DOI: 10.20103/j.stxb.202410252608

李曼,何昊,吴东丽,余慧婕,赵琳,刘聪,李琪,胡正华.气候变化背景下黄土高原土壤侵蚀时空演变.生态学报,2025,45(16): - . Li M, He H, Wu D L, Yu H J, Zhao L, Liu C, Li Q, Hu Z H.The spatial-temporal evolution of soil erosion in the Loess Plateau under the context of climate change.Acta Ecologica Sinica,2025,45(16): - .

气候变化背景下黄土高原土壤侵蚀时空演变

李 曼1,何 吴1,吴东丽2,余慧婕1,赵 琳1,刘 聪2,李 琪1,胡正华1,*

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/生态与应用气象学院,南京 2100442 中国气象局气象探测中心,北京 100081

摘要:在气候变化背景下,模拟土壤侵蚀的时空演变特征并探讨其与气候因子之间的响应,对于应对气候变化和防灾减灾具有 重要意义。现有研究主要聚焦于气候变化、坡度及植被恢复等因素对黄土高原土壤侵蚀的影响,但较少同时考虑各驱动因子之 间的相互作用及其对土壤侵蚀的直接与间接影响。基于气象站点、土地利用/土地覆被和土壤质地等数据,采用 Theil-Sen Median 趋势和 Mann-Kendal 检验对气候因子的时空变化特征进行了分析,利用 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型模拟了 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年黄土高原土壤侵蚀的时空分布,并通过最优参数地理探测 器和偏最小二乘结构方程模型在考虑自然因子和植被因子的基础上,重点对气候因子对土壤侵蚀的影响强度和路径进行分析。 结果表明:气候因子时空变化具有阶段性和区域性,降水量在1990-2000年以-55.96 mm/10a的速率下降,而2000-2020年以 53.99 mm/10a 的速率上升;研究期内年降水量、降水强度指数、大雨日数、强降水量、平均气温和最低气温的增长率分别为 26.15 mm/10a、0.26 mm d⁻¹ 10a⁻¹、0.56 d/10a、15.21 mm/10a、0.32 ℃/10a 和 0.40 ℃/10a。从空间上看,1990—2000 年降水量减少区域 为 86.36%, 而 2000 年以后增加区域达 97.42%; 2000—2020 年,极端降水指标在整个研究区基本为增加; 气温上升区域主要分 布在东、西部,气候变化呈现明显的暖湿化趋势且降水的极端性增强。1990—2020年,黄土高原土壤侵蚀模数呈现先减少再增 加趋势,2020年土壤侵蚀量为2.19亿t。最优参数地理探测器分析显示,坡度、降水和植被覆盖是土壤侵蚀的主要驱动因素,其 中降水量对土壤侵蚀的解释力从 1990 年的 0.11 在 2020 年增至 0.18。结合偏最小二乘结构方程模型分析结果,温度主要通过 影响降水间接影响土壤侵蚀,降水和自然因子对土壤侵蚀有直接正贡献,而植被因子对土壤侵蚀有直接负贡献,但 2020 年比 2010 年降低 0.02。因此,在气候暖湿化和降水极端化趋势下,其对土壤侵蚀的影响不可忽视,在未来的土壤侵蚀防控和可持续 发展中,需将气候适应和区域发展相结合,以应对未来气候变化的挑战。

关键词:土壤侵蚀;InVEST模型;气候变化;最优参数地理探测器;偏最小二乘法结构方程模型

The spatial-temporal evolution of soil erosion in the Loess Plateau under the context of climate change

LI Man¹, HE Hao¹, WU Dongli², YU Huijie¹, ZHAO Lin¹, LIU Chong², LI Qi¹, HU Zhenghua^{1,*}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: In the context of climate change, modeling the spatiotemporal evolution of soil erosion and examining its responsiveness to climatic factors were essential for addressing climate change and improving disaster prevention and mitigation efforts. Existing studies primarily focused on the impacts of climate variability, slope, and vegetation restoration on soil erosion in the Loess Plateau. However, few studies simultaneously considered the interactions among these driving

收稿日期:2024-10-25; 网络出版日期:2025-00-00

基金项目:中国气象局气候变化专题项目(QBZ202309)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhhu@ nuist.edu.cn

factors and their direct and indirect impacts on soil erosion. This study used data from meteorological stations, land use/land cover, and soil texture to analyze the spatiotemporal characteristics of climatic factors using Theil-Sen Median trend analysis and Mann-Kendall tests. The InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) model was applied to simulate the spatial and temporal distribution of soil erosion in the Loess Plateau for the years 1990, 2000, 2010, and 2020. Additionally, the optimal parameters-based geographical detector model and the partial least squares structural equation modeling were used to assess the intensity and pathways through which climatic factors influence soil erosion, while considering natural and vegetation factors. The results showed that climatic factors exhibited both temporal and spatial heterogeneity: precipitation decreased at a rate of -55.96 mm per decade from 1990 to 2000 but increased at a rate of 53.99 mm per decade from 2000 to 2020. During the study period, annual precipitation, precipitation intensity index, number of heavy rainfall days, extreme precipitation events, mean temperature, and minimum temperature increased at rates of 26.15 mm per decade, 0.26 mm per day per decade, 0.56 days per decade, 15.21 mm per decade, 0.32 °C per decade, and 0.40 °C per decade, respectively. Spatially, precipitation declined in 86.36% of the study area between 1990 and 2000, whereas it increased in 97.42% of the region between 2000 and 2020. From 2000 to 2020, extreme precipitation indicators generally rose across the entire study area. Temperature increases were most prominent in the eastern and western regions, reflecting a clear trend of warming and moistening, accompanied by intensified precipitation extremes. From 1990 to 2020, the soil erosion modulus in the Loess Plateau initially first declined and then increased, with soil erosion reaching 219 million tons in 2020. The optimal parameters-based geographical detector analysis revealed that slope, precipitation, and vegetation cover are the primary drivers of soil erosion, with the explanatory power of precipitation increasing from 0.11 in 1990 to 0.18 in 2020. The partial least squares structural equation modeling analysis further indicated that temperature primarily influenced soil erosion indirectly by affecting precipitation. Both precipitation and natural factors had direct positive contributions to soil erosion, whereas vegetation factors had a direct negative impact, although this effect decreased by 0.02 from 2010 to 2020. These findings highlight the significant impact of warming-wetting trends and the intensification of extreme precipitation events on soil erosion. Therefore, future soil erosion prevention and sustainable development efforts should integrate climate adaptation strategies with regional development plans to effectively address the challenges posed by ongoing climate change.

