

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.012

胡文韬, 郑粉莉, 高晓玉, 等. 近 61 年东北黑土区风蚀气候指标时空格局及其对大气海洋环流模式的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 23-24.
HU Wentao, ZHENG Fenli, GAO Xiaoyu, et al. Temporal and spatial patterns of wind erosion climate indices and their responses to atmospheric and oceanic circulation patterns in the Chinese Mollisol region over the past 61 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 23-24.

近 61 年东北黑土区风蚀气候指标时空格局及其对大气海洋环流模式的响应

胡文韬¹, 郑粉莉^{1,2}, 高晓玉¹, 郑润禾¹, 付金霞³, 李志³, 张加琼^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究东北黑土区风蚀气候指标的时空格局及其对大气海洋环流模式的响应, 对区域土壤风蚀预警和防治有重要意义。[方法] 选取 ≥ 5 m/s 的起沙风速发生频次、逐日最大风速、逐日极大风速、风蚀气候因子 4 个指标, 基于 1960—2020 年逐日风速数据和气象数据, 采用滑动平均、Mann-Kendall 检验和相干分析等方法, 分析 1960—2020 年东北黑土区春季(3—5 月)风蚀气候指标的时空格局, 解析风蚀气候指标对大气海洋环流模式的响应。[结果] 东北黑土区 1960—2020 年春季起沙风速发生频次为 5~30 次/季, 逐日最大风速为 6.1~8.7 m/s, 逐日极大风速为 9.8~12.2 m/s, 风蚀气候因子为 19.5~101.1。东北黑土区 4 个风蚀气候指标的月际变化趋势为 4 月 $>$ 5 月 $>$ 3 月; 除逐日极大风速外, 起沙风速发生频次、逐日最大风速和风蚀气候因子年际变化均呈显著下降趋势, 且在 1990 年左右发生显著突变, 但 2014 年以后风蚀气候指标上升趋势明显。东北黑土区各风蚀气候指标呈现自西北向东南递增后递减的空间分布, 地形是影响风蚀气候指标空间分布的主要因素。亚洲极涡强度(AVPII)是对东北黑土区春季风蚀气候指标影响的最显著的单一环流模式, 太平洋—北美遥相关指数(PNA)也对风蚀气候指标产生显著影响, 但风蚀气候指标与 2 个环流模式叠加(AVPII-PNA)呈现不显著的相关关系, 而 APVII-PNA-AO 大气海洋 3 环流模式叠加对起沙风速发生频次的影响显著。2014 年以后东北黑土区各风蚀气候指标快速上升趋势明显, 亚洲极涡强度、太平洋—北美遥相关指数对风蚀气候指标影响显著。[结论] 东北黑土区风蚀气候指标时空格局的影响因素主要包括风速、地形和大气海洋环流模式, 需关注 2014 年后风蚀动力增强带来的潜在风蚀危害。

关键词: 东北黑土区; 风蚀气候指标; 大气海洋环流模式; 逐日极大风速

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)06-0023-012

Temporal and Spatial Patterns of Wind Erosion Climate Indices and Their Responses to Atmospheric and Oceanic Circulation Patterns in the Chinese Mollisol Region over the Past 61 Years

HU Wentao¹, ZHENG Fenli^{1,2}, GAO Xiaoyu¹, ZHENG Runhe¹, FU Jinxia³, LI Zhi³, ZHANG Jiaqiong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Environment and Resources, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] A study on the spatial and temporal patterns of wind erosion climate indices and their responses to atmospheric and oceanic circulation patterns in the Chinese Mollisol region is of great significance for the early warning and prevention of wind erosion. [Methods] Four wind erosion climate indices, including occurrence frequency of ≥ 5 m/s of threshold wind of transporting sand, daily maximum

收稿日期: 2024-06-22 修回日期: 2024-07-20 录用日期: 2024-08-07 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-09-20

资助项目: 中国科学院战略性先导科技项目(A类)(XDA28010201); 国家重点研发计划项目(2022YFD1500102)

第一作者: 胡文韬(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: Huwt@nwfau.edu.cn

