DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.037 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.037
严云籍, 陈新佳, 付金霞, 等. 1960—2020年黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀动力的时空变化[J]. 水土保持研究,2026,33(6):212-221.
Yan Yunji, Chen Xinjia, Fu Jinxia, et al. Spatiotemporal variations of wind-water compound erosion dynamics in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River in 1960—2020[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):212-221.

1960—2020年黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀动力的时空变化

严云籍[1,2], 陈新佳[1], 付金霞[1], 王文静[1], 韩 颖[1]
(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 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:[目的]研究黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀动力的时空变化特征,为区域复合侵蚀研究、水土流失精准治理提供理论依据。[方法]选取3个风蚀和5个水蚀动力因子,利用全局熵权法分别构建风蚀、水蚀侵蚀动力综合指数并叠加为复合侵蚀动力指数,结合趋势分析和克里金插值法系统揭示1960—2020年研究区风水复合侵蚀动力的年际变化规律、季节性叠加效应及其空间分异格局。[结果]61年来,风蚀动力因子及其综合指数在年际和月内均显著下降,并于20世纪80年代发生突变;水蚀动力因子及其综合指数在年际呈不显著上升,但其综合指数在2月和6月显著上升。受风蚀动力显著下降的影响,风水复合侵蚀动力在年际和月内均显著下降,但2010年后缓慢回升。风水复合侵蚀动力年内呈显著"双峰"特征:7—8月(占年值的31.86%),4—6月(占年值的28.70%)表现出最强的叠加效应;这2个时段水蚀动力占比分别为80.67%和29.79%,风蚀动力占比分别为19.33%和70.21%。空间上,风水复合侵蚀动力多年均值呈北高南低格局;除米脂气象站不显著上升外,其他站点均呈下降趋势(其中7成站点显著下降)。[结论]研究区风水复合侵蚀动力具有明显的季节模式和空间分异性,7—8月、4—6月是风水复合侵蚀的高风险期。

关键词:风蚀动力; 水蚀动力; 风水复合侵蚀动力; 时空变化; 黄河中游多沙粗沙区
中图分类号:S157.1; P333.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0212-10

Spatiotemporal variations of wind-water compound erosion dynamics in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River in 1960—2020

Yan Yunji[1,2], Chen Xinjia[1], Fu Jinxia[1], Wang Wenjing[1], Han Ying[1]
(1.*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] Investigation of the spatiotemporal variations of wind-water compound erosion dynamics in the sandy and coarse sandy area of the middle Yellow River will provide a theoretical basis for regional compound erosion research and precise control of soil erosion. [**Methods**] Three wind erosion driving factors and five water erosion driving factors were selected to construct comprehensive indices of wind erosion and water erosion dynamics using the global entropy weight method. A wind-water compound erosion dynamics index was then developed by integrating these indices. The interannual variations, seasonal superimposition effects, and spatial differentiation of wind-water compound erosion dynamics in the study area during 1960—2020 were revealed using trend analysis and Kriging interpolation. [**Results**] Over the past 61 years, the wind erosion driving factors and their comprehensive index declined significantly at both interannual and monthly scales, and an abrupt

收稿日期:2025-08-21 **修回日期:**2026-01-16 **接受日期:**2026-01-21
资助项目:国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金(U2243210);国家重点研发计划项目课题(2022YFF1300805)
第一作者:严云籍(2000—),女,云南丘北人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:2019011610@nwsuaf.edu.cn
通信作者:付金霞(1978—),女,甘肃靖远人,博士,副教授,主要从事气候变化、土地利用覆被变化与土壤侵蚀研究。E-mail:fujinxia405@nwsuaf.edu.cn

change occurred in the late 1980s. In contrast, the water erosion driving factors and their comprehensive index showed a non-significant upward trend interannually, while the comprehensive index increased significantly in February and June. Due to the significant decline in wind erosion dynamics, wind-water compound erosion dynamics decreased significantly at both interannual and monthly scales, but showed a gradual increase after 2010. The compound erosion dynamics exhibited an obvious double-peak pattern within the year, with the strongest superimposition effects occurring in July—August (31.86% of the annual total) and April—June (28.70%). During these two periods, water erosion dynamics accounted for 80.67% and 29.79%, respectively, while wind erosion dynamics accounted for 19.33% and 70.21%. Spatially, the long-term mean compound erosion dynamics exhibited a pattern of being higher in the north and lower in the south. Except for a non-significant upward trend at the Mizhi meteorological station, all other stations showed decreasing trends, with approximately 70% of stations exhibiting significant declines. [**Conclusion**] Wind-water compound erosion dynamics in the study area exhibit pronounced seasonal patterns and spatial heterogeneity, with July—August and April—June identified as high-risk periods.

Keywords: wind erosion dynamics; water erosion dynamics; wind-water compound erosion dynamics; spatiotemporal variations; sandy and coarse sandy area of the middle Yellow River

黄河中游多沙粗沙区是我国典型的生态脆弱区,也是水土流失最为严重的区域之一。区内地形破碎、气候干旱、土壤疏松、植被稀疏。年内冬季寒冷、春季多风沙、夏秋降水集中且多为暴雨;风、水侵蚀交替/耦合作用强烈,极易形成复合侵蚀高峰[1-2]。尽管区域面积仅占黄河流域的9.9%,但多年平均年输沙量达11.82亿 t,占黄河总输沙量的73.9%,其中粒径≥0.05 mm的粗泥沙占比高达72.5%[3-4]。风力与水力在时间上交替、空间上叠加,显著延长了侵蚀持续时间、增强了侵蚀强度,成为区域产沙模数偏高的根本原因[5-6]。风水侵蚀动力的强度及其空间分异与时间波动特征,是引起地表侵蚀强度时空变异的第一性因素。因此,系统揭示黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀动力的时空演变规律,将为区域复合侵蚀研究、水土流失精准治理提供理论依据。

黄河中游多沙粗沙区风蚀、水蚀问题已引起众多学者的关注和研究,但目前相关研究主要聚焦于区域侵蚀环境特征、水蚀影响下的侵蚀强度空间变异[7-8]、风蚀或水蚀单一动力驱动的侵蚀过程或机理刻画[9]。尽管已有部分研究尝试通过小尺度实地监测[10-11]、控制条件试验模拟[12-13]、侵蚀模型模拟等手段探讨区域的风水复合侵蚀特征,一个根本性的前提问题——即驱动土壤侵蚀发生的"动力引擎"(风水复合侵蚀动力)如何随时间与空间而变化——其系统性认知与解析仍然较薄弱。现有研究多针对单一侵蚀类型(风蚀或水蚀)的动力因子进行分析[14-15],或仅在评估土壤侵蚀强度时将其作为背景参数简要提及[16-17],但缺乏对风水复合侵蚀动力关键参数(如侵蚀性风速强度和频率、降雨侵蚀力等)的长历时年际演变、季节性动态与叠加及其空间异质性等特征的精细刻画,从而难以支撑区域水土保持规划与生态修复工程的精准实施。因此,亟待聚焦于"侵蚀动力系统"本身,对黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀动力的长历时年际演变规律、季节性动态与叠加特征及其空间分异格局进行系统、深入研究。