Key Words: soil erosion; InVEST model; climate change; optimal parameters-based geographical detector model; partial least squares structural equation modeling

土壤侵蚀是全球范围内面积最大、最广泛的生态环境问题之一^[1-2]。2020年中国土壤侵蚀面积达269万km²,约占全国陆地面积的28.2%^[3]。土壤侵蚀会导致土壤生产力下降、养分流失和河道淤积,对生态系统功能和社会经济发展产生一定的负面影响^[4-5]。气候变化(如气候变暖、极端天气)可能会使土壤侵蚀程度和时空分布特征发生变化,在未来气候情景下,土壤侵蚀问题将进一步加剧,预计到21世纪末全球土壤侵蚀量将增加14.2%^[6-7]。定量评估土壤侵蚀演变特征和其受气候因子影响的程度,有助于加深气候变化背景下土壤退化风险的认识,为区域可持续发展提供指导,是当前研究的重点和热点。

模型模拟法是土壤侵蚀定量评估的有效方法,目前常用的土壤侵蚀经验模型和物理过程模型主要包括修正的通用土壤流失方程(RUSLE)^[1]、水蚀预报模型^[8]以及生态系统服务评估与权衡模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs,InVEST)^[3]等。相对而言,InVEST 模型的优势在于操作简便且具有良好的空间可视化效果,能够直观地展示不同区域的土壤侵蚀强度及其时空分布特征;此外,其对流域的土壤侵蚀评估具有更高的准确性^[9]。Qiao 等利用 InVEST 模型定量评估中国北方岩石山区沂河流域 1956—2020 年的年平均土壤侵蚀量为 38.21 t hm⁻² a^{-1[3]}。He 等研究表明,2000—2020 年赣江流域土壤侵蚀和泥沙输出量均呈先下降后上升的趋势,降水抑制了高植被覆盖对土壤侵蚀的缓解作用^[10]。气候变化改变了降水和温度的时

杂机制具有重要意义。

土壤侵蚀受坡度、植被覆盖和气候因子等多重因素的影响,当前大部分研究采用相关性分析、主成分分析 等方法来探讨各因子对土壤侵蚀的作用,但对于多变量空间数据的分异性以及潜变量之间的相互影响和对因 变量的间接影响的研究较为有限^[15-17]。最优参数地理探测器在传统地理探测器的基础上,通过优化空间尺 度和离散化参数,基于自变量和因变量之间的空间分异性,对驱动因子解释力强度进行分析^[18]。此外,偏最 小二乘法结构方程模型结合因子分析和多变量回归分析,能够消除其他因素的影响来捕获两个因素的相关 性,并通过量化直接和间接影响来估计驱动因素的总影响^[19]。因此,将最优参数地理探测器和偏最小二乘法 结构方程模型结合有助于深入地揭示气候变化背景下土壤侵蚀变化的复杂机制。

黄土高原由于其独特的地理位置和地形地貌,土质疏松且抗侵蚀性差,导致黄河流域 90%的泥沙负荷来 自于该区域的中游^[20],是全球土壤侵蚀最严重的地区之一,也是我国生态保护与恢复的重点区域^[21]。通过 营造梯田、坡面治理和退耕还林等水土保持措施,黄土高原的土壤侵蚀得到极大改善^[22]。然而,气候变化对 土壤侵蚀的影响仍不可忽视^[23]。因此,本研究通过 Theil—Sen Median 趋势分析和 Mann—Kendall 趋势检验 对气候变化趋势进行时空分析,利用 InVEST 模型评估了黄土高原 1990、2000、2010 和 2020 年土壤侵蚀情况, 并采用最优参数地理探测器和偏最小二乘法结构方程模型重点分析了不同年份气候因子对土壤侵蚀影响的 强度和途径,旨在为揭示土壤侵蚀机理和防灾减灾提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地处黄河流域中游(100°54′—114°33′E, 33°43′—41°16′N),面积约 64 万 km²,海拔 6—5218 m, 地势自西北向东南呈波状下降。存在许多石质山地和 厚层黄土覆盖区,土质疏松,抗侵蚀能力差,因此在长期 水流侵蚀下,逐渐形成了千沟万壑的特殊地貌,是该地 区的典型特征(图1)。研究区以大陆型干旱半干旱气 候为主,位于东南季风、西南季风和高原季风的相互作 用带,气温日较差大,降水时空分布不均匀,1990—2020 年年平均降水量为 427.7 mm,主要集中在 7—9 月。约 200 条河流发源于黄土高原,多年平均径流输沙量达 16 亿 t,占世界河流泥沙总量的 6%。



1.2 数据来源及预处理

黄土高原土地利用/土地覆被(LULC)数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www. resdc.cn/data),空间分辨率为30m,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个一级地类;高程 (DEM)数据来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn),空间分辨率为30m;1990—2020年黄土高原 70个气象站点的逐日气象数据来源于中国气象数据网(https://data.cma.cn),年降水量、平均气温和最低气 温的栅格数据经过异常值剔除和缺测值线性补差后,利用克里金插值法获得;1990—2020年水文站输沙量观 测数据来源于水利部黄河水利委员会(http://www.yrcc.gov.cn);归一化植被指数(NDVI)来源于中国科学院 资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/data);保持措施因子来源于科学数据银行(https://cstr.cn/ 31253.11.sciencedb.07135); 土壤质地数据来源于世界土壤数据库(https://www.fao.org/soils-portal/soilsurvey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en),空间分辨率为30弧秒。为保证数据一 致性,将以上数据的空间分辨率统一为1 km,坐标系为GCS_WGS_1984_Albers,并保持行列数一致。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤侵蚀计算

利用 InVEST 模型对黄土高原土壤侵蚀进行量化和可视化^[3]。计算公式为:

$$RUSLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i$$
(1)

式中, $RUSLE_i$ 为栅格单元 i 的实际土壤侵蚀总量(t km⁻² a⁻¹); R_i 为降雨侵蚀性因子(MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹); K_i 为 土壤可蚀性因子(t hm² h hm⁻² MJ⁻¹ mm⁻¹); LS_i 为坡度坡长因子; C_i 为植被覆盖和作物管理因子; P_i 为水土保持 措施因子。

降雨侵蚀性是表征降水的强度和持续时间的因子,与月和年尺度模型相比,使用日降雨数据的模型具有 更高的准确度^[24],计算公式为:

$$R_i = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^{\beta}$$
⁽²⁾

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}}$$
(3)

