

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.045.

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 Yangna, LI Ming, CHENG Lu. 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.

陕西省降雨和风蚀气候侵蚀力时空分布特征

雷杨娜, 李明, 程路

(陕西省气候中心, 西安 710014)

摘要: [目的] 研究陕西省不同区域降雨侵蚀力和风蚀气候侵蚀力的时空分布特征、突变特征和周期特性等, 为陕西水土流失防治和生态建设提供科学依据。 [方法] 利用陕西省 96 个气象站 1981—2020 年气象观测资料计算了全省降雨侵蚀力和风蚀气候侵蚀力, 采用气候趋势分析、空间插值、M-K 检验、小波分析等方法, 分析了陕西省风蚀、水蚀气候侵蚀力时空分布特征、突变和周期特征等。 [结果] (1) 全省 1981—2020 年降雨侵蚀力为 $2\ 719.6\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 空间差异性较大, 呈现南高北低的空间分布。陕西省风蚀气候侵蚀力为 3.18, 呈现北高南低的空间分布特征。(2) 近 40 年陕西省降雨侵蚀力年际波动较大, 呈现微弱上升趋势, 但未通过显著性检验。全省降雨侵蚀力经历了先减小后增大的变化趋势, 目前处于降雨侵蚀较大的年代。陕西省风蚀气候侵蚀力年际波动较大, 但无显著变化趋势。风蚀气候侵蚀力近 40 年先增强后减弱, 大部分地区风蚀气候侵蚀力在 20 世纪 90 年代最强, 目前处于最弱的年代。(3) 降雨侵蚀力主要以 6—9 月较大, 最大值出现在 7 月, 风蚀气候侵蚀力则以冬春两季较大, 4 月最大, 二者具有明显的非同步性。(4) 陕西省降雨侵蚀力存在 2~4 a, 8 a 和 31~32 a 共 3 个时间尺度的振荡周期, 风蚀气候侵蚀力变化主要存在 5~10 a 和 31~32 a 两个时间尺度的振荡周期。2009 年为降雨侵蚀力突变年份, 降雨侵蚀力自此逐渐上升, 突变前后降雨侵蚀力相差 $416.27\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。 [结论] 目前, 陕西省大部分地区降雨侵蚀力均处于较强的时期, 尤以陕北北部降雨侵蚀力距平最大, 且陕北北部全省风蚀气候侵蚀力最强的区域, 榆林东部风蚀气候侵蚀力近 40 年亦呈上升趋势, 该地区风蚀水蚀气候侵蚀力的增长更应引起重视。

关键词: 降雨侵蚀力; 风蚀气候侵蚀力; Mann-Kendall 检验; 小波分析; 陕西省

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0047-08

Spatio-temporal Characteristics of Rainfall Erosivity and Wind Erosion Climatic Erosivity in Shaanxi Province

LEI Yangna, LI Ming, CHENG Lu

(Shaanxi Climate Center, Xi'an, 710014, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal distribution, abrupt change and periodic characteristics of rainfall erosivity and wind erosion climate erosivity in different regions of Shaanxi Province were studied, so as to provide scientific basis for soil erosion control and ecological construction in Shaanxi. [Methods] The daily meteorological data of 96 stations in Shaanxi Province from 1981 to 2020 were used to calculate the rainfall erosivity and wind erosion climatic erosivity to analyze the change of water-wind erosion climate erosivity using methods such as climate trend analysis, spatial interpolation, Mann-kendall trend test and wavelet analysis. [Results] (1) The rainfall erosivity in Shaanxi from 1981 to 2020 was $2\ 719.6\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, with large spatial differences, showing a spatial distribution of high in the south and low in the north. The wind erosion climatic erosivity from 1981 to 2020 was 3.18, with a decreasing trend from north to south.

收稿日期: 2022-02-14

修回日期: 2022-03-15

资助项目: 陕西省 2021 年重点研发计划一般项目(2021SF-493); 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金课题(2020G-07)

第一作者: 雷杨娜(1983—), 女, 陕西渭南人, 硕士, 副高级工程师, 主要从事气候变化方面研究。E-mail: lyn0913@163.com

通信作者: 李明(1974—), 男, 新疆昌吉人, 正研级高工, 主要从事气候变化研究工作。E-mail: E-mail: 467665085@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

(2) In the past 40 years, the rainfall erosivity in Shaanxi showed an evident inter-annual variation with general upward but not passing a significant test. The rainfall erosion experienced a variation trend of first increasing and then decreasing, and it was stronger in the current era. The wind erosion climatic erosivity also showed an evident inter-annual variation, but the change trend was not significant. It experienced a variation trend of first decreasing and then increasing. It was strongest in the 1990s and weakest in the current era. The rainfall erosivity was mainly larger from June to September, and the maximum value appeared in July. The wind erosion climatic erosivity was larger in winter and spring, and the maximum value was in April. The two erosivities were obviously asynchronous. (4) There were three oscillation periods of rainfall erosivity in Shaanxi Province, which was 2~4 years, 8 years and 31~32 years. There were two oscillation periods of wind erosion climatic erosivity, which were 5~10 years and 31~32 years. The abrupt change of rainfall erosivity occurred significantly in 2009, since then the rainfall erosivity increased gradually. [Conclusion] At present, the rainfall erosivity in most areas of Shaanxi Province is strong, especially in northern Shaanxi with the strongest wind erosion climate erosivity. The wind erosion climate erosivity in eastern Yulin also showed an upward trend in recent 40 years. Therefore, more attention should be paid to the increase of wind erosion and water erosion climate erosivity in these areas.