因此,本研究基于1960—2020年黄河中游多沙粗沙区及其周边24个气象站点的多源气象数据,在筛选关键风蚀、水蚀动力因子的基础上,利用全局熵权法分别构建风蚀、水蚀动力综合指数,并通过叠加两类指数得到风水复合侵蚀动力综合指数。采用动态趋势分析、突变检验以及空间插值等手段,系统揭示风水复合侵蚀动力的年际变化、季节特征与空间格局演变,以期为区域复合侵蚀研究、水土流失精准治理提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄河中游多沙粗沙区(35°54′—40°15′N,106°57′—111°58′E)位于河口镇至龙门区间以及泾河、洛河上游地区,涉及内蒙古、陕西、山西、甘肃和宁夏5省(自治区)(图1),总面积7.86万 km²[18]。区域年平均气温11～14 ℃,年平均降水量350～550 mm;年内冬季寒冷、春季多风沙、夏秋降水集中且多为暴雨,风水复合侵蚀严重。地貌以黄土丘陵沟壑和黄土高塬沟壑为主,地形破碎,沟壑密度达2～5 km/km²,坡陡沟深。地表物质主要为沙黄土,其中粒径≥0.05 mm的粗颗粒含量占31%～57%[19]。植被以草原、灌丛和人工林为主,植被覆盖度呈显著空间变异。年均输沙量达11.82亿 t,占黄河总输沙量的73.9%,对黄河防洪安全构成严重威胁[20]。

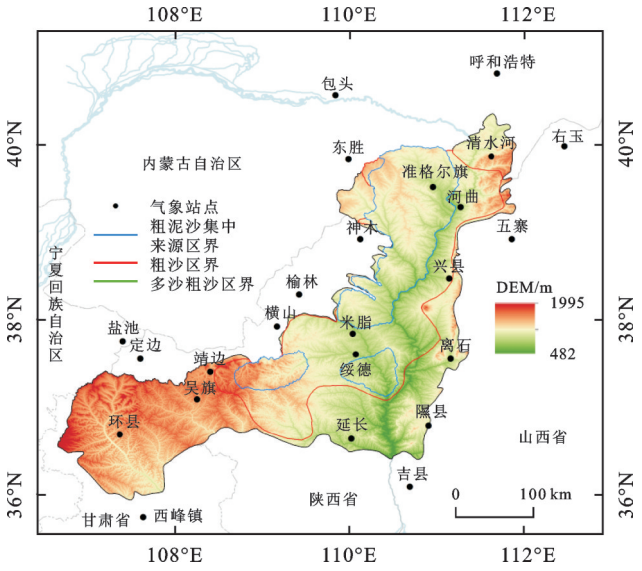


图 1 黄河中游多沙粗沙区地理位置及气象站点分布

Fig. 1 Geographical location and distribution of meteorological stations in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River

1.2 数据来源

黄河中游多沙粗沙区气象资料来源于国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn/),数据均经过了严格的质量控制。本研究选取1960—2020年研究区及其周边24个气象站点(图1)的每日平均风速、降水量、平均气温、相对湿度等数据,用于计算风蚀、水蚀动力因子。

1.3 研究方法

1.3.1 风蚀、水蚀动力因子的选择和计算 侵蚀动力是地表侵蚀发生的前提和必要条件,侵蚀动力(风、降雨)的能量越大、持续时间越长、出现频次越多,越容易引发强烈的地表侵蚀过程。本研究在考虑侵蚀动力的强度、频率、持续时间、能量以及侵蚀动力临界值和极端值的基础上,选择侵蚀性风速[21](日平均风速≥5 m/s)、侵蚀性风速频率、风蚀气候因子作为风蚀动力因子,选择≥25 mm降雨量、≥50 mm降雨量、连续5 d最大降雨量、≥95%分位数降雨量、降雨侵蚀力作为水蚀动力因子。风蚀气候因子和降雨侵蚀力计算公式如下:

(1)风蚀气候因子。本研究采用联合国粮农组织(FAO)推荐的公式[22]计算研究区风蚀气候因子。公式如下:

$$W=\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{12}\bar{u}^{3}\left(\frac{\mathrm{ETP}_i-P_i}{\mathrm{ETP}_i}\right)d \tag{1}$$

式中:$\bar{u}$表示2 m高处的月均风速(m/s);ETP_i表示月潜在蒸发量(mm);P_i表示月降水量(mm);d表示月天数。

其中,ETP_i的计算公式为:

$$\mathrm{ETP}_i=0.19(20+T_i)^2(1-r_i) \tag{2}$$

式中:T_i表示月平均气温(℃);r_i表示月相对湿度(%)。

(2)降雨侵蚀力。本研究采用基于日降雨数据的降雨侵蚀力模型[23]计算研究区的降雨侵蚀力。模型如下:

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

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

$$\beta=0.8363+\frac{18.144}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \tag{5}$$

式中:$k=1,2,3,\cdots,m$为某半月内侵蚀性降雨日数;P_k为半月内第k天的日雨量,本研究侵蚀性降雨量使用的标准是12 mm,否则以0计算。$R_{半月}$为第i个半月时段的降雨侵蚀力R值;α和β为模型参数;P_{d12}为日雨量≥12 mm的日平均雨量(即1年中≥12 mm日雨量的总和与相应日数的比值);P_{y12}为日雨量≥12 mm的年平均雨量(即1年中≥12 mm日雨量年累加值的多年平均)。

1.3.2 全局熵权法 本研究利用全局熵权法分别构建风蚀、水蚀动力的综合指数。全局熵权法是一种基于全局思想和信息熵理论的客观赋权方法,已被广泛应用于多指标综合评价、决策分析和系统优化等领域[24-25]。其核心是通过分析多指标、多时段数据的全局信息离散程度,确定各指标的权重。对于评价指标而言,指标值的离散程度越高(即不同样本、不同时段的差异越大),其信息熵越小,说明该指标提供的有效信息量越多,则权重越大;反之,若指标值趋于一致,信息熵越大,则权重越小。与传统熵权法相比,全局熵权法整合所有时段的截面数据,构建全局决策矩阵,计算的权重更具稳定性和综合性,能反映指标在时空维度上的长期贡献度。其计算步骤如下:

(1)使用p个指标$x_1, x_2,\cdots,x_p$对n个站点T年的综合指数进行评价,基于T张截面数据表$\boldsymbol{X}^T=(x_{ij})_{n\times p}$,构成$nT\times p$的全局评价矩阵$\boldsymbol{X}$:

$$\boldsymbol{X}=(X^1,X^1,\cdots,X^1)'_{nT\times p}=(x_{ij})_{nT\times p} \tag{6}$$

(2)对全局评价矩阵$\boldsymbol{X}$中的数据进行标准化:

