

生态恢复背景下黄河源区复合土壤侵蚀 强度评估及其对气候变化的响应

张彪^{1,2}, 王治英^{1,2}, 宋法通^{1,2}, 方海燕^{3,4},
马敏⁵, 张风宝², 吴淑芳^{1,2}, 冯浩²

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 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.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
4.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100101; 5.青海大学土木水利学院, 西宁 810016)

摘要: [目的] 为阐明生态恢复背景下黄河源区复合土壤侵蚀时空演变特征及其对气候变化的响应机制。[方法] 基于1980—2020年气象观测、遥感植被指数及地形数据, 耦合RUSLE、RWEQ与冻融侵蚀模型, 定量评估3类营力侵蚀强度; 结合转移矩阵分析时空演变路径, 并采用逐栅格偏相关分析揭示复合侵蚀对年降水量、年平均气温和年平均风速的独立响应关系。[结果] 1980—2020年黄河源区气候呈“暖湿化”趋势(降水显著增加, 气温上升1.5℃, 风速下降0.3~0.6 m/s), 植被覆盖度提升超40.0%。水蚀、风蚀与冻融侵蚀强度均显著降低。不同气候变量与复合侵蚀营力的偏相关分析表明, 1980—2020年降水对侵蚀的正向驱动持续增强(正相关区占比由27.4%提升至56.0%), 气温影响由促进转为抑制(正相关区占比从46.0%下降至12.8%), 风速驱动作用明显弱化(正相关区占比下降至19.8%)。黄河源区复合侵蚀营力的交替和协同作用, 导致特定时空条件下气候变量与侵蚀强度变化的异常响应。[结论] 生态恢复工程有效改善黄河源区复合土壤侵蚀环境特征, 抑制黄河源区复合土壤侵蚀; 复合营力侵蚀交替和协同作用导致气候变量与侵蚀强度变化异常响应的时空关系。研究结果为复合土壤侵蚀强度评估及其与环境变化之间的响应研究提供理论参考。

关键词: 复合土壤侵蚀; 生态恢复; 高海拔寒旱区; 土壤侵蚀模型; 多准则模型; 偏相关分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0331-14

Intensity Assessment of Compound Soil Erosion in Source Region of Yellow River and Its Response to Climate Change under Background of Ecological Restoration

Zhang Biao^{1,2}, Wang Zhiying^{1,2}, Song Fatong^{1,2}, Fang Haiyan^{3,4},
Ma Min⁵, Zhang Fengbao², Wu Shufang^{1,2}, Feng Hao²

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2.State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100101, China; 4.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101,
China; 5.School of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the spatiotemporal evolution characteristics of compound soil erosion in the source region of the Yellow River under the background of ecological restoration and reveal its response mechanisms to climate change. [Methods] Based on meteorological observations, remote sensing-derived vegetation index, and topographic data from 1980 to 2020, the RUSLE, RWEQ, and freeze-thaw

erosion models were coupled to quantitatively assess the intensity of three types of soil erosion driving forces. Transition matrices were employed to analyze the spatiotemporal evolution pathways, while pixel-based partial correlation analysis was conducted to reveal the independent responses of compound erosion to annual precipitation, annual average temperature, and annual average wind speed. **[Results]** From 1980 to 2020, the climate in the source region of the Yellow River exhibited a warming and wetting trend, characterized by a significant increase in precipitation, a temperature rise of 1.5 °C, and a wind speed reduction of 0.3–0.6 m/s, while vegetation coverage increased by more than 40.0%. The intensities of water, wind, and freeze-thaw erosion all decreased significantly. Partial correlation analysis between different climate variables and compound erosion driving forces revealed that, during the study period (1980–2020), the positive driving effect of precipitation on erosion continuously strengthened (the proportion of positively correlated area increased from 27.4% to 56.0%), the influence of temperature shifted from promoting to suppressing erosion (the proportion of positively correlated area decreased from 46.0% to 12.8%), and the driving effect of wind speed markedly weakened (the proportion of positively correlated area decreased to 19.8%). The alternating and synergistic effects of compound erosion driving forces in the source region of the Yellow River resulted in abnormal responses of climate variables and erosion intensity changes under specific spatiotemporal conditions. **[Conclusion]** The ecological restoration project effectively improves the compound soil erosion environmental characteristics in the source region of the Yellow River, thereby suppressing the compound soil erosion in this region. The alternating and synergistic effects of compound erosion driving forces lead to abnormal spatiotemporal responses of climate variables and erosion intensity changes. The research findings provide theoretical references for the intensity assessment of compound soil erosion and its response to environmental changes.

Keywords: compound soil erosion; ecological restoration; high-altitude cold and arid regions; soil erosion model; multi-criteria model; partial correlation analysis

Received: 2026-01-22

Revised: 2026-03-18

Accepted: 2026-03-25

Online(www.cnki.net): 2026-04-14

复合土壤侵蚀是土壤在多种侵蚀力作用下的剥蚀、破坏、分离、迁移和沉积过程,包括风、水和冻融作用^[1]。黄河源区作为青藏高原生态安全屏障和黄河上游重要水源涵养区,长期受到高寒、干旱、强辐射等自然条件制约,面临水力、风力与冻融营力造成的复合土壤侵蚀威胁^[2]。事实上,黄河源区地处青藏高原东北缘,高寒干旱、植被稀疏、土层浅薄,冬春季节大风频繁导致风力侵蚀活跃,夏季集中降雨引发水力侵蚀,冻融循环频繁则使土壤结构反复破坏,形成典型的水-风-冻融复合侵蚀格局^[3-4]。自 21 世纪初期以来,黄河源区成为国家生态治理的重点区域并启动生态恢复工程。工程以“退牧还草、封山育林、黑土滩治理生态移民、围栏封育”为主要措施,通过禁牧减畜、植被重建与生态系统整体修复,遏制草地退化与土地沙化趋势^[5]。气候变化与生态工程双重背景下黄河源区土壤侵蚀环境特征发生显著改变:一方面,气温持续升高、降水格局波动,导致冻融循环频率与强度改变,冰雪融水过程发生变化^[6];另一方面,自 21 世纪初期生态保护与建设工程实施以来,退牧还草、封育禁牧等措施显著改变区域下垫面状况^[7-8]。

然而,目前该区域生态恢复工程前后的复合土壤侵蚀时空分布格局尚未明确。以往研究^[9-10]多是基于单一侵蚀营力的评估方法难以准确刻画复合侵蚀变化。针对黄河源区土壤侵蚀的研究多聚焦于水蚀或风蚀的独立分析,水-风-冻融多营力作用下的复合侵蚀强度及其时空分异规律仍缺乏系统量化。研究区水力侵蚀主要集中在东部降水较丰、河网密布、地形起伏较大的区域,尤其 6—9 月雨季表现强烈;风力侵蚀则存在于西北部高海拔、干旱少雨、地表裸露的宽谷盆地和退化草甸区;冻融侵蚀广泛分布于坡度较缓但土壤含水量较高的高寒草甸和黑土滩区域^[11]。尽管已有大量研究^[2-3,6]证实生态恢复工程对减少土壤侵蚀具有积极作用,但针对复合土壤侵蚀强度时空变化,仍缺乏基于长时序、高分辨率数据的定性和定量解析,严重制约生态修复工程成效的科学评估。全球暖湿化背景下,黄河源区的生态恢复工程在改变区域下垫面状况的同时也使得区域气候环境发生系统性改变,从而深刻影响区域的土壤侵蚀环境^[12]。植被覆盖减少地表裸露,显著降低近地表风速,影响土壤冻融循环过程,同时影响地表蒸散

发与潜热通量^[13-14]。然而,系统性气候变化与复合土壤侵蚀间的响应关系若采用简单相关分析,将无法有效剥离不同气候因子与复合侵蚀的空间变化关系,进而影响准确构建黄河源区不同气候变量与复合土壤侵蚀变化间的空间响应机制。

为此,本研究以黄河源区为研究区域,集成 1980—2020 年逐日无缝隙植被数据、地面气象观测数据、土地利用数据及数字高程模型,分析研究期间黄河源区关键土壤侵蚀环境特征的变化,构建黄河源区长时间序列,高分辨率的复合土壤侵蚀强度数据集,定量揭示水力、风力与冻融侵蚀的时空演变特征;并进一步耦合偏相关分析等方法,定量剥离年降水量、年平均气温和年平均风速各自对复合土壤侵蚀的净响应关系。研究成果旨在深化对高寒生态脆弱区复合侵蚀过程的理解,为优化黄河源区水土保持策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河源区(32°25′~36°20′N,95°45′~103°30′E)位于青藏高原东北缘,是黄河的发源地与重要水源涵养区,位于黄河流域龙羊峡水库入库站-唐乃亥水文站上游(图 1)。行政上横跨甘肃、青海、四川,总面积约 13.2 万 km²。该区平均海拔>4 200 m,属典型的高寒高海拔生态系统,气候寒冷干燥,年平均气温-4.0~2.0℃,年降水量 300~500 mm,集中于 6—9 月,生态环境脆弱且恢复能力弱^[8,15]。