Keywords: rainfall erosivity; wind erosion climatic erosivity; Mann-Kendall test; wavelet analysis; Shaanxi Province

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[1],是目前世界上最为严重的生态环境问题之一,它对农业生产、自然环境和人类的生存发展都造成了严重影响^[2]。土壤侵蚀与降雨、风力、地形、土壤和植被等自然因素相关,而不合理的人类活动也会加剧土壤侵蚀。

在中国北方,风蚀和水蚀是两种主要的土壤侵蚀类型。降雨是造成土壤水蚀的主要自然驱动力,风速则是影响土壤风蚀的首要因素,同时降水和气温也对风蚀有重要影响。因此对土壤水蚀和风蚀气候驱动因素研究主要是基于降雨侵蚀力和风蚀气候侵蚀力。针对降雨侵蚀力,从 Wischmeier 等^[3]提出 EI_{30} 降雨侵蚀力指标至今,许多学者根据不同研究区域实际情况,建立了相应的降雨侵蚀力指标及简易算式^[4-6],为不同地区的土壤侵蚀研究提供了良好的基础。章文波等^[7]提出直接利用日降雨量计算降雨侵蚀力的模型,资料易获取,信息量更大,可较好地提高估算精度,因此被广泛利用。利用章文波模型,不同学者研究了我国黄河流域、秦巴山区、黄土高原、新疆、贵州、山东和福建等地的降雨侵蚀力时空变化特征^[8-14]。风蚀气候侵蚀力计算公式由 Chepil 等提出,后经联合国粮农组织(FAO)、Skidmore 改良,被广泛应用于世界各地风蚀气候侵蚀力特征分析及评估研究中^[15]。国内有关风蚀气候侵蚀力的研究主要集中在干旱半干旱地区,如黄土高原、毛乌素沙地、塔里木盆地及青海、内蒙等地

的风蚀气候侵蚀力时空分布特征研究^[16-20]。

陕西地处黄土高原和秦巴山区,黄土高原地貌破碎、土质松散、暴雨集中^[21-22],秦巴山区地形及地质构造复杂,降水较多,泥石流、滑坡等地质灾害频发^[23],加上不合理的人类活动,水土流失严重。陕西范围狭长,地形地貌复杂,气候多样,风蚀和水蚀经常同时或者交替发生,二者交互作用造成土壤侵蚀严重^[24],土地退化、沙化,河道泥沙淤积,生态问题日益严峻,制约社会发展。随着全球气候变化,近几十年陕西省不同区域呈现不同气候变化趋势^[25],在全球气候变暖背景下陕西省风蚀气候侵蚀力和降雨侵蚀力强弱有何变化?时空分布特征有无显著变化?针对新的变化在不同地区如何采取相应的防范措施和应对方案?鉴于此,本文基于陕西省96个气象站近40年日气象资料,分析陕西省不同区域降雨侵蚀力和风蚀气候侵蚀力的时空分布特征、突变特征和周期特性等,以期对陕西黄土高原和秦巴山区水土流失防治和生态建设提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域

陕西省地处北纬 $31^{\circ}42'$ — $39^{\circ}35'$,东经 $105^{\circ}29'$ — $111^{\circ}15'$,省域南北狭长,地理环境复杂,可分为陕北黄土高原、关中平原和陕南秦巴山地地貌区。复杂的地理环境造就了丰富的气候类型,分为陕北、关中和陕南三大自然区。陕西属大陆性季风气候,春暖干

燥,夏季炎热多雨,秋凉湿润,冬季寒冷干燥,四季分明,雨热同季。全省年平均气温 7~16℃,气温日较差 8~14℃,年均降水量 320~1 258 mm,年均日照时数 1 265~2 833 h,季节和区域差异显著。

1.2 数据来源

本研究选取了陕西省 99 个国家气象站 1981—2020 年逐日、逐月气象观测资料,包括月平均气温、月平均风速、月降水量、月平均相对湿度、日降水量等气象要素,数据来源于陕西省气象局。为保证资料统一性和完整性,剔除了观测时间较短的站点,最终选择陕西省共 96 个气象站进行分析(图 1)。

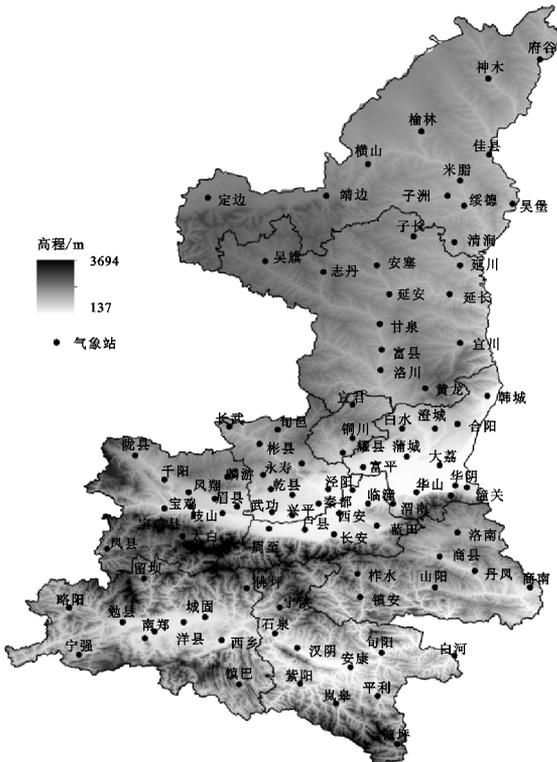


图 1 陕西省气象站分布

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算方法 本文采用章文波等[26]提出的利用日降雨量资料估算降雨侵蚀力的模型,具体公式如下:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k P_j^\beta \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 半月的降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm²·h)]; k 为该半月内的降雨天数; P_j 为该半月内第 j 天的侵蚀性日降雨量(mm),以日降雨量≥12 mm 为侵蚀性降雨划分标准,否则以 0 计算, α 和 β 为模型待定参数,计算公式如下:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

式中: P_{d12} 为日降雨量≥12 mm 的日平均雨量(mm);

P_{y12} 为日降雨量≥12 mm 的年平均降雨量(mm)。

1.3.2 风蚀气候侵蚀力计算方法 本文采用联合国粮农组织(FAO)订正的风蚀气候侵蚀力计算公式进行计算[27]:

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} \bar{u}_i^3 \left(\frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right) d \quad (4)$$

式中: C 为风蚀气候侵蚀力值; P_i 为月降水量(mm); d 为每月的天数; \bar{u}_i 为 2 m 高处的月平均风速(m/s); ETP_i 为月潜在蒸发量(mm)。

月潜在蒸发量采用中华人民共和国环境保护部《生态保护红线划定指南》(环办生态[2017]48 号)文件中提供的计算方法[28]:

$$ETP_i = 0.19 (20 + T_i)^2 (1 - r_i) \quad (5)$$

式中: ETP_i 为月潜在蒸发量(mm); T_i 为月平均气温(℃); r_i 为月平均相对湿度(%)。

采用气候趋势分析、空间插值、M-K 检验、小波分析等方法,分析陕西省风蚀水蚀气候侵蚀力的时间变化趋势、空间分布特征、突变性和周期性特征,揭示陕西省风蚀水蚀气候侵蚀力时空特征。

