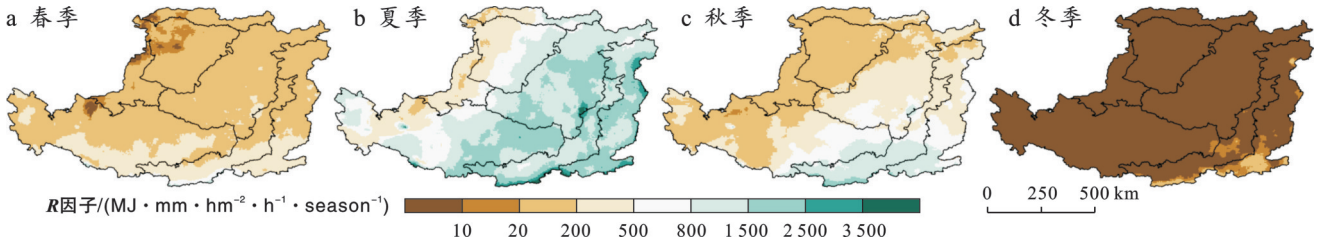


图7　黄土高原2001—2024年校正后ERA5-Land降雨驱动的季节性降雨侵蚀力(R)因子空间分布

Fig.7　Spatial distribution of seasonal rainfall erosivity (R) factors driven by corrected ERA5-Land rainfall on Loess Plateau from 2001 to 2024

2.3.3　土壤侵蚀空间分布与区域特征

2001—2024年黄土高原各因子空间分布情况如图8所示。校正后的ERA5-Land降雨数据计算得到的R因子呈现从东南向西北明显下降趋势,与降雨的空间分布一致,具有显著的空间异质性。整个研究区的R因子为1 674.50 MJ·mm/(hm²·h·a),高值区域〔R因子>5 000 MJ·mm/(hm²·h·a)〕主要集中在南部黄土高原,与该地区频繁的夏季暴雨密切相关;西北部地区R因子较低〔R因子<1 000 MJ·mm/(hm²·h·a)〕,相应的这些地区降雨稀少。

C因子呈从东南向西北逐渐增加的梯度变化。在黄土高原东南部的土石山区,由于森林覆盖良好,C因子普遍维持在0.05以下的较低水平。这些地区茂密的植被有效拦截降雨,显著降低了土壤侵蚀风

险。而在中部的黄土丘陵沟壑区，如延安、庆阳一带，经过多年退耕还林工程实施，*C*因子已从2001年的0.3～0.4下降至2024年的0.1～0.2，反映出植被恢复的显著成效。西北部的干旱半干旱区呈现明显不同的特征，*C*因子多在0.2～0.3之间波动，局部坡耕地仍保持较高值。最西北部的荒漠沙地区，如宁夏中卫、甘肃白银和毛乌素沙地等，由于植被稀疏，*C*因子普遍高于0.35，成为土壤侵蚀的高风险区。

*P*因子的空间分布格局表现出显著的区域异质性特征，其低值区（$p<0.5$）主要集中分布在以下3类典型地理分区：①具有完善灌溉系统的农耕区，该区域通过梯田化改造和集约化管理显著提升了水土保持效能；②主要河流的河谷平原区，得益于平坦地形和人工防护林体系的双重作用；③部分土石山区，由于原生植被保存良好和枯落物层发达，形成持续稳定的低侵蚀环境。这3类区域的共同特征是具备结构性植被覆盖与人为管理措施的协同防护体系，使得*P*因子较周边区域降低40%～80%。