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min\limits_i x_{ij}}{\max\limits_i x_{ij}-\min\limits_i x_{ij}}\times 99+1 \quad 1\leqslant i\leqslant nT,1\leqslant j\leqslant p \tag{7}$$

(3)计算第j个指标下第i个站点在该指标中所占的比重f_{ij}:

$$f_{ij}=\frac{x'_{ij}}{\sum\limits_{i=1}^{nT}x'_{ij}} \quad 1\leqslant i\leqslant nT,1\leqslant j\leqslant p \tag{8}$$

(4)计算第j个指标的信息熵值e_j:

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{nT}f_{ij}\ln f_{ij} \quad 1\leqslant i\leqslant nT,1\leqslant j\leqslant p \tag{9}$$

其中$k=\frac{1}{\ln(nT)}$

(5)计算第j指标的差异系数g_j:

$$g_j=1-e_j \tag{10}$$

(6)计算各指标的权重w_j:

$$w_j=g_j/\sum_{j=1}^{p}g_j \tag{11}$$

(7)计算综合评价值,得到侵蚀动力的综合指数F_j:

$$F_j=\sum_{j=1}^{p}w_j x'_{ij} \tag{12}$$

1.3.3　时空变化分析方法　本研究采用线性倾向估计、5 a滑动平均、Mann-Kendall趋势检验分析各指标或指数的动态变化趋势。Mann-Kendall趋势检验的统计变量$Z_{MK}>0$或$Z_{MK}<0$时,表示时间序列呈上升或下降趋势。当$|Z_{MK}|\geq1.96$时,达到0.05的显著性水平;Z_{MK}的绝对值越大,说明时间序列变化趋势越显著。采用累积距平法和Mann-Kendall突变检验综合探明各指标或指数的突变点。累积距平曲线的上下起伏可直观判断时间序列的阶段性变化特征或发生突变的大致时间。Mann-Kendall突变检验的曲线UF和UB在置信区间(±1.96)内相交时,则相交点为时间序列的突变点。利用GIS技术和克里金插值法获得各指标或指数的空间分布图,并分析其空间格局变化。采用Mann-Kendall趋势检验法分析每个气象站点的各指标或指数在区域的变化趋势。

2　结果与分析

2.1　风蚀、水蚀动力因子的时空变化

2.1.1　时间变化　1960—2020年黄河中游多沙粗沙区风蚀动力因子的变异系数CV值变化于0.04～0.50,其中侵蚀性风速年均值变异系数最小、侵蚀性风速年频次变异系数最大。水蚀动力因子的CV值变化于0.19～0.50,其中连续5 d最大降雨量变异系数最小、≥50 mm降雨量变异系数最大(表1)。线性倾向估计和Mann-Kendall趋势检验值Z_{MK}表明,1960—2020年3个风蚀动力因子均呈显著下降趋势($|Z_{MK}|\geq1.96$,$p<0.05$),侵蚀性风速年均值、侵蚀性风速年频次、风蚀气候因子的年减少率分别为0.009 4 m/s,0.43次和0.14。3个风蚀动力因子年际变化均呈先波动上升、再快速下降、2010年后略有回升的趋势(图2)。综合累积距平法和Mann-Kendall突变检验结果发现(图3),侵蚀性风速年均值、侵蚀性风速年频次、风蚀气候因子分别在1988年、1988年、1983年发生了由上升趋势转为下降趋势的突变。≥25 mm降雨量、≥50 mm降雨量、≥95%分位数降雨量、连续5 d最大降雨量呈不显著下降趋势,其余水蚀动力因子均呈不显著上升趋势($|Z_{MK}|<1.96$,$p\geq0.05$)(表1),均呈先波动下降、2010年后缓慢上升的变化过程,年际波动频繁(图2),无明显突变点。

表1　1960—2020年黄河中游多沙粗沙区风蚀、水蚀动力因子变化趋势

Table 1　Change trends of wind erosion and water erosion dynamic factors in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020)

指标	平均值	最小值	最大值	变异系数	M－K趋势系数	线性倾向估计
侵蚀性风速年均值/(m·s^{-1})	0.21	5.41	6.42	0.04	－6.61	－0.0094
侵蚀性风速年频次/(次·a^{-1})	17.27	5.44	39.27	0.50	－8.12	－0.4276
风蚀气候因子	16.14	－0.88	29.77	0.35	－3.52	－0.1373
≥25 mm降雨量/mm	126.37	24.05	225.33	0.34	0.98	0.2721
≥50 mm降雨量/mm	38.90	4.46	88.34	0.50	0.00	0.0360
连续5d最大降雨量/mm	77.48	37.45	112.69	0.19	－0.13	0.0431
≥95%分位数降雨量/mm	320.05	138.57	478.60	0.21	1.07	0.5659
年降雨侵蚀力/(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1})	1347.87	412.55	2306.89	0.29	0.88	0.0119

2.1.2　空间变化　1960—2020年黄河中游多沙粗沙区大多数气象站点的侵蚀性风速年均值、侵蚀性风速年频次、风蚀气候因子呈显著减少趋势($p<0.05$),仅个别站点(呼和浩特、榆林、离石和延长)的风蚀气候因子呈不显著增加趋势($p\geq0.05$)(图4)。侵蚀性风速年均值呈西高东低的空间分布格局,而侵蚀性风速年频次和风蚀气候因子均呈自东南向西北递增的分布趋势。侵蚀性风速多年均值在绥德、清水河形成高值中心,其年频次多年均值在定边、东胜形成高值中心,而风蚀气候因子多年均值在东胜、靖边形成高值中心。

黄河中游多沙粗沙区大多数气象站点的水蚀动力因子变化趋势不显著,仅有少数站点的≥25 mm降雨量(定边和米脂)、连续5 d最大降雨量(包头和米脂)、≥95%分位数降雨量(靖边和米脂)、降雨侵蚀力(定边、靖边和米脂)呈显著上升趋势($p<0.05$)(图

4)。5个水蚀动力因子均呈自东南向西北减少的空间分布趋势。≥25 mm降雨量、≥95%分位数降雨量多年均值在吉县形成高值中心,≥50 mm降雨量多年均值在神木市和吉县形成高值中心,连续5 d最大降雨量多年均值在隰县形成高值中心,降雨侵蚀力多年均值则在西峰镇和吉县形成高值中心。