研究区内地貌以高原丘陵、宽谷盆地和冰蚀湖

盆为主,地表广泛分布着高寒草甸、高寒草原和沼泽湿地,土壤类型以高山草甸土、高山草原土和沼泽土为主,土层浅薄、结构松散、抗蚀性差^[16]。作为国家生态安全屏障的重要组成部分,黄河源区自 21 世纪初起实施三江源生态保护与建设工程,通过退牧还草、封山育林、生态移民等措施持续推进生态恢复,植被覆盖状况显著改善。然而,在气候变化与人类活动双重驱动下,该区域仍面临水力侵蚀、风力侵蚀与冻融侵蚀交互叠加的复合土壤侵蚀问题,严重威胁水源涵养功能与生态安全。因此,系统评估生态恢复背景下黄河源区复合土壤侵蚀强度的时空演变特征,对优化区域水土保持策略、保障黄河上游生态屏障功能具有重要意义。

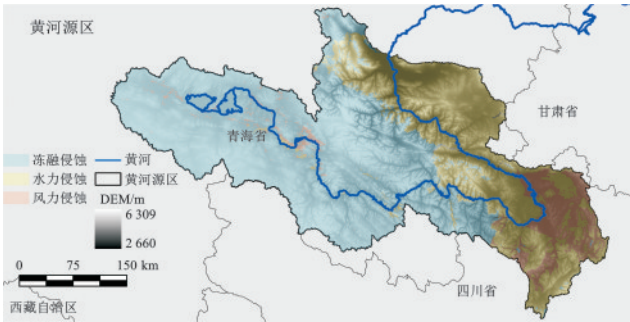


图 1 黄河源区位置及侵蚀类型分布
Fig.1 Location and distribution of erosion types in source region of Yellow River

1.2 数据来源

本研究采用的土壤侵蚀类型分布数据、地形数据、土地利用/土地覆盖数据、植被数据、气候数据及土壤属性数据来源见表 1。

表 1 研究区数据源
Table 1 Data sources of study area

数据类型	数据名称	分辨率	来源
土壤侵蚀类型分布数据	中国土壤侵蚀类型空间分布数据	—	资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)
地形数据	COP-DEM	30 m	欧洲航天局(https://dataspace.copernicus.eu/)
土地利用数据	CLCD	30 m	https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810
植被数据	中国 1981—2023 年每日无缺口归一化差分植被指数数据集	1 km	https://doi.org/10.1038/s41597-024-03364-3
气候数据	中国地面气象站逐日观测数据集(V3.0)	—	中国气象网(http://data.cma.cn)
土壤数据	HWSD2.0	1 km	世界土壤数据库(https://gaez.fao.org/pages/hwsd)

1.3 研究方法

1.3.1 RUSLE 模型 修正通用土壤流失方程(RUSLE)由于适用性强、结构简单,参数易获取等特点已被广泛用于世界范围的土壤侵蚀评价,包括中国黄土高原,青藏高原地区,并得到充分验证^[17]。其具体原理表达式为:

$$A = RKLSCP \tag{1}$$

式中:A 为年土壤流失量,t/(hm²·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·h)/(MJ·mm·hm²);C 为植被覆盖与管理因子;LS 为坡长坡度因子;P 为水土保持措施因子。

降雨侵蚀力因子(R)反映土壤侵蚀中降雨条件

的潜在影响力。本研究采用章文波等^[18]提出的以日降雨量为基础的降雨侵蚀力计算方法,其在计算降雨侵蚀力方面考虑侵蚀性降雨。故本研究中采用章文波等提出的降雨侵蚀模型,计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{24} R_i \quad (2)$$

$$R_i = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.144/P_{d12} + 24.455/P_{y12} \quad (4)$$

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_i}{C_1 + S_i} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25 \text{SOC}}{\text{SOC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{SOC})} \right) \times \left(1 - \frac{0.7 S_{nl}}{S_{nl} + \exp(-5.51 + 22.9 S_{nl})} \right) \quad (6)$$

式中: S_a 为砂粒(0.05~2 mm)质量分数,%; S_i 为粉砂(0.002~0.05 mm)质量分数,%; C_1 为黏粒(<0.002 mm)质量分数,%; SOC 为有机碳质量分数,%; $S_{nl}=1-S_a/100$ 。

坡长坡度因子(LS)反映地形对土壤侵蚀的影响。本研究基于COP-DEM数据,采用CSLE模型中等提出的 LS 因子算法^[20],计算公式为:

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

$$S = \begin{cases} 10.80 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.80 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中: L 为坡长因子; m 为坡长指数; S 为坡度因子; θ 为坡度,°。

植被覆盖与经营管理因子(C)反映不同土地利用类型和植被覆盖对土壤侵蚀的影响。本研究采用蔡崇法等^[21]基于植被覆盖度的计算公式,对建设用地和水域均认为不存在显著的土壤侵蚀,因此默认 C 值取0,计算公式为:

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \ln f & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0 & f > 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (10)$$

式中: C 为植被覆盖与作物管理因子; f 为植被覆盖度。

$$\text{EF} = \frac{(29.9 + 0.31 S_a + 0.17 S_i + 0.33(S_a/C_1) - 2.590M - 0.95 \text{CaCO}_3)}{100} \quad (18)$$

$$\text{SCF} = \frac{1}{1 + 0.0066 C_1^2 + 0.0210 M^2} \quad (19)$$

$$K' = \cos \alpha \quad (20)$$

$$C = e^{-0.0483 \times \text{SC}} \quad (21)$$

$$\alpha = 27.815 \beta^{-7.1891} \quad (5)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力,(MJ·mm)/(ha·h); i 为1 a中第*i*个半月; K 为半月内侵蚀性降雨的天数; P_{d12} 为日降雨量12 mm的日平均降雨量,mm; P_{y12} 为日降雨量12 mm的年平均降雨量,mm; α 、 β 为回归系数。

土壤可蚀性因子(K)反映土壤颗粒被分离和搬运的难易程度。本研究采用Williams等^[19]提出的基于土壤有机质和颗粒组成比例的EPIC模型,计算公式为:

水土保持措施因子(P)反映采取特定水保措施后土壤侵蚀量与不采取任何措施时土壤侵蚀量的比值。本研究基于土地利用类型覆被数据和前人研究^[22-24]结果进行赋值,林地、草地为1,裸地、水体及建设用地为0,采用Lufafa等^[25]提出的方法获得农田的 P 因子值。

$$P = 0.2 + 0.03S \quad (11)$$

式中: S 为坡度,°。

1.3.2 RWEQ模型 RWEQ模型是美国农业部(USDA)在20世纪90年代基于早期WEQ模型改进发展而来的定量评估风力土壤侵蚀强度的物理经验模型,广泛应用于干旱、半干旱及高寒草原等风蚀敏感区的土壤风蚀模数估算与风险评估^[26]。

$$Q_{\text{wind}} = \frac{2x}{S^2} Q_{\text{max}} e^{-\left(\frac{x}{s}\right)^2} \quad (12)$$

$$Q_{\text{max}} = 109.8(\text{WF} \times \text{EF} \times \text{SCF} \times K \times C) \quad (13)$$

$$s = 150.71(\text{WF} \times \text{EF} \times \text{SCF} \times K \times C)^{-0.3711} \quad (14)$$

$$\text{WF} = \text{wf} \times \frac{\rho}{g} \times \text{SW} \times \text{SD} \quad (15)$$

$$\rho = 348.01 \left(\frac{1.013 - 0.1183 \times \text{EL} + 0.0048 \times \text{EL}^2}{T} \right) \quad (16)$$

$$\text{SW} = \frac{\text{ET}_p - (R + I) \frac{R_d}{N_d}}{\text{ET}_p} \quad (17)$$

$$\text{SC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{min}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{min}}} \quad (22)$$

式中: Q_x 为距上风向*x*处的风沙通量,kg/m; Q_{max} 为风力的最大输沙能力,kg/m; s 为关键地块长度,m,

将其定义为风沙传输最大距离的63%;WF为气候因子,kg/m;EF、SCF、K、COG分别为土壤可蚀性因子、土壤结皮因子、土壤糙度因子、植被盖度因子,无量纲; S_a 、 S_i 、 C_i 分别为土壤砂粒、粉粒、黏粒质量分数,%; S_a/C_i 为土壤砂粒和黏土质量分数比;OM为有机质质量分数,%; CaCO_3 为碳酸钙质量分数,%; α 为地形坡度; C 为绿色植被覆盖率,%; $\text{NDVI}_{\max}$ 和 $\text{NDVI}_{\min}$ 分别为95%和5%累积频率的NDVI。