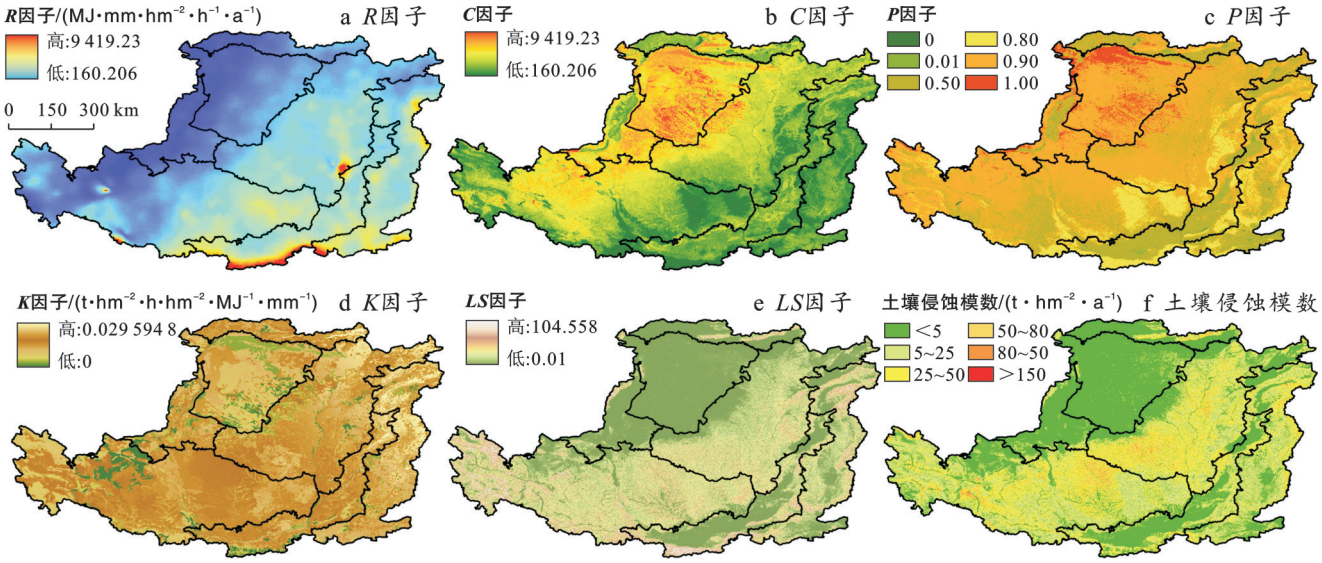


图8 黄土高原2001—2024年各因子的空间分布及年均土壤侵蚀速率

Fig.8 Spatial distribution of each factor and annual average soil erosion rate on Loess Plateau from 2001 to 2024

根据各因子分布的空间耦合，2001—2024年黄土高原的土壤侵蚀模数如图8f所示。2001—2024年黄土高原地区的平均土壤侵蚀速率为14.44 t/(hm²·a)，土壤侵蚀表现出显著的空间异质性，呈现出“黄土丘陵沟壑区＞黄土高塬沟壑区＞土石山区＞河谷平原区＞农灌区＞沙地”的规律。黄土丘陵沟壑区因松散土壤、破碎地形、密集沟壑网络、集中降雨以及大规模陡坡复垦、过度放牧和植被破坏等密集人类活动，侵蚀速率达到21.97 t/(hm²·a)。西南部的黄土高塬沟壑侵蚀速率为20.33 t/(hm²·a)，尽管该地区*R*因子相对较低，但植被覆盖不足、陡坡、深沟和人为活动导致了高侵蚀风险。这两个区域共同形成了黄土高原上一条独特的侵蚀严重带。东南部的土石山区因*R*因子值较高且地形陡峭，被划分为高风险区。与此同时，作为黄土高原主要农业区的河谷平原区和农灌区，也经历了严重的土壤侵蚀。

2001—2024年黄土高原土壤侵蚀速率整体呈现“高值—快速下降—低谷—反弹波动”的阶段性演变特征（表8），而这种变化与同期降雨侵蚀力的年际波动高度一致。2001年为研究初期高值阶段，黄土丘陵沟壑区和黄土高塬沟壑区侵蚀速率分别达到41.93和25.36 t/(hm²·a)，显著高于其他区域。2001—2005年各区侵蚀速率下降，其中丘陵沟壑区下降幅度超过50%。到2010年前后基本维持相似水平，2015年出现全区最低值，丘陵沟壑区和高塬沟壑区分别降至7.97和7.89 t/(hm²·a)。2015年后侵蚀强度明显上升，2020年达到阶段性高值，随后至2024年略有波动但总体仍低于初期水平。

表8 2001—2024年典型时段黄土高原土壤侵蚀模数

Table 8 Soil erosion modulus of Loess Plateau during typical periods from 2001 to 2024 单位：t/(hm²·a)

区域	土壤侵蚀模数					
	2001年	2005年	2010年	2015年	2020年	2024年
农灌区	7.73	2.04	3.34	1.38	3.97	8.45
土石山区	14.17	11.25	12.97	7.00	14.26	10.98
沙地	1.52	0.34	0.53	0.22	0.47	1.60
河谷平原区	11.52	11.31	8.57	4.63	8.89	9.73
黄土丘陵沟壑区	41.93	17.82	17.96	7.97	17.95	20.18
黄土高塬沟壑区	25.36	23.58	23.37	7.89	24.59	21.00
总体	21.41	14.33	14.39	5.84	15.00	14.61

