

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.030.

许 旭, 李谭宝, 李占斌, 等. 宁夏风蚀气候侵蚀力时空演变及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 217-227, 235.

XU Kui, LI Tanbao, LI Zhanbin, et al. Temporal and Spatial Evolution and Influencing Factors of Wind Erosion Climatic Erosivity in Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 217-227, 235.

## 宁夏风蚀气候侵蚀力时空演变及影响因素分析

许 旭<sup>1,2</sup>, 李谭宝<sup>2,3</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 于坤霞<sup>1,2</sup>, 李 鹏<sup>1,2</sup>, 姜 英<sup>2,3</sup>, 李才文<sup>2,3</sup>, 杨 志<sup>4</sup>

(1.西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2.旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048; 3.国家林业和草原局 西北调查规划院, 西安 710048; 4.宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川 750002)

**摘 要:**[目的]揭示宁夏回族自治区风蚀气候侵蚀力( $C$ 值)的时空演变特征,阐明宁夏气候对风蚀的影响及因素,进而为宁夏风蚀评估提供科学依据。[方法]基于宁夏及周边气象站 1965—2019 年的观测数据,根据 FAO 风蚀气候侵蚀力计算公式,利用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变点检验、Morlet 小波分析及随机森林等方法,开展了宁夏风蚀气候侵蚀力时空演变及影响因素的研究。[结果](1) 宁夏多年平均  $C$  值为 23.8,在年尺度和季节尺度上呈现可持续发展的显著减少趋势,且春夏季高、夏秋季低。(2) 多年平均  $C$  值在空间上呈现中北部高、南部低的分布,显著减少的站点共 8 个,且均呈现可持续性。(3) 除夏季尺度外,其他季节尺度和年尺度的  $C$  值均在 2003 年前后发生显著突变,且均存在一个 30 a 左右的主周期。(4) 影响  $C$  值最主要的因子是风速,其次是降水量、相对湿度、热力因子、太平洋年代际振荡指数。[结论]宁夏属于干旱半干旱地区气候侵蚀力较弱的区域,风速是影响宁夏  $C$  值最主要的因子。

**关键词:**风蚀气候侵蚀力; 时空演变; 随机森林; 宁夏

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)04-0217-11

## Temporal and Spatial Evolution and Influencing Factors of Wind Erosion Climatic Erosivity in Ningxia

XU Kui<sup>1,2</sup>, LI Tanbao<sup>2,3</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2</sup>, YU Kunxia<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>,  
JIANG Ying<sup>2,3</sup>, LI Caiwen<sup>2,3</sup>, YANG Zhi<sup>4</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China; 3.Northwest Survey and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China; 4.Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

**Abstract:**[Objective] This paper reveals the temporal and spatial evolution characteristics of wind erosion climate erosivity ( $C$  factor) in Ningxia Hui Autonomous Region, expounds the influence and factors of Ningxia climate on wind erosion, and further provides scientific basis for wind erosion evaluation in Ningxia. [Methods] Based on the observation data of Ningxia and its surrounding weather stations from 1965 to 2019, according to FAO wind erosion climate erosivity calculation formula, this paper evaluates the temporal and spatial evolution of wind erosion climate erosivity and its influencing factors in Ningxia by using Mann-Kendall trend test, Pettitt catastrophe test, Morlet wavelet analysis and random forest. [Results] (1) The average  $C$  factor of Ningxia was 23.8, on the annual scale and seasonal scale, it showed a sustainable and significant decreasing trend, which was higher in spring and winter and lower in summer and autumn. (2) The average  $C$  factor for many years showed a high distribution in the north-central part and a low

收稿日期:2022-05-05

修回日期:2022-05-26

资助项目:国家自然科学基金面上项目(52079104);国家林业和草原局西北调查规划设计院项目(XBY-KJ CX-2021-1);宁夏区水利科技项目(SBZZ-J-2021-12, SBZZ-J-2021-13);陕西省重点研发计划(2023-ZDLSF-60)

第一作者:许旭(1998—),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:15137467652@163.com

通信作者:于坤霞(1989—),女,河南新乡人,博士,副教授,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:yukunxia@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

distribution in the south. A total of 8 stations were significantly reduced, and all of them are sustainable. (3) Except for the summer scale, the C factor of other seasonal scales and annual scales all changed significantly around 2003, and there was a main period of about 30 years. (4) The most important factor affecting C factor was wind speed, followed by precipitation, relative humidity, thermal factors and Pacific Decadal Oscillation. [Conclusion] Ningxia belongs to the arid and semi-arid areas with weak climate erosion, and wind speed is the most important factor affecting Ningxia's C factor.

**Keywords:** wind erosion climatic erosivity; temporal and spatial evolution; random forest; Ningxia

风蚀是指土壤及其母质在风力作用下发生剥蚀、分选、搬运的过程<sup>[1]</sup>,主要发生在我国北方干旱半干旱地区,是农田土壤质量退化和沙漠化的主要过程之一<sup>[2]</sup>。同时风蚀是一个受多种因素影响的复杂过程,包括气候条件、土壤性质、地表特征和土地利用实践等<sup>[3]</sup>;在多种因素中,气候条件是影响风蚀的重要因素<sup>[4]</sup>,为了将这种气候条件影响风蚀的可能程度进行量化,从而提出了风蚀气候因子指数的概念,即风蚀气候侵蚀力<sup>[5-6]</sup>。在20世纪60年代,Chepil等<sup>[5]</sup>首先建立起第一个风蚀气候因子指数公式,而后联合国粮农组织(FAO)对Chepil的风蚀气候因子公式进行修正,提出了由风速、降水和蒸发来决定的风蚀气候因子指数公式<sup>[7]</sup>。随后,Skidmore<sup>[8]</sup>通过考虑风速密度函数和表层土壤含水量建立了一个新的风蚀气候因子指数公式。目前应用最广泛的是FAO提出的风蚀气候因子计算公式,该方法在我国干旱半干旱地区较适应<sup>[9]</sup>。

中国对风蚀气候因子的研究主要集中在干旱半干旱地区,在1994年,董玉祥等<sup>[9]</sup>利用FAO所提出的风蚀气候因子指数计算公式,最先阐述了我国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的基本特征;接着方祖光等<sup>[10]</sup>计算了福建沿海地区气候干燥度和风蚀气候侵蚀力,指出该地区在秋冬季由于干旱和大风频繁导致风蚀气候侵蚀力较大;而后王永等<sup>[11]</sup>对内蒙古阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力时空特征进行分析,结果显示该地区属于我国干旱半干旱地区气候侵蚀力较强( $C>100$ )的区域;邹春霞等<sup>[12]</sup>通过MHF小波分析来研究内蒙古阴山北麓农牧交错带的风蚀气候侵蚀力,其结果显示具有明显的周期性特征;马茜茜等<sup>[13]</sup>根据阿拉善高原8个气象站观测资料,对该地区风蚀气候侵蚀力进行趋势分析和突变点分析,结果表明风蚀气候侵蚀力在1990年发生突变,拐子湖站年C值呈显著增加,其余各站均显著下降。

宁夏地处黄土高原与内蒙古高原过渡地带,是风蚀水蚀交错区,生态环境脆弱<sup>[14]</sup>;该地区风力侵蚀仍然是长期所要面临的生态问题,研究宁夏风蚀气候因子的时空分布及影响因素,对宁夏的风蚀评估具有重要意义。因此,本研究采用FAO的风蚀气候因子计

算公式,利用FAO Penman-Monteith日潜在蒸散量计算公式得到较为准确的潜在蒸散量用来计算风蚀气候因子,采用Mann-Kendall趋势检验、Morlet小波分析和Pettitt突变点检验等方法分析其时空变化趋势、周期性及突变特征,并利用交叉小波和随机森林对风蚀气候侵蚀力的影响因素进行分析,以期对宁夏风蚀评估提供参考。