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

$$R_{4\mp} = \sum_{i=1}^{24} R_i \tag{5}$$

式中, R_i 为某半月的降雨侵蚀力值(MJ mm hm⁻¹ h⁻¹);*m* 为半月天数,半月时段划分以每月前 15 天作为第一 个半月时段,剩下部分作为另一个半月时段,全年共分为 24 个时段; P_k 为半月内第 *k* 天侵蚀性降雨的雨量 (mm),其中 12mm 被视为侵蚀性降雨的阈值,超过 12mm 则以当日降水量计入,否则计为 0; β 和 α 为模型参 数, β 范围为 1—4, α 范围为 0—5; P_{d12} 和 P_{y12} 分别为日降水量超过 12mm 的多年平均日雨量和年雨量; R_{q} 为年 降雨侵蚀力值(MJ mm hm⁻¹ h⁻¹)。

土壤可蚀性因子反映了土壤对外部侵蚀和迁移的敏感性,本研究采用 Williams 等的侵蚀/生产力模型 (EPIC)方程进行参数计算^[25],计算公式为:

$$K_{\rm i} = 0.1317 \times \left[0.2 + 0.3 \times e^{-0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100}\right)}\right] \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}}\right)^{0.3} \times \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + e^{3.72 - 2.95C}}\right) \times \left(1.0 - \frac{0.7 \text{SNI}}{\text{SNI} + e^{-5.51 + 22.9 \text{SNI}}}\right)$$
(6)

$$SNI = 1 - \frac{SAN}{100}$$
(7)

式中, K_i 为栅格单元*i*的土壤可蚀性因子(t hm² h hm⁻² MJ⁻¹ mm⁻¹);SAN、SIL、CLA 和 *C* 分别为砂粒、粉粒、黏 粒和有机碳含量(%);0.1317 为单位换算系数。

植被覆盖和作物管理因子指在特定条件下,植被覆盖或田间管理土地的土壤流失量与适时翻耕、连续休耕土地的土壤流失量之比。本研究使用基于中国国家土壤侵蚀调查相应采样单元的实地测量因子数据与归 一化植被指数之间建立的回归方程进行计算^[26-27],计算公式为:

$$C = \begin{cases} 1.2899e^{-6.343NDVI} & (\text{林u}, \bar{\varphi} \text{tu}) \\ -0.143In NDVI+0.2525 & (\text{耕u}) \end{cases}$$
(8)

式中,C为植被覆盖和作物管理因子;NDVI为归一化植被指数。

保持措施因子(*P_i*)指有水土保持措施的土壤流失与没有水土保持措施的顺坡耕作地土壤流失之比,范围为 0—1,各土地利用类型的 *P* 因子值在 ArcGIS 10.8 中读取(表1)。坡度坡长因子*LS_i*反映了地形对土壤侵蚀的影响,其计算使用 Desmet 和 Govers 的二维地表方法,具体公式见文献^[28]。

	Table 1 Tal	ole of C and P factor	s for each land use ty	pe	
土地利用类型		P 因子			
Land use type	1990年	2000 年	2010 年	2020 年	P factors
耕地 Cropland	0.42	0.41	0.38	0.37	0.79
林地 Forest	0.10	0.12	0.11	0.10	1
草地 Grassland	0.24	0.30	0.20	0.20	0.81
水域 Water	0	0	0	0	0
建设用地 Construction land	0	0	0	0	0
未利用地 Unused land	1	1	1	1	1

表 1 各土地利用类型 *C* 和 *P* 因子表

1.3.2 土壤侵蚀分级

根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007),将黄土高原土壤侵蚀强度分为六个等级,分别为平均土壤侵蚀模数<1000 t km⁻² a⁻¹(微度),1000—2500 t km⁻² a⁻¹(轻度),2500—5000 t km⁻² a⁻¹(中度),5000—8000 t km⁻² a⁻¹(强烈),8000—15000 t km⁻² a⁻¹(极强烈),>15000 t km⁻² a⁻¹(剧烈)。

1.3.3 Theil-Sen Median(Sen's)斜率和 Mann-Kendall(MK)趋势检验

Theil-Sen Median 斜率和 Mann-Kendal 检验两种非参数统计方法相结合,是判断长时间序列时间和空间变 化趋势的重要方法。其具有无需数据服从正态分布,并且不受缺失值和异常值影响的优点,被广泛应用于气 象、遥感等领域^[29]。因此,本研究采用 Sen's 和 MK 方法分析黄土高原气候要素的空间趋势变化特征,并用 Sen's 斜率分析要素的年际变化趋势。其中 Sen's 趋势分析通过计算所有可能的两个时间点之间的斜率,并 使用中位数作为最终斜率估计,能有效避免极值对结果的影响,计算公式为:

$$\beta = \operatorname{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \tag{9}$$

式中, Median 为取中值; β 为变化趋势; x 为相应的气象要素, $i \approx j$ 为年份, 1990 $\leq i \leq j \leq 2020$ 。若 $\beta > 0$ 则表明 气候因子为增加趋势, 反之为减少。MK 检验的具体公式见文献^[30]。在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下, 当 Z 的绝对 值大于 1.65、1.96 和 2.58 时分别表示通过了 90%、95% 和 99% 的显著性检验, 趋势显著性具体判别方法如 表 2。

Table 2 The trend categories of Sen's slope and the Mann-Kendall tests							
β	Ζ	趋势类别 Trend category	趋势特征 Trend feature	β	Ζ	趋势类别 Trend category	趋势特征 Trend feature
β>0	2.58 <z< td=""><td>4</td><td>极显著增加</td><td>β<0</td><td><i>Z</i>≤1.65</td><td>-1</td><td>不显著减少</td></z<>	4	极显著增加	β<0	<i>Z</i> ≤1.65	-1	不显著减少
	1.96 <z≤2.58< td=""><td>3</td><td>显著增加</td><td></td><td>$1.65 < Z \le 1.96$</td><td>-2</td><td>微显著减少</td></z≤2.58<>	3	显著增加		$1.65 < Z \le 1.96$	-2	微显著减少
	$1.65 < Z \le 1.96$	2	微显著增加		$1.96 < Z \le 2.58$	-3	显著减少
	<i>Z</i> ≤1.65	1	不显著增加		2.58 <z< td=""><td>-4</td><td>极显著减少</td></z<>	-4	极显著减少
$\beta = 0$	Ζ	0	无变化				