从整体年际变化分析(图 9),2001—2024 年黄土高原土壤侵蚀速率各分区都呈现波动下降趋势。由于黄土丘陵沟壑区和高塬沟壑区坡度大,沟壑密集,土体结构疏松,在同时期强降雨条件下极易发生侵蚀反弹,因此其年际波动幅度显著大于其他地区:黄土丘陵沟壑区和黄土高塬沟壑区线性变化率分别为−0.56 和−0.47 t/(hm^2·a),而土石山区和沙地变化趋势接近于零,河谷平原区和农灌区呈轻微下降。总体而言,2001—2024 年侵蚀强度空间差异始终显著,高侵蚀区仍为水土流失控制的核心区域。

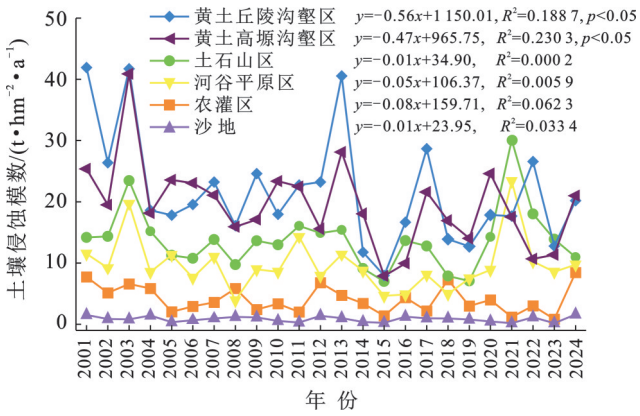


图 9　黄土高原生态分区 2001—2024 年土壤侵蚀模数年际变化

Fig.9　Interannual variations in soil erosion modulus for ecological subregions of Loess Plateau from 2001 to 2024

3　讨　论

3.1　站点插值基准的不确定性

尽管插值降雨在独立验证站上表现出优于原始 ERA5-Land 的精度,但插值结果本质上仍属于由离散站点观测重建得到的空间连续场,并非无误差的真实降雨分布。尤其在地形起伏较大、站点分布稀疏或局地对流降雨频繁的区域,薄板样条插值可能难以完全刻画降雨的局地突变特征,从而引入一定插值偏差。由于 QM 校正是以插值降雨作为参考基准构建 ERA5-Land 与“观测场”之间的映射关系,因此插值误差可能进一步传递至后续校正结果,使部分区域的校正降雨仍存在一定系统不确定性。换言之,本研究的校正结果应理解为相对于站点插值基准的优化结果,其可靠性主要体现在区域总体格局、分区差异及相对变化趋势的改善上,而在局部极端降雨强度和微尺度空间差异刻画方面仍存在一定局限。未来若能够结合更高密度站点资料或多源降雨产品开展交叉验证,将有助于进一步降低插值误差对校正结果的影响。