## 1 数据与方法

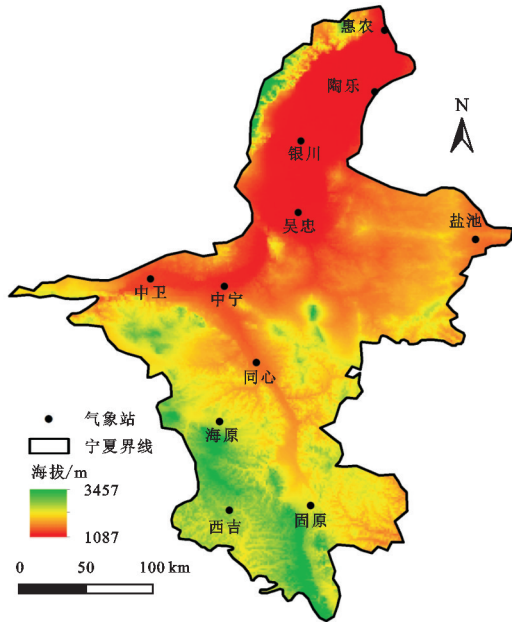
### 1.1 研究区概况

宁夏位于我国西北内陆地区,地处内蒙古高原和黄土高原过渡地带,地理坐标介于东经 $104^{\circ}17'$ — $107^{\circ}39'$ ,北纬 $35^{\circ}14'$ — $39^{\circ}23'$ ,区域面积为 $6.64\times 10^4\text{ km}^2$ 。宁夏地势南高北低,海拔变化范围为 $1\,087\sim 3\,457\text{ m}$ ,北部和中部以风蚀地貌为主,南部以流水地貌为主。由于位于西北内陆高原,属典型的大陆性半湿润半干旱气候;昼夜温差大,太阳辐射强;全年平均气温为 $5\sim 18^{\circ}\text{C}$ ,1月最冷,7月最热;雨季集中于6—9月,多年平均降水量为 $285.3\text{ mm}$ ;多年平均蒸发能力为 $1\,077.4\text{ mm}$ ;年无霜期 $150\text{ d}$ 左右;年日照时数达 $3\,000\text{ h}$ 以上。宁夏与腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地相围,结合气候条件使得该地区生态脆弱,沙尘天气与土地沙漠化严重<sup>[15]</sup>。

### 1.2 数据来源

气象站点资料来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),包括宁夏及周边共计22个气象站的日值气象资料;其中宁夏包括惠农、吴忠、银川、陶乐、中卫、中宁、盐池、海原、同心、固原、西吉共11个气象站,其时间序列为1965—2019年;为了得到更精确的风蚀气候侵蚀力空间分布特征,选取宁夏周围包括景泰、靖远、华家岭、鄂托克旗、定边、环县、崆峒、陇县、麦积、吉兰太、阿拉善左旗共11个气象站(图1),除吉兰太和阿拉善左旗的时间序列为1965—2017年外,其余时间序列均为1965—2019年。大气环流数据来自美国NOAA物理科学实验室(PSL)网站(<https://psl.noaa.gov/>),包括北极涛动指数(AO)、北大西洋涛动指数(NAO)、太平洋年代际振荡指数

(PDO)、太平洋北美遥相关指数(PNA)、南方涛动指数(SOI),时间序列为1965—2019年;太阳黑子(Sunspot)数据来自SILSO网站(<https://wwwbis.sidc.be>),时间序列为1965—2019年。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2020)4619号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 宁夏位置与气象站分布

### 1.3 方法

1.3.1 风蚀气候侵蚀力的计算 本文采用的风蚀气候侵蚀力计算公式为联合国粮农组织(FAO)改良的风蚀气候因子指数计算公式,该计算公式考虑了风速、降水、蒸发等因素,在我国干旱半干旱地区具有良好的适用性<sup>[9]</sup>。其计算公式如下所示:

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

式中: $C$ 为风蚀气候因子指数,其值代表风蚀气候侵蚀力的大小; $\bar{u}_i$ 为2 m高处月平均风速(m/s); $ETP_i$ 为月潜在蒸散量(mm); $P_i$ 为月降水量(mm); $d$ 为月天数(d)。

本文采用的潜在蒸散量计算公式为联合国粮农组织(FAO)改进的FAO Penman-Monteith<sup>[16]</sup>日潜在蒸散量计算公式,通过叠加得到月潜在蒸散量,该公式能较全面地考虑影响蒸散的各种因素,在各个地区表现较好<sup>[6]</sup>。其计算公式如下所示:

$$ETP = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900 u_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

式中: $ETP$ 为日潜在蒸散量(mm/d); $R_n$ 为地表净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $G$ 为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $u_2$ 为2 m处日平均风速(m/s); $T$ 为2 m处日平均气温(°C); $e_s$ 为饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为实际水汽压

(kPa); $\Delta$ 为饱和水汽压曲线的斜率(kPa/°C); $\gamma$ 为湿度计常数(kPa/°C)。

由于式(1)和式(2)计算时采用的是2 m高处的风速,而气象站点的风速数据是监测的10 m高处的风速,需要进行转换<sup>[6,16]</sup>,此时用到的公式是FAO推荐的风速转换公式,其计算公式如下所示:

$$u_2 = u_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (3)$$

式中: $u_2$ 为2 m高处风速(m/s); $u_{10}$ 为10 m高处风速(m/s)。

1.3.2 趋势性与持续性分析 Mann-Kendall 检验法(M-K 检验)是最早由Mann提出,后来由Kendall进行改进的一种趋势分析方法,该方法在评估水文气象序列的变化趋势中被广泛应用<sup>[17]</sup>。在M-K检验中,给定一个置信水平 $\alpha$ ,当 $|Z| \geq Z(\alpha/2)$ 时,则在置信水平 $\alpha$ 上时间序列具有明显的变化趋势。

Hurst 指数( $H$ )在评估水文气象序列变化的持续性中被广泛应用<sup>[17]</sup>。当 $H = 0.5$ 时,表示变化是不可持续的;当 $H > 0.5$ 时,表示变化是正可持续性;当 $H < 0.5$ 时,表示变化是负可持续性。

1.3.3 Pettitt 突变点检验 Pettitt 方法是一种非参数突变点检验的方法,被广泛应用在水文气象突变点检验中<sup>[18]</sup>。相比于另外一种常用的M-K突变点检验,该方法可能的突变点只有一个,即 $|U_{t,n}|$ 最大时所对应的年份。当 $|U_{t,n}|$ 最大时对应的显著性水平 $p \leq 0.05$ 时,则认为数据中存在显著突变点。

1.3.4 Morlet 小波分析 为了分析风蚀气候侵蚀力的变化周期,采用Morlet小波<sup>[18]</sup>进行周期分析。Morlet小波可以对数据进行降噪、重建和提取,从而确定震动周期出现在哪个时间上,广泛应用于众多领域。其小波变换公式如下所示:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; $a, b$ 分别为频域和时域因子; $\bar{\varphi}(t)$ 为小波函数 $\varphi(t)$ 的复共轭函数。

1.3.5 交叉小波分析 为了探究风蚀气候侵蚀力与大气环流因子的驱动性,采用交叉小波<sup>[19]</sup>进行驱动性分析。交叉小波能较好揭示两个时间序列的相关性及变化特征。对于任意两个时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的交叉小波功率谱描述为:

$$W_{xy}(\alpha, \tau) = C_x(\alpha, \tau) C_y^*(\alpha, \tau) \quad (5)$$

式中: $W_{xy}(\alpha, \tau)$ 为交叉小波功率谱; $\alpha$ 为尺度伸缩函数; $\tau$ 为时间平移函数; $C_x(\alpha, \tau)$ 为序列 $x(t)$ 的小波变换系数; $C_y^*$ 为序列 $y(t)$ 的小波变换系数的复共轭。

1.3.6 随机森林 随机森林是由Breiman<sup>[20]</sup>提出的一



个包含多个决策树的集成学习器,对于输入的样本每棵决策树均会给定一个分类结果,最终取所有决策树中分类结果最多的作为本次的结果。随机森林回归模型存在两个重要参数  $mtry$  和  $ntree$ ,分别表示用于二叉树的变量个数和决策树数目,需要选取最佳的  $mtry$  来保证模型错误率最低,选取最佳的  $ntree$  值保证模型错误率最低并且不降低模型的计算效率;而随机森林回归模型中可以根据  $IncMSE$  和  $IncNodePurity$  两个指标对因子做重要性评价,两个指标越高,则因子越重要。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时间尺度风蚀气候侵蚀力及计算因子基本统计特征