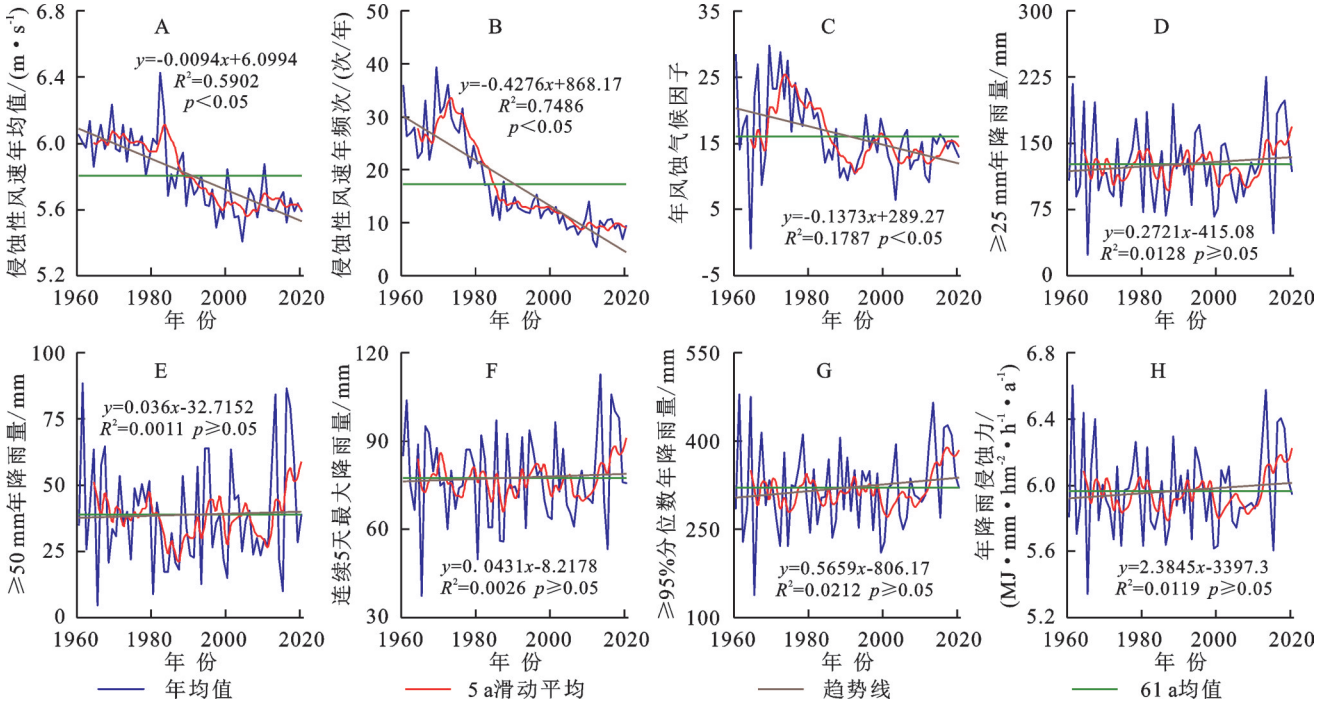


图2 黄河中游多沙粗沙区1960—2020年风蚀、水蚀动力因子的年际变化

Fig. 2 Interannual changes of wind erosion and water erosion dynamic factors in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020)

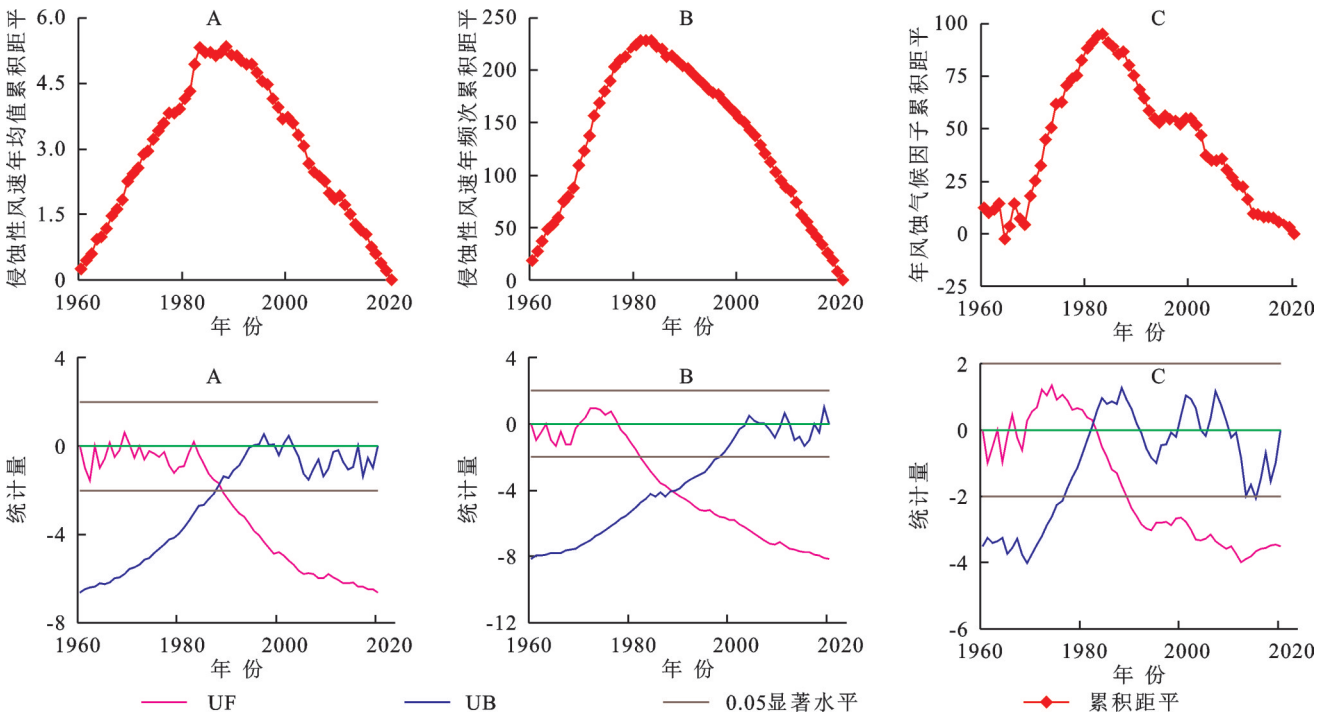


图3 黄河中游多沙粗沙区1960—2020年风蚀动力因子的突变检验(累积距平和Mann-Kendall法)

Fig. 3 Mutation test of wind erosion dynamic factors in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020) (cumulative anomaly and Mann-Kendall test)

2.2 侵蚀动力综合指数时空变化

2.2.1 时间变化 1960—2020年黄河中游多沙粗沙区风蚀动力综合指数的变异系数CV值为0.32,水蚀动力综合指数的变异系数CV值为0.34。近61年间,风蚀动力综合指数呈显著下降趋势($p<0.05$),而水蚀动力综合指数呈不显著增加趋势($p\geq0.05$)(表2)。风