3.2　ERA5-Land 降雨数据校正的效果

ERA5-Land 再分析数据模拟的降雨在黄土高原上存在显著高估偏差,模拟值较站点插值观测值高估约 25.2%,在黄土高塬沟壑区、河谷平原区和土石山区的高估现象尤为突出。有研究已在伊朗和青藏高原等地区,使用分位数映射法校正了 ERA5-Land 降雨数据,证实了方法的可行性[14,19]。但与以往的高海拔或干旱区研究不同,本研究区域位于季风与西风交汇带,降雨受季风推进、地形抬升及局地对流共同控制,因此误差结构不仅体现在强度放大,还表现为明显的空间异质性。校正结果显示,校正后的 ERA5-Land 数据整体性能显著提升,在降雨空间分布和捕捉极端降雨事件强度方面与观测结果的一致性更高,强降雨(95 分位)和极强降雨(99 分位)RMSE 分别降低了 40.88% 和 8.50%。此外,修正后的数据与观测到的年度和季节降雨总量更为吻合,夏季降雨的 RMSE 显著提升了 65.4%,尽管其误差降低比例略逊于秋冬季节,但夏季降雨占年总量的一半以上、集中了 70% 的暴雨事件,原始误差基数大、空间变异性强且需同时修正平均降雨与极端降雨双重偏差,校正难度更高。另一个值得注意的发现是,校正后模拟极端降雨的相关系数显著增加,但对极强降雨的改善幅度仍有限,Ma 等[19]研究也证实在面对物理驱动的极端降雨情况时,依靠统计分布的校正方案存在根本性局限性。本研究进一步发现,在降雨主导的侵蚀敏感区,这种统计方法的局限性对侵蚀模拟的影响更加显著。这可能是由于极端降雨主要由复杂且物理驱动的过程(如深层对流)控制,其发生具有明显的非平稳性和物理突变特征,而分位数映射基于历史分布假设,难以重建尾部异常事件的物理生成机制。因此,未来的研究应优先开发下一代方法,整合允许对流的建模或物理约束,以更可靠地捕捉和校正 ERA5-Land 再分析数据中这些关键极端的气候变化。另外需要注意的是,本研究 ERA5-Land 降雨数据校正范围为 2001—2024 年虽然基于站点的观测数据截至 2020 年,但从统计学角度而言,完全满足了对极端降雨与后续侵蚀过程进行稳定分析的要求,能够保证校正结果的可靠性与可扩展性,对 2021—2024 年的分析更侧重于区域尺度时空格局识别与相对变化特征刻画。未来若获得更新站点资料,可对 2021 年后的校正效果开展进一步独立检验。

3.3　ERA5-Land 对降雨侵蚀力的驱动响应

降雨侵蚀性计算的准确性高度依赖于所用降雨数据的特性[3],本研究利用校正后 ERA5-Land 再分

析数据集驱动RUSLE模型中的降雨侵蚀力R因子，从而优化了这一关键输入参数。研究结果表明，2001—2024年黄土高原降雨侵蚀的空间分布呈西北-东南递增梯度，符合观测降雨模式，与前人研究结果一致[20-21]。值得注意的是，月降雨侵蚀性表现出明显的单峰分布，主要集中在7—9月，夏季降雨侵蚀力R因子约占年降雨侵蚀力R因子的70%，这个结果与Cui Yongsheng等[22]研究结果相似。此外，在黄土高原降雨集中的月份，强降雨事件R95pTOT贡献了超过各月99%的侵蚀能量，极强降雨事件R99pTOT贡献了超过各月50%的侵蚀能量，这凸显了短时间高强度降雨在土壤侵蚀中的关键作用[23]。由此可以看出，黄土高原降雨侵蚀力具有显著的“少数强事件主导”特征，即区域侵蚀能量并非由全部降雨均匀贡献，而是高度集中于超过高分位阈值的强降雨和极强降雨过程。这类事件通常同时具有较大的降雨量，更高的降雨强度以及更强的径流触发能力，因而能够在短时间内释放更高的雨滴打击能和坡面侵蚀动力[24]。说明黄土高原夏季短时强降雨频发，侵蚀过程受极端事件主导的气候事实，这一结论在中国半湿润地区[4]到欧洲温带流域[2]的广泛区域得到证实，为后续针对性开展极端降雨下水土保持措施提供了数据支撑。

但需要指出的是，R95pTOT和R99pTOT对降雨侵蚀力的主导作用，既是黄土高原极端降雨驱动侵蚀演变的客观物理表现，也与指标定义方式及日尺度侵蚀力模型对大雨事件的计算敏感性有关。R95pTOT和R99pTOT分别表征湿日降雨中超过第95，99分位阈值部分的累积降雨量，本质上属于反映降雨分布尾部特征的极端降雨指标；与此同时，本文采用的日尺度R因子估算方法仅对日降雨量≥12 mm的降雨赋予侵蚀力，小于该阈值的降雨按0处理，这在一定程度上削弱了小雨和一般降雨对总侵蚀力的贡献，并进一步强化了强降雨及极端降雨的相对作用。因此，R95pTOT和R99pTOT的高贡献率可视为“区域侵蚀动力高度集中于降雨分布尾部”的综合体现，说明黄土高原侵蚀过程对极端降雨事件具有高度敏感性；同时，这一结果也在一定程度上受到百分位指标特征与R因子阈值型计算方法共同作用的影响。