2 结果与分析

2.1 风蚀水蚀气候侵蚀力空间分布

2.1.1 降雨侵蚀力空间分布特征 图 2 给出了陕西各地区降雨侵蚀力及其倾向率空间分布图。全省各站降雨侵蚀力在 950.4~9 361.2 MJ·mm/(hm²·h),空间差异性较大,全省多年均值为 2 719.6 MJ·mm/(hm²·h),全省降雨侵蚀力呈现南高北低的空间分布。陕北榆林地区降雨侵蚀力最小,基本在 1 800 MJ·mm/(hm²·h)以下,陕北南部和关中大部分地区次之,为 1 800~2 600 MJ·mm/(hm²·h),陕南地区最大,基本在 3 000 MJ·mm/(hm²·h)以上。图 2B 为全省各站降雨侵蚀力变化趋势分布。可以看出,年降雨侵蚀力上升趋势和下降趋势站点数相差不大,上升站点略多,分布区域也较集中,上升站点主要分布在陕北和关中西部地区,而下降站点主要分布在关中东部和陕南地区,且大部分站点变化趋势不显著,仅在陕北地区少数站点上升趋势较为显著。

2.1.2 风蚀气候侵蚀力空间分布特征 风蚀气候侵蚀力空间分布图(图 3)中可以看出,陕西省风蚀气候侵蚀力呈现出北高南低的空间分布特征。全省各气象站 C 值范围为 -8.96~30.0。陕南汉中和安康地区 C 值小于 0,属于不易受风蚀区域;关中、陕北延安和榆林南部地区 C 值小于 10,风蚀气候侵蚀力较弱;榆林中部 C 值在 10~20,风蚀气候侵蚀一般;榆林北部定边地区 C 值在 20 以上,属于陕西风蚀气候侵蚀

力最强的地区。整体来说,陕西大部分地区风蚀气候侵蚀力较弱,占了全省区域的90%以上,仅有10%左右的地区风蚀气候侵蚀力较强,且主要分布在陕北榆林地区。图3B为全省各站风蚀气候侵蚀力变化趋势分布。可以看出,年风蚀气候侵蚀力下降趋势站点数略多于上升趋势站点数,上升站点主要分布在陕

西北部、关中中南部和陕南中部部分地区,而下降站点主要分布在陕北东部、关中北部和陕南大部分地区。变化趋势显著的站点数占全省气象站的37%,显著下降趋势站点主要分布在陕北东部和关中北部地区,显著上升站点主要分布在陕北东部、汉中中部和安康南部。