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

wind velocity, daily extreme wind velocity and wind erosion climatic erosivity, were selected to address the spatial and temporal patterns of wind erosion climate indices in the spring (March-May) of the Chinese Mollisol region from 1960 to 2020 based on the daily wind speed data and meteorological data, and to elucidate the impacts of atmospheric and ocean circulation patterns on these indices. The research methods included the moving average, Mann-Kendall test and multiple wavelet coherence. [Results] The occurrence frequency of ≥ 5 m/s threshold wind speed of transporting sand varied from 5 to 30 times per season, daily maximum wind velocity varied from 6.1 to 8.7 m/s, daily extreme wind velocity varied from 9.8 to 12.2 m/s, and wind erosion climatic erosivity varied from 19.5 to 101.1 in the Chinese Mollisol region from 1960 to 2020. An intermonthly change trend of these four wind erosion climate indices followed by April > May > March. Except for daily extreme wind velocity, there was a significant decreasing trend of the other three indices from 1960 to 2020 with a significant abrupt change around 1990, but a noticeable upward trend of these indices was observed after 2014. The spatial distribution of wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region showed an increasing and then decreasing trend from the northwest to the southeast, and topography was a crucial factor affecting the distribution of wind erosion climate indices. Moreover, the Asia Polar Vortex Intensity Index (APVII) was the most important circulation pattern affecting wind erosion climate indices, and the Pacific/North American Pattern (PNA) also had a significant impact on wind erosion climate indices. However, there was no significant correlation between the wind erosion climate indices and the superposition of APVII and PNA, while the superpositions of three APVII-PNA-AO patterns had a significant effect on the occurrence frequency of the threshold wind of transporting sand. Overall, after 2014, there was a rapid increasing trend in the wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region, and both APVII and PNA circulation patterns had significant impacts on the wind erosion climate indices. [Conclusion] The factors that influenced the spatial and temporal patterns of wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region include wind velocity, topography and atmospheric-oceanic circulation patterns, etc. Attention should be paid to the potential wind erosion hazards caused by the enhancement of wind erosion dynamics after 2014.

Keywords: the Chinese Mollisol region; wind erosion climate indices; atmospheric and oceanic circulation patterns; daily extreme wind velocity

Received: 2024-06-22

Revised: 2024-07-20

Accepted: 2024-08-07

Online(www.cnki.net): 2024-09-20

据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告^[1], 20 世纪 50 年代以来, 全球气候正在经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化, 在此背景下, 风速^[2]、气温等气候要素的显著变化将影响区域风蚀动力, 进而加速区域风蚀过程^[3-4]。而近年来, 风蚀对大气海洋环流模式的响应也引发广泛关注, 大尺度大气海洋环流模式是年际尺度上最突出的气候信号, 对全球气候变化具有深远影响^[5-6]。因此, 分析风蚀气候指标时空格局对不同大气海洋环流模式的响应不仅对风蚀潜在危险性评价及其预警有重要意义, 而且对深入揭示影响风蚀气候指标时空格局的气候机制提供参考。

风蚀气候侵蚀因子(C)是表征气候对土壤风蚀潜在的影响程度, 也是土地沙化和农田风蚀评判的重

要指标^[7]。风蚀气候因子最初由 CHEPIL 等^[8]提出并用于风蚀方程^[9](wind erosion equation, WEQ), 其采用平均风速、月降雨量和平均温度指标进行计算, 后经联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)修正, 现已被广泛用于风蚀预报与风蚀潜在危险程度评价。目前我国在风蚀气候因子时空变化研究方面取得明显进展, 如陈首序等^[10]利用 FAO 风蚀气候因子的计算公式评估了我国沿海地区风蚀气候因子的基本特征; 张克新等^[11]研究表明, 我国河西地区风蚀气候因子总体呈现自西向东、自北向南递减的空间分布规律。已有研究还探讨风蚀气候因子与 ENSO 等各大气海洋环流指数的关系, 如 LOU 等^[12]计算浑善达克沙地 1980—2016 年风蚀气候因子, 并研究 C 因子时空格局与 ENSO 的关系, 结果表明, 拉尼娜事件期间的平均 C 因子弱于厄尔尼诺事

件期间;WANG 等^[13]基于1969—2019年逐日气象观测数据,计算了新疆地区风蚀气候因子,并评估其与ENSO、AO等大气海洋环流指数的关系。然而,目前已有研究^[14-15]采用的风蚀气候因子仅能从平均风速计算并评估不同地区的土壤风蚀潜在程度,对于风蚀发生过程中风速的瞬时特征描述不够全面,忽略了短时风速变化特征,难以揭示最大风速和瞬时极大风速对风蚀的影响机制,且单一风蚀气候因子对于极端大风事件的描述较为薄弱,难以全面解释气候变化背景下土壤风蚀的潜在程度。此外,已有风蚀气候因子与大气海洋环流指数的研究主要关注单一环流指数,缺乏对多种大气海洋环流指数的深入分析,难以全面解释多种大气海洋环流模式对于风蚀的交互影响。