3.4 黄土高原土壤侵蚀模拟

从模型适用范围看，RUSLE模拟结果更适用于以坡面水蚀为主、产沙过程与降雨侵蚀力联系较为直接的流域。在此类区域中，降雨、地形、土壤和植被因子对侵蚀模数的解释能力较强，因此模型能够较好反映侵蚀变化趋势，相关系数R和NSE系数均保持较高。相较之下，在存在明显沟蚀、重力侵蚀、淤地坝拦沙、人类工程调控或风水复合侵蚀的流域中，RUSLE的模拟能力明显下降。其原因在于RUSLE本质上是经验型坡面侵蚀模型，主要刻画土壤剥蚀过程，并不直接模拟沟道侵蚀、泥沙输移、库坝拦截以及风蚀等过程，因此当实测输沙量或换算侵蚀模数受到这些额外过程强烈影响时，模型结果就可能出现偏差，甚至导致NSE为负。例如，大宁、会宁等流域模拟效果较差，可能与丘陵沟壑区淤地坝建设后下游输沙过程被显著改变有关[25]；模拟侵蚀结果空间分布显示宁南与定西地区侵蚀强度最高，而传统意义上的泥沙集中来源区侵蚀模数却相对一般，这种差异可能源于RUSLE模型仅估算坡面侵蚀量，而未包含沟蚀及泥沙输移过程；此外，内蒙古十大孔兑地区以沙质土壤为主，入渗能力强，水蚀过程相对较弱，且风蚀在该区占重要地位，而RUSLE未考虑风蚀因素。这就导致模型结果与传统泥沙来源认知之间存在一定差异，这反映了侵蚀类型、输沙效率与模型结构之间的尺度差异。

模拟结果显示，2001—2024年黄土高原土壤侵蚀的时空演变呈现出显著的阶段性与空间分异特征，其本质上是降雨侵蚀力主导作用与生态恢复工程长期调控效应共同作用的结果。从气候驱动角度看，在半湿润向半干旱过渡带，降雨侵蚀力仍然是控制侵蚀空间格局的首要因子。这一格局与以往关于黄土高原水土流失空间分布的研究结论相符[26]，即东南部受夏季季风影响降雨集中，强度大，极端暴雨频发，易形成高侵蚀带，而西北部因降水稀少总体侵蚀背景值较低。然而，仅由R因子并不能完全解释侵蚀强度差异，例如西南部黄土高塬沟壑区在R因子相对较低的条件下仍表现出较高侵蚀速率，表明地形破碎度、坡耕地分布以及人为扰动在该区具有放大效应[27]。除降雨外，土壤侵蚀的空间异质性还受到C因子和P因子的显著调节。C因子在2001—2024年显著下降，这种趋势与1999年以来实施的退耕还林工程政策背景高度吻合[28-29]。植被恢复通过增加地表覆盖度、改善土壤结构与提高入渗能力，显著削弱了降雨动能对地表的直接打击，但在极端气候背景下，单纯依赖植被恢复难以完全抵御侵蚀风险，尤其是在坡度大，沟壑密集的丘陵沟壑区。农灌区和河谷平原区P因子较低，表明这些区域在土地利用格局和人为管理背景下具有相对较强的减蚀能力，这可能与梯田化改造、灌溉系统与人工防护林体系的综合效应有关[30-31]。但在强降雨背景下，工程措施的减

蚀效应存在阈值限制。当降雨侵蚀力超过一定强度时,工程与植被措施可能难以减弱R因子的冲击,这也解释了丘陵沟壑区和高塬沟壑区年际波动幅度显著大于其他分区的现象。前人研究表明,在黄土高原区域尺度土壤侵蚀时序变化中,R因子和C因子通常是更为活跃的动态驱动项。Jia Lu等[32]对黄土高原17个典型流域的分析表明,R因子是导致水蚀变化的重要动态因子,且泥沙变化的主控机制具有明显阶段性:1980年前R因子变化是重要影响因素,同时骨干坝发挥了显著拦沙作用;1980—1998年工程拦沙与植被增加共同影响泥沙变化;1999年后植被恢复成为泥沙进一步下降的主要因素。Ma Tianle等[33]在黄土高原纸坊沟流域85 a的研究也指出,近期土壤侵蚀动态主要受植被变化控制,2022年植被变化和梯田建设对侵蚀变化的贡献分别为86.10%和13.90%。这说明,在区域或较长时段尺度上,R因子和C因子往往更能表征侵蚀年际波动,而工程措施对应的P因子更多体现为特定建设阶段下的基础性减蚀作用。由于本研究未纳入2001—2024年梯田、淤地坝等工程措施的动态增加过程,模型对侵蚀强度下降速率的估计可能偏于保守,即实际减蚀效果可能优于本文模拟结果。