1.3.3 冻融侵蚀强度指数模型 多准则决策模型(MCDM)被开发用于评估冻融侵蚀。该模型由指标和综合权重(主观和客观)组成。采用层次分析法计

算主观权重,采用熵权法确定客观权重,最后采用粒子群优化算法(PSO)确定最优权值组合^[27]。最终将综合权重与指标相结合计算冻融侵蚀强度指数,评价冻融侵蚀强度。本研究中选择年冻融循环天数、年冻融循环水量、气温年较差、年累积降水量、坡度、坡向、植被盖度和土壤结构稳定性指数共8个因子作为冻融侵蚀强度评价因子,建立研究区冻融侵蚀强度评价体系(表2)。采用李智广等^[28]对我国冻融侵蚀的划分方法将冻融侵蚀分为微度侵蚀(<1.7)、轻度侵蚀(1.7~2.2)、中度侵蚀(2.2~2.5)、强烈侵蚀(2.5~2.8)、极强烈侵蚀(2.8~3.3)和剧烈侵蚀(>3.3)6类。部分指标计算公式为:

$$\text{FTCD} = \sum_{i=0}^{365} \begin{cases} 1 & T_{\text{Dmax}} > 0 \& T_{\text{Dmin}} < 0 \\ 0 & T_{\text{Dmax}} \geq 0, T_{\text{Dmin}} \geq 0 \& T_{\text{Dmax}} \leq 0, T_{\text{Dmin}} \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\text{PTWC} = \sum_{i=0}^{12} \begin{cases} P_i & T_{\text{Mmax}} > 0 \& T_{\text{Mmin}} < 0 \\ 0 & T_{\text{Mmax}} \geq 0, T_{\text{Mmin}} \geq 0 \& T_{\text{Mmax}} \leq 0, T_{\text{Mmin}} \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{SSI} = \frac{\text{SOC} \times 1.724}{C_i + S_i} \times 100\% \quad (25)$$

式中:FTCD为年冻融循环天数,d; T_{Dmax} 和 T_{Dmin} 分别

为日最高、最低气温,℃;PTWC为年冻融循环水量,mm; P_i 为第*i*个月降水量,mm; T_{Mmax} 和 T_{Mmin} 分别为月平均最高/最低气温,℃;SSI为土壤结构稳定指数。

表2 冻融侵蚀强度评价因子

Table 2 Evaluation indicators of freeze-thaw erosion intensity

指标	单位	定义	备注
年冻融循环天数	d	经历完整冻融循环的天数。	冻融循环次数反映冻融事件发生的频率,影响冻融侵蚀的强度
年冻融循环水量	mm	活动层(冻融层)土壤由冻结状态转为解冻状态时的总水量。	冻融过程相变过程中的水分含量可以反映冻融侵蚀发生的水分条件
气温年较差	℃	一年中最高气温和最低气温之差	年温度波动对冻融侵蚀强度有重要影响
年累积降水量	mm	一年中降雨量、降雪量和其他形式的降水量累积之和	降水影响土壤水分和冻融循环的频率
坡度	—	斜坡的垂直高度(<i>h</i>)与水平宽度 <i>l</i> 之比	在土壤冻融循环过程中,边坡对水流有一定的影响。
坡向	—	斜坡在水平面上的投影方向	坡向影响太阳辐射量的接收,冻融循环
植被覆盖度	—	反映植被生长状况指数	植被覆盖可以保护土壤表面,通过隔离土壤和保持水分来减少冻融侵蚀的影响。
土壤结构稳定性指数	—	土壤结构的稳定性	土壤结构抵抗冻融循环破坏的能力

冻融侵蚀强度指数计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (26)$$

$$e_j = -\frac{\sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}}{\ln m} \quad (27)$$

$$W_{\text{obj}} = \frac{(1 - e_j)}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \quad (28)$$

式中: x_{ij} 为标准化值; m 为评价对象; n 为评价因子个数; e_j 为第*j*个因子的熵; W_{obj} 为第*j*个因子的熵权。

$$W_{\text{com}} = \alpha W_{\text{sub}} + (1 - \alpha) W_{\text{obj}} \quad (29)$$

式中: α 为基于目标函数的粒子群优化(PSO)算法优化的比例系数。

$$\text{FTEI} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{com},i} I_i}{\sum_{i=1}^n W_{\text{com},i}} \quad (30)$$

式中:FTEI为冻融侵蚀强度指数; W_i 为各因子的综合权重; I_i 为各因子的归一化值。

1.3.4 偏相关分析 为定量辨识复合土壤侵蚀强度对关键气候因子(年降水量、年平均风速、年平均气温)的独立响应关系,并排除其他变量的共线性干扰,本研究采用逐栅格偏相关分析。在每个栅格单元上,计算复合土壤侵蚀强度序列与某一气候变量

间的偏相关系数,同时控制其余 2 个气候变量的影响。偏相关系数为 $[-1,1]$,绝对值越大表示独立影响越强,符号反映正/负响应关系。该方法有效分离多气候因子的混杂效应,有助于揭示不同驱动因子对复合侵蚀的主导作用及其空间分异特征^[29]。

$$R_{xy \cdot zw} = \frac{R_{xy,z} - R_{xw,z}R_{yw,z}}{\sqrt{(1-R_{xw,z}^2)(1-R_{yw,z}^2)}} \quad (31)$$

式中: $R_{xy \cdot zw}$ 为控制 z 和 w 的 x 与 y 的偏相关系数; $R_{xy,z}$ 、 $R_{xw,z}$ 、 $R_{yw,z}$ 为 x 与 y 、 x 与 w 、 y 与 w 的偏相关系数。

2 结果与分析

2.1 复合土壤侵蚀环境特征

本研究选取年累积降水量、年平均气温、冻融循环天数、冻融循环水量、植被覆盖度及风速共 6 个环境指标来反映生态恢复前后黄河源区的复合土壤侵蚀环境特征变化。图 2 为黄河源区生态恢复工程前后复合土壤侵蚀环境特征的时空分布特征。结果显示,黄河源区的年降水呈东南高、西北低的分布格局,与地形抬升和季风影响方向一致。时间序列显示显著上升趋势,尤其在 2005 年后,连续多年降水偏丰,湿润化趋势明显。降水增加有利于植被恢复,但也提高了极端降雨事件频率,局部地区水蚀风险上升。整体上,黄河源区生态恢复前后年平均气温呈显著上升趋势($R^2=0.392$, $r=0.557$)。该升温趋势与青藏高原整体增温背景一致。生态恢复工程实施前升温速率达 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$,实施后升温趋势加剧,气温整体抬升约 $1.2\sim 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。升温导致冻结期缩短、融化期提前,影响冻融循环。黄河源区冻融循环天数为 $160\sim 210\text{ d}$,空间上以高海拔山地和湖滨湿地为主。生态恢复后受持续升温影响,年际波动显著增加,总体有所下降。黄河源区冻融循环水量为 $300\sim 400\text{ mm}$,相对稳定。冻融期缩短和冻土退化,地表产流集中,冻融-水力侵蚀仍具高风险。由于生态工程的实施,植被覆盖明显改善,空间上呈东南高、西北低的格局,与降水梯度一致。2000—2020 年植被覆盖度提升至 $0.60\sim 0.70$,增幅达 40.0% 以上。空间上,植被恢复在退耕区、围栏封育区及河岸带最为明显,形成点-带-面恢复格局。生态恢复后,黄河源区年均风速为 $2.4\sim 3.0\text{ m/s}$,呈明显下降趋势。风速下降与植被覆盖提升共同作用,显著降低黄河源区的风力侵蚀潜力。黄河源区复合土壤侵蚀环境伴随生态恢复,由低温高风蚀-强冻融向暖湿低风蚀-植被主导调控转变。