据东北黑土地白皮书(2020)^[16]报道,东北黑土区受风蚀影响的面积约占黑土地面积的11.1%,坡耕地年平均风蚀厚度0.5~1.0 mm,占总土壤侵蚀量的20%~30%。风蚀不但使农田表层土壤粗化^[17]和土壤有机质及养分减少,威胁粮食生产,而且也是土地沙化和沙尘灾害发生的根源^[18]。因此,研究气候变化背景下东北黑土区风蚀动力时空特征,对保护黑土地和实现黑土资源永续利用有重要意义。然而,目前东北黑土区风蚀动力因子时空变化特征研究薄弱,尤其是现有研究尚未考虑对风蚀强度有重要影响的起沙风速发生频次、逐日最大风速和逐日极大风速等,难以为气候变化背景下黑土区土壤风蚀风险评估提供科学支持。因此,本研究选用起沙风速发生频次、逐日最大风速、逐日极大风速、风蚀气候因子表征风蚀气候指标,分析1960—2020年东北黑土区春季风蚀动力的时空变化特征,解析风蚀气候动力因子对大气海洋环流模式的响应,以期对气候变化背景下东北黑土区土壤风蚀风险评估和防治提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

东北黑土区总面积约109万km²,包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区共246个县^[19]。气候属中温带大陆性半湿润气候区,春季多风,全年平均风速2.5~4.5 m/s,多年平均气温为-7~11℃,多年平均年降水量350~1000 mm^[19];地貌呈东、北、西3面被中低山包围,中部为广阔平原,全区平均海拔350 m^[20]。全国水土保持区划将东北黑土区划分为6个区,包括大小兴安岭山地区、东北漫川漫岗区、呼伦贝尔丘陵平原区、大兴安岭东南山地丘陵区、长白山—完达山山地丘陵区、松辽平原风沙区(图1)。

1.2 数据来源

本研究数据源包括气象数据和大气海洋环流指

数。气象数据来源于“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”(<http://www.cma.gov.cn/>),包括东北黑土区74个气象站点1960—2020年逐日风速、降水、气压、气温、相对湿度资料,该数据集通过严格的质量控制程序,并被广泛运用于中国气候变化相关的研究^[21-22]中。本研究严格遵循欧洲气候评估数据集采用的标准^[23]:(1)数据不得少于40年;(2)每个站点缺失数据不得超过10%;(3)每年缺失数据不得超过20%或超过连续3个月。

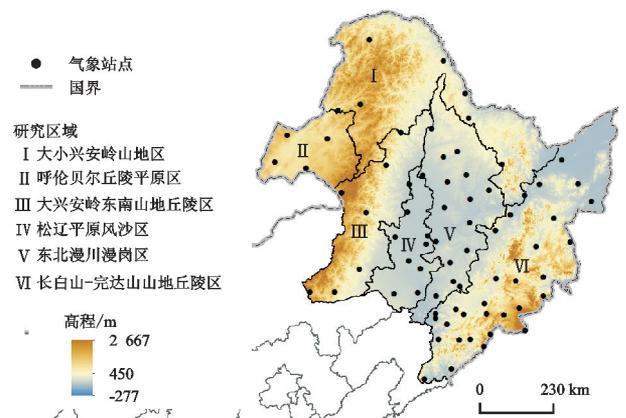


图1 东北黑土区水土保持分区^[19]及气象站点分布

Fig.1 Regionalization of Soil and Water Conservation in the Chinese Mollisol region^[19] and the distribution of meteorological stations

本研究选取的大气海洋环流指数包括北极涛动指数(AO)、亚洲区极涡强度指数(APVII)、太平洋—北美遥相关指数(PNA)、北太平洋遥相关型指数(NP),时间序列均为1960—2020年。北极涛动指数(AO)来源于美国NOAA物理科学实验室网站(<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>),亚洲区极涡强度指数(APVII)、太平洋—北美遥相关指数(PNA)、北太平洋遥相关型指数(NP)来源于国家气候中心(https://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php)。北极涛动指数(AO)定义为20°—90°N、0~360°区域内,1000 hPa高度异常场经验正交函数分析 EOF 所得的第1模态的时间系数的标准化序列^[24];亚洲区极涡强度指数(APVII)定义为北半球60°—150°E区域内,由500 hPa等压面与极涡南界特征等高线所在的等高面之间的空气总质量^[25];太平洋—北美遥相关指数(PNA)定义为20°—90°N、0~360°区域内,标准化500 hPa高度场经验正交函数分析 EOF 所得的第2模态的时间系数^[26];北太平洋遥相关型指数(NP)定义为20°—90°N、0~360°区域内,标准化500 hPa高度场经验正交函数分析 EOF 所得的第5模态的时间系数^[25]。