蚀动力综合指数61年间呈先波动上升、再快速下降、2010年后略有回升的趋势(图5A),且在1989年发生了由上升趋势转为下降趋势的突变(图6A)。水蚀动力综合指数年际间波动频繁并在2010年后出现上升趋势(图5B),无明显突变点(图6B)。年内变化表明,风蚀动力综合指数在1—4月呈上升趋势,5—9月呈下降趋势,10月开始回升(图7);风蚀动力综合指数的高峰期是3—5月(主高峰,占年值的38.85%)和11—12月(次高峰,占年值的15.93%),低谷期是7—9月;61年间各月的风蚀动力综合指数均呈现显著减少趋势($p<0.05$)。水蚀动力综合指数在1—7月呈上升趋势、8—12月呈下降趋势(图7),高峰期是6—9月(占年值的81.67%);61年间水蚀动力综合指数在2月和6月表现为"显著增加"趋势,其余月份变化不显著。

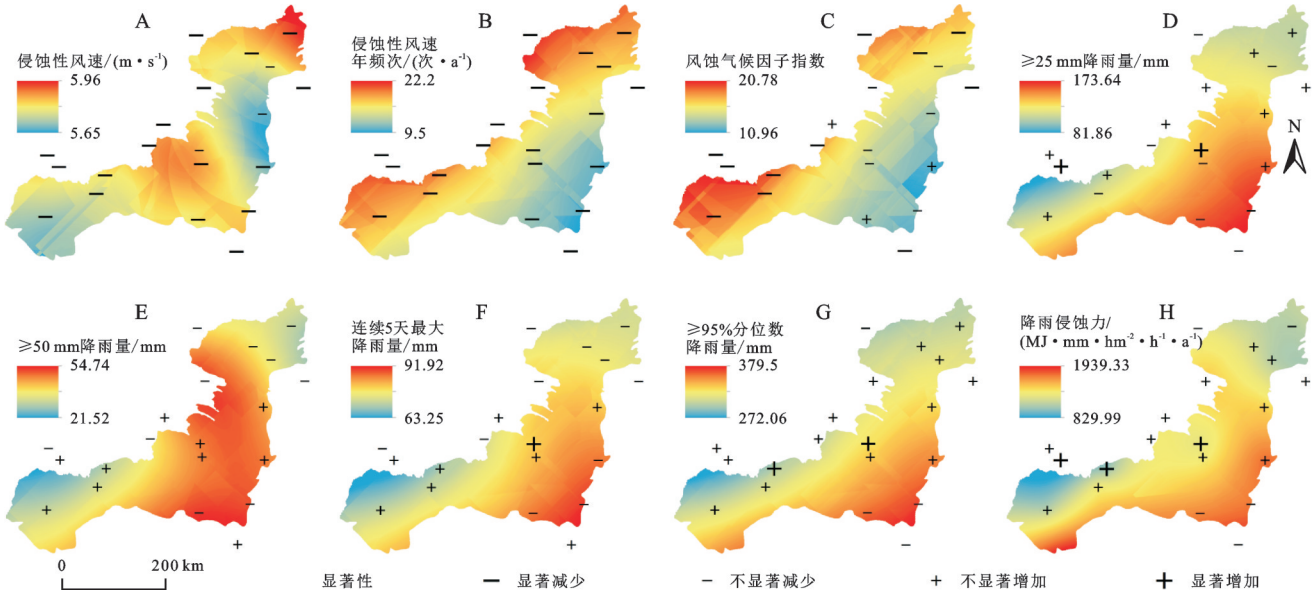


图4　黄河中游多沙粗沙区1960—2020年风蚀、水蚀动力因子的空间变化趋势

Fig. 4　Spatial variations of wind erosion and water erosion dynamic factors in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020)

1960—2020年风水复合侵蚀动力综合指数的变异系数CV值为0.23。受风蚀动力综合指数显著下降趋势的影响,风水复合侵蚀动力综合指数也呈显著下降趋势($p<0.05$)(表2)。年际变化呈先波动上升、再快速下降、2010年后略有回升的趋势(图5C)。风水复合侵蚀动力综合指数在1981年发生了由上升趋势转为下降趋势的突变(图6C)。风水复合侵蚀动力综合指数在年内出现双峰特征,主高峰在7—8月(占年值31.86%)、次高峰在4—6月(占年值28.70%),这2个时段风、水动力叠加效应最强,其中水动力占比分别为80.67%和29.79%,风动力占比分别为19.33%和70.21%;在1—3月、10—12月,风、水动力叠加效应近似。61年间各月风水复合侵蚀动力综合指数均"显著减少",表明复合侵蚀的长期变化主要受风蚀动力减弱的影响,水蚀动力的个别月份增强(如2月、6月)未对整体复合侵蚀趋势产生显著影响。

表2　1960—2020年黄河中游多沙粗沙区侵蚀动力综合指数的变化趋势

Table 2　Change trends of comprehensive index of erosion dynamics in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020)

指标	平均值	最小值	最大值	变异系数	M-K趋势系数	线性倾向估计
风蚀动力综合指数	0.22	0.11	0.36	0.32	−8.28	−0.0036
水蚀动力综合指数	0.16	0.04	0.30	0.34	0.21	0.0002
风水复合侵蚀动力综合指数	0.38	0.25	0.60	0.23	−5.69	−0.0033

2.2.2　空间变化　61年间区域所有气象站点的风蚀动力综合指数呈减少趋势,除呼和浩特呈不显著减少趋势($p\geq0.05$)外,其他23个站点均呈显著减少趋势($p<0.05$)。风蚀动力综合指数多年均值呈西北高、东南低的空间格局,在东胜和定边形成高值中心,在延长形成低值中心。大多数气象站点的水蚀动力综合指数变化趋势不显著,其中15个站点(包头、呼和浩特、右玉、准格尔旗、榆林、神木、五寨、兴县、盐池、靖边、吴旗、绥德、离石、环县、西峰镇)呈不显著增加趋势($p\geq0.05$),7个站点(东胜、清水河、河曲、横山、隰县、延长、吉县)呈不显著减少趋势($p\geq0.05$),仅定边、米脂2个站点呈显著增加趋势($p<0.05$)。水蚀动力综合指数多年均值呈东南高、西北低的分布格局,在吉县形成高值中心,在包头和盐池形成低值中心。

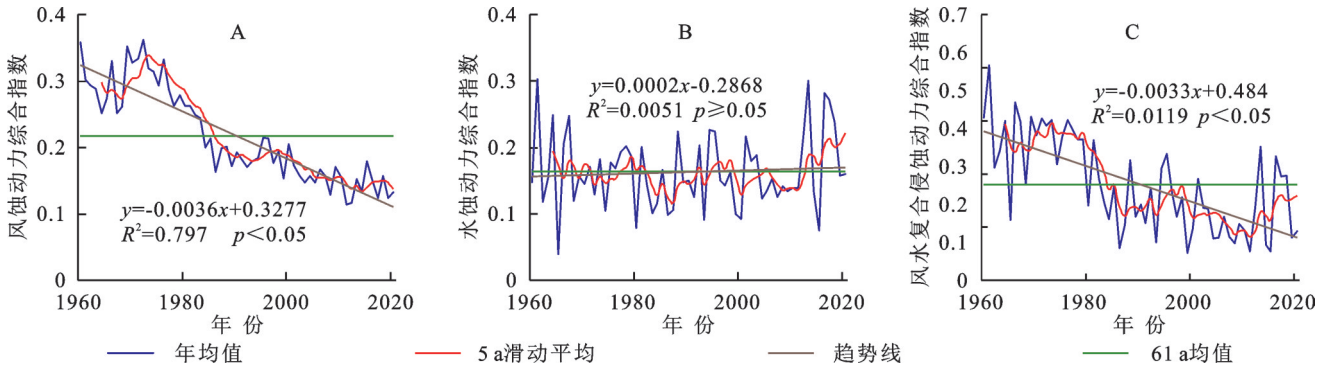


图 5 黄河中游多沙粗沙区 1960—2020 年侵蚀动力综合指数的年际变化

Fig. 5 Interannual changes of comprehensive index of erosion dynamics in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020)