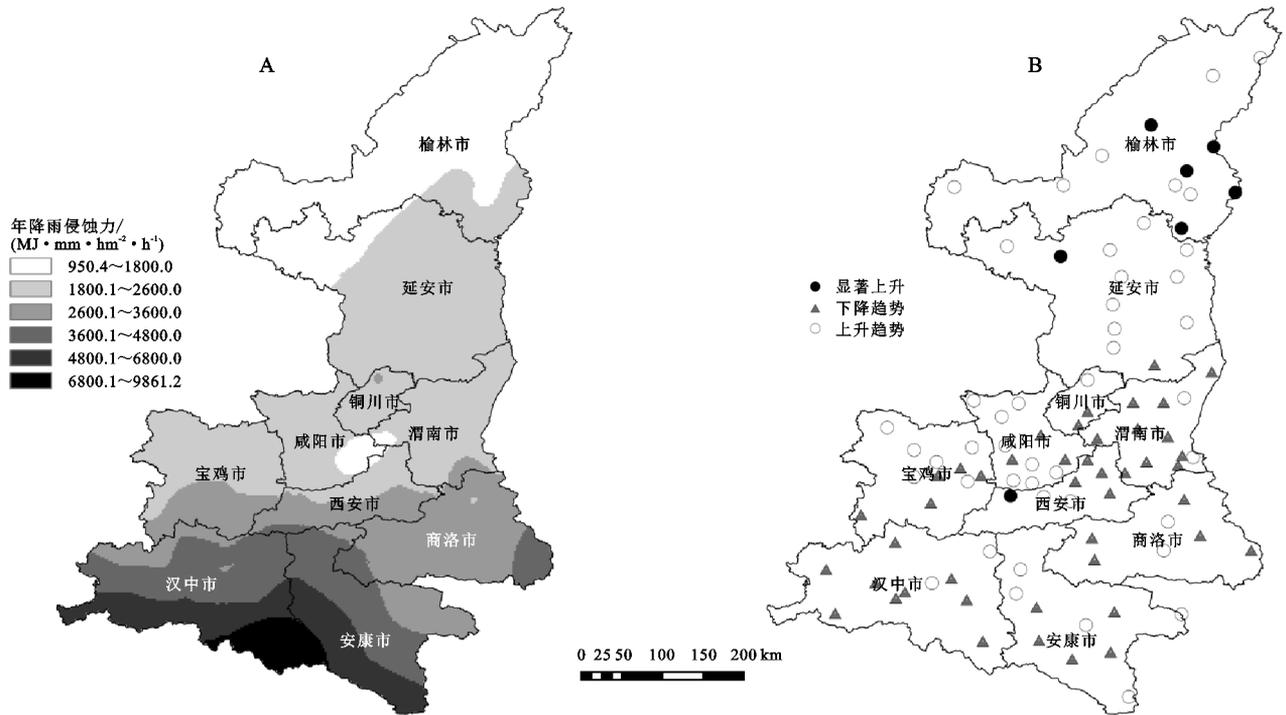


图2 陕西省降雨侵蚀力空间分布、各气象站降雨侵蚀力变化趋势

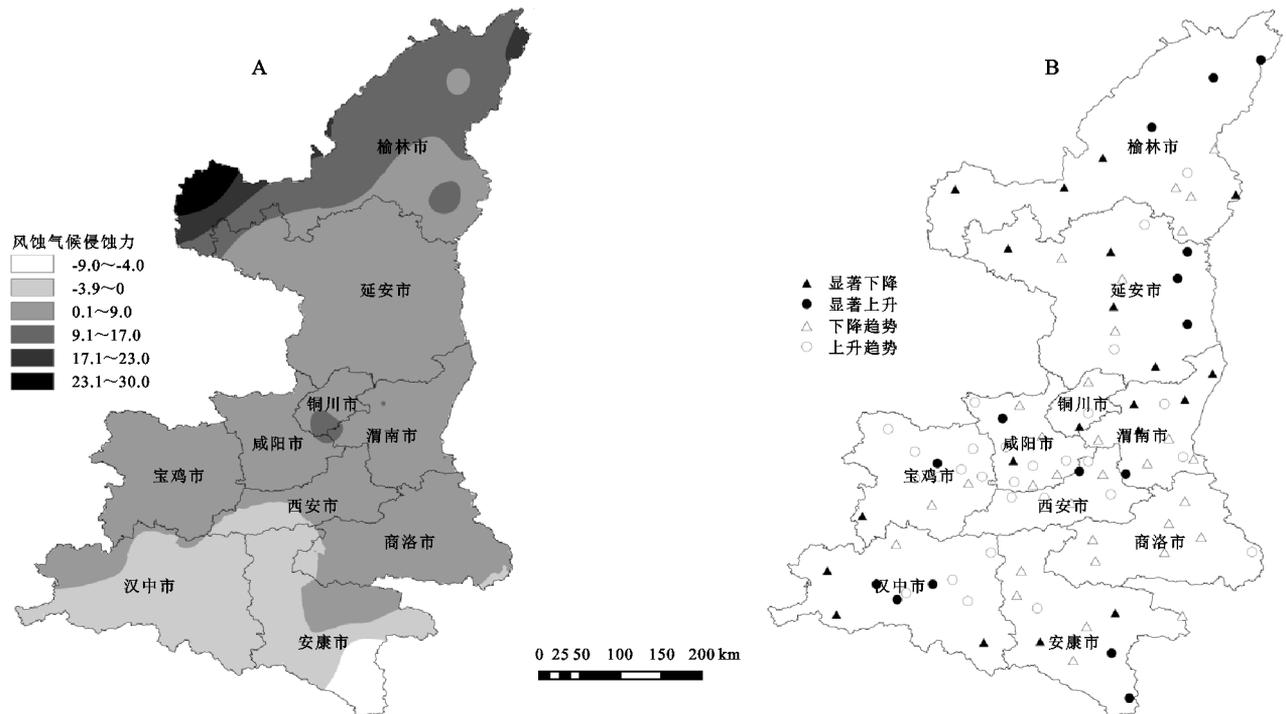


图3 陕西省风蚀气候侵蚀力空间分布、各气象站风蚀气候侵蚀力变化趋势

2.2 风蚀水蚀气候侵蚀力时间变化

2.2.1 降雨侵蚀力时间变化 陕西省多年平均降雨

侵蚀力为 2 719.58 MJ·mm/(hm²·h),2011年最高为 4 750.24 MJ·mm/(hm²·h),1997年最小为 1 493.86

MJ · mm/(hm² · h),二者相差 3 256.78 MJ · mm/(hm² · h),由图 4 可见近 40 年陕西省降雨侵蚀力年际波动较大,呈现微弱上升趋势,但未通过显著性检验。从四季变化来看,各季节降雨侵蚀力相差较大,夏季降雨侵蚀力最大,多年平均为 1 753.02 MJ · mm/(hm² · h),占全年比重为 64.5%,冬季最小,仅有 5.95 MJ · mm/(hm² · h)。除冬季外,各季节降雨侵蚀力逐年变化基本同全年一致,年际波动较大,变化趋势不显著。全省各区域年均降雨侵蚀力差异显著,陕南最大,多年平均为 4 301.93 MJ · mm/(hm² · h),其次为关中和陕北南部,分别为 2 211.74 MJ · mm/(hm² · h),2 091.69 MJ · mm/(hm² · h),陕北北部最小,多年均值仅为 1 580.09 MJ · mm/(hm² · h)。各地区降雨侵蚀力年际变化同全省基本一致,年际变化较大,但变化趋势不明显。

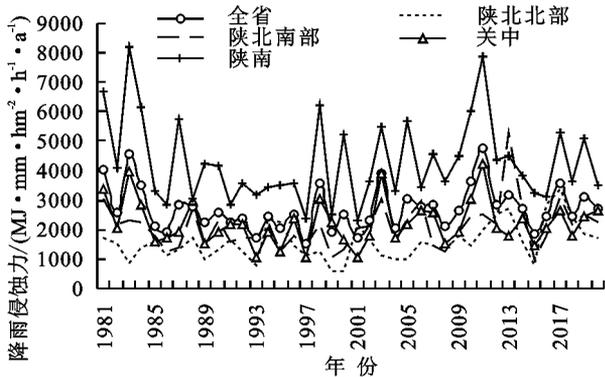


图 4 陕西省及各区域降雨侵蚀力年际变化

全省不同区域降雨侵蚀力存在一定差异,因此将全省分为陕北北部、陕北南部、关中和陕南四大地区进行对比分析。分析全省及各地区不同年代降雨侵蚀力变化(图 5),全省降雨侵蚀力近 40 年来经历了先减小后增大的变化趋势,20 世纪 80 年代降雨侵蚀力较大,距平值为 201.95 MJ · mm/(hm² · h),90 年代明显减小,距平值转为 -426.96 MJ · mm/(hm² · h),之后逐渐增大,2000 年代仍为负距平,2010 年代转为正距平,距平值为 242.56 MJ · mm/(hm² · h)。4 个地区除陕北北部呈逐年代增大外,其他两个地区年代际变化趋势同全省基本一致,呈现先减小后增大的年代际变化。整体来说,近 40 年来,全省各区域 1990 年代和 2000 年代降雨侵蚀力较弱,除陕南地区 1980 年代降雨侵蚀力最大外,全省大部分地区降雨侵蚀力最大时段均为 2010 年代,说明目前处于降雨侵蚀力较大的年代。

分析陕西省降雨侵蚀力月变化(图 6),降雨侵蚀力月变化呈单峰型,1—7 月逐渐增大,在 7 月达到最大值,为 749.35 MJ · mm/(hm² · h),之后逐渐减小,12 月将至最低,仅为 0.27 MJ · mm/(hm² · h),可见降雨侵蚀力年内分布极不均匀。降雨侵蚀力月

变化特征与陕西当地气候特征关系密切,陕西为显著的季风性气候,侵蚀性降雨多集中在 6—9 月,犹以 7—8 月较大,因此降雨侵蚀力也主要以 6—9 月较大,为 2 228.80 MJ · mm/(hm² · h),占全年降雨侵蚀力的 82.0%,故对于陕西省水土保持工作来说,应着重降低 6—9 月水土流失风险。