由于气象站点的降水量、风速、潜在蒸散量及风蚀气候侵蚀力数据只能代表该站点处的情况,为了得到整个宁夏的面数据,本文采用 ArcGIS 软件的泰森多边形法计算得到宁夏面降水量、面风速、面潜在蒸散量及面风蚀气候侵蚀力数据,并以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—次年 2 月为冬季来划分季节。

2.1.1 年际变化特征 宁夏 1965—2019 年风蚀气候侵蚀力及计算因子的年际变化特征见图 2 和表 1。在

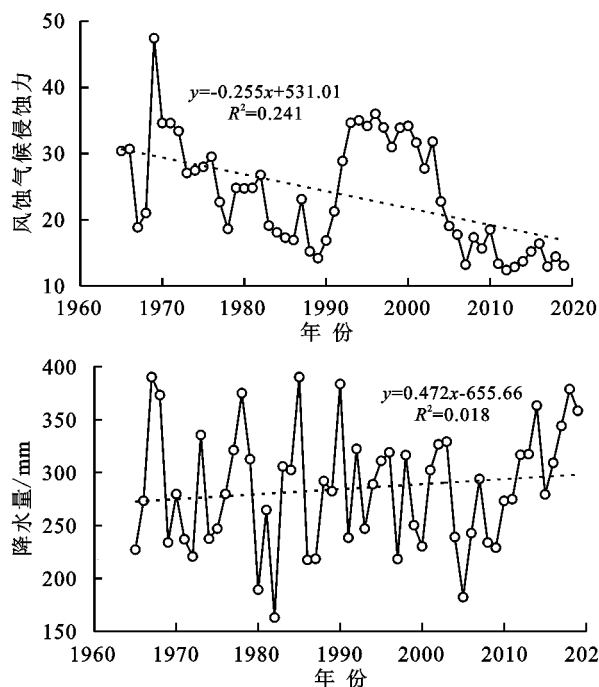
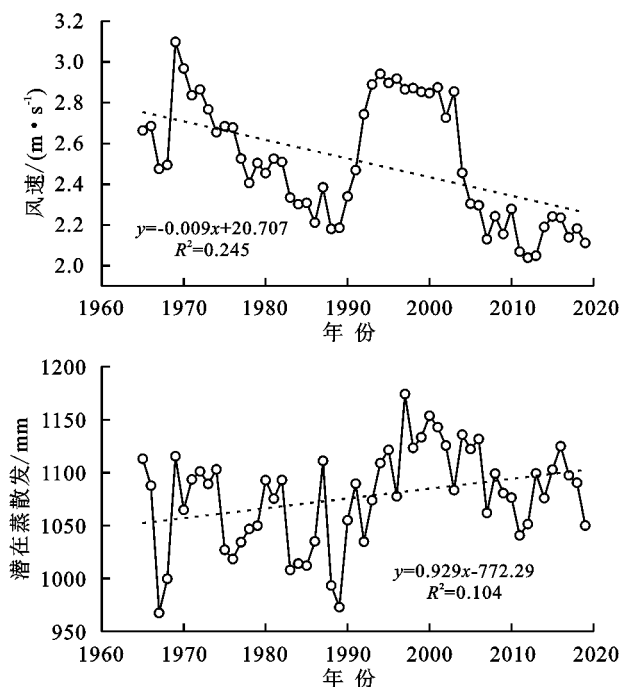


图2 宁夏风蚀气候侵蚀力及计算因子年际变化

2.1.2 年内变化特征 宁夏 1965—2019 年风蚀气候侵蚀力及计算因子的年内变化特征见图 3 和表 2。1965—2019 年,宁夏风蚀气候侵蚀力月变化特征总体呈现为 1—4 月份增加,4 月份达到最大值为 3.54; 6—9 月份减少,9 月份达到最小值为 0.90;10—12 月

1965—2019 年,宁夏风蚀气候侵蚀力总体上在 12.4~47.4 波动,其中最大值出现在 1969 年,最小值出现在 2012 年;近 55 年风蚀气候侵蚀力的均值为 23.8,属于我国干旱半干旱地区气候侵蚀力较弱的区域。通过计算风蚀气候侵蚀力和计算因子的 CV 值可以发现,近 55 年间风蚀气候侵蚀力的年际变化幅度较大,呈现出中等变异程度,风速和降水量虽然也呈现为中等变异,但其变异程度较风蚀气候侵蚀力小,而潜在蒸散量则呈现出弱变异。1965—2019 年宁夏风蚀气候侵蚀力年际变化趋势以 0.255/a 的速率呈显著减少趋势( $\alpha \leq 0.05$ ),在计算因子中,风速以 0.009 m/(s·a) 的速率呈显著减少趋势( $\alpha \leq 0.05$ ),潜在蒸散量以 0.929 mm/a 的速率呈显著增加趋势( $\alpha \leq 0.05$ ),而降水量则以 0.472 mm/a 的速率呈不显著增加趋势( $\alpha > 0.05$ )。同时由 Hurst 指数可以看出,宁夏风蚀气候侵蚀力、风速、降水量和潜在蒸散量的变化趋势均与过去保持一致,该地区的风蚀气候侵蚀力和风速在未来仍会持续减少,而潜在蒸散量在未来仍会持续增加。

从风蚀气候侵蚀力和计算因子的年际变化特征可以看出,风速与风蚀气候侵蚀力存在较为相似的年际变化趋势,这种相似的变化趋势表明了风速是影响风蚀气候侵蚀力大小最主要的因素。



份又持续增加,这种月变化趋势与雷杨娜等<sup>[21]</sup>研究陕西省风蚀气候侵蚀力月变化特征相似。在计算因子中,风速呈现先增大后减少再缓慢增大的月变化趋势,与风蚀气候侵蚀力的月变化特征相似;而降水量和潜在蒸散量则是呈现先增大后减少的月变化趋势,

其中降水量的最大值出现在 8 月份,潜在蒸散量的最大值出现在 6 月份。

表 1 宁夏风蚀气候侵蚀力及计算因子年际统计特征

名称	M-K 统计量	Hurst	均值	CV 值
风蚀气候侵蚀力	-4.11**	0.690	23.80	0.349
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	-4.21**	0.706	2.51	0.118
降水量/mm	1.34	0.549	285.30	0.197
潜在蒸散量/mm	2.03*	0.685	1077.40	0.043

注:\*,\*\* 分别表示通过了置信区间 95%,99%的显著性检验,下表同。

在 1965—2019 年,宁夏风蚀气候侵蚀力具有明显的季节变化特征,总体呈现出春季(9.6)>冬季(5.52)>夏季(5.05)>秋季(3.65),这也与董玉祥等<sup>[9]</sup>研究我国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力在春季最强相吻合;但与之不同的是,宁夏夏季风蚀气候侵蚀力并不是最弱的季节,反而比秋季的风蚀气候侵蚀力大,处于第三强的季节;为了分析这种现象,通过

对比夏季和秋季的 $(ETP-P)/ETP$ 和 $u^3$ ,发现在研究时段内夏季与秋季的 $(ETP-P)/ETP$ 均值分别为 0.642,0.654,相差不大,而两个季节的 $u^3$ 均值分别为 6.81,4.64 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>,相差较大,因此可能是由于宁夏夏季风速较秋季大从而导致夏季风蚀气候侵蚀力比秋季强这一现象。在季节变化趋势上,宁夏风蚀气候侵蚀力在各季节均呈现显著减少( $\alpha\leq 0.05$ )的变化趋势;从 Hurst 指数可以看出,宁夏各季节风蚀气候侵蚀力的变化趋势均与过去保持一致,未来各季节风蚀气候侵蚀力仍会持续减少。并且对宁夏各季节风蚀气候侵蚀力做变异系数分析,其中春季的变异系数为 0.36,夏季的变异系数为 0.404,秋季的变异系数为 0.513,冬季的变异系数为 0.418;近 55 年宁夏风蚀气候侵蚀力在各季节均呈现中等程度变异,其中秋季变异程度最强,春季变异程度最弱。