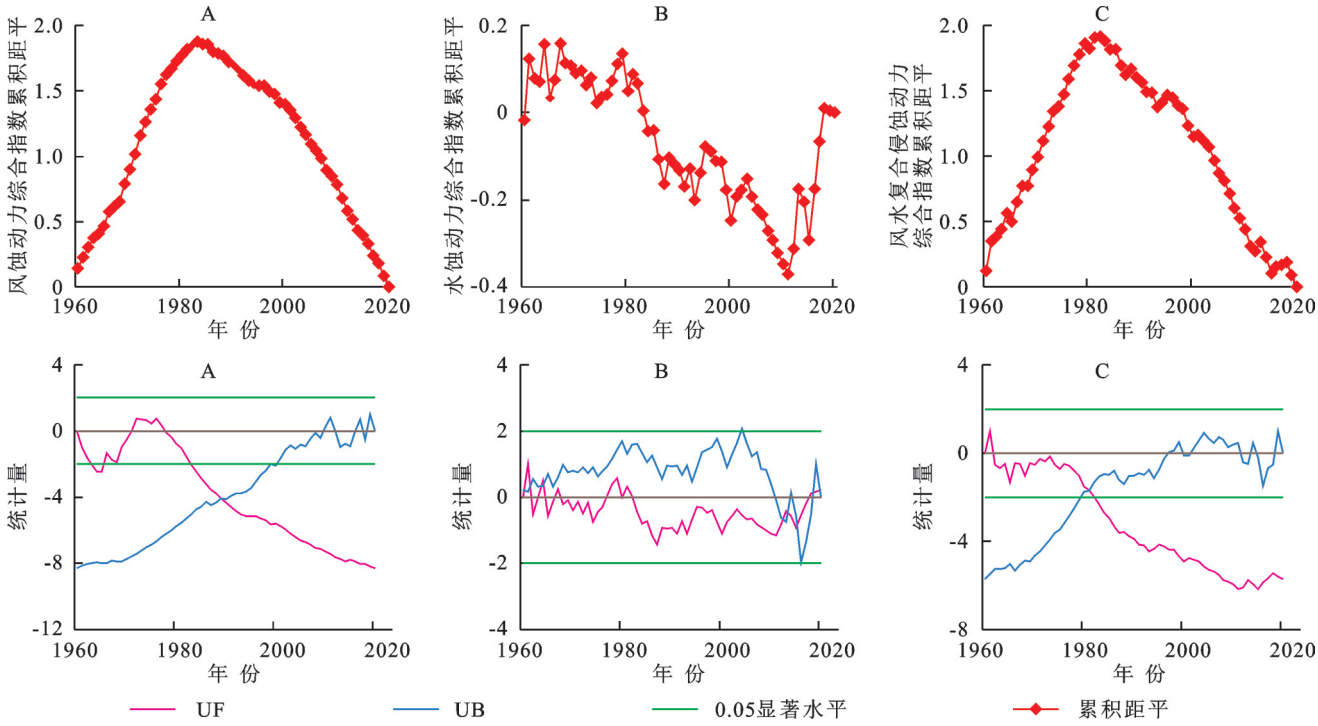


图 6 黄河中游多沙粗沙区 1960—2020 年侵蚀动力综合指数的突变检验(累积距平和 Mann-Kendall 法)

Fig. 6 Mutation test of comprehensive index of erosion dynamics in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020) (cumulative anomaly and Mann-Kendall test)

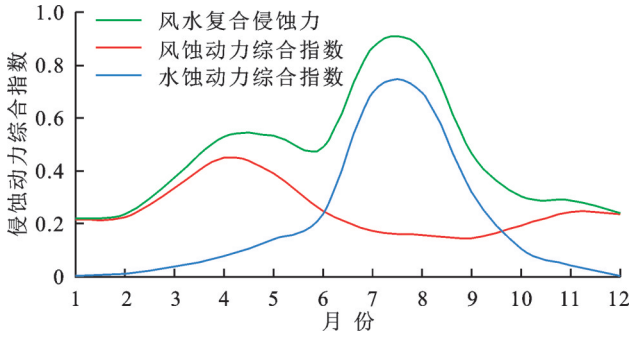


图 7 黄河中游多沙粗沙区 1960—2020 年侵蚀动力综合指数的年内变化

Fig. 7 Intra-annual changes of comprehensive index of erosion dynamics in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020)

大多数气象站点的风水复合侵蚀动力综合指数呈减少趋势,其中包头、右玉、东胜、准格尔旗、清水河、神木、五寨、盐池、靖边、定边、吴旗、横山、环县、隰县、延长、吉县、西峰镇 17 个站点呈显著减少趋势($p<0.05$),呼和浩特、河曲、榆林、兴县、绥德、离石 6 个站点呈不显著减少趋势($p\geq0.05$);仅米脂 1 个站点呈不显著增加趋势($p\geq0.05$)。风水复合侵蚀动力综合指数多年均值呈北高南低的空间分布格局,在东胜形成高值中心,在延长和吉县形成低值中心(图 8)。

3 讨 论

3.1 风蚀动力持续减弱,水蚀动力季节性增强

1960—2020 年研究区风蚀动力各因子及其综合指数显著下降($p<0.05$),这与研究区气候条件变化及生态工程实施密切相关。一方面,近几十年全球气候变暖导致风速普遍下降,风蚀动力随之减弱[26];另

一方面,自2000年以来,“退耕还林还草”“三北防护林”“京津风沙源治理”等工程有效改善了黄土高原北部风蚀环境[27],降低了地表裸露度和风蚀动力,研究结果与区域相关成果一致[28],说明区域防风固沙成效明显。研究期内,水蚀动力各因子及综合指数在年际呈不显著波动上升趋势(2010年后上升显著),但其综合指数在各月份表现出较大差异性:1—7月呈上升趋势、8—12月呈下降趋势,并在6—9月达到年内高峰(占年值的81.67%);61年间水蚀动力综合指数在2月和6月呈显著增加趋势($p<0.05$),说明水蚀动力具有显著的季节性特征且季节性在增强,这与降水集中度变化、极端降水事件增多等因素有关[29]。这说明在评估区域水蚀风险时,需兼顾年际变化与月内差异,强化对关键时间节点的监测与管理。