表 2 Sen's 斜率和 Mann-Kendall 检验趋势类别

1.3.4 最优参数地理探测器

本研究选取年平均气温、最低气温、降水量、降雨侵蚀力、降水强度指数(日降水量≥1 mm 的降水总量与 日数之比)、大雨日数(日降水量≥20 mm 的日数)、强降水量(日降水量>95%分位值的年降水总量)、归一化 植被指数和坡度9个因子,对黄土高原 1990、2000、2010 和 2020 年土壤侵蚀的空间分异性进行单因子探测。 其中降水强度指数、大雨日数和强降水量为极端气候指数,在 R 4.3.2 中利用 RClimDex 模型计算得到,OPGD 利用"GD"包进行分析。

1.3.5 偏最小二乘法结构方程模型

偏最小二乘法结构化方程模型能准确的识别各因子之间的复杂关系,分别探讨 1990、2000、2010 和 2020

年影响土壤侵蚀的因子及其相互作用^[31]。该模型用测量模型中的因子分析来解释潜变量和测量变量的关系,用结构模型中的路径图来显示潜变量的关系。本研究中自然因子、温度、降雨和植被因子作为潜变量,经过多次的拟合分析和调试,将潜变量的观测变量分别设为坡度,年平均气温和最低气温,年平均降水量、降雨 侵蚀力、降水强度指数、大雨日数和强降水量,归一化植被指数。最后,使用拟合优度指数(GoF)、载荷 (Loading)和 P 值对偏最小二乘法结构化方程模型进行精度评估。其中 GoF 为 0.1—0.25 是弱拟合,0.25—0. 36 是中等拟合,≥0.36 为强拟合^[31];Loading 的阈值为 0.7;P 值<0.05,则认为影响显著^[32]。在模型中两个变量之间的通径系数表示直接效应,而间接效应为沿着相关路径的通径系数的乘积,总效应是直接效应和间接 效应的总和,用来描述变量之间的总体关系。模型在 R 4.3.2 中利用"plspm"包分析。

2 结果与分析

2.1 气候因子的时空变化特征

2.1.1 气候因子的时间变化

黄土高原 1990—2020 年气候因子年际变化趋势如图 2 所示,将研究时段分为 1990—2000 年和 2000—2020 年两个时期,降水量在第一个时期呈现明显的下降趋势,下降速率为-55.96 mm/10a,而第二个时期以 53.99 mm/10a 的增长速率上升;大雨日数也呈现先减再增的趋势,第一个时期以-0.34 d/10a 的速率下降,第 二个时期以 1.01 d/10a 的速率上升;降水强度指数和强降水量均呈现第二个时期增长速度比第一个时期快的 特征;平均气温和最低气温在两个时期均呈现上升趋势。研究区 31 年间年降水量、降水强度指数、大雨日数、





Fig.2 Interannual variations of climatic factors in the Loess Plateau from 1990 to 2020

强降水量、平均气温和最低气温均呈波动上升趋势,增长率分别为 26.15 mm/10a、0.26 mm d⁻¹ 10a⁻¹、0.56 d/ 10a、15.21 mm/10a、0.32 ℃/10a 和 0.40 ℃/10a。综上,黄土高原在 1990—2000 年气候为暖干化趋势,而 2000—2020 年气候变化转为暖湿化趋势,且降水的极端性增强。

2.1.2 气候因子的空间变化

结合 Sen's 斜率和 MK 趋势检验,可以有效揭示黄土高原气象要素变化趋势的空间分布特征。在 1990—2000 年期间,降水量在大部分地区呈现减少趋势,尤其是在中部地区,显现出显著和极显著的减少区域;大雨日数和强降水量与降水量趋势相似,而降水强度指数在中东部地区出现显著增加区;平均气温和最低气温均表现出上升趋势(图 3)。在 2000—2020 年期间,降水量总体呈增加趋势,东北部地区极显著增加,西南部高海拔地区也显示出显著的增加趋势;三个极端降水指标也均呈现增加趋势,中部和东部地区显著增加和极显著增加;其中气温在东部和西部区域均有上升,但北部和中部地区的平均气温出现下降趋势(图 4)。





根据表3统计各气候因子在空间上变化趋势的面积比例可知,1990—2000年期间,黄土高原86.36%的地 区降水量呈现减少趋势,降水量增加的面积仅占13.64%。然而,2000年后,降水量增加的区域面积比例显著 上升,达到97.42%,其中2.01%的区域呈现极显著增加趋势。降水强度指数两个时期相比,第二个时期增加 区域更大,且显著和极显著增加在第二个时期达到16.17%;大雨日数和强降水量在第二个时期增加区域面积 百分比分别达到93.44%和95.01%。相比之下,平均气温在第二个时期的增加区域总面积减少至83.96%,但 极显著和显著增加区域的比例有所提升,表明虽然上升趋势持续,但增幅有所缓和。最低气温在第二个时期 的增加趋势更加明显,极显著增加区域达到15.62%。综上所述,黄土高原气候因子的变化具有区域性和阶段 性,总体呈现温度升高,降水增加,降水极端性增强的趋势。

2.2 土壤侵蚀强度时空变化特征

1990-2020年土壤侵蚀能力从西北向东南增加,主要以微度、轻度和中度侵蚀为主,极强烈和剧烈侵蚀





的主要分布在东南部的渭河和汾河流域,2010年土壤侵蚀模数为 30.99 t/km²,土壤侵蚀量减少至 1.99 亿 t, 而 2020年土壤侵蚀量略有上升,为 2.19 亿 t(图 5)。由表 4 可知,在 1990、2000 和 2010 年强烈、极强烈和剧 烈侵蚀所占面积减少,2020年剧烈侵蚀面积为 4.38%。

Table 3 Spatial variation trends of climatic factors							
卢尼国乙	面积百分比 Area percentage/%						
气侠因于 Climatia fastor	时 期 Poriod		无变化	减少			
Climatic factor	1 enou	Increase	Stable	Decrease			
降水量	1990—2000年	0.02*,13.61	0	0.09 *** ,2.42 ** ,6.21 * ,77.64			
Precipitation	2000—2020年	2.01 *** ,15.02 ** ,15.58 * ,64.82	0	2.58			
降水强度指数	1990—2000年	1.34 ** ,2.97 * ,70.15	0	0.03 * ,25.52			
Simple daily intensity index	2000—2020年	2.31 *** ,13.85 ** ,10.96 * ,66.78	0	6.10			
大雨日数	1990—2000年	0.02*,36.13	0	0.01 *** ,3.08 ** ,3.52 * ,57.26			
Very heavy precipitation days	2000—2020年	2.58 *** ,11.72 ** ,13.48 * ,65.65	5.04	1.52			
强降水量	1990—2000年	1.90 * ,47.82	0	0.75 * ,49.52			
Very wet day precipitation	2000—2020年	0.03 *** ,8.05 ** ,15.80 * ,71.13	4.18	0.82			
平均气温	1990—2000年	8.24 ** ,25.07 * ,66.62	0	0.06			
Average temperature	2000—2020年	7.02*** ,12.84** ,9.38* ,54.73	0	0.18 * ,15.86			
最低气温	1990—2000年	4.40 ** ,15.96 * ,65.02	14.60	0.02			
Minimum temperature	2000—2020年	15.62 *** ,21.96 ** ,6.22 * ,24.80	7.81	1.20 *** ,2.34 ** ,3.06 * ,17.00			