2.2 复合土壤侵蚀强度时空变化

依据土壤侵蚀类型空间分布,基于不同模型计算黄河源区不同营力土壤侵蚀强度。根据《土壤侵蚀分级标准》^[30]将黄河源区复合土壤侵蚀强度(水力、风力和冻融侵蚀)分为微弱、轻微、中等、严重、极严重、强烈共 6 个等级。为验证本研究中复合土壤侵蚀强度评估结果的可靠性,收集以往该地区的土壤侵蚀强度评价结果(表 4)。通过土壤侵蚀强度分级与平均土壤侵蚀模数 2 个方面进行对比,结果显示,本研究水力侵蚀与风力侵蚀评价结果侵蚀模数相近、土壤侵蚀强度等级分布吻合,表明评价方法可靠,结果具有良好的合理性与可比性。该地区冻融侵蚀以微度和轻度为主(合计占 87.6%),与崔娟娟等^[31]研究结果一致,符合黄河源区高寒生态脆弱但整体侵蚀模数偏低的自然规律,结果具有空间逻辑性和生态合理性。图 3 展示黄河源区生态恢复前后(1980—2020 年)不同土壤营力强度的空间分布。总体而言,1980—2020 年黄河源区不同土壤侵蚀营力强度呈下降趋势。空间分布上看,水蚀主要分布在东部与东南部高山草甸与河谷地带,包括玛多县东部、达日县西部、玛沁县北部及黄河干流沿岸,面积为 $39\,927\text{ km}^2$,占总面积的 32.5% 。研究期间黄河源区平均水力侵蚀模数由 1980 年的 $1\,039.9\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,减少到 2020 年的 $348.8\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,共减少 $691.1\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。1980 年,剧烈强度等级水蚀占 19.3% 。到 2020 年,水力侵蚀明显减弱,微弱侵蚀成为主导类型,占 89.3% 。水蚀强度显著降低的地区位于低海拔河谷缓坡区,同时也是生态恢复重点治理区。风蚀主要分布在东南部河岸沙地,特别是黄河干流及主要支流的河漫滩、沙洲地带。风蚀减弱区主要集中在东南部的中高海拔草甸区。从 1980—2020 年平均风蚀模数为 $12.4\sim 165.3\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,减少 $152.9\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。黄河源区受风蚀影响的面积为 $9\,902\text{ km}^2$,占总面积的 8.0% 。风蚀空间格局以微度和轻度侵蚀强度为主,占风力侵蚀总面积的 81.9% 。冻融侵蚀是黄河源区分布最为广泛的土壤侵蚀类型,主要发生在黄河源区西部和西北部的高海拔丘陵和平原,面积 $72\,802\text{ km}^2$,占总面积的 59.3% ,冻融侵蚀强度指数为 $1.5\sim 2.2$ 。1980 年冻融侵蚀强度空间格局以轻度和中度冻融侵蚀为主,分别占 61.8% 和 22.5% 。2000 年以后,轻度冻融侵蚀比例上升到 15.7% ,中度冻融侵蚀比例下降到 14.4% 。冻融侵蚀强度减弱的区域主要分布在植被恢复良好的高寒草甸区。

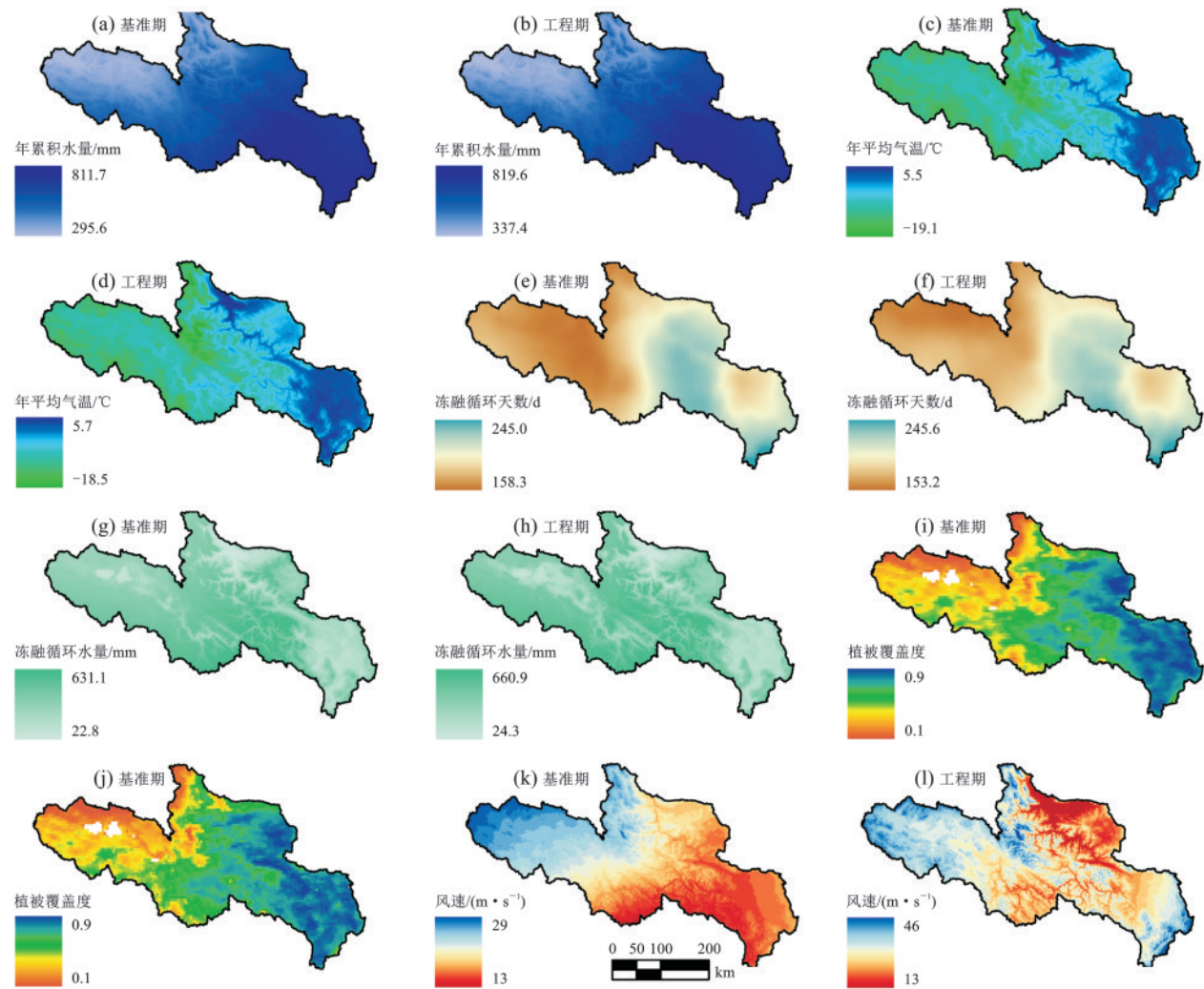


图2 黄河源区土壤侵蚀环境特征时空分布

Fig.2 Spatiotemporal distribution of soil erosion environmental characteristics in source region of Yellow River

表3 黄河源区复合侵蚀土壤侵蚀强度评估验证

Table 3 Evaluation and verification of compound soil erosion intensity in source region of Yellow River

复合土壤 侵蚀类型	年份	土壤侵蚀强度等级/%						土壤侵蚀强度/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	其他研究	本研究
水力 侵蚀 ^[32]	2000	92.27/91.78	4.99/7.14	2.23/1.9	0.43/0.45	0.06/0.21	0.02/0.03	3.78	4.19
	2005	83.16/88.68	12.13/8.91	2.55/2.80	1.45/0.74	0.69/0.34	0.02/0.05	6.48	5.21
	2010	91.42/83.92	5.47/10.86	2.02/4.46	0.94/1.37	0.14/0.74	—/0.16	3.93	7.21
	2015	92.27/89.16	4.75/8.68	2.37/2.65	0.55/0.69	0.06/0.30	—/0.04	3.71	5.01
风力 侵蚀 ^[33]	2000	91.01/91.16	8.40/8.19	0.47/0.34	0.07/0.06	0.04/0.01	—	0.85	0.78
	2005	96.68/92.74	3.31/7.09	0.01/—	—	—	—	0.34	0.51
	2010	93.84/92.57	6.13/7.13	0.03/0.05	—	—	—	0.54	0.60
	2015	96.08/93.89	3.92/5.95	—	—	—	—	0.36	0.42

注:表中数据均为其他研究的土壤侵蚀强度等级占比/本研究的土壤侵蚀强度等级占比。

为揭示黄河源区不同类型土壤侵蚀在长期演变过程中的空间格局转换,构建水力、风力及冻融侵蚀的面积转移矩阵(表5~表7),系统分析各侵蚀类型的强度等级演变路径和转化方向。水力侵蚀以高强度向低等级转化为主,原极强烈和剧烈侵蚀

分别有74.8%和68.5%降为微弱;但局部中低强度区出现升级,显示部分区域侵蚀压力仍在加剧。1980—2020年中度和强烈风力侵蚀消失,96.7%的微弱侵蚀区维持不变,且83.5%的轻度侵蚀区转移为微弱侵蚀,整体风险持续降低。1980—2020年黄

河源区冻融侵蚀强度总体显著降低,高强度侵蚀面积大幅缩减。微度和轻度侵蚀区合计占比达 87.2%,其中 1980 年中度及以上侵蚀区中有超过 70% 转移至轻度及以下等级;剧烈侵蚀基本消除,仅存 39.4 km²且全部由较低强度转化而来,未出现新增剧烈侵蚀。结果表明,1980—2020 年生态恢复与环境变化共同驱动区域土壤侵蚀向低强度、稳定化方向持续改善。