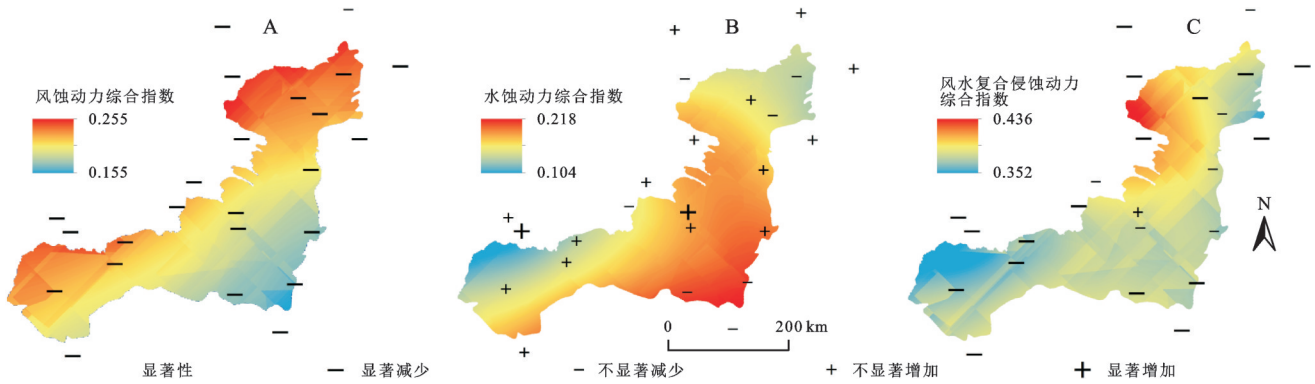


图8　黄河中游多沙粗沙区1960—2020年侵蚀动力综合指数的空间变化趋势

Fig. 8　Spatial variations of comprehensive index of erosion dynamics in sandy and coarse sandy area of middle Yellow River (1960—2020)

3.2　风水复合侵蚀动力的年内叠加特征及空间异质性

风水复合侵蚀动力年内具有明显“双峰”特征,其中4—6月和7—8月分别为次高峰与主高峰。4—6月风蚀动力占比高达70.21%,主要因春末初夏风速大、频次多,地表植被尚未完全恢复,地面裸露程度较高;而7—8月水蚀动力占比达到80.67%,主要受短时强降水过程影响,易引发坡面产流与土壤侵蚀加剧。这种季节组合结构说明区域复合侵蚀动力在年内呈现出“风蚀启动、水蚀主导、叠加增强”的时序过程,与现有研究结论相吻合[12-13],具有重要的防治窗口期指导意义。在空间上,风水复合侵蚀动力指数多年均值呈“北高南低”的分布格局。北部东胜、准格尔旗、清水河等地气候干旱、植被稀疏、风力强劲且极端降雨增加,导致该区域复合侵蚀动力值较高;而南部如延长、吉县等地的降雨相对充沛和均匀、植被覆盖度较高、大风频次少,致使这些区域复合侵蚀动力值较低。风水复合侵蚀动力时空变化特征的系统阐明,可为后续深入探究复合侵蚀的作用机制及时空演变规律提供坚实的科学支撑。

4　结　论

(1) 1960—2020年研究区风蚀动力各因子(侵蚀性风速年均值、侵蚀性风速年频次、风蚀气候因子)及综合指数在年际、各月内均呈显著下降趋势,并于20世纪80年代末发生突变。水蚀动力各因子及综合指数在年际呈不显著波动上升趋势(2010年后上升趋势明显),但其综合指数在2月和6月呈显著增加趋势。

(2) 受风蚀动力显著下降的影响,风水复合侵蚀动力在年际、各月均呈显著下降趋势,但于2010年后缓慢上升。风水复合侵蚀动力年内呈“双峰”分布,7—8月(占年值的31.86%),4—6月(占年值的28.70%)表现出最强的叠加效应;这2个时段,水蚀动力占比分别为80.67%和29.79%,风蚀动力占比分别为19.33%和70.21%。

(3) 空间上,风水复合侵蚀动力综合指数多年均值呈北高南低格局;除米脂气象站呈不显著上升趋势外,其他站点均呈下降趋势(其中70%的站点显著下降)。

参考文献(References):

[1] 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 H M, Wang J A, Zou X Y, et al. Progress and prospect of research on wind-water complex erosion[J]. Journal of Desert Research, 2016,36(4):962-971.

[2] 徐澜,王云强,孙慧,等.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤水分季节变化特征与主控因素[J].水土保持学报,2021,35(5):122-129.
Xu L, Wang Y Q, Sun H, et al. Seasonal changes of soil water content and controlling factors in a small watershed in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):122-129.

[3] 郑秀云,王明海.黄河泥沙哪里来[N].中国水利报,2000-06-15(4).
Zheng X Y, Wang M H. Where does the Yellow River sediment come from[N]. China Water Resources News,

2000-06-15(4).

[4] 王敏,刘志刚,张攀,等.黄河中游多沙粗沙区水土流失治理面临的关键问题与发展对策[J].中国水利,2023(10):42-45.
Wang M, Liu Z G, Zhang P, et al. Key issues and development strategies of soil and water loss control in the abundant and coarse sediment area of the middle Yellow River[J]. China Water Resources, 2023(10):42-45.

[5] 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 P, Yao W Y, Liu G B, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(24):154-161.

[6] 张攀,姚文艺,肖培青,等.黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J].水利学报,2022,53(1):109-116.
Zhang P, Yao W Y, Xiao P Q, et al. Interactive superposition effect of multi-dynamic erosion in the Pisha sandstone area of the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(1):109-116.

[7] 许炯心.黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程[J].中国科学(D辑:地球科学),2000,30(5):540-548.
Xu J X. Sediment yield process of wind-water two-phase erosion in sandy and coarse sand areas in the middle reaches of the Yellow River[J]. Science in China, Ser D, 2000,30(5):540-548.

[8] 颜明,张守红,许炯心,等.风水两相变化对黄河中游支流粗泥沙的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):25-29.
Yan M, Zhang S H, Xu J X, et al. Effect of aeolian and fluvial changes to coarse sands in the middle Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2):25-29.

[9] Zhang J Q, Yang M Y, Deng X X, et al. Beryllium-7 measurements of wind erosion on sloping fields in the wind-water erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018,615:240-252.

[10] 付金霞,王静,张宝利,等.砒砂岩原状坡面不同季节复合侵蚀动力的贡献研究[J].农业工程学报,2020,36(11):66-73.
Fu J X, Wang J, Zhang B L, et al. Contributions of composite erosion forces on undisturbed Pisha sandstone slope in different seasons[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 66-73.

[11] 殷敏峰,邸明婷,邓鑫欣,等.黄土高原水蚀风蚀交错带迎风坡水蚀影响的风蚀特征[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(5):39-46.
Yin M F, Di M T, Deng X X, et al. Wind erosion characteristics on windward slopes affected by water erosion in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(5):39-46.