1.3 研究方法

本研究选取的风蚀气候指标包括常用的风蚀气候

因子^[10]和对风蚀强度有重要影响的风蚀动力指标,即起沙风速发生频次(1960—2020年)、逐日最大风速(1980—2020年)、逐日极大风速(2005—2020年)。

风蚀气候因子(C)根据联合国粮农组织(FAO)推荐的计算公式计算,该公式考虑风速、降水、蒸发等因素,在干旱半干旱区有着良好的适用性^[10]。根据FAO修正公式^[27]计算风蚀气候因子:

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} [u_i^3 (ETP_i - P_i / ETP_i) d_i] \quad (1)$$

式中: C 为风蚀气候因子; i 为月份; d_i 为月总天数; u_i 为2 m处的月平均风速(m/s); ETP_i 为月潜在蒸发量(mm); P_i 为月降水量(mm)。

采用公式(2)进行风速换算:

$$u_2 = u_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (2)$$

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

ETP的计算采用中国气象局推荐的生态质量气象评价方法中的计算方法^[28]:

$$ETP_i = \frac{22d_i(1.6 + U_i^{\frac{1}{2}})W_{oi}(1 - h_i)}{[p_i^{\frac{1}{2}}(273.2 + t_i)^{\frac{1}{4}}]} \quad (3)$$

式中: U_i 为10 m高度月平均风速(m/s); p_i 为月平均气压(mb); t_i 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$); W_{oi} 为温度为 t_i 时的饱和水汽压(mmHg); h_i 为月平均相对湿度(%)。

根据东北黑土区74个气象站点1960—2020年逐日风速和气象资料,计算春季(3—5月)起沙风速发生频次(1960—2020年)、逐日最大风速(1980—2020年)和逐日极大风速(2005—2020年)。根据相关研究^[17],东北黑土区风蚀发生的起动风速为5 m/s,故统计逐日 ≥ 5 m/s起沙风速发生频次。根据《地面气象观测规范 风向和风速》^[29]及《风能资源术语》^[30]的定义,逐日最大风速为1日内任意10 min的平均风速最大值,逐日极大风速为1日内3 s平均风速的最大值。

1.4 数据分析

1.4.1 时间特征分析方法 Mann-Kendall趋势分析法^[31]通过计算MK统计量 Z 值,判断序列数据上升和下降趋势。对于一个时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,统计值 S 的计算过程为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

式中:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (5)$$

当 $n \geq 8$ 时,随机序列 S 近似服从正态分布,其

平均值 $E(S)$ 和方差 $\text{Var}(S)$ 为:

$$E(S) = 0 \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

进而求得 Z 值:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

根据 Z 值是否大于零判断序列数据上升和下降趋势,当 $|Z| > 1.96$ 说明通过0.05显著性检验, $|Z| < 1.96$ 则未通过0.05显著性检验。根据序列数据构造正向统计量 UF 和逆向统计量 UB ,若 UF 和 UB 在95%置信区间以外相交,表明序列数据呈显著上升或下降趋势。

根据Sen斜率估计方法^[32]计算各风蚀气候指标的斜率,计算公式为:

$$X(t) = at + b \quad (9)$$

式中: $X(t)$ 为时间序列在 t 时刻的值; a 为斜率; b 为常数。

$X(t)$ 中每对数据的斜率值 a_i 的计算方法为:

$$a_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} (i = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

式中: x_j 和 x_k 分别为时间 j 和 k 的数据值($j > k$),将得到的斜率值 a_i 从小到大排序,中值 a_{median} 就是对应的 $X(t)$ 的斜率估计值。

1.4.2 相干分析方法 根据各风蚀气候指标和大气海洋环流指数序列长度,采用二元小波相干分析^[33](bivariate wavelet coherence, WTC)和多重小波相干性分析^[34](multiple wavelet coherence, MWC)方法,分析风蚀气候指标与单个及多个大气海洋环流模式的相干性。小波相干性显著性检验采用以红噪声为标准谱的Monte Carlo方法^[35]。平均小波相干值(average wavelet coherence, AWC)和显著相干性百分比面积(percent area of significant coherence, PASC)可以评估各大气海洋环流模式对各风蚀气候指标的影响。其中,如果增加1个额外的因素PASC的增量 $> 5\%$ 时,则被认为显著影响^[36]。

2 结果与分析

2.1 风蚀气候指标的动态变化

东北黑土区特殊的地理环境特征决定风蚀主要发生在每年春季的3—5月。从时间尺度上看,冬季东北黑土区农田土壤冻结和地表积雪覆盖,几乎不存在发生土壤风蚀的风险;夏秋降雨频繁,作物生长处于旺盛期或收获期,且作物覆盖良好,地表发生风蚀