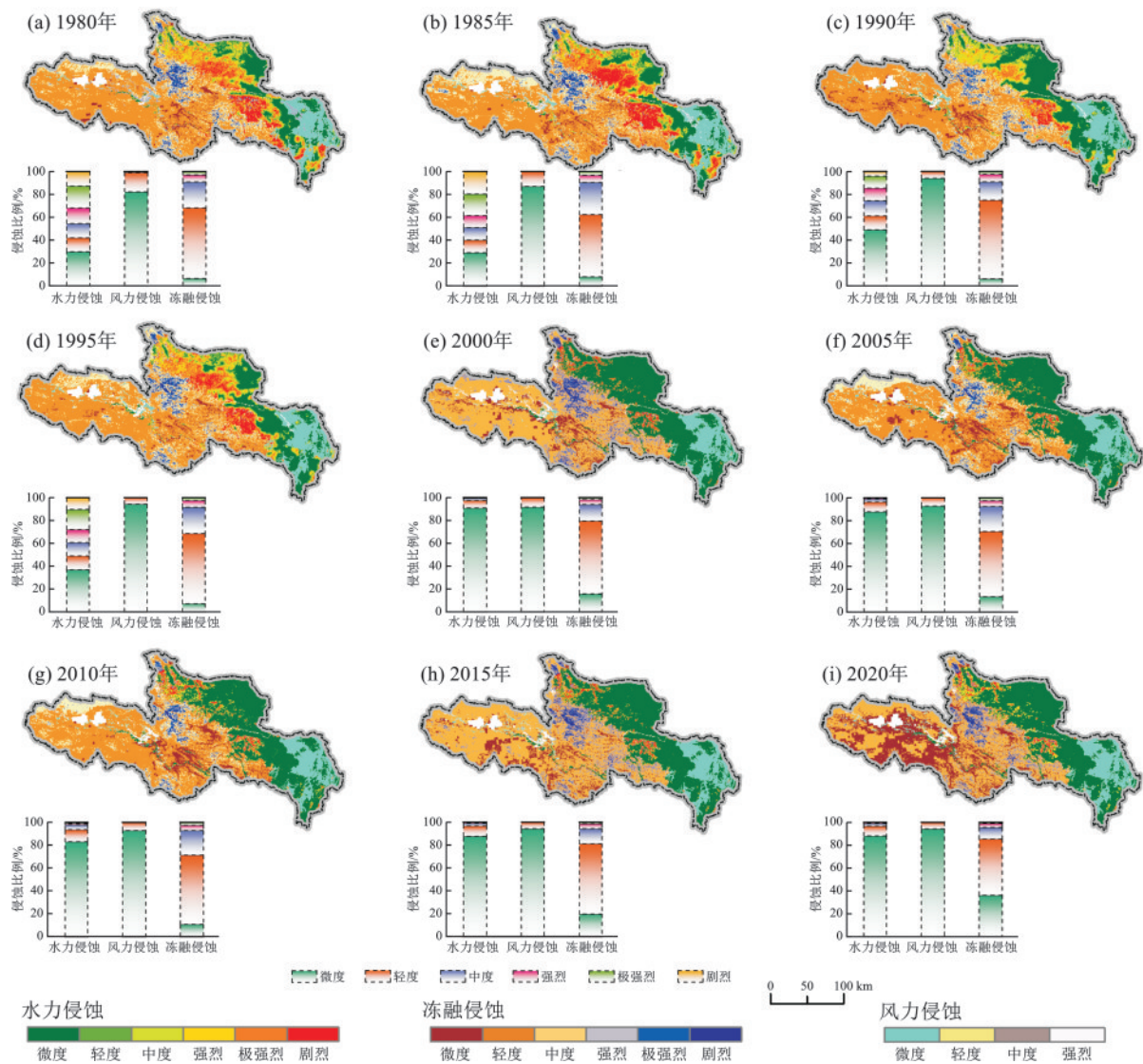


图3 黄河源区复合土壤侵蚀强度时空分布

Fig.3 Spatiotemporal distribution of compound soil erosion intensity in source region of Yellow River

表4 水力侵蚀强度等级面积转移矩阵							
Table 4 Area transfer matrix of water erosion intensity grades							
km ²							
1980年	2020年						总计
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
微度	11 887.1	61.1	5.0	0.3	0	0	11 953.6
轻度	4 456.4	201.8	42.8	7.8	1.3	0	4 710.0
中度	4 418.1	525.1	142.1	23.9	4.0	0	5 113.3
强烈	4 175.3	798.8	259.6	56.6	14.0	0.8	5 305.1
极强烈	5 840.2	1 353.1	447.2	123.6	36.1	4.4	7 804.5
剧烈	3 603.4	977.5	419.3	150.7	97.4	18.3	5 266.4
总计	34 380.4	3 917.4	1 316.0	362.9	152.7	23.4	40 152.9

表5 风力侵蚀强度等级面积转移矩阵			
Table 5 Area transfer matrix of wind erosion intensity grades			
km ²			
1980年	2020年		总计
	微度	轻度	
微度	8 209.7	276.6	8 486.3
轻度	1 519.3	299.7	1 819.0
中度	21.7	79.6	101.3
强烈	1.9	0.1	2.0
总计	9 752.6	655.9	10 408.5

表 6 冻融侵蚀强度等级面积转移矩阵
Table 6 Area transfer matrix of freeze-thaw erosion intensity grades km²

1980 年	2020 年						总计
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
微度	2 882.6	173.2	0	0	0	0	3 055.8
轻度	19 467.6	27 193.4	217.5	0.4	0.1	0	46 879.0
中度	273.1	11 036.1	3 617.5	171.4	0.1	0	15 098.1
强烈	0.3	494.0	2 506.8	1 053.6	79.6	0	4 134.3
极强烈	0	8.3	185.5	686.1	426.9	6.4	1 313.2
剧烈	0	0	0	2.5	22.9	14.0	39.4
总计	22 623.6	38 904.9	6 527.3	1 914.0	529.5	20.4	70 519.8

2.3 土壤侵蚀与气候变量的偏相关分析

本研究中选择 3 个气候变量(年降水量、年平均气温、平均风速)通过偏相关分析探究其与复合土壤侵蚀的空间响应关系。图 4~图 6 分别展示了年降水量、年平均气温和风速与复合土壤侵蚀的偏相关系数。1980—2020 年黄河源区年降水量与复合土壤侵蚀强度的偏相关系数呈显著的时空演变特征。总体上,降水对侵蚀的正向驱动作用在研究期内持续增强,且空间格局由局部主导向全域强化转变。早期(1980—1985 年),正相关区域占比为 27.4%,主要集中在东南部河谷地带,而西北部高寒区以弱负相关

或不显著为主;至 1995—2000 年正相关面积比例升至 33.6%,并开始向中西部扩展,表明降水在植被覆盖较低的区域逐渐成为侵蚀主导因子。进入生态恢复阶段(2000 年后),正相关范围进一步扩大,尤其在 2015—2020 年正相关区域占比达 56.0%,且强度显著提升,相关系数超过 0.4 的强正相关区广泛分布于玛多、曲麻莱等生态敏感区。值得注意的是,2000—2005 年出现短暂波动,正相关比例下降至 21.6%,可能与该时期气候异常或生态工程初期扰动有关。但此后随着植被恢复进程推进,降水通过增强地表径流与冲刷能力,其对侵蚀的驱动作用趋于稳定并强化。