[12] 卫午毓,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面产流产沙过程试验[J].水土保持学报,2020,34(2):18-22.
Wei W Y, Xiao P Q, Zhang P, et al. Experiment on runoff and sediment production process of pisha sandstone slope under composite erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(2):18-22.

[13] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.砒砂岩区典型小流域复合侵蚀动力特征分析[J].水利学报,2019,50(11):1384-1391.
Zhang P, Yao W Y, Liu G B, et al. Dynamic characteristics of complex erosion in a typical small watershed of soft sandstone area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(11):1384-1391.

[14] 雷杨娜,李明,程路.陕西省降雨和风蚀气候侵蚀力时空分布特征[J].水土保持研究,2023,30(3):47-54,61.
Lei Y N, Li M, Cheng L. Spatio-temporal characteristics of rainfall erosivity and wind erosion climatic erosivity in Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):47-54,61.

[15] 郭锐,李旭强,马瑞,等.1991—2023年陕西省榆林市降雨侵蚀力时空变化[J].水土保持通报,2025,45(6):227-235.
Guo R, Li X Q, Ma R, et al. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity in Yulin City of Shaanxi Province during 1991—2023[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(6):227-235.

[16] 张加琼,刘章,杨明义,等.黄土高原水蚀风蚀交错带坡面土壤侵蚀特征及其影响因素[J].水土保持研究,2018,25(1):1-6,22.
Zhang J Q, Liu Z, Yang M Y, et al. Soil erosion and its influence factors on a slope in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(1):1-6,22.

[17] 张卓佩,牛健植,樊登星,等.黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析[J].水土保持学报,2024,38(2):85-96.
Zhang Z P, Niu J Z, Fan D X, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Yellow River in the rich and coarse sediment area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):85-96.

[18] 王光谦,张长春,刘家宏,等.黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J].泥沙研究,2006,31(2):10-16.
Wang G Q, Zhang C C, Liu J H, et al. Analyses on the variation of vegetation coverage and water/sediment reduction in the rich and coarse sediment area of the Yellow River Basin[J]. Journal of Sediment Research, 2006,31(2):10-16.

[19] 殷宝库,苏鹏飞,张建国,等.1985—2020年黄河中游多沙粗沙区水土流失动态变化[J].水土保持通报,2021,41(5):123-126.
Yin B K, Su P F, Zhang J G, et al. Dynamic changes of soil and water loss in rich and coarse sediment areas of middle Yellow River Basin from 1985 to 2020[J].

Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):123-126.

[20] 杜洲,牛健植,樊登星,等.基于PLUS模型的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化模拟及驱动力分析[J].水土保持研究,2024,31(6):309-318.
Du Z, Niu J Z, Fan D X, et al. Simulation and driving force analysis of land use change in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River based on PLUS model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):309-318.

[21] 曹晓仪,董治宝,李静,等.基于GIS的榆林市土壤风蚀危险度评价[J].水土保持通报,2013,33(1):206-210.
Cao X Y, Dong Z B, Li J, et al. GIS-based evaluation of soil erosion risk by wind in Yulin City of Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(1):206-210.

[22] Chepil W S. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962,17(4):162-165.

[23] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.
Zhang W B, Fu J S. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. Resources Science, 2003, 25(1):35-41.

[24] 徐雪,王永瑜.基于双重逻辑视角的黄河流域城乡融合发展评价及空间差异分析[J].中国沙漠,2024,44(6):1-13.
Xu X, Wang Y Y. Evaluation and spatial difference analysis of urban-rural integration development in the Yellow River Basin: Based on dual logic perspective [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(6):1-13.

[25] 周广亮,翟晓格,张绍阳.黄河流域农业绿色发展时空格局及影响因素研究[J].人民黄河,2025,47(4):7-14.
Zhou G L, Zhai X G, Zhang S Y. Study on the spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural green development in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2025,47(4):7-14.

[26] Wu H H, Fu C S, Zhang L L, et al. Significant sensitivity of global vegetation productivity to terrestrial surface wind speed changes[J]. Nature Communications, 2025,16:9315.

[27] 邵全琴,刘树超,宁佳,等.2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J].地理学报,2022,77(9):2133-2153.
Shao Q Q, Liu S C, Ning J, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000-2019 using remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(9):2133-2153.

[28] 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 W F, Wang Y T, Dang X H, 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.

[29] 黎珩,朱冰冰,边熵,等.1970—2020年黄土高原水蚀风蚀交错区极端降水时空变化研究及驱动因素分析[J].干旱区地理,2024,47(4):539-548.
Li H, Zhu B B, Bian H, et al. Temporal and spatial changes in extreme precipitation and its driving factors in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau from 1970 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2024,47(4):539-548.

(上接第211页)

[24] 洪琦,赵勇,陈明杰,等.大球盖菇菌渣原位还田对土壤有机质、酶活力及细菌多样性的影响[J].食用菌学报,2022,29(1):27-35.
Hong Q, Zhao Y, Chen M J, et al. Effects of in situ stropharia rugosoannulata cultivation residue return on soil organic matter, enzyme activity and bacterial diversity[J]. Acta Edulis Fungi, 2022,29(1):27-35.

[25] 温学飞.化学固沙剂对退化沙地植物多样性与微生物多样性的影响[J].中国农学通报,2015,31(22):1-6.
Wen X F. Influence of sand fixation chemicals on biodiversities of plants and microorganisms on degraded sands [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(22):1-6.

[26] 张智勇,刘广全,艾宁,等.吴起县退耕还林后主要植被类型土壤质量评价[J].干旱区资源与环境,2021,35(2):81-87.
Zhang Z Y, Liu G Q, Ai N, et al. Soil quality evaluation of main vegetation types after conversion of farmland to forest in Wuqi County[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(2):81-87.

[27] 陈艺文,李红丽,董智,等.3种固沙材料与风沙土复配后土壤改良效应及其质量评价[J].水土保持研究,2022,29(5):48-54.
Chen Y W, Li H L, Dong Z, et al. Soil improvement effect and quality evaluation of three sand-fixing materials combined with aeolian sandy soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):48-54.

[28] 孙伟娇,黄小钰,魏文良,等.不同生物炭用量对盐化潮土土壤质量与玉米生长的影响[J].山东农业科学,2025,57(3):125-132.
Sun W J, Huang X Y, Wei W L, et al. Effects of different biochar application rates on soil quality and maize growth in salinized fluvo-aquic soil[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025,57(3):125-132.

[29] 张邦彦,谢小伟,张朝辉,等.有机-无机改良物料对盐碱地土壤质量及湖南稷子产量的影响[J].草业学报,2025,34(8):15-29.
Zhang B Y, Xie X W, Zhang Z H, et al. Effect of organic-inorganic amendments on the quality of saline-alkaline soil and yield of echinochloa frumentacea [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025,34(8):15-29.