4　结　论

(1)原始ERA5-Land再分析数据对黄土高原年均降雨量存在显著系统性高估,模拟值较站点插值观测值高估约25.2%,且在黄土高塬沟壑区、河谷平原区和土石山区的高估现象尤为突出。

(2)分位数映射方法有效校正了ERA5-Land降雨数据的高估偏差,年降雨模拟的RMSE值降低72.1%,校正后各季节降雨偏差均控制在5%以内(除冬季外),空间相关系数均提升至0.93以上,RMSE降低均超过64%;其中,夏季强降雨事件的RMSE降低40.9%,显著改善了再分析数据对极端降雨事件的模拟能力。

(3)2001—2024年校正后ERA5-Land数据驱动的降雨侵蚀力与黄土高原气候特征高度吻合:夏季降雨占年降雨总量的1/2以上,对应降雨侵蚀力占年总量的70%以上;强降雨R95pTOT占各月月均降雨侵蚀力R因子的90%以上,在夏季达到99%,极强降雨R99pTOT占夏季月均R因子的50%以上,表明极端降雨是区域土壤侵蚀的核心气候驱动因子。

(4)2001—2024年黄土高原侵蚀变化呈现“气候主导、生态调控、极端事件触发波动”的复合机制特征。RUSLE模型模拟结果在大多数验证点显示出显著相关性,年均土壤侵蚀模数为14.44 t/(hm^2·a),长期趋势下降,空间差异持续存在,高侵蚀带稳定分布于丘陵沟壑区和高塬沟壑区,未来水土保持工作的重点仍应集中于地形破碎,降雨集中且人类活动强度较高的区域。

(5)本研究采用的“ERA5-Land校正+RUSLE模型”框架,为黄土高原大尺度土壤侵蚀评估提供连续降雨驱动数据支撑,并在区域尺度上较好地识别极端降雨影响下的侵蚀高风险区。同时,该方法为其他数据稀缺地区开展类似研究提供了可借鉴思路,但其适用性仍需在不同区域条件下进一步检验。

参考文献(References)

[1] Wen Xin, Zhen Lin. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review [J]. Environmental Development, 2020,34:100493.

[2] Zabaleta A, Meaurio M, Ruiz E, et al. Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, northern Spain [J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43(1): 235-245.

[3] 李慧娟,高建恩,张元星,等.延安极端降雨特性分析及对梯田侵蚀灾害影响[J].水土保持学报,2016,30(6):79-84.
Li Huijuan, Gao Jianen, Zhang Yuanxing, et al. Analysis of Yan'an extreme rainfall characteristics and impacts of erosion disasters on terraces [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(6):79-84.

[4] Wang Wenting, Yin Shuiqing, Xie Yun, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall [J]. Catena, 2016,141:56-65.

[5] Sakhraoui F, Abu Arra A, Şişman E. Assessing reanalysis ERA-5 LAND precipitation data for soil erosion modeling: Performance, challenges, and insights [J]. Earth Science Informatics, 2025,18(3):450.

[6] Guo Chunrui, Ning Ning, Guo Hao, et al. Does ERA5-land effectively capture extreme precipitation in the Yellow River basin [J]. Atmosphere, 2024,15(10):1254.

[7] 刘婷婷,朱秀芳,郭锐,等.ERA5再分析降水数据在中国的适用性分析[J].干旱区地理,2022,45(1):66-79.
Liu Tingting, Zhu Xiufang, Guo Rui, et al. Applicability of ERA5 reanalysis of precipitation data in China [J]. Arid Land Geography, 2022,45(1):66-79.

[8] Qian Lihui, Zhao Peng. Assessment of ERA5-Land reanalysis precipitation data in the Qilian Mountains of China [J]. Atmosphere, 2025,16(7):826.

[9] 朱丽,吕潇雨,郭浩,等.ERA5-Land降水产品在黄河流域干旱监测中的适用性研究[J].干旱气象,2023,41(5):677-687.

Zhu Li, Lyu Xiaoyu, Guo Hao, et al. Suitability study of ERA5-Land precipitation product for drought monitoring in the Yellow River basin [J]. Journal of Arid Meteorology, 2023,41(5):677-687.

[10] Sharifi E, Eitzinger J, Dorigo W. Performance of the state-of-the-art gridded precipitation products over mountainous terrain: A regional study over Austria [J]. Remote Sensing, 2019,11(17):2018.