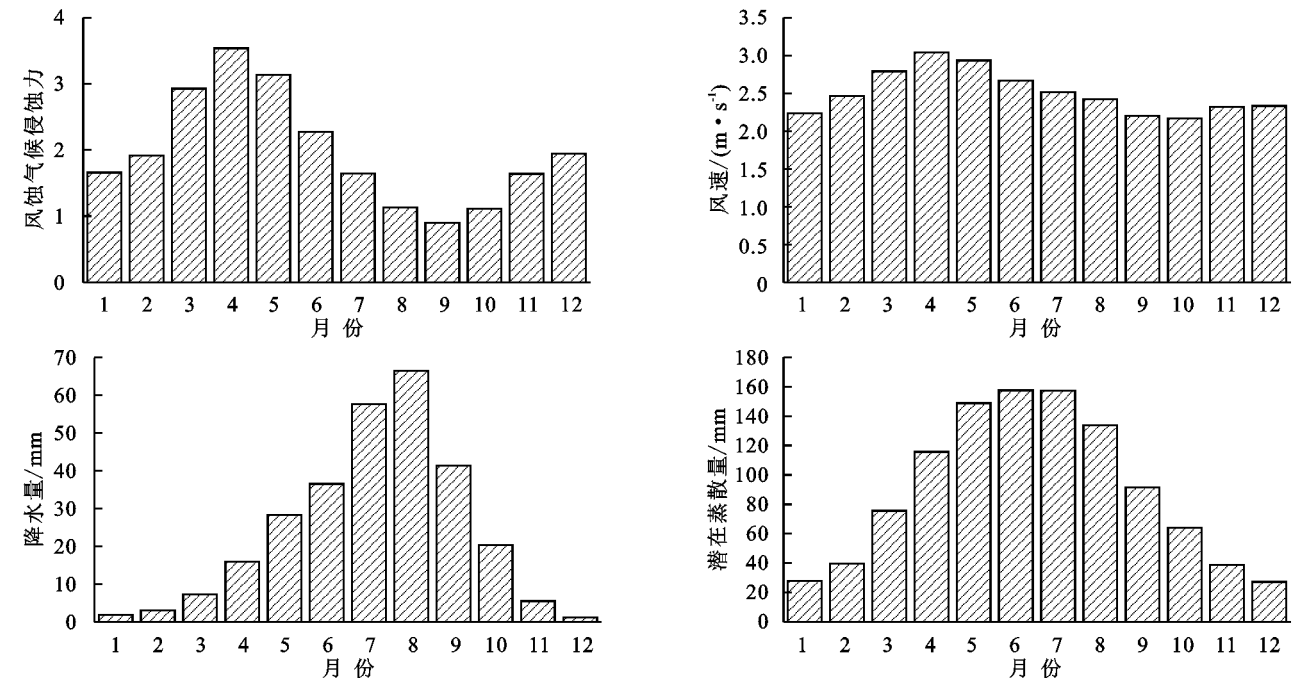


图 3 宁夏风蚀气候侵蚀力及计算因子月际变化图

表 2 宁夏风蚀气候侵蚀力季节统计特征

季节	M-K 统计量	Hurst 值	均值	CV 值
春季	-4.12**	0.683	9.60	0.360
夏季	-2.41*	0.581	5.05	0.404
秋季	-2.41*	0.665	3.65	0.513
冬季	-3.73**	0.672	5.52	0.418

2.2 风蚀气候侵蚀力时空变化趋势

为了得到宁夏风蚀气候侵蚀力空间分布特征,采用 ArcGIS 软件的克里金插值法对宁夏风蚀气候侵蚀力进行插值,得到宁夏风蚀气候侵蚀力多年平均及年代际空间分布,结果见图 4。1965—2019 年,宁夏

多年平均风蚀气候侵蚀力在空间上介于 4.3~37.3,整体呈现中北部高、南部低的空间分布,并且出现了惠农、中宁、同心、海原这 4 个高值区,多年平均值均在 35 左右;同时出现了银川、西吉两个低值区,多年平均值均在 10 左右。

55 年间宁夏风蚀气候侵蚀力各年代际空间分布差异显著。20 世纪 70 年代介于 13~43.5,呈现北高南低的空间分布,有惠农、中宁、海原 3 个高值区,最大值位于海原;20 世纪 80 年代介于 3.7~41.7,与 70 年代相比略有减小,存在中宁、海原两个高值区,最大值位于海原;20 世纪 90 年代介于 3.2~62.8,与 80 年代相比除海原显著减少外,其余地区有增加趋势,存

在惠农、中宁两个高值区,最大值位于惠农;21 世纪初介于 4.8~36.2,与 90 年代相比均存在减少趋势,存在惠农、中宁、中卫、同心 4 个高值区,最大值位于同心;21 世纪 10 年代介于 3.6~40.9,与 21 世纪初相比除同心显著增加外,其余地区有减少趋势,存在中卫、中宁、同心 3 个高值区,最大值位于同心。

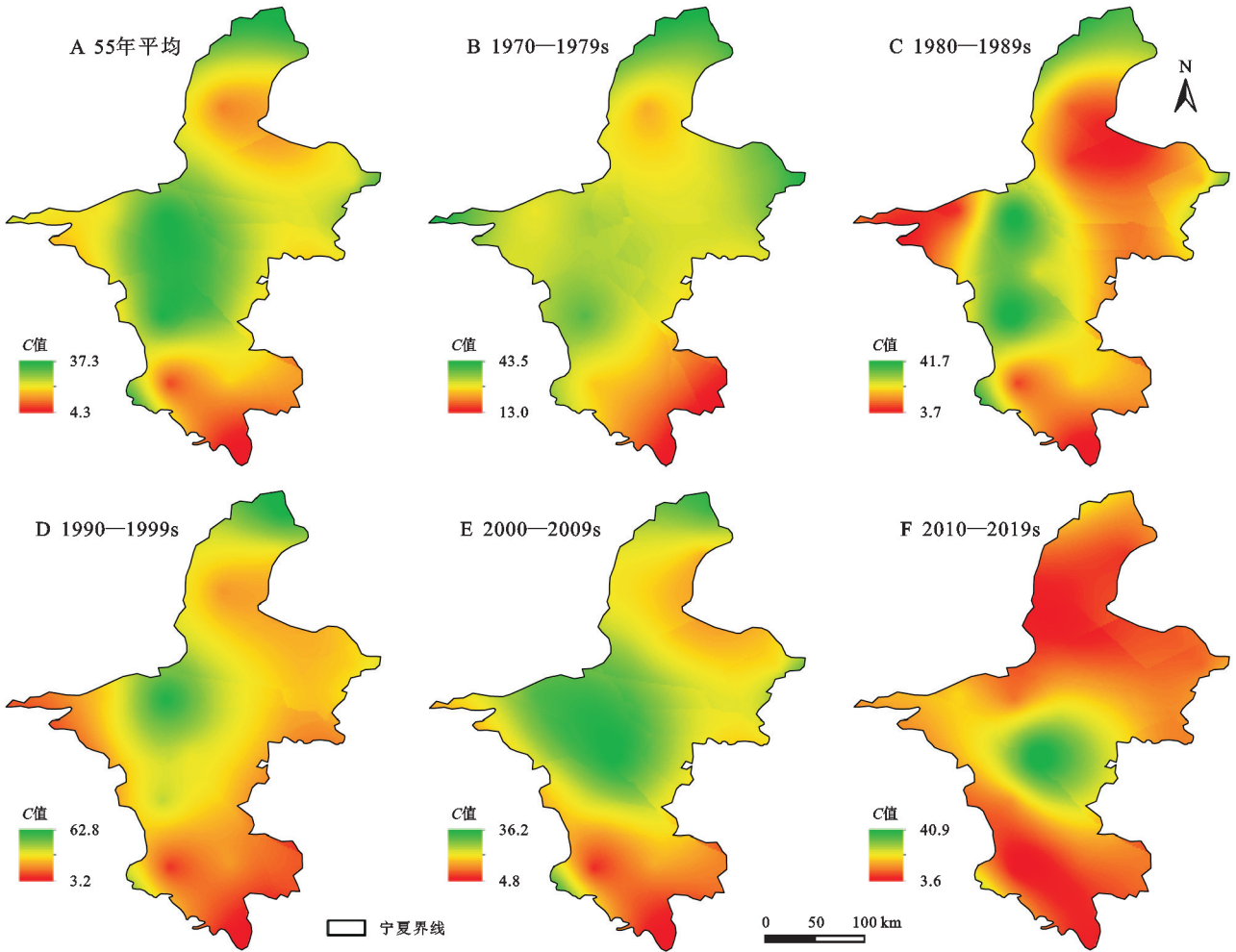


图 4 宁夏风蚀气候侵蚀力多年平均及年代际空间分布

参考刘旭东等<sup>[22]</sup>的研究,运用 K-均值聚类法,并根据宁夏多年风蚀气候侵蚀力空间分布特征,将宁夏划分为轻度、中度、重度 3 类气候侵蚀区,聚类中心分别为 11.2,21.2,35.4,聚类结果见表 3。第一类地区包括银川、西吉,这些地区多年平均风速较低,风蚀气候侵蚀力较弱,气候对风蚀的影响较弱,其中最小值出现在西吉,为 9.4;第 2 类地区包括吴忠、陶乐、中卫、盐池、固原,这些地区风蚀气候侵蚀力在宁夏处于中等程度;第 3 类地区包括惠农、中宁、海原、同心,这些地区多年平均风速较高,风蚀气候侵蚀力较强,气候对风蚀的影响较强,其中最大值出现在中宁,为 36。