潜在风险很小。而在春季解冻期农田地表裸露,表层土壤发生昼融夜冻现象,反复的冻融循环过程使土壤结构破坏,土壤抗蚀能力降低,为风蚀提供丰富的物质来源^[37];加之晚春季节大风天气频发,降雨稀少伴随急剧升温,土壤水分蒸发使表层土壤干燥,农耕地风蚀风险增大^[38]。由于东北黑土区风蚀呈现以春季为主的季节性变化规律,且春季的风蚀气候因子是其他季节的2.5~7.0倍^[39],故本研究分析每年3—5月风蚀气候指标的时空格局。

2.1.1 年际变化 东北黑土区1960—2020年春季风蚀气候因子和起沙风速发生频次年际变化幅度较大,而逐日最大风速和逐日极大风速2个风蚀气候指标的年际变化幅度较小(表1和图2)。起沙风速发生频次为5~30次/季,多年平均为17次/季,最大值出现在1971年,最小值出现在2014年;逐日最大风速为6.1~8.7 m/s,多年平均为7.4 m/s,最大值出现在1980年,最小值出现在2014年;逐日极大风速为9.8~12.2 m/s,多年平均为11.0 m/s,最大值出现在2019年,最小值出现在2014年;风蚀气候因子为19.5~101.1,多年平均为52.2,最大值出现在1971年,最小值出现在2014年。MK突变检验表明,起沙风速发生频次(图2b)、逐日最大风速(图2d)、风蚀气候因子(图2h)3个指标均发生显著突变,其发生突变的年份分别为1988年、1993年和1988年。因逐日极大风速观测年限(2005—2020年)较短,不满足MK突变检验的要求,故这里不做分析。

表1 东北黑土区春季风蚀气候指标年际变化特征

Table1 Interannual change characteristics of spring wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region

指标	起沙风速发生频次/ (次·季 ⁻¹)	逐日最大风速/ (m·s ⁻¹)	逐日极大风速/ (m·s ⁻¹)	风蚀气候 因子
最大值	29~30	8.7	12.2	101.1
最小值	5~6	6.1	9.8	19.5
平均值	17	7.4	11.0	52.2
Z值	-7.61	-5.41	52.2	-7.22

东北黑土区1960—2020年春季风蚀气候指标除逐日极大风速呈现16年显著上升($Z=2.16$)趋势(图2e)外,其余3个指标均呈显著下降的趋势,起沙风速发生频次、逐日最大风速、风蚀气候因子的MK趋势系数分别为-7.61, -5.41, -7.22。东北黑土区1960—2020年春季风蚀气候指标变化过程可以分为3个阶段:(1)1960—1980年波动变化,期间起沙风速发生频次、风蚀气候因子变化幅度分别为11~12次/季和48.0,其对应平均值分别为24~25次/季和74.9。(2)1981—2013年快速下降,期间起沙风速发生频次、逐日最大风速、逐日极大风速和风蚀气候因子的变化幅度分

别为16~17次/季、2.4 m/s、1.0 m/s和56.4,其对应平均值分别为13~14次/季、7.4 m/s、10.7 m/s和41.0。(3)2014—2020年波动回升,期间起沙风速发生频次、逐日最大风速、逐日极大风速和风蚀气候因子的变化幅度分别为8~9次/季、1.4 m/s、2.5 m/s和25.9,其对应平均值分别为10~11次/季、6.9 m/s、11.2 m/s和37.1。

2.1.2 年代变化 东北黑土区春季4个风蚀气候指标在年代间的变化趋势存在差异。起沙风速发生频次在年代间呈波动—下降—上升的变化趋势(表2);其中,起沙风速发生频次在20世纪60,70年代呈波动变化,20世纪80,90年代和21世纪前13年(2000—2013年)呈下降的变化趋势,而从2014年以后呈上升的变化趋势。

与20世纪60年代相比,起沙风速发生频次在20世纪80,90年代和21世纪前13年分别下降24.2%,45.9%,56.4%;而在2014年后与21世纪前13年相比其上升2.6%。风蚀气候因子在年代间呈现上升—下降—上升的变化趋势(表2);其中,20世纪70年代风蚀气候因子呈上升的变化趋势,20世纪80,90年代和21世纪前13年呈下降的变化趋势,而从2014年以后呈上升的变化趋势。

与20世纪60年代相比,风蚀气候因子在20世纪70年代上升3.9%,而在20世纪80,90年代和21世纪前13年分别下降23.3%,45.6%,54.9%;但在2014—2020年与21世纪前13年相比其上升11.8%。逐日最大风速在年代间呈下降—波动的变化趋势(表2);其中,自20世纪80年代至21世纪前13年逐日最大风速下降趋势明显,而从2014年以后呈波动变化。