[11] Jiao Donglai, Xu Nannan, Yang Fan, et al. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China [J]. Scientific Reports, 2021, 11:17956.

[12] Tani S, Gobiet A. Quantile mapping for improving precipitation extremes from regional climate models [J]. Journal of Agrometeorology, 2019,21(4):434-443.

[13] Liu Senfeng, Raghavan S V, Nguyen N S, et al. Improving the regional precipitation simulation corrected by satellite observation using quantile mapping [J]. Remote Sensing, 2025,17(10):1716.

[14] Raeesi M, Zolfaghari A A, Kaboli S H, et al. Using quantile mapping and random forest for bias-correction of high-resolution reanalysis precipitation data and CMIP6 climate projections over Iran [J]. International Journal of Climatology, 2024,44(12):4495-4514.

[15] Yang Xiaonan, Sun Wenyi, Li Pengfei, et al. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities [J]. Science of the Total Environment, 2018,642:591-600.

[16] Zhu Q, Yang Xihua, Ji Fei, et al. Extreme rainfall, rainfall erosivity, and hillslope erosion in Australian alpine region and their future changes [J]. International Journal of Climatology, 2020,40(2):1213-1227.

[17] Yang Xihua, Zhang Xiaoping, Lv Du, et al. Remote sensing estimation of the soil erosion cover-management factor for China's Loess Plateau [J]. Land Degradation & Development, 2020,31(15):1942-1955.

[18] 张洵.未来情景下黄土高原土壤侵蚀时空演变及水土保持价值评估[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2024.
Zhang Xun. Temporal and spatial evolution of soil erosion and evaluation of soil and water conservation value in the Loess Plateau under future scenarios [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.

[19] Ma Jiapei, Wang Genxu, Li Hongyi. A variance-upscaling quantile mapping method for gridded precipitation bias correction [J]. Journal of Hydrology, 2024, 632:130959.

[20] 谢乐,侯鹏,周涛,等.黄土高原降雨特征对降雨侵蚀力时空变化的影响[J].生态学报,2025,45(10):4940-4951.
Xie Le, Hou Peng, Zhou Tao, et al. The rainfall characteristics effect spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(10):4940-4951.

[21] 陈剑南,刘益麟,李朋飞,等.1901—2016年黄土高原降雨侵蚀力时空变化[J].水土保持研究,2022,29(4):39-46.
Chen Jiannan, Liu Yilin, Li Pengfei, et al. Spatiotemporal changes of rainfall erosivity on the Loess Plateau during 1901—2016 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):39-46.

[22] Cui Yongsheng, Pan Chengzhong, Liu Chunlei, et al. Spatiotemporal variation and tendency analysis on rainfall erosivity in the Loess Plateau of China [J]. Hydrology Research, 2020,51(5):1048-1062.

[23] 李澳,于志静,王德富,等.黄土高原地区水土流失对土地利用和降水变化的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):95-102.
Li Ao, Yu Zhijing, Wang Defu, et al. Response of soil and water loss to land use and precipitation changes on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):95-102.

[24] Li Pengfei, Chen Jiannan, Zhao Guangju, et al. Determining the drivers and rates of soil erosion on the Loess Plateau since 1901 [J]. Science of the Total Environment, 2022,823:153674.

[25] Zeng Yi, Jing Tongge, Xu Baodong, et al. Vectorized dataset of silted land formed by check dams on the Chinese Loess Plateau [J]. Scientific Data, 2024,11:348.

[26] 张建国,李晶晶,余红兵.黄河流域黄土高原地区水土流失动态变化及分布特征[J].水土保持研究,2025,32(4):110-116.
Zhang Jianguo, Li Jingjing, Yu Hongbing. Dynamic changes and distribution characteristics of soil and water loss in Loess Plateau area of Yellow River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):110-116.

[27] 蒋婷婷.黄土丘陵沟壑区延河流域土壤侵蚀时空变化与驱动因素研究[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2021.
Jiang Tingting. Spatial-temporal variation and driving factors of soil erosion in Yanhe River basin in loess hilly and gully region [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2021.

[28] Jiao Juying, Zhang Zhenguo, Bai Wenjuan, et al. Assessing the ecological success of restoration by afforestation on the Chinese Loess Plateau [J]. Restoration Ecology, 2012,20(2):240-249.

(下转第334页)