表 3 宁夏地区风蚀气候侵蚀力的分布情况

类型	地区	区域气候特点
轻度	银川、西吉	相对于其他地区蒸发能力偏低,降水量有高低,气温偏低,相对湿度偏高,多年平均风速均在 2 m/s 左右
中度	吴忠、陶乐、中卫、盐池、固原	蒸发能力、降水量、气温、相对湿度、风速有高低,综合起来导致该地区风蚀气候侵蚀力处于中度状态
重度	惠农、中宁、海原、同心	相对于其他地区蒸发能力偏高,降水量总体偏低,气温偏高,相对湿度偏低,多年平均风速均在 2.9 m/s 左右

利用 M-K 趋势检验方法,对 1965—2019 年宁夏各站点年风蚀气候侵蚀力趋势进行识别,如图 5A 所示。在研究时段内,宁夏境内年风蚀气候侵蚀力只有 1 个站呈现显著增加趋势( $\alpha \leq 0.05$ ),2 个站年风蚀气候侵蚀力变化趋势不明显( $\alpha > 0.05$ ),8 个站呈现显著减少趋势( $\alpha \leq 0.05$ ),并且境内 11 个气象站年风蚀气候侵蚀力的 Hurst 指数均大于 0.5(图 5B),存在显著增加趋势的地区风蚀气候侵蚀力在未来仍会持续



增加,存在显著减少趋势的地区风蚀气候侵蚀力在未来仍会持续减少,结合表 3 的分析,同心位于气候影

响风蚀较重的区域,同时呈现出可持续的显著增大趋势,因此未来需要对该地区的风蚀状况进行防范。

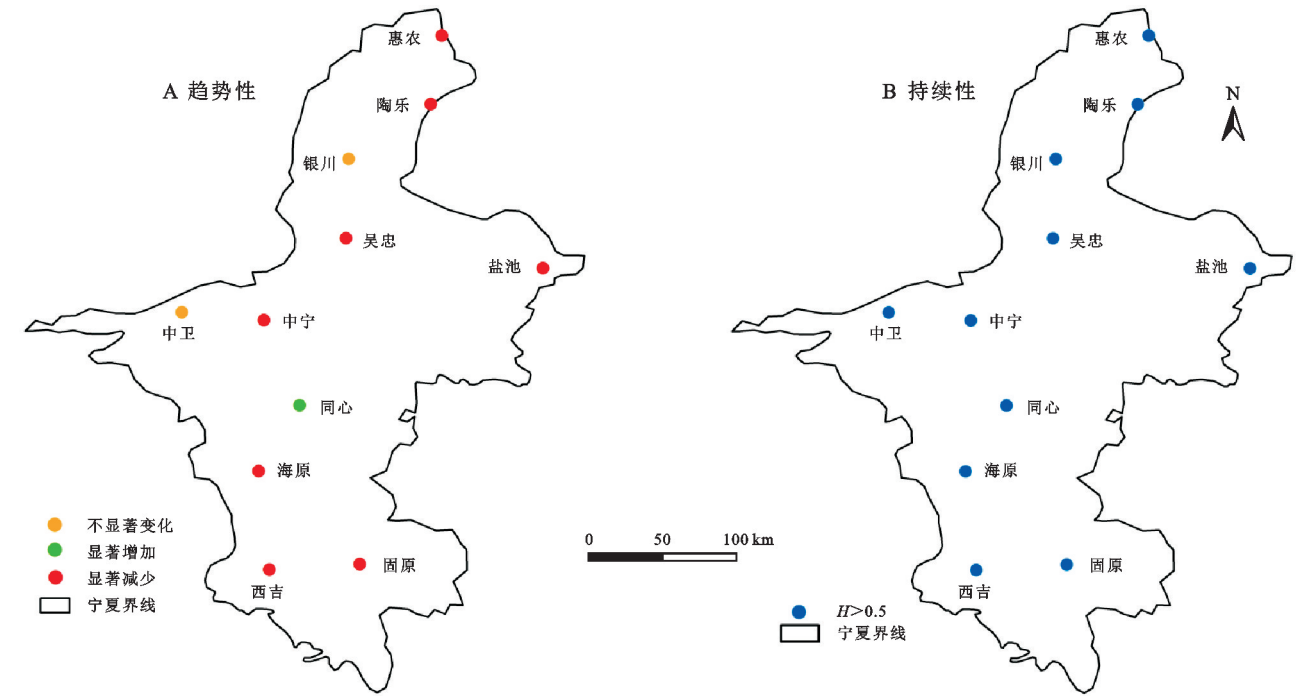


图 5 宁夏年风蚀气候侵蚀力空间趋势及其 Hurst 指数

2.3 风蚀气候侵蚀力突变点识别

采用 Pettitt 突变点检验对宁夏风蚀气候侵蚀力年尺度和各季节尺度做突变点检验,结果如图 6A—D 所示。从图中可以看出,在研究时段内,年尺度和冬季尺度风蚀气候侵蚀力在 2003 年发生了显著的突变;春季尺度与秋季尺度在 2004 年发生了显著的突变,只有夏季尺度未发生显著突变,但统计量的最大值出现在 2003 年。因此在不同时间尺度上,宁夏风蚀气候侵蚀力大致在 2003 年前后发生突变,说明了整个宁夏不同时间尺度的风蚀气候侵蚀力在 1965—2019 年突变具有一致性。

为了探究这种突变的产生,对计算因子进行 Pettitt 突变点检验,发现在年尺度和各季节尺度下宁夏平均风速均在 2003 年发生显著突变,而其他因子在年尺度和各季节尺度下的突变点均与风蚀气候侵蚀力的突变点相差甚远,结合 2.1 分析风速是影响风蚀气候侵蚀力大小最主要的因素,因此,在研究时段内宁夏不同时间尺度的风蚀气候侵蚀力在 2003 年前后发生的突变可能是由该地区风速在 2003 年发生显著突变所造成的。

2.4 不同时间尺度风蚀气候侵蚀力变化周期

1960—2019 年宁夏不同时间尺度风蚀气候侵蚀力的 Morlet 小波变换图见图 7。由图可知,55 年间研究区风蚀气候侵蚀力在年尺度、春季尺度和夏季尺度下存在一个 33 a 的主周期,在秋季尺度和冬季尺度下存在一个 27 a 的主周期;因此,在不同时间尺度