与20世纪80年代相比,逐日最大风速在20世纪90年代和21世纪前13年分别下降8.0%和15.0%。对于逐日极大风速从2014年以来呈上升的变化趋势,2014—2020年较2000—2013年上升4.6%。上述结果表明,2014年以来东北黑土区春季风蚀气候因子的上升趋势相对明显。

2.1.3 月际变化 东北黑土区3—5月4个风蚀气候指标的月际变化均呈先增加后减少的趋势(表3),其最大值均出现在4月,最小值均出现在3月。与1960—2020年的月平均值相比,4个风蚀气候指标在3月均小于平均值,其减少幅度在8.2%以上,以风蚀气候因子的减少幅度最大,其值为22.0%;4月4个风蚀气候指标均大于月平均值,其增加幅度在15.0%以上,以风蚀气候因子的增加幅度最大,其值为51.0%;5月4个风蚀气候指标又均小于平均值,各气候风蚀气候指标的减少幅度也明显小于3月。此结果表明,4—5月是东北黑土区春季风蚀发生的主月份。

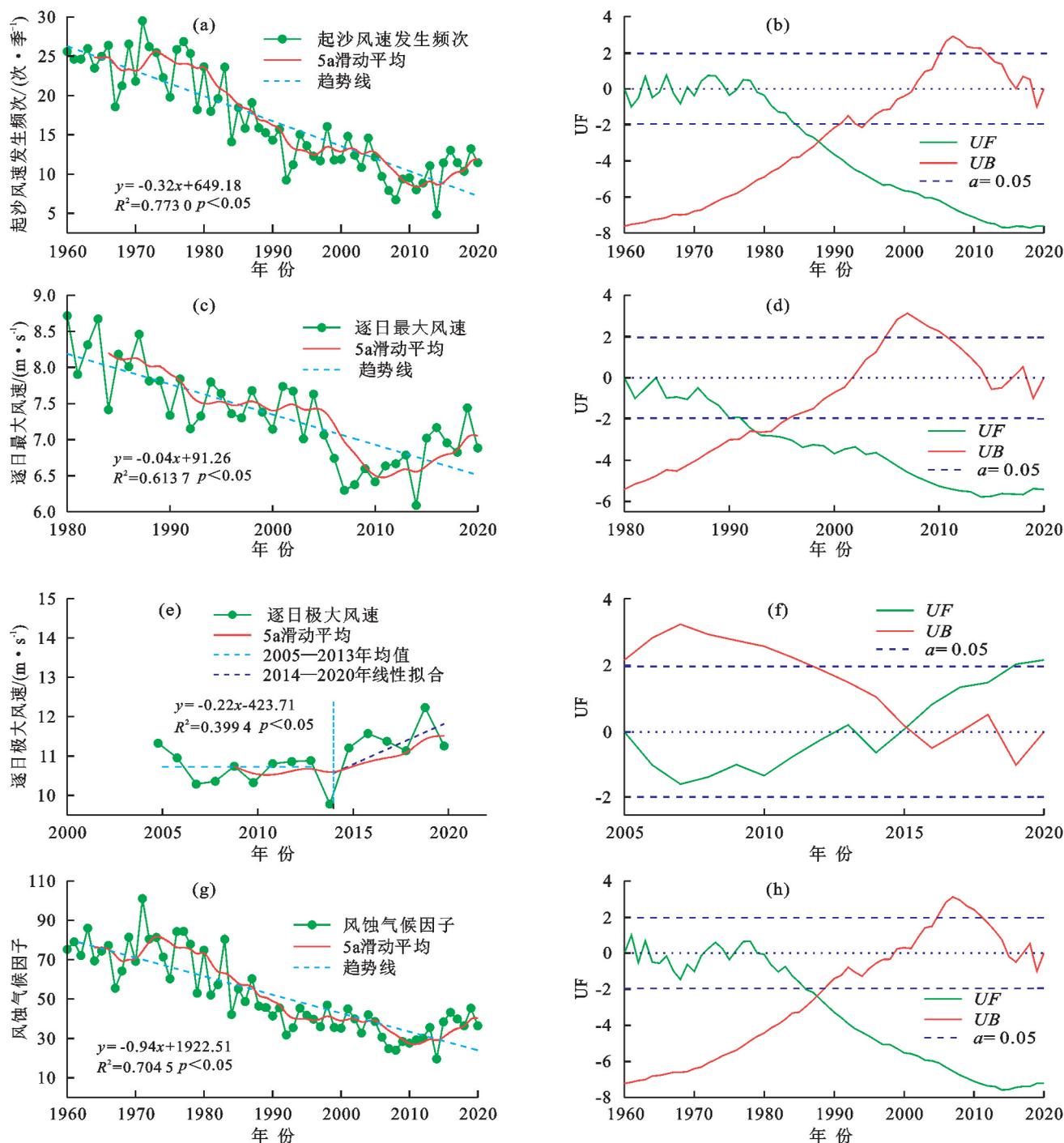


图 2 东北黑土区 1960—2020 年春季风蚀气候指标动态变化及其对应的突变检验

Fig.2 Dynamic changes of wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region from 1960 to 2020 in the spring with abrupt change tests