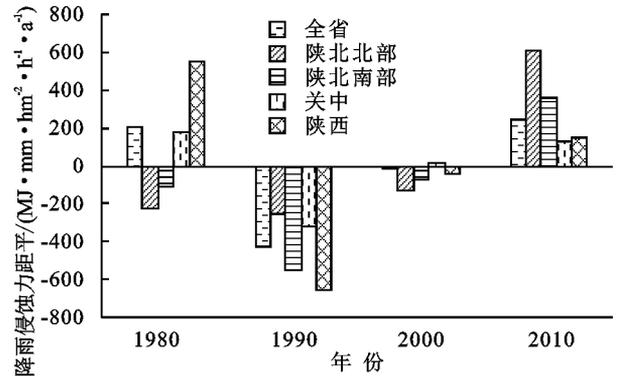


图 5 陕西省及各区域降雨侵蚀力年代际变化

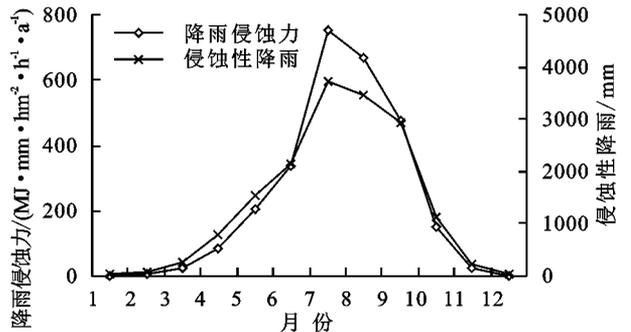


图 6 1981—2020 年陕西省降雨侵蚀力和侵蚀性降雨月变化

2.2.2 风蚀气候侵蚀力时间变化 从年均风蚀气候侵蚀力变化曲线图(图 7)可以看出,陕西省风蚀气候侵蚀力年际波动较大,表明年均风蚀气候侵蚀力年际变化显著,但变化趋势不明显。1981—2020 年全省平均值为 3.18,1997 年最大(7.24),1983 年最小(-0.83)。除冬季风蚀气候侵蚀力呈现略微减小趋势外,春、夏、秋 3 个季节年际变化与全年类似,年际波动较大,变化趋势不显著(图略)。全省各区域年均风蚀气候侵蚀力差异显著,陕北长城沿线最大,多年平均为 13.87,其次为陕北南部和关中,分别为 4.09,3.55,陕南地区最小,多年均值仅为 -0.57。各地区年际变化同全省基本一致,年际变化较大,但变化趋势不明显。

进一步分析风蚀气候侵蚀力年代际变化(图 8),风蚀气候侵蚀力近 40 年来经历了先增强后减弱的变化趋势,20 世纪 80 年代较小,距平值为 -0.47,90 年代明显增大,距平值为 0.84,之后逐年代下降,2000 年代仍为正距平(0.14),2010 年代转为负距平,距平值为 -0.51。陕北长城沿线地区在 20 世纪 80 年代为强的正距平(1.20),90 年代和 2000 年代距平值较小,2010 年代为强的负距平(-1.23);陕北南部 2010

年代前均为正距平,且距平逐年代减小,2010年代则转为负距平;关中地区除20世纪90年代为正距平外,其余年代均为负距平;陕南地区20世纪80年代和2010年代为负距平,20世纪90年代至2000年代为正距平。整体来看陕西大部分地区风蚀气候侵蚀力在20世纪90年代最强,目前处于最弱的年代。

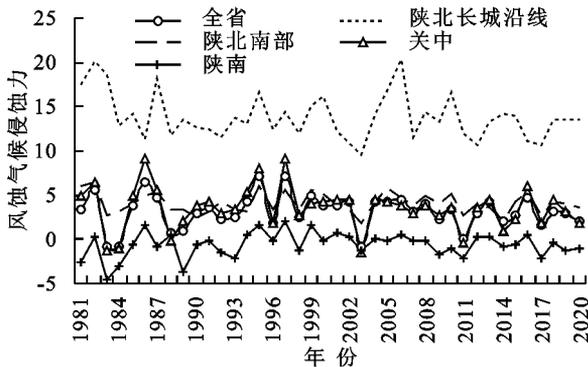


图7 全省及各区域风蚀气候侵蚀力年变化

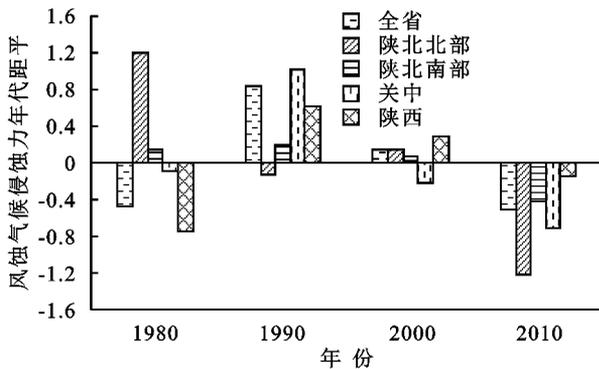


图8 全省及各区域风蚀气候侵蚀力年代际变化

图9为陕西省风蚀气候侵蚀力月际变化,发现月际变化显著,1—4月逐渐增大,且在4月达到最大值,之后逐渐减小,9月达到最小值,为-0.46。9月之后又逐渐增大。从各季节分布来看,风蚀气候侵蚀力季节特征主要变现为表现为春季最大(1.94),冬季次之(1.75),夏秋季很小,均小于0。风蚀气候侵蚀力

月和季节变化特征与陕西当地的气候特征关系密切,春季陕西气候干燥,雨水较少,易出现大风天气;冬季气温较低,植被覆盖度较低,地表多为裸露状态,因此冬春两季更易发生土壤风蚀现象。

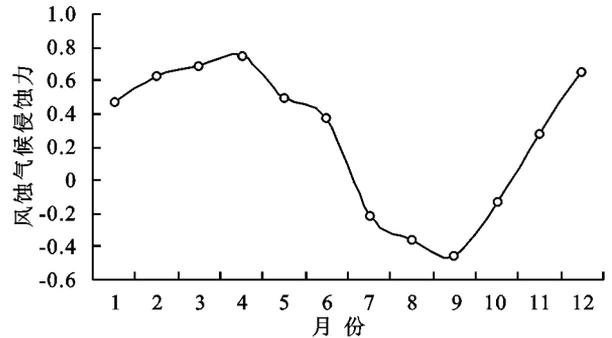


图9 1981—2020年陕西省风蚀气候侵蚀力月变化

2.3 周期性分析

可利用小波分析进行气候序列的周期分析, Morlet小波实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息,小波方差图可以定量地分析时间序列的主要周期。