下宁夏风蚀气候侵蚀力均呈现出一个 30 a 左右的主周期,说明了整个宁夏不同时间尺度的风蚀气候侵蚀力在 1965—2019 年变化周期具有一致性。

2.5 大气环流对宁夏风蚀气候侵蚀力的影响

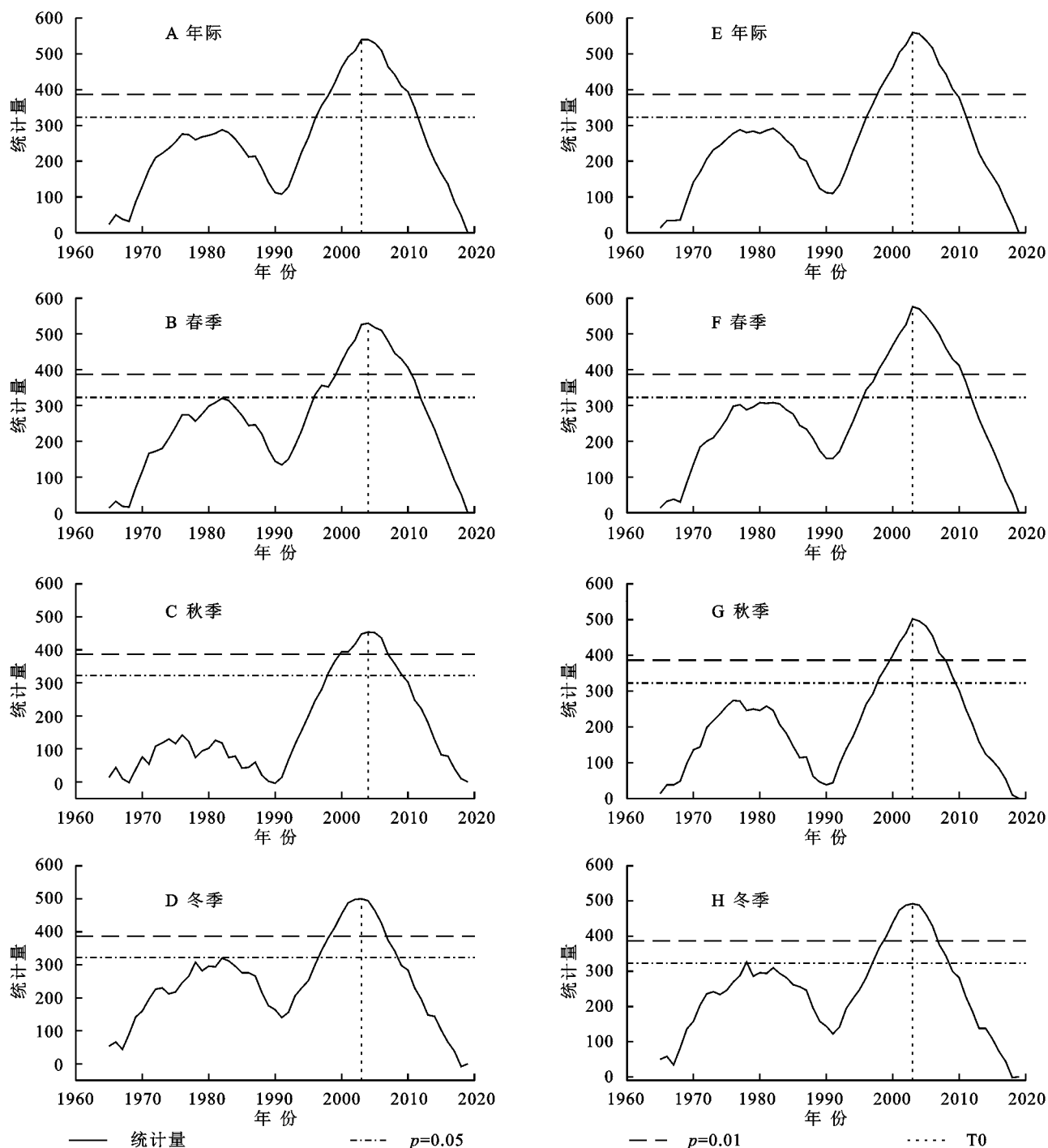
1965—2019 年宁夏风蚀气候侵蚀力与 6 种大气环流异常因子在月尺度下的交叉小波变换见图 8。由图可知,宁夏风蚀气候侵蚀力与北极涛动指数(AO)、北大西洋涛动指数(NAO)、太平洋北美遥想指数(PNA)、南方涛动指数(SOI)和太阳黑子(Sunspot)均在不同时段内存在共振周期以及显著相关性,但这些时段的相关性存在正负交替出现的情况,因此并未呈现出较好的耦合特征,而相对于以上 5 种大气环流异常因子,太平洋年代际振荡指数(PDO)与宁夏风蚀气候侵蚀力在 1989—2006 年内存在 9~15 月的显著正相关性( $\alpha \leq 0.05$ ),具有较好的耦合特征。从以上的分析表明,PDO 的增强可能会促使宁夏风蚀气候侵蚀力增加,从而导致宁夏地区风蚀情况加剧。

2.6 气象因子对宁夏风蚀气候侵蚀力的影响

结合前人的研究<sup>[9-13,21-22]</sup>,并根据 2.5 的分析,本文选取动力因子(风速和 PDO)、热力因子(气温和日照时数)、水分因子(降水量和相对湿度),在月尺度下建立随机森林回归模型,对气象因子做重要性评判。为了保证模型错误率最低且不降低计算效率,通过优选得到两个参数的取值分别为 mtry=5,ntree=200,此时模型

残差平方和的平均值为 0.0902, 解释量为 94.62%, 模型精度较优。通过建立的随机森林回归模型, 分别得到两个重要性评价指标 IncMSE 和 IncNodePurity, 结果见图 9。从图 9 可以看出, 无论是指标 IncMSE 还是指标 IncNodePurity, 均是风速为最重要的因子, 这也与 2.1 分析风速是影响风蚀气候侵蚀力大小最主要的因素相印证; 在指标 IncMSE 中显示降水量比相对湿度更重要, 而指标 IncNodePurity 中则显示相对湿度比降水量较重要, 但两者的值很接近, 因此认为降水量为第二重要的

因子, 相对湿度为第三重要的因子; 在指标 IncMSE 中, 气温和日照时数的重要程度非常接近, 而 PDO 则呈现负值, 在指标 IncNodePurity 中, 同样显示出气温与日照时数重要程度相近, 此时 PDO 值呈现为最小值, 因此将热力因子(气温和日照时数)共同归结为第四重要的因子, 而 PDO 相对于其他气象因子对宁夏风蚀气候侵蚀力的重要性最小。因此, 影响宁夏风蚀气候侵蚀力变化的最主要因子是风速; 其次是降水量、相对湿度、热力因子(气温和日照时数)、PDO。