2.2 风蚀气候指标的空间分布

东北黑土区春季风蚀气候指标的空间分布呈现自西北向东南递增后递减的规律(图 3),高值区分布在呼伦贝尔丘陵平原区(Ⅱ区)西部、松辽平原风沙区(Ⅳ区)和东北漫川漫岗区(Ⅴ区),大小兴安岭山地区(Ⅰ区)和长白山—完达山山地丘陵区(Ⅵ区)南部为低值区。极大风速在大兴安岭东南山地丘陵区(Ⅲ区)西南部也存在 1 个高值区(11.6~13.2 m/s),但此处的风蚀气候因子仅为高值区的 1/3,出现这一规

律的原因是Ⅲ区南部降水稀少,蒸散量大,导致风蚀气候因子计算较小。

由图 3 可知,东北黑土区春季风蚀气候指标在 61 个站点显著下降,占 74 个总站点的 82.4%,9 个站点不显著下降,仅占总站点的 12.2%,4 个站点不显著上升,仅占总站点的 5.4%。其中,67 个站点的春季起沙风速发生频次显著下降,5 个站点不显著下降,2 个站点不显著上升;54 个站点春季逐日最大风速显著下降,9 个不显著下降,10 个站点不显著上升,而 1 个站点(双阳)呈现

显著上升趋势;13 个站点春季逐日极大风速不显著下降,48 个站点不显著上升,而显著上升站点为 13 个,分别为呼玛、满洲里、海拉尔、小二沟、北安、伊春、铁力、哈尔滨、牡丹江、林西县、靖宇、临江和集安。

表 2 东北黑土区风蚀气候指标年代变化

Table 2 Decadal variations of wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region

年份	起沙风速发生频次/ (次·季 ⁻¹)	逐日最大风速/ (m·s ⁻¹)	逐日极大风速/ (m·s ⁻¹)	风蚀气候 因子
1960—1969	24~25(0)	—	—	73.5(0)
1970—1979	24~25(-0.3)	—	—	76.4(3.9)
1980—1989	18~19(-24.2)	8.1(0)	—	56.4(-23.3)
1990—1999	13~14(-45.9)	7.5(-8.0)	—	40.0(-45.6)
2000—2013	10~11(-56.4)	6.9(-15.0)	10.7(0)	33.1(-54.9)
2014—2020	10~11(2.6)	6.9(0)	11.2(4.6)	37.1(11.8)

注:起沙风速发生频次、风蚀气候因子 1960—2013 年变化对比的参考年代为 20 世纪 60 年代;逐日最大风速 1980—2013 年变化对比的参考年代为 20 世纪 80 年代;4 个指标 2014—2020 年代变化对比的参考年代均为本世纪 2000—2013 年;括号内数据为变化对比(%)。

2.3 风蚀气候指标与大气海洋环流模式相干分析

由于逐日极大风速观测年限(2005—2020 年)较短,不满足二元小波相干分析和多重小波相干性分析的要求,故不对逐日极大风速这一指标进行分析。各风蚀气候指标与各大气海洋环流模式的二元小波相干性分析结果(表 4)表明,起沙风速发生频次、逐日最大风

速、风蚀气候因子与 AO、APVII、PNA、NP 的 AWC 分别为 0.33~0.36,0.37~0.43,0.33~0.40,0.31~0.45,平均值分别为 0.35,0.39,0.37,0.36;起沙风速发生频次、逐日最大风速、风蚀气候因子与 AO、APVII、PNA、NP 的 PSAC 分别为 3.5%~6.3%,7.0%~16.8%,8.2%~12.2%,3.3%~12.8%,平均值分别为 5.1%,10.5%,10.5%,7.1%。由此可知,各风蚀气候指标与 APVII 环流模式的 AWC 和 PSAC 平均值为最大值,说明 APVII 环流模式对风蚀气候指标的影响占主导作用,且 PNA 的 PSAC 值与 APVII 同为最大,表明风蚀气候指标也受太平洋—北美遥相关指数(PNA)的直接影响。由图 4 可知,APVII 环流模式与风蚀气候指标均呈正相关,起沙风速发生频次、风蚀气候因子存在约 0~3 年的正相关周期,逐日最大风速存在约 5.5~8.0 年的正相关周期。