表 3 气候因子空间变化趋势

面积百分比一栏的数字分别为 1990—2000 年和 2000—2020 年九个趋势类别的面积占比;其中 *** 代表极显著; ** 代表显著; *代表微显著;无代表不显著





Fig.5 Spatial distribution of soil erosion intensity from 1990 to 2020

Table 4 Changes in son crosson intensity revers in the Lociss Frateau from 1770 to 2020								
上撞得她强度	1990年		2000 年		2010 年		2020 年	
Soil erosion intensity	面积 Area/	百分比 Percentage/%	面积 Area/	百分比 Percentage/%	面积 Area/ ×10 ⁵ km ²	百分比 Percentage/%	面积 Area/	百分比 Percentage/%
微度 Weak	2.85	44.18	3.14	48.67	3.17	49.13	3.02	46.88
轻度 Slight	1.37	21.22	1.25	19.42	1.25	19.39	1.25	19.33
中度 Moderate	1.00	15.57	0.92	14.32	0.93	14.48	0.90	13.99
强烈 Intensive	0.55	8.51	0.50	7.74	0.46	7.20	0.54	8.41
极强烈 Very intensive	0.46	7.13	0.41	6.38	0.40	6.23	0.45	7.01
剧烈 Severe	0.22	3.39	0.22	3.47	0.23	3.57	0.28	4.38

表 4 1990—2020 年黄土高原土壤侵蚀强度等级变化 Table 4 Changes in soil arcsion intensity levels in the Lasse Plateau from 1990 to 2020

2.3 土壤侵蚀驱动因子的影响强度和途径

不同时期各驱动因子对土壤侵蚀的影响程度和方向存在差异,最优参数地理探测器结果显示(图6),坡度对土壤侵蚀的解释力最强,q值范围为0.50-0.54,在2000年达到最大值后下降,2020年上升;NDVI的解释力先减小后增加最后保持稳定;与降水相关的驱动因子均呈现先增再减再增的变化趋势,在2020年达到最大值;而温度相关的因子在各年份解释力较为平稳。

利用偏最小二乘法结构方程模型对土壤侵蚀影响因子的直接和间接作用进行分离和解耦。结合图 7 和 表 5 可知,自然因子中潜在变量坡度对土壤侵蚀的影响最大,降水体现为正效应,植被因子体现为负效应,温 度主要通过影响降水间接影响土壤侵蚀。1990年,自然因子对土壤侵蚀的直接影响最大,路径系数为 0.77, 温度通过间接途径影响土壤侵蚀,降水对其的影响存在直接和间接影响,而植被对土壤侵蚀的影响为直接影 响,路径系数为-0.17;2000年,自然因子、植被因子、温度和降水对土壤侵蚀的影响与 1990年较接近;2010 年,自然因子对土壤侵蚀的路径系数减少,与 2000年相比下降 0.05,降水的直接和间接影响均呈现上升趋势, 其中直接影响为 0.38,间接影响为-0.13,同时植被因子对其的抑制作用增强,路径系数达到-0.25;2020年, 自然因子对土壤侵蚀的影响进一步下降,植被覆盖的抑制作用减弱,降水的影响不变。

总体来看,坡度为土壤侵蚀的主导因子,体现出先升后降的趋势;温度主要通过影响降水和植被覆盖间接 的影响土壤侵蚀,且较为稳定;"退耕还林"政策下,植被覆盖面积增加能有效抑制土壤侵蚀,尤其在 2010 年 最为明显;而气候变化暖干化向暖湿化转变的背景下,降水对土壤侵蚀的影响逐渐增强然后保持稳定。

3 讨论

3.1 InVEST 模型精度验证

利用 InVEST 模型得到的土壤侵蚀量空间分布特征与多项研究结果一致,均呈现"东南高,西北低"的特点^[26,33];1990—2020 年土壤侵蚀趋势变化,与 Li 等的研究结果一致^[27]。此外,分别利用无定河、泾河、延河





Fig.6 The single factor detection of the effects of various driving factors on soil erosion in different years Slope:坡度;*Ri*:降雨侵蚀力;Pre:降水;SDII:降水强度指数;NDVI:归一化植被指数;R95P:强降水量;Tmin:最低气温;R20mm;大雨日数; Tmean:平均气温,所有因子 *P*≤0.01

	Table 5 Direct, indirect, and to	tal effects of latent variables of	n soil erosion in different ye	ears
年份	关系	直接影响	间接影响	总影响
Year	Relation	Direct effect	Indirect effect	Total effect
1990年	自然因子-土壤侵蚀	0.77	-0.03	0.72
	温度-土壤侵蚀	0.08	0.08	0.16
	降水-土壤侵蚀	0.26	-0.07	0.19
	植被因子-土壤侵蚀	-0.17	0.00	-0.17
2000 年	自然因子-土壤侵蚀	0.73	-0.02	0.75
	温度-土壤侵蚀	0.06	0.10	0.16
	降水-土壤侵蚀	0.29	-0.09	0.20
	植被因子-土壤侵蚀	-0.16	0.00	-0.16
2010年	自然因子-土壤侵蚀	0.75	-0.05	0.70
	温度-土壤侵蚀	0.07	0.10	0.17
	降水-土壤侵蚀	0.38	-0.13	0.25
	植被因子-土壤侵蚀	-0.25	0.00	-0.25
2020年	自然因子-土壤侵蚀	0.71	-0.02	0.69
	温度-土壤侵蚀	0.07	0.09	0.16
	降水-土壤侵蚀	0.38	-0.13	0.25
	植被因子-土壤侵蚀	-0.23	0.00	-0.23

衣5 个问并仍消任支重对上壤侵蚀的直接、问按种态影响	表 5	不同年份潜在变量对土壤侵蚀的直接、间接和总影响
----------------------------	-----	-------------------------