2.3.1 降雨侵蚀力周期变化 通过小波分析(图10A)可知,陕西省降雨侵蚀力存在2~4 a, 8 a和31~32 a共3个时间尺度的振荡周期,由方差分析(图10B)可知,陕西省降雨侵蚀力周期变化存在4个峰值,分别为31, 8, 4, 2 a,其中31 a为最大峰值,说明31 a为陕西省降雨侵蚀力变化的第一主周期,经历了“高/低”3个循环交替,8 a, 4 a和2 a为第2~4主周期。各尺度周期变化在整个时段都比较稳定,且具有全域性。

分析陕西省季节降雨侵蚀力周期变化(图略),各季节降雨侵蚀力主周期存在一定差异,春季降雨侵蚀力主周期为4 a,振荡周期为3~6 a,夏、秋两季同年变化一致,主周期为31 a,振荡周期为31~32 a;春季第二主周期为31 a,而夏秋季第二主周期则为4 a。

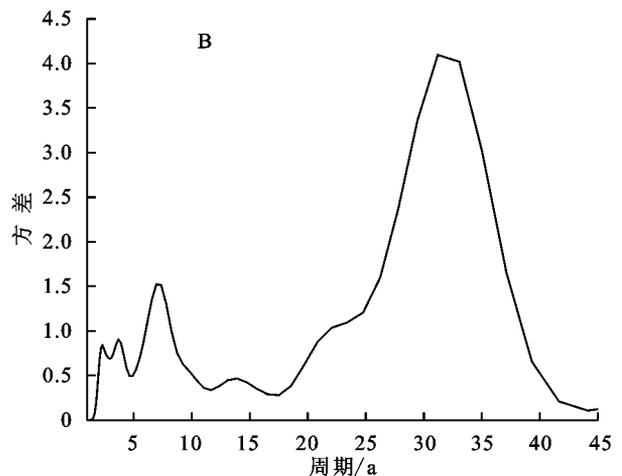
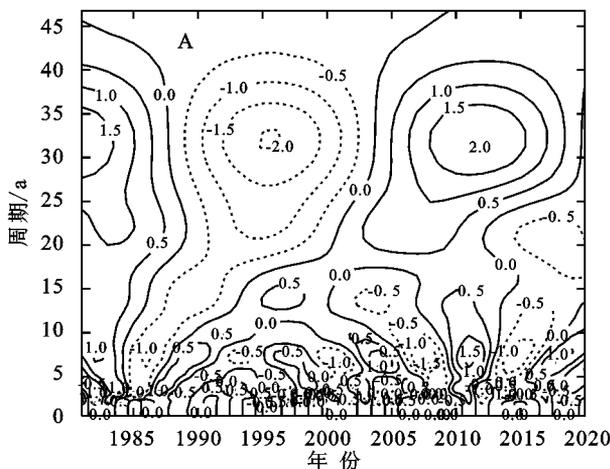


图10 陕西省降雨侵蚀力小波变换系数(A)和小波方差(B)

2.3.2 风蚀气候侵蚀力周期变化 分析陕西省风蚀气候侵蚀力周期变化(图 11A)可知,风蚀气候侵蚀力变化主要存在 5~10 a 和 31~32 a 两个时间尺度的振荡周期,对比方差分析图(图 11B),风蚀气候侵蚀力主要有 4 个周期峰值,分别为 5 a,31 a,3 a 和 10 a,其中 5 a 为第

一主周期,且在 80,90 年代中期变化剧烈,31 a,10 a 和 3 a 为 2~4 主周期。各季节周期变化同年周期存在一定差异,风蚀气候侵蚀较大的冬、春季节第一主周期分别为 22 a 和 14 a,第二主周期均为 5 a,两个季节也存在 31 a 左右的变化周期,但其方差较小,表现不显著。

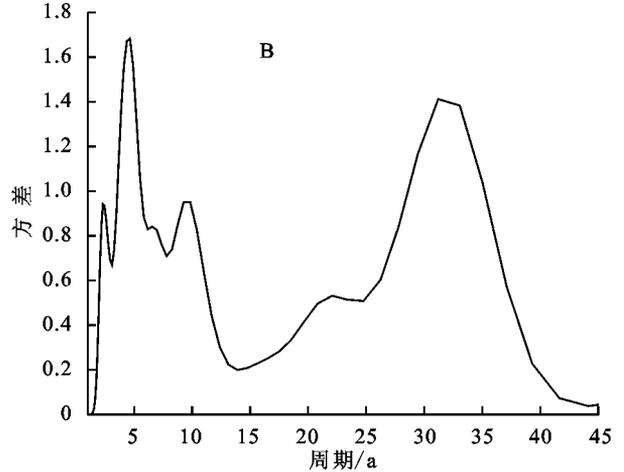
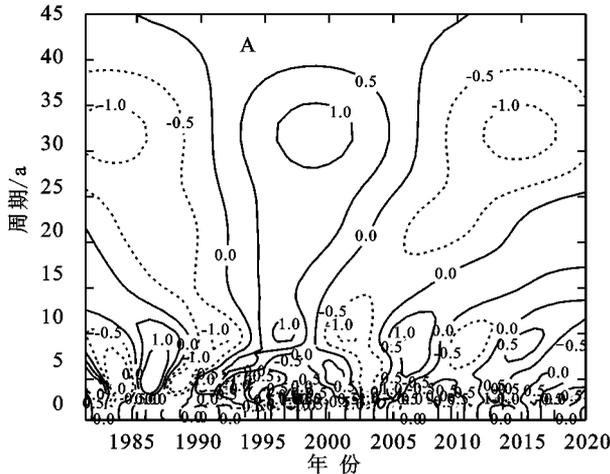


图 11 陕西省风蚀气候侵蚀力小波变换系数(A)和小波方差(B)

2.4 突变特征分析

2.4.1 降雨侵蚀力突变分析 用 M-K 法对陕西省降雨侵蚀力序列进行突变分析,结果显示(图 12),年降雨侵蚀力 UF 曲线 20 世纪 80 年代至 2000 年代末为负,说明呈下降趋势,且 UF 值在 1993—2002 年小于临界值,说明这段时间下降趋势显著;2010 年代 UF 值转为正,呈上升趋势。UF 和 UB 曲线出现了多次相交且在两条临界值线之间,分析显示 2009 年为降雨侵蚀力突变年份,降雨侵蚀力自此逐渐上升,突变前后降雨侵蚀力相差 416.27 MJ·mm/(hm²·h)。