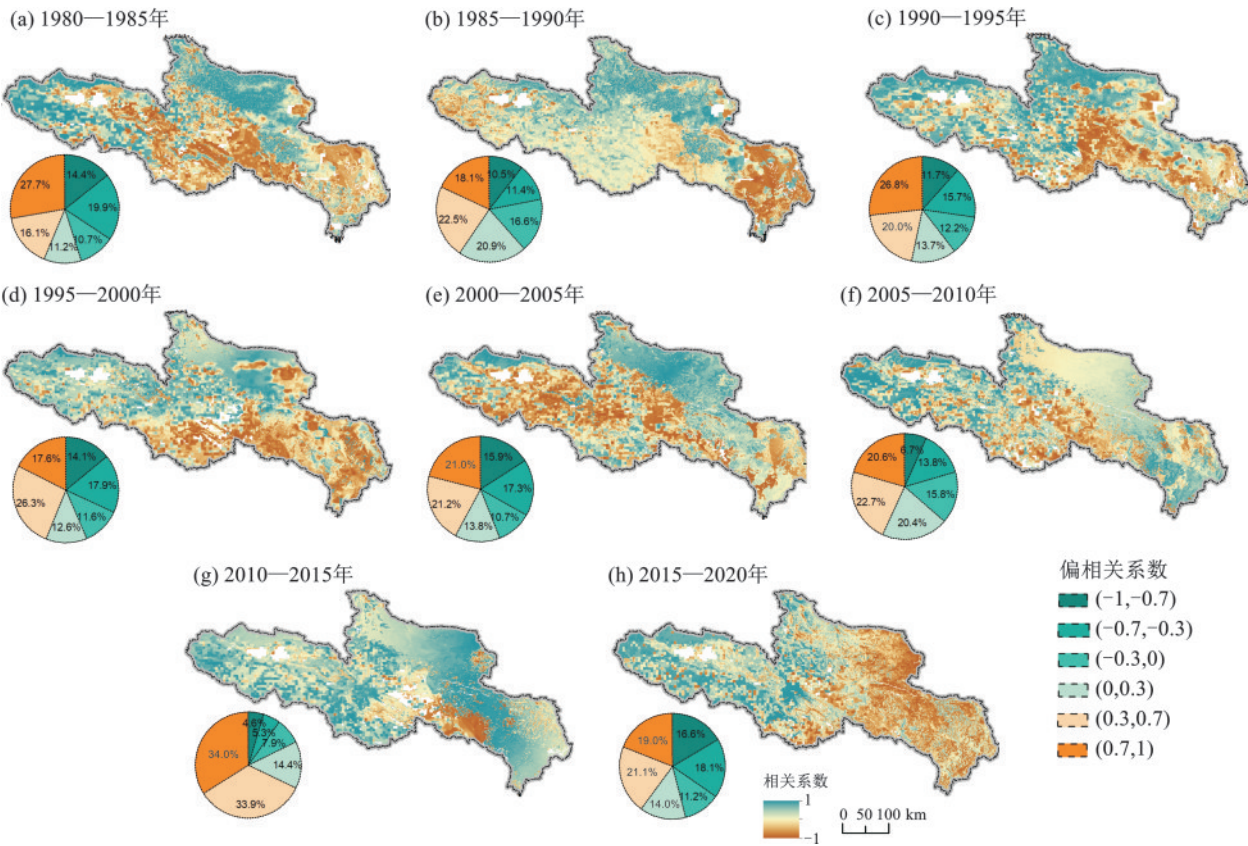


图 4 黄河源区土壤侵蚀与年降水量的偏相关性
Fig.4 Partial correlation analysis between soil erosion and annual precipitation in source region of Yellow River
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

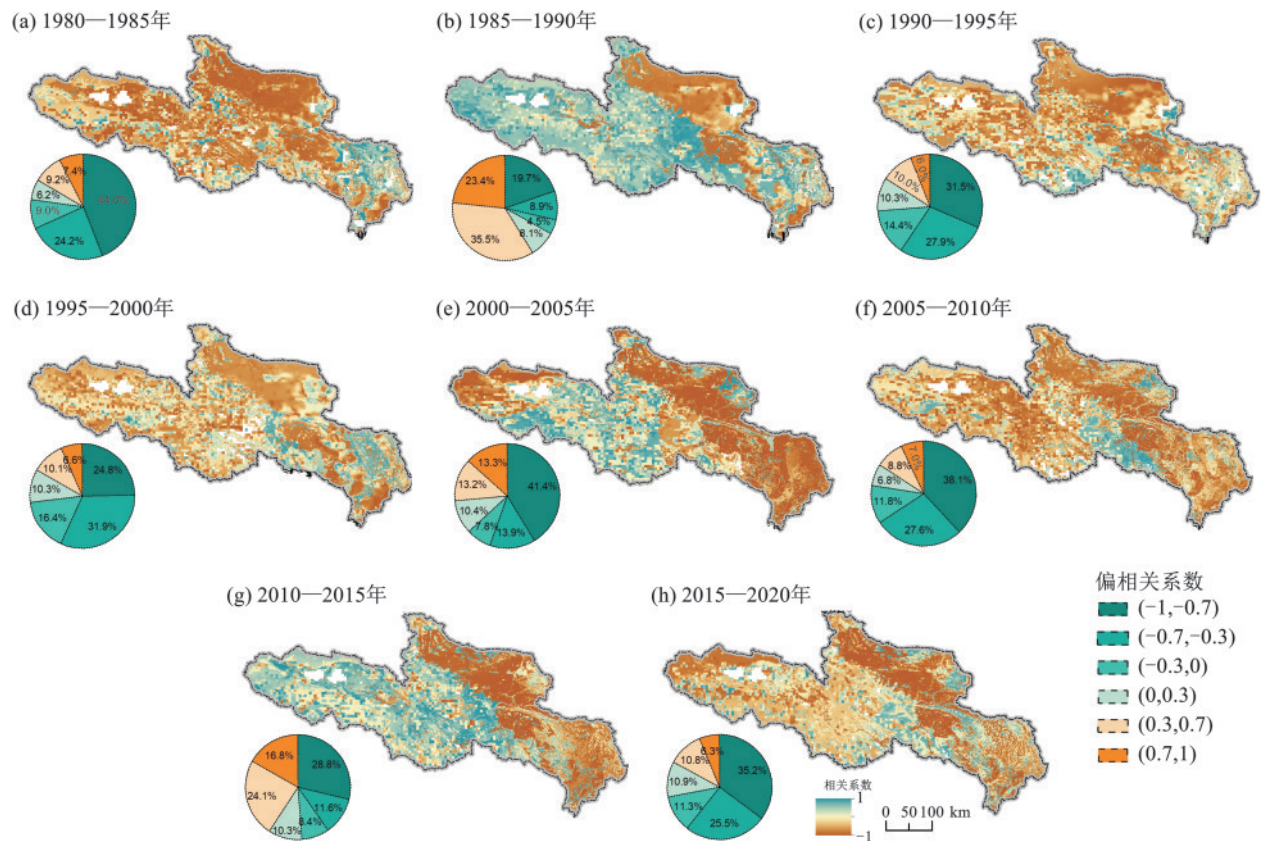


图5 黄河源区土壤侵蚀与年平均气温的偏相关性

Fig.5 Partial correlation analysis between soil erosion and annual average temperature in source region of Yellow River

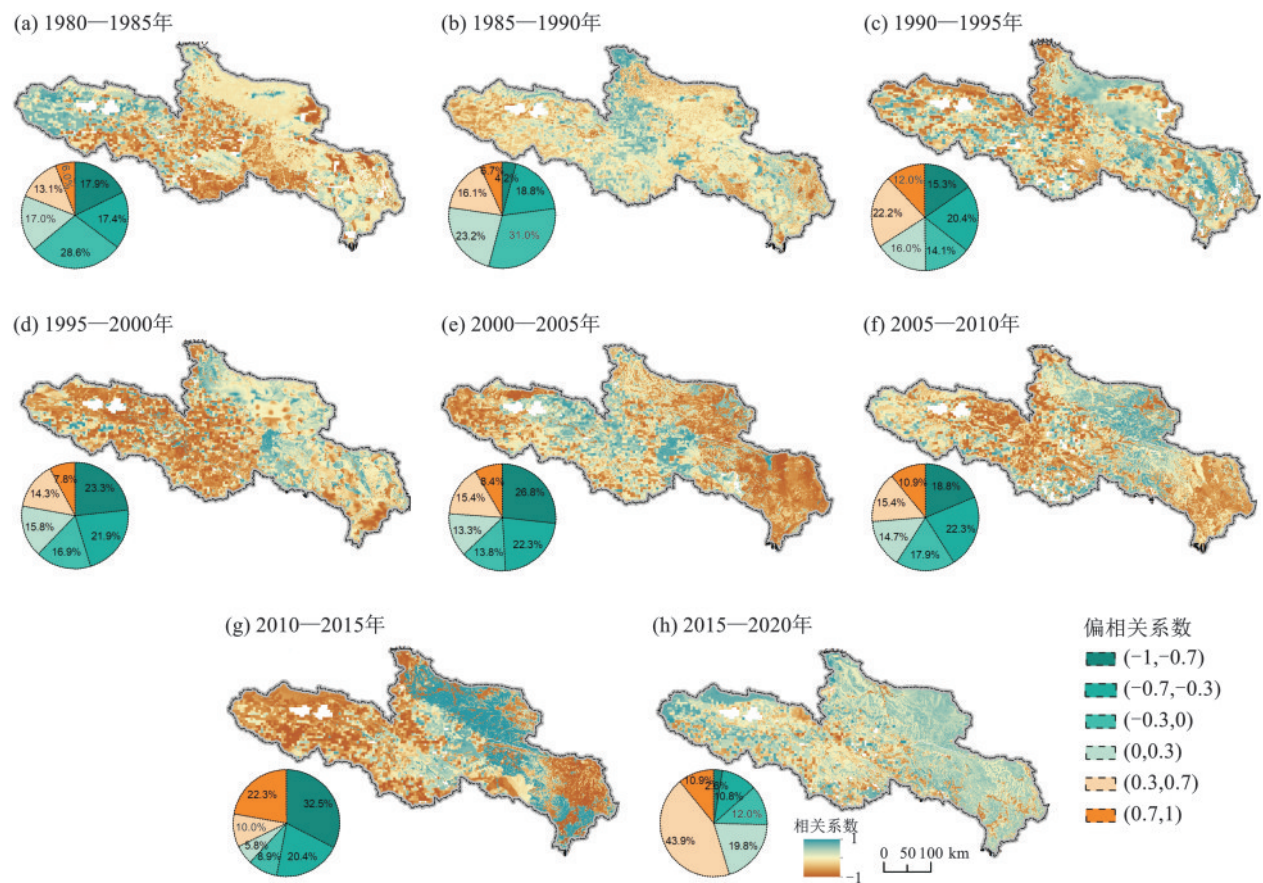


图6 黄河源区土壤侵蚀与风速的偏相关性

Fig.6 Partial correlation analysis between soil erosion and wind speed in source region of Yellow River