和北洛河流域出口的白家川、张家山、甘谷驿和状头水文站分别在 1990、2000、2010 和 2020 年测得的输沙量, 对模型的模拟结果进行验证,模拟值与实测值具有显著相关性,*R*²和 NSE 分别为 0.69 和 0.81(图 8)。综上所述,本研究基于 InVEST 模型的土壤侵蚀估算结果具备较高的可靠性。



http://www.ecologica.cn

3.2 土壤侵蚀时空变化成因分析

黄土高原地区 1990 年至 2020 年间土壤侵蚀呈现 出先减少后增加的时空变化趋势,主要原因包括自然环 境和人类活动两个方面。时间维度上,1990 年以来,土 壤侵蚀的减少与一系列生态修复和水土保持工程的实 施密不可分:自 20 世纪 50 年代起,黄土高原地区先后 推行了三北防护林、退耕还林还草等工程,显著提升了 区域植被覆盖率,有效抑制了土壤侵蚀^[22,34-35]。然而, 随着气候变化的加剧,特别是降水量的上升,2020 年一 些地区的土壤侵蚀出现了一定的增加趋势。气候变化 引起极端降水事件多发、频发,尤其是夏季的短时强降 水现象尤为突出,在 1990 至 2000 年期间,黄土高原降 水量和大雨日数分别以-55.96 mm/10a 和-0.34 d/10a 的速率下降,2000 年后以 53.99 mm/10a 和 1.01 d/10a



的速率上升,但过强的降雨使得植被在土壤侵蚀防治中的效用减弱,尤其在暴雨和大暴雨下,侵蚀强度仍然较 大^[36-37]。从空间维度来看,黄土高原土壤侵蚀较强的区域主要分布于西部陇中高原和东南部盆地等低海拔 地区附近的沟壑区,而北部沙漠和河套平原土壤侵蚀微小。将土壤侵蚀的空间分布图与高程图对比可知,土 壤侵蚀强度大的区域一般位于海拔高或坡度大的地区,这种地形条件下,降水后地表径流更容易形成,水流对 土壤颗粒的冲刷和搬运能力更强,形成了典型的水土流失高发带^[38]。另一方面,结合气候变化空间趋势分 析,陇中高原地区降水量呈现增加趋势,而北部沙漠、河套平原以及东部低海拔地区降水量减少,降水量的增 多,特别是极端降水的多发,引起急剧地表径流加速了土壤颗粒的流失,进一步加剧了侵蚀的强度和范围^[27]。 综合来看,地形坡度和降水强度的共同作用,使得这些区域成为水土流失的重点治理对象。

总体来看,黄土高原土壤侵蚀的时空演变不仅与植被恢复和水土保持等人为干预有关,气候变化引起的 降水时空分布变化可能逐渐更为关键影响因素。因此,未来的土壤侵蚀防治工作必须综合考虑气候变化下降 水、温度和极端天气事件的影响,以制定更为准确的应对策略。

3.3 气候暖湿化变化趋势对土壤侵蚀的影响

2014—2023 年全球平均气温比 1850—1900 年高(1.20±0.12)℃^[39],气候变暖导致极端降水事件加 剧^[40],全球大部分地区极端降水的频率和强度增高,近几十年来区域极端降水也呈现增加趋势^[41]。黄土高 原气候暖湿化趋势是全球气候变化的区域表现,该地区主要受东亚夏季风和中纬度西风的控制,气候变暖后, 东亚夏季风减弱,蒙古反气旋环流异常,偏东风路径下水汽输送明显增强,以及西风带北移,更多暖湿水汽进 人黄土高原,为降水事件发生提供了有利条件^[42]。降水量是影响土壤侵蚀最主要的气候因子,与土壤侵蚀呈 现极显著正相关。通过查阅 2010 年和 2020 年中国气候概况和天气气候事件发现,2010 年黄土高原多个站 点日降水量突破历史极值,暴雨日数较常年偏多,其中 8 月 7 日,甘肃省甘南州出现局地短时强降水,引发舟 曲县的特大山洪泥石流灾害;2020 年,黄河流域夏季降水量为 1961 年以来同期最多^[43-44],一次大暴雨形成 的强烈地表径流,配合黄土高原土壤结构疏松的特点,产生的土壤侵蚀量可能占全年侵蚀量的 40%到 90%, 是造成后期部分地区土壤侵蚀增加的重要原因^[27,45-46]。同时气温的上升还可通过促进植被生长间接影响土 壤侵蚀,植被根系有助于固定土壤,减少裸露面积,减弱水蚀和风蚀的直接侵蚀作用^[47]。综上所述,在暖湿化 趋势下,特别是降水模式的极端化,可能会导致某些地区的土壤侵蚀进一步加剧^[27,46,48]。

3.4 在气候变化背景下黄土高原土壤侵蚀同时受到多重因素的叠加影响且具有阶段性特征

黄土高原土壤侵蚀受到多重因素的共同作用,影响强度在不同时期展现出不同的特征。1990年,土壤侵 蚀主要由自然因子坡度驱动,降水量相对较低,极端降水次数和强度弱,植被覆盖度不高,抑制作用不明显; 2000年,退耕还林等人类活动使得植被覆盖范围在局部区域逐渐上升,但还未达到最优状态,对土壤侵蚀的抑制作用有限^[49],但降水量低,土壤侵蚀强度较低;2010年,黄土高原生态修复取得显著成效,植被能通过降低土壤颗粒间的净排斥力,提高土壤团聚体的稳定性和抗侵蚀性,进而减少侵蚀^[50],由于植被覆盖面积显著增加^[24],对土壤侵蚀的负贡献提升至-0.25,但同时降雨量增多,极端降水事件的频率和强度增加,使降水在土壤侵蚀中的直接影响显著上升,而植被覆盖对土壤侵蚀的负贡献在很大程度上抵消了降水增加和极端化的正贡献,使得流域输沙量得到有效控制^[6,31];2020年,极端气候特征更加突出,降水量和大雨日数对土壤侵蚀的解释力增至 0.18,大范围的植被建设使整体侵蚀状况较 1990年明显改善,但仍有局部地区土壤侵蚀强度增加,这可能与频繁的降雨事件导致土壤含水量高、土壤饱和,在短时间内形成高强度径流,突破了植被的稳固阈值,导致土壤被集中冲蚀有关^[51],尽管在其他地方植被依旧有效抑制侵蚀,但综合到模型层面负向系数呈现出略减 0.02。综合来看,植被恢复对土壤侵蚀的抑制作用在极端气候事件趋强的背景下,仍然展现出较好的效果。