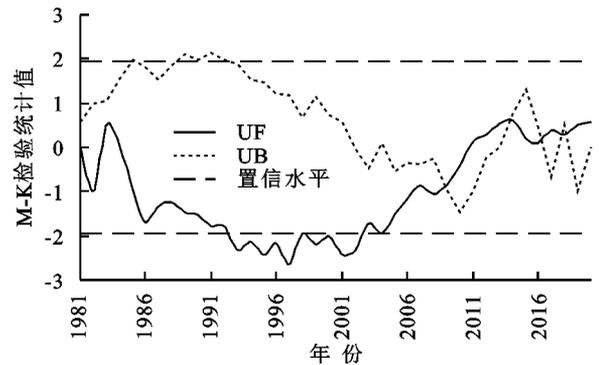


图 12 陕西省年降雨侵蚀力 M-K 统计量

各季节降雨侵蚀力 M-K 突变检验结果显示(图略),春季降雨侵蚀力 UF 值 1983—1992 年和 2014—2020 年两个时段为正呈上升趋势,但均未超过临界值线,说明上升趋势不显著。1993—2013 年为负呈下降趋势,下降趋势也不显著。春季降雨侵蚀力突变点出现在 2009 年,突变点前后降雨侵蚀力相差 28.2 MJ·mm/(hm²·h)。夏季降雨侵蚀力 UF 值仅在 2018 年和 2020 年为正,其余时间均为负值,说明近 40 年夏季降雨侵蚀力主要呈下降趋势,但均未达到临界值线,说明下降趋势不显著。夏季 UF 和 UB 曲线在 2006 年之后出现多个交点,结合滑动 T 检验再判断,夏季降雨侵蚀未出现突变。秋季 UF 值 2011 年之前为负呈下降趋势,之后为正呈上升趋势,在 1991—2001 年超过临界值线,此时段下降趋势显著。2002 年和 2007 年 UF 和 UB 曲线两次相交,结合实际分析,秋季降雨侵蚀力突变点出现在 2002 年,突变后比突变前降雨侵蚀力下降趋势减缓。

2.4.2 风蚀气候侵蚀力突变分析 陕西省年风蚀气候侵蚀力 M-K 检验结果显示(图 13),风蚀气候侵蚀力在 1986 年之前正负交替频繁,1986—2014 年 UF 值为正呈上升趋势,之后 UF 值转负呈下降趋势,但均未超过临界值线,说明变化趋势不显著。UF 和 UB 曲线出现了多次相交且在两条临界值线之间,主要在 1986 年之前和 2009 年之后,说明风蚀气候侵蚀力年际变化波动强烈。同时对其进行滑动 T 检验分析,未呈现明显的突变时间点,综合分析近 40 年来陕西省风蚀气候侵蚀力无明显突变。

分析风蚀气候侵蚀较强的冬春季节 M-K 检验结果显示(图略),春季风蚀气候侵蚀力 UF 值 1981—2003 年为负呈下降趋势,2004—2014 年为正呈上升趋势,但均未达到显著性水平;2015—2020 年正负交替出现,说明年际变化波动较大。冬季 UF 值均小于 0,说明近 40 年来冬季风蚀气候侵蚀力呈下降趋势,且在 1990—1997 年和 2002—2020 年超过临界值线,

说明该时段下降趋势显著。冬季 UF 和 UB 曲线未出现交点,说明没有出现突变。

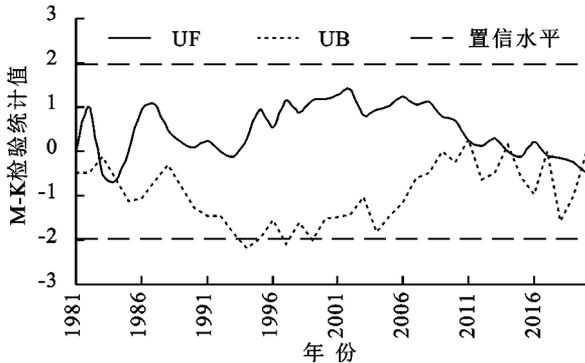


图 13 陕西省年风蚀气候侵蚀力 M-K 统计量曲线

4 结论

(1) 近 40 年陕西省年均降雨侵蚀力为 $2\ 719.58\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 空间差异性较大, 变化范围为 $950.4 \sim 9\ 361.2\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 呈现南高北低的空间分布特征。年降雨侵蚀力仅陕北地区少数站点上升趋势较为显著。陕西省年均风蚀气候侵蚀力为 3.18, 南北差异较大, 在 $-8.96 \sim 30.0$ 变化, 呈现北高南低的空间分布特征。年风蚀气候侵蚀力显著下降趋势站点主要分布在陕北东部和关中北部地区, 显著上升站点主要分布在陕西北部、汉中中部和安康南部。

(2) 近 40 年陕西省降雨侵蚀力年际波动较大, 呈现微弱上升趋势, 但未通过显著性检验。全省降雨侵蚀力经历了先减小后增大的变化趋势, 目前处于降雨侵蚀力较大的年代。陕西省风蚀气候侵蚀力年际波动较大, 但无显著变化趋势。风蚀气候侵蚀力近 40 年经历了先增强后减弱的变化趋势, 陕西大部分地区风蚀气候侵蚀力在 20 世纪 90 年代最强, 目前处于最弱的年代。

(3) 陕西省降雨侵蚀力主要以 6—9 月较大, 最大值出现在 7 月, 且各月间差异较大。风蚀气候侵蚀力则主要以冬春两季较大, 其中 4 月最大, 各月间差异较小。水蚀和风蚀年内分布具有明显的非同步性。

(4) 陕西省降雨侵蚀力存在 2~4 a, 8 a 和 31~32 a 共 3 个时间尺度的振荡周期, 风蚀气候侵蚀力变化主要存在 5~10 a 和 31~32 a 两个时间尺度的振荡周期。2009 年为降雨侵蚀力突变年份, 降雨侵蚀力自此逐渐上升, 突变前后降雨侵蚀力相差 $416.27\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。风蚀气候侵蚀力近 40 年来无明显时间突变点。