气温对侵蚀的影响由早期以弱正向驱动逐步演变为后期以负相关为主导,反映出气候变暖背景下冻融过程与植被恢复共同作用下的复杂响应机制。1980—1995年,气温与侵蚀呈普遍正相关,尤其在西北部高海拔地区,正相关区域占比达46.0%以上。表明气温升高通过增强冻融循环频率和强度,破坏土壤结构,促进水蚀与风蚀发生。然而,2000—2005年正相关比例骤降至31.1%,并持续下降至2015—2020年的12.8%;与此同时,负相关区域占比从1995—2000年的17.8%上升至2015—2020年的38.5%,且在玛多、鄂陵湖周边等生态恢复重点区尤为明显。

1980—2020年黄河源区年平均风速与复合土壤侵蚀强度的偏相关系数整体呈先增强后减弱的动态演化趋势。早期(1980—1990年),风速与侵蚀呈显著正相关,正相关区域占比维持在30.0%以上,主要分布于玛多西部、曲麻莱北部等高海拔宽谷和退化草甸区,表明风力侵蚀在气候干冷、植被稀疏背景下占据主导地位。进入2000年后,随着生态恢复工程的推进,风速对侵蚀的驱动作用逐步削弱。2000—2005年正相关比例降至26.8%,并持续下降至2015—2020年的19.8%;与此同时,负相关区域占比从1995—2000年的4.3%上升至2015—2020年的15.7%,尤其在扎陵湖-鄂陵湖周边及黑土滩治理区表现明显,反映出地表植被覆盖增加有效抑制风蚀过程。值得注意的是,2005—2010年出现短暂波动,正相关比例回升至25.4%,可能与该时期局部强风事件或草原退化反弹有关。但总体来看,风速对侵蚀的影响已从主导因子逐渐转变为次要因子,其作用被植被恢复所部分抵消。

3 讨论

本研究揭示,1980—2020年黄河源区复合土壤侵蚀环境经历由低温高风蚀-强冻融向暖湿低风蚀-植被主导调控的系统性转型,该转变是气候变化与生态工程协同作用的结果。降水显著增加(尤其2005年后)与气温持续升高(1980—2020年累计升温约1.5℃)共同推动区域水热条件向“暖湿化”演进,与青藏高原整体气候趋势一致^[34-35]。湿润化虽有利于植被恢复(植被覆盖度提升超40.0%),但也通过增强降雨动能和地表径流,局部抬升水蚀风险^[36]。与此同时,冻融循环天数呈下降趋势,反映冻结期缩短、活动层加深,导致冻土退化与产流集中,使冻融和水力侵蚀在高寒草甸区仍具高敏感性^[37]。值得注意的是,风速的持续降低与植被覆盖度提升形成正反馈,显著削弱风蚀潜力,在高寒沙化治理中发挥关键作用^[38]。

不同侵蚀营力强度的时空分异变化深刻反映生态恢复背景下的人类活动与气候变化综合作用。水蚀主要集中在东南部河谷带,其强度大幅下降,减少691 t/(km²·a),主要归因于生态恢复、围栏封育等措施提升地表覆盖与根系固土能力,有效拦截雨滴溅蚀与坡面径流^[39]。风蚀范围有限(仅占8%)且以微-轻度为主,其近乎消失的中高强度等级凸显植被恢复对地表粗糙度和抗风蚀阈值的提升效应。相比之下,冻融侵蚀虽分布最广(59.3%),但其强度亦显著减弱,表明植被覆盖不仅抑制水蚀与风蚀,还能通过调节地表能量平衡、减少冻融循环频次,间接削弱冻融侵蚀动力^[40]。不同侵蚀强度的转移矩阵进一步证实,3类侵蚀均以高强度向低等级转化为主,说明生态工程在多营力协同治理中具有普适有效性。然而,局部中低强度水蚀区出现升级现象,可能与极端降水事件频发或过度放牧有关,提示需警惕恢复-扰动交替下的侵蚀反弹风险。综上,生态恢复通过提升植被覆盖,增强地表抗蚀能力并调节局地微气候(如降低风速、减少雨滴溅蚀等),同时改善下垫面水热条件,削弱冻融循环强度,从而有效抑制复合侵蚀营力作用,显著减弱黄河源区复合土壤侵蚀。

不同气候因子对复合侵蚀的影响表现出显著时空异质性且存在异常响应。本研究中,水力侵蚀区中观测到降水与水蚀呈负相关关系。该发现挑战了传统的假设,即降水增加加剧侵蚀。事实上这是区域存在多重侵蚀营力交替或者共同作用的结果。黄河源区降水的区域时空异质性与气温梯度分布形成不同侵蚀力的交替和协同作用,继而形成复合营力侵蚀^[1,35]。具体而言,部分地区形成水-风复合侵蚀营力区域^[41],降水稀少时期,土壤颗粒间的黏聚力减弱,使风蚀过程增强。而随着降水的增加,土壤水分上升,湿润土壤颗粒间的凝聚力增强,更难将土壤颗粒吹走,表现为侵蚀减弱^[42]。侵蚀与降水的关系由正相关转为负相关的特殊关系。同样的,在黄河源区风速与风蚀呈负相关,在黄河源区西部和中部存在风-冻融复合侵蚀区域,特别是在高海拔(4 200~4 500 m)的岛状和斑状多年冻土带。在风-冻融复合侵蚀区域,由于冻融过程的周期性变化,风速与风蚀的关系变得复杂。在冬季土壤冻结期,风速与风蚀呈负相关。在这个时期,土壤表面形成冻结层,有效地减少风对土壤的直接影响,从而抑制风蚀。乌兰布和沙漠的研究表明,当含水率较低($\leq 2\%$)时,形成稳定的冻结层,降低风蚀速率^[42]。然而,在气温升高的土壤融化期,表层

土体转为较为松散结构,风速与风蚀呈正相关。黄河源区复合侵蚀营力的交替和协同作用在特定时空条件中导致气候变量与侵蚀强度变化的异常响应。

值得注意的是,黄河源区作为世界第三极,对全球气温变化极为敏感。温度变化影响土壤冻融循环过程,进而影响植被恢复过程。大规模的生态恢复有效缓解全球变暖对黄河源区水土流失的波动影响。然而,脆弱的高寒气候特征,土壤贫瘠,生态承载力低等问题给生态恢复带来困难与挑战。因此,在全球气候变暖和人类活动加剧的背景下,持续加强对黄河源区等高寒脆弱生态系统的复合土壤侵蚀研究和防治势在必行。

4 结 论

1) 系统性侵蚀环境转型。1980—2020年黄河源区经历显著的气候与生态转型。年降水量显著增加($p < 0.01$),气温升高约 1.5°C ,风速下降约20.0%,植被覆盖度从0.40~0.50增至0.60~0.70,增幅超40.0%。共同促使区域由低温高风蚀、强冻融侵蚀向暖湿低风蚀、植被主导调控转变。

2) 复合侵蚀强度显著降低。水力、风力及冻融侵蚀强度均显著下降。至2020年,水力侵蚀微弱和轻度侵蚀面积占比达87.2%,水力侵蚀模数减少 $691.1\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。风蚀模数由 $165.3\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 降至 $12.4\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,中度及以上风蚀等级完全消失。冻融侵蚀强度指数为1.5~2.2,微度和轻度侵蚀占比超过87.0%。

3) 气候变化与侵蚀响应的时空异质性。黄河源区降水时空异质性与气温梯度分布形成复合营力侵蚀交替和协同作用,导致特定时空条件中的气候变量与侵蚀强度变化出现异常响应。

4) 复合侵蚀营力的复杂性与未来研究应进一步识别复合侵蚀营力交替或协同作用的区域,完善复合土壤侵蚀类型分区时空分布,为复合土壤侵蚀研究提供支撑。

参考文献:

- [1] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161.
Zhang Pan, Yao Wenyi, Liu Guobin, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 154-161.
- [2] 杨新.中国土壤侵蚀分区及土壤流失调查[J].自然灾害学报,2011,20(4):131-136.
Yang Xin. Study of soil erosion regionalization and soil

loss survey in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(4): 131-136.