3.5 土壤侵蚀治理的建议

1990—2020年期间,黄土高原气候经历了暖干化向暖湿化的转变,土壤侵蚀防治也经历了从梯田营造、 淤地坝修建到退耕还林还草与治沟造地相结合的综合治理^[22, 52]。在未来气候暖湿化持续和极端天气事件增 多的态势下,从以下几个方面提出土壤侵蚀治理建议:一是对已建成的水土保持工程措施进行维护和管理,新 建措施需多考虑对极端降水应对能力的提升^[22];二是继续加大水土保持和生态工程建设,提高植被覆盖度, 但同时需要仔细评估水—气候—植被相互作用的基础上选择适宜的植被,建立一个可持续的多年生植被生态 系统,在减缓土壤侵蚀的同时尽量减少水的消耗^[53]。黄土高原地区需要构建综合的生态治理体系,将水土保 持、气候适应与区域发展相结合,形成长效机制,以应对全球气候变化的挑战,并为其他类似的问题提供经验 借鉴。

3.6 局限性与展望

InVEST 模型在生态系统量化评估方面展现出较好的效果,土壤侵蚀量的计算以 RUSLE 为主,着重分析 地表过程,但缺少对沟谷侵蚀、河岸侵蚀和重力侵蚀的估计,具有一定的不确定性^[9]。此外,本研究中的土壤 可蚀性因子,其计算数据来源于世界土壤数据库,而研究期内土壤环境受人类活动和气候变化的影响,进而可 能会导致参数精度存在一定的误差。对于生物物理系数表中的植被覆盖和作物管理因子以及保持措施因子, 在本研究中计算了其当年的对应值,然而由于采用的是区域平均值输入模型,也可能会对计算结果有一定影 响。因此,未来应将实地采样与遥感、地理信息系统等技术相结合,提高评估精度,掌握土壤侵蚀动态,为应对 措施的制定提供科学依据。

4 结论

1990—2020年,黄土高原地区气候呈现暖干化向暖湿化变化的趋势,降水趋于极端化,土壤侵蚀强度总体来说得到极大控制,但局部地区在2020年侵蚀量有所上升。根据最优参数地理探测器和偏最小二乘法结构方程模型的结果,坡度、降水和植被覆盖是土壤侵蚀的主要驱动因素,温度主要通过影响降水间接影响土壤 侵蚀,降水对土壤侵蚀的影响为正贡献,而植被因子对土壤侵蚀为负贡献,植被覆盖对土壤侵蚀的负贡献在很 大程度上抵消了降水增加和极端化的正贡献,使得流域输沙量得到有效控制。但在更极端化的降雨背景下, 植被对土壤侵蚀的整体抑制效果未能继续增强,甚至出现小幅回落。因此,在气候暖湿化和极端化背景下,未 来对土壤侵蚀的治理应加强生态修复与极端气候的防范。

参考文献(References):

- Pal S C, Chakrabortty R. Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic model. Advances in Space Research, 2019, 64(2): 352-377.
- [2] Chappell A, Baldock J, Sanderman J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes. Nature Climate

Change, 2016, 6: 187-191.

- [3] Qiao X R, Li Z J, Lin J K, Wang H J, Zheng S W, Yang S Y. Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(2): 298-312.
- [4] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, Olson C, Sztein A E, Sparks D L. Soil science. Soil and human security in the 21st century. Science, 2015, 348(6235): 1261071.
- [5] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, Lugato E, Yang J E, Alewell C, Wuepper D, Montanarella L, Ballabio C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [6] Eekhout J P C, de Vente J. Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. Earth-Science Reviews, 2022, 226: 103921.
- [7] Li Z Y, Fang H Y. Impacts of climate change on water erosion: a review. Earth-Science Reviews, 2016, 163: 94-117.
- [8] Zhu R P, Yu Y, Zhao J C, Liu D J, Cai S Y, Feng J L, Rodrigo-Comino J. Evaluating the applicability of the water erosion prediction project (WEPP) model to runoff and soil loss of sandstone reliefs in the Loess Plateau, China. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(2): 240-250.
- [9] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望.生态学报,2019,39(2):432-440.
- [10] He X, Miao Z M, Wang Y M, Yang L, Zhang Z X. Response of soil erosion to climate change and vegetation restoration in the Ganjiang River Basin, China. Ecological Indicators, 2024, 158: 111429.
- [11] Wen X, Deng X Z. Current soil erosion assessment in the Loess Plateau of China: a mini-review. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123091.
- [12] Liang Y, Gao G Y, Liu J B, Dunkerley D, Fu B J. Runoff and soil loss responses of restoration vegetation under natural rainfall patterns in the Loess Plateau of China: The role of rainfall intensity fluctuation. Catena, 2023, 225: 107013.
- [13] Wang J X, Zhang Y, Li K H, Zhang Z Q, Chen C. Gully internal erosion triggered by a prolonged heavy rainfall event in the tableland region of China's Loess Plateau. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(4): 610-621.
- [14] Zhang W X, Furtado K, Wu P L, Zhou T J, Chadwick R, Marzin C, Rostron J, Sexton D. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. Science Advances, 2021, 7(31): eabf8021.
- [15] Chen J S, Chen Y P, Wang K B, Zhang H W, Tian H W, Cao J. Impacts of land use, rainfall, and temperature on soil conservation in the Loess Plateau of China. Catena, 2024, 239: 107883.
- [16] Barral Muñoz M Á. Positive rainfall erosivity trends compared with the reduction in soil erosion in a Mediterranean area (1996-2020). Catena, 2025, 249: 108606.
- [17] Xu H Q, Hu X J, Guan H D, Zhang B B, Wang M Y, Chen S M, Chen M H. A remote sensing based method to detect soil erosion in forests. Remote Sensing, 2019, 11(5): 513.
- [18] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(5): 593-610.
- [19] Zhang Y L, Zhao Z Y, Zhu J, Wang Y L, Wang H Y, Fu B J, Lü Y H, Jiang W, Hu Y, Wu X. The dynamic patterns of critical ecological areas in the Yellow River Basin are driven primarily by climate factors but threatened by human activities. Journal of Environmental Management, 2024, 371: 123282.
- [20] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, Liu J P, Sun X X, Wang Y. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities. Global and Planetary Change, 2007, 57(3-4): 331-354.
- [21] Wang S, Fu B J, Liang W. Developing policy for the Yellow River sediment sustainable control. National Science Review, 2016, 3(2): 162-164.
- [22] 杨磊, 冯青郁, 陈利顶. 黄土高原水土保持工程措施的生态系统服务. 资源科学, 2020, 42(1): 87-95.
- [23] Ma X F, Zhao C Y, Zhu J T. Aggravated risk of soil erosion with global warming-A global meta-analysis. Catena, 2021, 200: 105129.
- [24] Jia L, Yu K X, Li Z B, Li P, Zhang J Z, Wang A N, Ma L, Xu G C, Zhang X. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of China and its impact on sediment load. Catena, 2022, 210: 105931.
- [25] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion-sediment yield models. Soil Technology, 1997, 11(1): 43-55.
- [26] Jian Z, Sun Y J, Wang F, Zhou C H, Pan F, Meng W X, Sui M X. Soil conservation ecosystem service supply-demand and multi scenario simulation in the Loess Plateau, China. Global Ecology and Conservation, 2024, 49: e02796.
- [27] Li P F, Chen J N, Zhao G J, Holden J, Liu B T, Chan F K S, Hu J F, Wu P L, Mu X M. Determining the drivers and rates of soil erosion on the Loess Plateau since 1901. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153674.
- [28] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 427-433.
- [29] Zuo D P, Han Y N, Xu Z X, Li P J, Ban C G, Sun W C, Pang B, Peng D Z, Kan G Y, Zhang R, Yang H. Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an alpine river basin of the Tibet Plateau, China. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126532.