注: A—D 为风蚀气候侵蚀力的突变检验, E—H 为风速突变检验。

图 6 宁夏不同时间尺度风蚀气候侵蚀力及风速突变检验



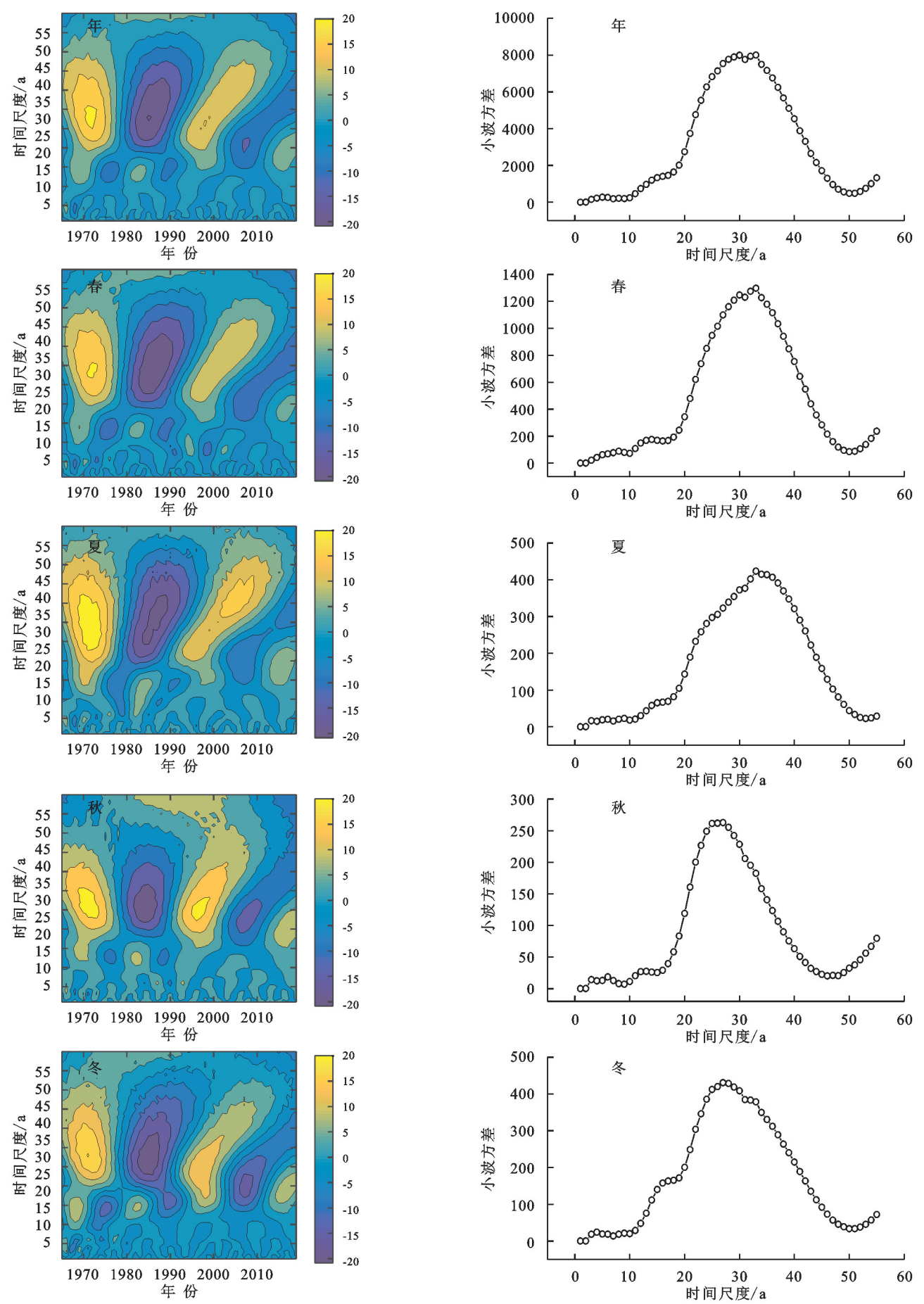


图 7 宁夏不同时间尺度风蚀侵蚀力周期变化

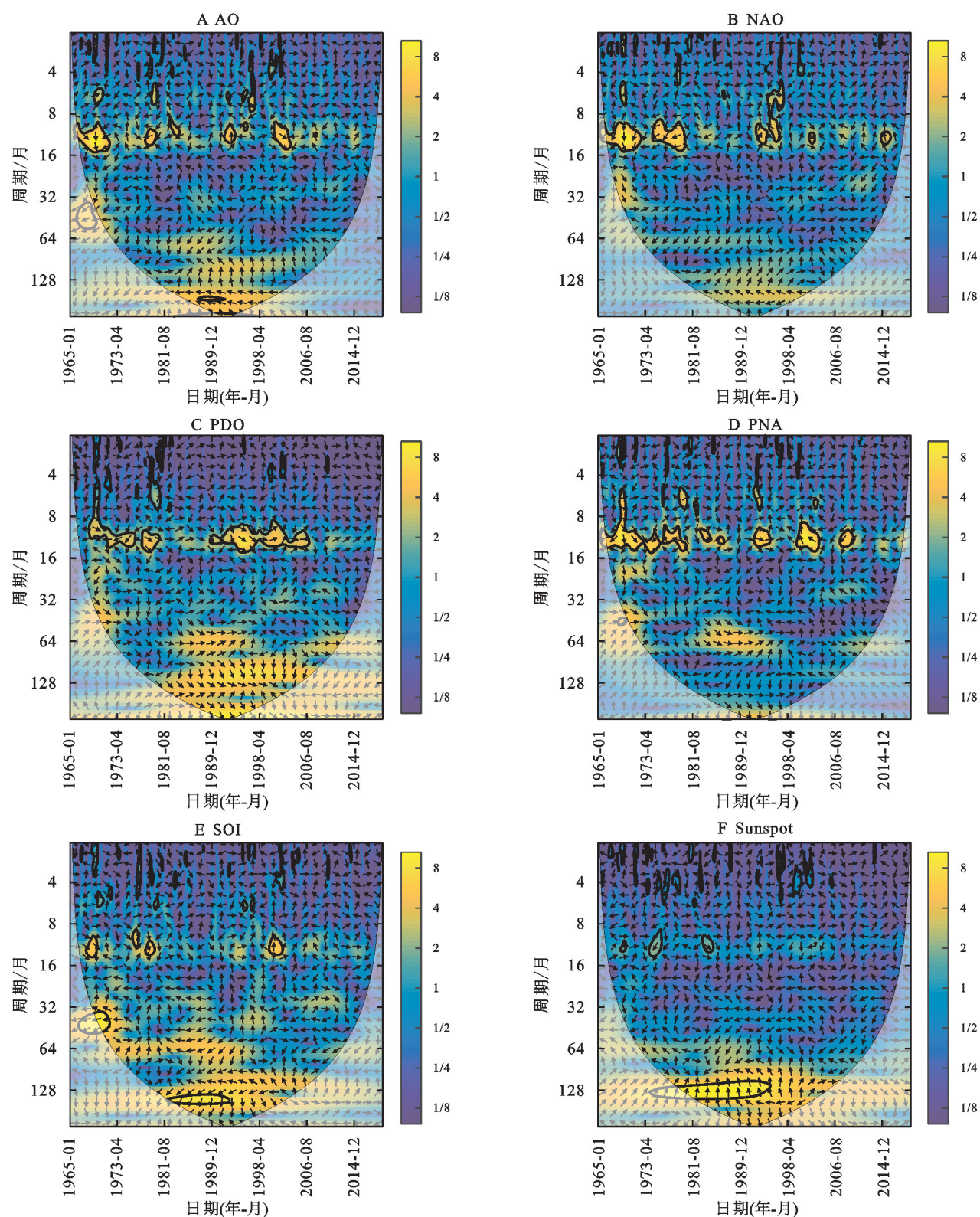


图8 宁夏风蚀气候侵蚀力与大气环流交叉小波变换

### 3 讨论

在分析宁夏风蚀气候侵蚀力空间分布特征中,出现了惠农、中宁、同心、海原4个高值区,这些地区的风蚀气候侵蚀力最大,其中中宁、同心、海原位于宁夏中部干旱风沙区,惠农北靠乌兰布和沙漠,同时这

些地区平均风速相对于其他地区最大,这一点也与梁会等<sup>[23]</sup>研究宁夏土壤风蚀特征中统计气象站点各等级风速发生的累积时数相印证,结合地理环境和气候条件,这些地区土壤风蚀可能较为严重;同时出现了银川、西吉两个气候侵蚀力低值区,这些地区的风蚀气候侵蚀力最小,其中银川水资源丰富,



湖泊湿地众多,西吉多年平均降水量为 409.3 mm,降水相对充沛,并且这两个地区的平均风速相对其他地区

区较低,在这种气候与环境条件下,这些地区土壤风蚀可能较轻微。

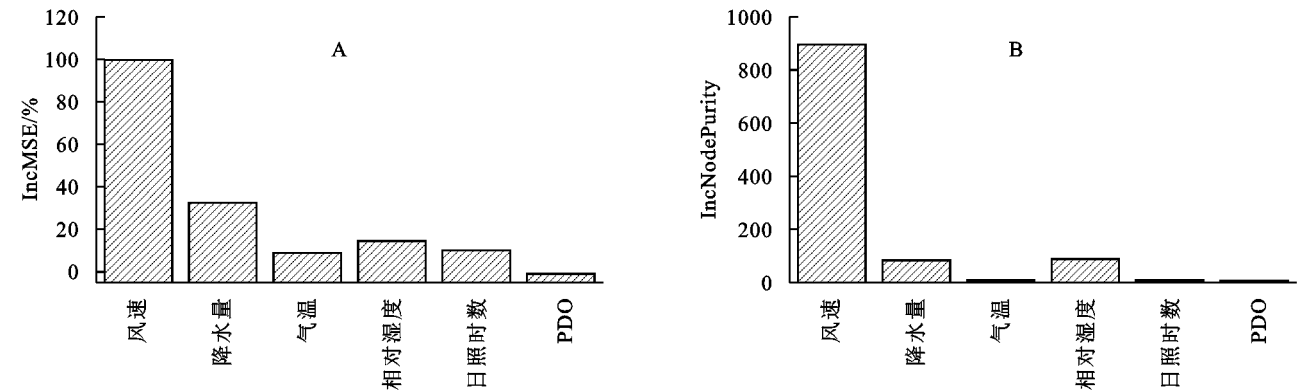


图 9 宁夏气象因子对风蚀气候侵蚀力重要性评判

大气环流是太阳辐射、大气内部热动量相互交换等因素形成的<sup>[24]</sup>,是气候条件形成的因素之一,而气候条件的变化又深刻影响风蚀气候侵蚀力的变化,其中 PDO 是影响北半球气候变化的重要环流因子<sup>[17]</sup>,它可以通过引起风场的变化<sup>[25]</sup>,进而影响到地表风速,并且根据前人的研究<sup>[26]</sup>,也发现在一些地区 PDO 与风速存在显著的正相关,结合结果与分析中得出的风速是影响风蚀气候侵蚀力最重要的影响因素,从而导致了 PDO 与宁夏风蚀气候侵蚀力存在较好的耦合特征。