- [3] Xu Shu, Qin Tianling, Lv Xizhi, et al. Analysis of runoff and sediment evolution and attribution in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 57: e102110.
- [4] 金君良,李子威,朱榴骏,等.高原寒区水文过程演变模拟与展望[J].水科学进展,2025,36(6):959-973.
Jin Junliang, Li Ziwei, Zhu Liujun, et al. Evolution, modeling, and prospects of hydrological processes in high-altitude cold regions[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(6): 959-973.
- [5] 赖欢欢,陈竹安,钟发明.季节尺度下三江源生态系统服务时空演变及权衡协同[J/OL].环境科学:2025,1-19[2026-06-10].<https://doi.org/10.13227/j.hjks.202508268>.
Lai Huanhuan, Chen Zhu'an, Zhong Faming. Spatiotemporal evolution and trade-off synergy of ecosystem services in the Sanjiangyuan Region at seasonal scales [J/OL]. Environmental Science, 2025, 1-19 [2026-06-10]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202508268>.
- [6] 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 Tongde, Jiao Juying, Wang Haolin, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 547-564.
- [7] 段成伟.黄河源区高寒草甸斑块退化机理与其恢复研究[D].西宁:青海大学,2023.
Duan Chengwei. Study on mechanisms of alpine meadow patchy degradation and its restoration in the source zone of the Yellow River[D]. Xining: Qinghai University, 2023.
- [8] Yu Kaining, Yang Caijia, Wu Tao, et al. Analysis of vegetation coverage changes and driving forces in the source region of the Yellow River[J]. Scientific Reports, 2025, 15: e22569.
- [9] 江凌,肖懿,欧阳志云,等.基于RWEQ模型的青海省土壤风蚀模数估算[J].水土保持研究,2015,22(1):21-25.
Jiang Ling, Xiao Yi, Ouyang Zhiyun, et al. Estimate of the wind erosion modules in Qinghai Province based on RWEQ model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 21-25.
- [10] 迟文峰,王月甜,党晓宏,等.黄河流域土壤侵蚀时空演变与格局特征[J].中国沙漠,2023,43(3):305-317.
Chi Wenfeng, Wang Yuetian, Dang Xiaohong, et al. Temporal variation and spatial pattern of soil erosion in the Yellow River basin [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 305-317.
- [11] 黄婷婷,赵辉,赵院,等.三江源国家公园土壤侵蚀及其

- 分布特征[J].水土保持通报,2023,43(5):95-103.
- Huang Tingting, Zhao Hui, Zhao Yuan, et al. Soil erosion and its spatial distribution characteristics in three-river-source national park[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 95-103.
- [12] 刘海, 刘凤, 郑粮. 气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 143-151.
- Liu Hai, Liu Feng, Zheng Liang. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in the Yellow River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 143-151.
- [13] 李诺成, 林战举, 谷强, 等. 长江源多年冻土区近地表冻融侵蚀强度的动态变化特征[J]. 冰川冻土, 2025, 47(5): 1290-1304.
- Li Nuocheng, Lin Zhanju, Gu Qiang, et al. Dynamic variation characteristics of near-surface freeze-thaw erosion intensity in permafrost regions of source area of Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2025, 47(5): 1290-1304.
- [14] 焦程龙, 范星文, 牛富俊, 等. 青藏高原热融滑塌冻融侵蚀对地下冰含量变化的响应研究[J]. 冰川冻土, 2025, 47(5): 1331-1342.
- Jiao Chenglong, Fan Xingwen, Niu Fujun, et al. Response of retrogressive thaw slump-induced freeze-thaw erosion to ground ice content variations on Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2025, 47(5): 1331-1342.
- [15] Li Zongjie, Liu Fang, Li Hao, et al. Driving forces of the spatiotemporal supply pattern of runoff in the source region of Yellow River[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 60: e102515.
- [16] 董晓宁, 田世民, 张丽. 黄河源区水沙变化特征分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(6): 21-27.
- Dong Xiaoning, Tian Shimin, Zhang Li. Analysis of characteristics of runoff and sediment changes in the source area of the Yellow River[J]. Yellow River, 2021, 43(6): 21-27.
- [17] Chuenchum P, Xu Mengzhen, Tang Wenzhe. Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang-Mekong River by using the modified RUSLE model[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(3): 213-227.
- [18] 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 Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711.
- [19] Williams J, Nearing M, Nicks A, et al. Using soil erosion models for global change studies[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 381-385.
- [20] Zhang Hongming, Wei Jicheng, Yang Qinke, et al. An improved method for calculating slope length(λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds[J]. Geoderma, 2017, 308: 36-45.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.
- [22] Dai Zhihui, Feng Xinbin, Zhang Chao, et al. Assessment of mercury erosion by surface water in Wanshan mercury mining area[J]. Environmental Research, 2013, 125: 2-11.
- [23] Xu Lifeng, Xu Xuegong, Meng Xiangwei. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China[J]. Catena, 2013, 100: 74-82.
- [24] Lu Qingshui, Xu Bo, Liang Fuyuan, et al. Influences of the Grain-for-Green project on grain security in southern China[J]. Ecological Indicators, 2013, 34: 616-622.
- [25] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model[J]. Agricultural Systems, 2003, 76(3): 883-894.
- [26] 刘珺, 郭中领, 常春平, 等. 基于RWEQ和WEPS模型的中国北方农牧交错带潜在风蚀模拟[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 27-37.
- Liu Jun, Guo Zhongling, Chang Chunping, et al. Potential wind erosion simulation in the agro-pastoral ecotone of northern China using RWEQ and WEPS models[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 27-37.
- [27] 李慧, 高小云. 基于多准则决策支持系统的洪水风险地区开发可能性评估[J]. 水利水电快报, 2024, 45(8): 5.
- Li Hui, Gao Xiaoyun. Application of a multi-criteria decision support system for assessing development potential in flood risk areas: Case study of Warta River[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 2024, 45(8): 5.
- [28] 李智广, 刘淑珍, 张建国, 等. 我国冻融侵蚀的调查方法[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(4): 1-5.
- Li Zhiguang, Liu Shuzhen, Zhang Jianguo, et al. Survey

- method of freeze-thaw erosion in China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(4): 1-5.
- [29] 万义荣, 黄丹, 汤林玲, 等. 新疆植被净初级生产力时空变化及其对气候变化和人类活动的响应[J/OL]. *环境科学*, 2025, 1-13 [2026-06-10]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202506270>.
- Wan Yirong, Huang Dan, Tang Linling, et al. Spatiotemporal variations of net primary productivity of vegetation in Xinjiang and its responses to climate change and human activities[J/OL]. *Environmental Science*, 2025, 1-13 [2026-06-10]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202506270>.
- [30] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [31] 崔娟娟, 信忠保, 黄艳章. 2003—2020年青藏高原冻融侵蚀时空变化特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4515-4526.
- Cui Juanjuan, Xin Zhongbao, Huang Yanzhang. The spatiotemporal variations in freeze-thaw erosion in 2003—2020 on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4515-4526.
- [32] Li Jialie, Sun Ranhao, Xiong Muqi. Methodology of Time series of soil erosion dataset in water erosion area of China in five-year increments (2000—2015) [D]. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.13>.
- [33] Han Le, Zhao Yuanyuan, Chi Wenfeng, et al. A dataset of soil wind erosion in the Yellow River basin from 2000 to 2018[J]. *China Scientific Data*, 2023, 9(3): 1-7.
- [34] Yang Wenqian, Zhang Gangfeng, Yang Huimin, et al. Review and prospect of soil compound erosion[J]. *Journal of Arid Land*, 2023, 15(9): 1007-1022.
- [35] Zhang Yiran, Zhou Degang, Guo Xiaofeng. Regional climate response to global warming in the source region of the Yellow River and its impact on runoff [J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 67(3): 843-855.
- [36] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. *Nature Communications*, 2017, 8:e2013.
- [37] Hao Hongmin, Lu Rong, Liu Yu, et al. Effects of shrub patch size succession on plant diversity and soil water content in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2016, 144: 177-183.
- [38] Ying Lingxiao, Wang Lijing, Huang Xuan, et al. Climate change impairs the effects of vegetation improvement on soil erosion control in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2024, 241: e108062.
- [39] Li Jinlong, Wang Genxu, Li Kai, et al. Impacts of climate change and freeze-thaw cycles on water and sediment fluxes in the headwater region of the Yangtze River, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2023, 227: e107112.
- [40] 杨会民, 王静爱, 邹学勇, 等. 风水复合侵蚀研究进展与展望[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 962-971.
- Yang Huimin, Wang Jing'ai, Zou Xueyong, et al. Progress and prospect of research on wind-water complex erosion[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4): 962-971.
- [41] 王艳辉, 赵晓峰, 张健乐, 等. 风水复合侵蚀对团聚体有机碳及其组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(4): 267-274.
- Wang Yanhui, Zhao Xiaofeng, Zhang Jianle, et al. Effect of wind-rain complex erosion on aggregate organic carbon and its fractions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(4): 267-274.
- [42] 韩兆恩. 冻结对风沙土风沙运移的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- Han Zhaoen. Study on the effect of freezing on aeolian sand transport in sandy soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.