目前, 陕西省大部分地区降雨侵蚀力均处于较强的时期, 尤其以陕北北部降雨侵蚀力距平最大, 且陕

北北部也是全省风蚀气候侵蚀力最强的区域, 榆林东部风蚀气候侵蚀力近 40 年亦呈上升趋势, 加之该地区地处毛乌素沙地南缘, 黄土高原北部, 土质疏松, 地形破碎, 生态环境脆弱, 因此该地区风蚀水蚀气候侵蚀力的增长更应引起重视。针对该地区风蚀和水蚀变化情况, 依然要加强土地治理, 全面保护和增加林草植被, 通过大力开展造林种草、小流域治理等措施进行综合治理, 适度开发利用沙区资源, 同时发挥生态系统自然修复功能, 因地制宜, 将保护和恢复植被与合理利用自然资源相结合, 维护生态安全, 促进经济和社会的可持续发展。

参考文献:

- [1] 崔宗培.《中国水利百科全书》[M].2 版.北京:中国水利水电出版社,2006:1412.
- [2] 李锐.中国水土流失基础研究的机遇与挑战[J].自然杂志,2008,30(1):6-11.
- [3] 刘惠英,王永文,张平仓.三峡库区龙河流域降雨侵蚀力的时空分布特征[J].长江科学院院报,2016,33(4):22-26.
- [4] 王万忠,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [5] 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.
- [6] 殷水清,谢云,王春刚.用小时降雨资料估算降雨侵蚀力的方法[J].地理研究,2007,26(3):541-547.
- [7] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [8] 范俊甫,何惠馨,郭兵.1980—2015 年黄河流域降雨侵蚀力时空变化分析[J].地球信息科学学报,2018,20(2):196-204.
- [9] 邵祎婷,何毅,穆兴民.秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):416-425.
- [10] KEO Soksmnang,何洪鸣,赵宏飞.黄土高原 50 余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):1-7.
- [11] 朱大运,杨倩,陈海.1960—2017 年贵州省不同水系降雨侵蚀力时空变异特征[J].水土保持通报,2021,41(1):6-14.
- [12] 冯若昂,刘加珍,陈永金.山东省多年降雨侵蚀力及其增长率变化分析[J].自然灾害学报,2017,26(5):83-91.
- [13] 陈晓瑜,孙晓航,黄奇晓.1970—2017 年福建省降雨侵蚀力的时空变化特征[J].福建农林大学学报:自然科学版,2021,50(1):125-133.
- [14] 王雅琴,范文波,许忠宇,等.近 50 年新疆地区风蚀气候侵蚀力时空变化特征分析[J].水土保持研究,2021,28(4):22-28.

- 转运解毒与分异的研究进展[J].土壤学报,2019,56(4):785-795.
- [38] Liang M X, Chen Z B, Lin Q, et al. Assessing the transport of rare earth elements in runoff in a small watershed developed on a coarse-grained granite area in southern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020,79(13):339. DOI:10.1007/s12665-020-09094-0.
- [39] 琚彤军,刘普灵,石辉.稀土元素在作物体内的吸收及分布特征研究[J].中国稀土学报,2002,20(S):163-167.
- [40] Michaelides K, Ibraim I, Nord G, et al. Tracing sediment redistribution across a break in slope using rare earth elements[J]. *Earth Surface. Processes & Landforms*, 2010,35(5):575-587.
- [41] 张青青,陈志强,陈志彪,等.模拟降雨下离子型稀土矿区坡面产流产沙与稀土迁移规律[J].稀土,2018,39(5):56-69.
- [42] Ou X L, Chen Z B, Chen Z Q, et al. Effects of organic matter on the distribution of rare earth elements in red soil aggregates during ecological restoration[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021,18(11):2915-2928.
- [43] Samonova O A, Aseyeva E N, Chernitsova O V. Data on rare earth elements in different particle size fractions of topsoil for two small erosional landforms in central European Russia[J]. *Data in Brief*, 2020,30:105450.
- [44] 官传东,戴慧敏,杨作升,等.长江沉积物稀土元素的粒度效应研究[J].地质学刊,2012,36(4):349-354.
- [45] 李洋,李徐生,韩志勇,等.黄土不同粒级稀土元素分布特征及其制约因素[J].土壤学报,2016,53(4):972-984.
- [46] Haddadchi A, Ryder D S, Evrard O, et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013,28(4):560-578.
- [47] Zhao Y, Zhou Q Z, Gao G L, et al. A new methodological framework coupling computational fluid dynamics and fingerprinting for assessment of aeolian sediment transport processes[J]. *Catena*, 2021,204:105372.
- [48] Land M, Ohlander B, Ingri J, et al. Solid speciation and fractionation of rare earth elements in a spodosol profile from northern Sweden as revealed by sequential extraction[J]. *Chemical Geology*, 1999,160(1/2):121-138.
- [49] Li X J, Zan J B, Yang R S, et al. Grain-size-dependent geochemical characteristics of Middle and Upper Pleistocene loess sequences from the Junggar Basin: Implications for the provenance of Chinese eolian deposits [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2019,538:109458.
- [50] Chen X L, Song Y G, Li J C, et al. Size-differentiated REE characteristics and environmental significance of aeolian sediments in the Ili Basin of Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017,143:30-38.

(上接第54页)

- [15] 陈首序,董玉祥.风蚀气候侵蚀力研究进展[J].中国沙漠,2020,40(5):65-73.
- [16] 蒋冲,陈爱芳,喻小勇,等.黄土高原风蚀和风水蚀复合区的风蚀气候侵蚀力变化[J].干旱区研究,2013,30(3):477-484.
- [17] 雷金银,吴发启,马璠,等.毛乌素沙地土壤风蚀的气候因子分析[J].水土保持研究,2007,14(2):104-105.
- [18] 杨兴华,何清,李红军,等.塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].中国沙漠,2012,32(4):990-995.
- [19] 吴成永,陈克龙,曹广超,等.近30年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J].地理研究,2018,37(4):717-730.
- [20] 邹春霞,申向东,李夏子,等.内蒙古阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):1172-1178.
- [21] 陈浩.黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [22] 邓鑫欣,张加琼,杨明义,等.黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀特征[J].水土保持研究,2019,26(3):1-6.
- [23] 熊炜,范文.秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究[J].灾害学,2014,29(1):228-233.
- [24] 海春兴,史培军,刘宝元,等.风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J].水土保持学报,2000,16(2):50-56.
- [25] 申雨晨,李双双,延军平,等.极点对称模态分解下陕西气候变化特征及影响因素[J].干旱区地理,2021,44(1):36-46.
- [26] 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.
- [27] 董玉祥,康国定.中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].水土保持学报,1994,8(3):1-7.
- [28] 环境保护部,国家发展改革委.生态保护红线划定指南(环办生态[2017]48号)[R].2017-5-27.