在研究气象因子对风蚀气候侵蚀力的影响方面,与前人研究<sup>[9-13,27]</sup>得出的结论一致,均是风速为最主要的因子。祁栋林等<sup>[27]</sup>的研究表明,青海省风蚀气候侵蚀力与降水量的对应关系较差,而在本研究中降水量却是影响风蚀气候侵蚀力第二重要的因子,因此,在不同地区影响风蚀气候侵蚀力的因子也各不相同,这也与任景全等<sup>[28]</sup>研究吉林省风蚀气候侵蚀力时所得出的结论相一致。

4 结论

- (1) 宁夏风蚀气候侵蚀力(C 值)总体上在 12.4~47.4 波动,多年平均值为 23.8,属于我国干旱半干旱地区气候侵蚀力较弱的区域;在年尺度和各季节尺度上呈现可持续的显著减少趋势,变异程度较大;季节变化特征明显,总体呈现春季最大,冬季次之,秋季最小的季节变化。
- (2) 宁夏多年平均 C 值在空间分布上介于 4.5~37.3,总体呈现中北部高、南部低的分布,同时将研究区划分为轻度、中度和重度气候侵蚀区,其中同心站位于气候影响风蚀较重的区域,并且呈现可持续的显著增大趋势,未来需要防范。
- (3) Pettitt 突变点检验显示,除夏季尺度外,其他季节尺度和年尺度 C 值均在 2003 年前后发生显著突变,这种突变可能是由于不同时间尺度的平均风

速在 2003 年发生显著突变而导致的;并且年尺度和各季节尺度 C 值均存在一个 30 a 左右的主周期。  
(4) 影响宁夏 C 值最主要的因子是风速,其次是降水量、相对湿度、热力因子(气温和日照时数)、PDO。

参考文献:

[1] 陈渭南.蒙陕接壤地区土壤母质的风蚀实验研究[J].水土保持学报,1991,5(1):33-40.

[2] 陈渭南,董光荣,董治宝.中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J].地球科学进展,1994,9(5):6-12.

[3] Yue S, Yang R, Yan Y, et al. Spatial and temporal variations of wind erosion climatic erosivity in the farming-pastoral zone of Northern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019,135(3):1339-1348.

[4] 张晓虹,何有华,胡彦婷.干旱风沙区水库边缘植被-风力侵蚀的变化及成因[J].水土保持通报,2020,40(6):1-7,22.

[5] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962,17(4):162-165.

[6] 刘慧,李晓英,肖建华,等.1961—2015 年雅鲁藏布江流域风蚀气候侵蚀力变化[J].地理科学,2019,39(4):688-695.

[7] Food and Agriculture Organization of the United Nations: A Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment[M]. Rome: FAO,1980.

[8] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity[J]. Climatic Change,1986,9(1/2):195-208.

[9] 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.

[10] 方祖光,谢皎如.福建沿海地区干燥度和风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].福建师范大学学报:自然科学版,1997,13(3):96-103.

[11] 王永,赵举,程玉臣.阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].华北农学报,2005,20(S1):57-60.

[12] 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.

- (06):896-901.
- [16] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土高原坡沟系统径流泥沙过程[J].兰州大学学报:自然科学版,2010,46(5):7-10,18.
- [17] 张意奉,焦菊英,唐柄哲,等.特大暴雨条件下小流域沟道的泥沙连通性及其影响因素:以陕西省子洲县为例[J].水土保持通报,2019,39(1):302-309.
- [18] 唐柄哲.黄土丘陵沟壑区坡沟系统侵蚀产沙特征及泥沙连通性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] 胡胜,邱海军,王宁练,等.地形对黄土高原滑坡的影响[J].地理学报,2021,76(11):2697-2709.
- [20] Fang H Y. Effect of soil conservation measures and slope on runoff, soil, TN, and TP losses from cultivated lands in northern China [J]. Ecological Indicators, 2021,126:107677.
- [21] Caviedes-Voullième D, Ahmadienia E, Hinz C. Interactions of microtopography, slope and infiltration cause complex rainfall-runoff behavior at the hillslope scale for single rainfall events [J]. Water Resources Research, 2021,57(7):1-20.
- [22] Duvert C, Gratiot N, Anguiano-Valencia R, et al. Baseflow control on sediment flux connectivity: Insights from a nested catchment study in Central Mexico [J]. Catena, 2011,87(1):129-140.
- [23] 许阳光,郭文召,王文龙,等.极端降雨下黄土高原草被沟坡浅层滑坡特征及其对产流产沙的影响[J].生态学报,2022,42(19):7898-7909.
- [24] Bogunovic I, Pereira P, Kisic I, et al. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia) [J]. Catena, 2018,160:376-384.
- [25] 李阳,张建军,魏广阔,等.晋西黄土区极端降雨后浅层滑坡调查及影响因素分析[J].水土保持学报,2022,36(5):44-50.
- [26] Paik K, Kim W. Simulating the evolution of the topography-climate coupled system [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021,25(5):2459-2474.
- [27] 宁怡楠.黄土高原典型小流域水文连通性变化及其与径流泥沙量的响应关系[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2021.
- [28] Bracken L J, Turnbull L, Wainwright J, et al. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015,40(2):177-188.

~~~~~

(上接第227页)

- [13] 马茜茜,肖建华,姚正毅,等.1960—2017年阿拉善高原风蚀气候侵蚀力时空演变[J].地理科学,2021,41(6):1096-1104.
- [14] 璩向宁.宁夏沙区生态环境建设的基本理论问题[J].水土保持研究,2002,9(3):155-157.
- [15] 崔文斌.宁夏某铜尾矿风蚀特征及潜力评价[D].银川:宁夏大学,2021.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M].Rome: FAO,1998.
- [17] 贾路,于坤霞,邓铭江,等.西北地区降雨集中度时空演变及其影响因素[J].农业工程学报,2021,37(16):80-89.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
- [19] 邵骏.基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J].水力发电学报,2013,32(2):22-26,42.
- [20] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.
- [21] 雷杨娜,雷田旺,程路.陕西省风蚀气候侵蚀力时空演变特征[J].陕西气象,2022(1):28-34.
- [22] 刘旭东,左合君,闫敏.锡林郭勒地区风蚀气候侵蚀力时空变化规律研究[J].内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2019,48(2):142-147,153.
- [23] 梁会,田美荣,钱金平,等.基于风蚀模型的宁夏土壤风蚀特征及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(1):34-40.
- [24] 杨修群,王国民,张向东,等.大气环流与灾害性天气气候研究:黄土松先生学术成就和贡献回顾[J].气象科学,2020,40(5):569-584.
- [25] Meijers A J S, Cerovečki I, King B A, et al. A see-saw in Pacific subantarctic mode water formation driven by atmospheric modes [J]. Geophysical Research Letters, 2019,46(22):13152-13160.
- [26] 董海霞.变化环境下降水-气温相依结构的非一致性诊断及驱动力探究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [27] 祁栋林,李晓东,苏文将,等.近50年青海省风蚀气候侵蚀力时空演变趋势[J].水土保持研究,2015,22(6):234-239.
- [28] 任景全,郭春明,李建平,等.气候变化背景下吉林省风蚀气候侵蚀力时空特征[J].水土保持研究,2017,24(6):233-237.