- [30] Chen G, Zuo D P, Xu Z X, Wang G Q, Han Y N, Peng D Z, Pang B, Abbaspour K C, Yang H. Changes in water conservation and possible causes in the Yellow River Basin of China during the recent four decades. Journal of Hydrology, 2024, 637: 131314.
- [31] Gu Z P, Chen X W, Ruan W F, Zheng M L, Gen K L, Li X C, Deng H J, Chen Y, Liu M B. Quantifying the direct and indirect effects of terrain, climate and human activity on the spatial pattern of kNDVI-based vegetation growth: a case study from the Minjiang River Basin, SouthEast China. Ecological Informatics, 2024, 80: 102493.
- [32] Adeyeye O A, Hassaan A M, Song Z H, Xie D T, Zhang L. Disentangling the main factors influencing spring algal blooms in the Three Gorges Reservoir using partial least square structural equation modelling. Chemosphere, 2024, 368: 143680.
- [33] Qiu H H, Zhang J Y, Han H R, Cheng X Q, Kang F F. Study on the impact of vegetation change on ecosystem services in the Loess Plateau, China. Ecological Indicators, 2023, 154: 110812.
- [34] Zhang X Y, Liu K, Li X K, Wang S D, Wang J N. Vulnerability assessment and its driving forces in terms of NDVI and GPP over the Loess Plateau, China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2022, 125: 103106.
- [35] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6: 1019-1022.
- [36] Fu Y, Li G L, Zheng T H, Li B Q, Zhang T. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action. Catena, 2017, 150: 154-160.
- [37] Zhu T X. Effectiveness of conservation measures in reducing runoff and soil loss under different magnitude-frequency storms at plot and catchment scales in the semi-arid agricultural landscape. Environmental Management, 2016, 57(3): 671-682.
- [38] Gao J B, Wang H. Temporal analysis on quantitative attribution of Karst soil erosion: a case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China. Catena, 2019, 172: 369-377.
- [39] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书—2023, 2023. 北京:科学出版社, 2023.
- [40] O'Gorman P A. Precipitation extremes under climate change. Current Climate Change Reports, 2015, 1(2): 49-59.
- [41] Thackeray C W, Hall A, Norris J, Chen D. Constraining the increased frequency of global precipitation extremes under warming. Nature Climate Change, 2022, 12(5): 441-448.
- [42] Chen F H, Chen J H, Huang W, Chen S Q, Huang X Z, Jin L Y, Jia J, Zhang X J, An C B, Zhang J W, Zhao Y, Yu Z C, Zhang R H, Liu J B, Zhou A F, Feng S. Westerlies Asia and monsoonal Asia: spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. Earth-Science Reviews, 2019, 192: 337-354.
- [43] 代潭龙, 王秋玲, 王国复, 陈峪, 赵珊珊, 翟建青, 邹旭恺, 姜允迪, 石帅, 周兵, 崔童, 孙劭, 蔡雯悦, 朱晓金, 钟海玲, 郭艳君, 支蓉, 刘芸芸, 赵俊虎, 柳艳菊, 李多. 2020年中国气候主要特征及主要天气气候事件. 气象, 2021, 47(4): 478-487.
- [44] 王遵娅, 曾红玲, 高歌, 陈峪, 司东, 刘波. 2010 年中国气候概况. 气象, 2011, 37(4): 439-445.
- [45] Yang B, Ma X W, Jiao J Y, Zhao W T, Ling Q, Li J J, Zhang X H. Magnitude and hotspots of soil erosion types during heavy rainstorm events on the Loess Plateau: Implications for watershed management. Catena, 2024, 246: 108365.
- [46] Zhang J P, Ren Y L, Jiao P, Xiao P Q, Li Z. Changes in rainfall erosivity from combined effects of multiple factors in China's Loess Plateau. Catena, 2022, 216: 106373.
- [47] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [48] Yin C Y, Bai C Y, Zhu Y J, Shao M A, Han X Y, Qiao J B. Future soil erosion risk in China: differences in erosion driven by general and extreme precipitation under climate change. Earths Future, 2025, 13(3): e2024EF005390.
- [49] Jiang C, Zhang H Y, Zhang Z D, Wang D W. Model-based assessment soil loss by wind and water erosion in China's Loess Plateau: Dynamic change, conservation effectiveness, and strategies for sustainable restoration. Global and Planetary Change, 2019, 172: 396-413.
- [50] Ma R T, Hu F N, Xu C Y, Liu J F, Yu Z H, Liu G, Zhao S W, Zheng F L. Vegetation restoration enhances soil erosion resistance through decreasing the net repulsive force between soil particles. Catena, 2023, 226: 107085.
- [51] Liang Y, Jiao J Y, Tang B Z, Cao B T, Li H. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124694.
- [52] Ding Y H, Wu P, Liu Y J. Modulation of sea surface temperature in three oceans on precipitation increase over Northwest China during the past 60 years: a review. Frontiers in Climate, 2022, 4: 1015225.
- [53] Fu B J, Wu X T, Wang Z Z, Wu X L, Wang S. Coupling human and natural systems for sustainability: experience from China's Loess Plateau. Earth System Dynamics, 2022, 13(2): 795-808.