表 3 东北黑土区春季风蚀气候指标月际变化

Table 3 Intermonthly variations of spring wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region

指标	起沙风发生频次/ (次·月 ⁻¹)	逐日最大风速/ (m·s ⁻¹)	逐日极大风速/ (m·s ⁻¹)	风蚀气候 因子
1960—2020 年				
风蚀气候指标的	5~6	7.4	11.0	17.4
月平均值				
3 月平均值	4~5(-17.9)	6.8(-8.2)	10.0(-8.9)	13.6(-22.0)
4 月平均值	6~7(42.1)	7.8(15.0)	11.5(15.0)	20.5(51.0)
5 月平均值	5~6(-13.2)	7.6(-2.7)	11.4(-0.3)	18.1(-11.6)

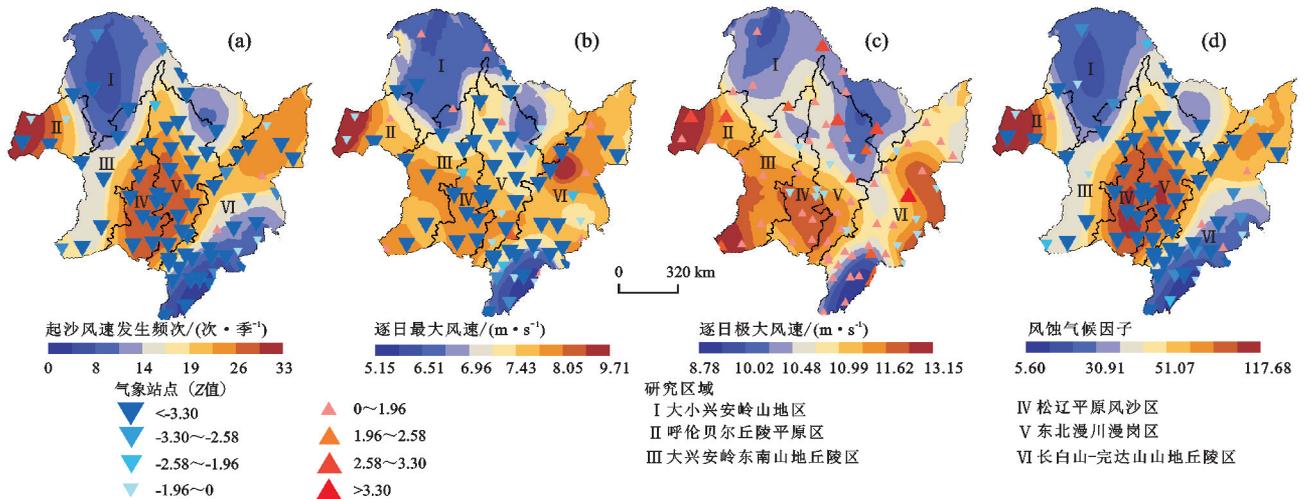


图 3 东北黑土区 1960—2020 年春季风蚀气候指标的空间格局

Fig.3 Spatial distribution of spring wind erosion climate indices in the Chinese Mollisol region from 1960 to 2020

起沙风速发生频次、逐日最大风速、风蚀气候因子与两两大气海洋双环流模式叠加的相干分析结果(表 5 和图 4)表明,各风蚀气候指标与大气海洋双环流模式的相干值(MWC)均大于其与单个大气海洋环流模式的相干值(AWC);但 PSAC 的增幅均<5%,表明大气海洋双环流模式对风蚀气候指标的影响均不显著。

各风蚀气候指标与 APVII-PNA-AO 大气海洋三环流模式叠加的多元小波相干分析结果(表 5 和图 4)表明,各风蚀气候指标与大气海洋三环流模式叠加的 MWC 较其与大气海洋双环流模式叠加(APVII-AO、APVII-PNA、PNA-AO)的 MWC 均有所增加,其中起沙风速发生频次与 APVII-PNA-AO 的 PSAC

增量 $> 5\%$, 说明 APVII-PNA-AO 大气海洋三环流模式共同作用对起沙风速发生频次的影响显著。

表 4 各风蚀气候指标与单大气海洋环流模式的平均小波相干值 (AWC) 和显著相干性百分比面积 (PSAC)

Table 4 Average wavelet coherence (AWC) and percent area of significant coherence (PSAC) between wind erosion climate indices and single atmospheric-oceanic circulation patterns

风蚀气候指标	AO		APVII		PNA		NP	
	AWC	PSAC/%	AWC	PSAC/%	AWC	PSAC/%	AWC	PSAC/%
起沙风速发生频次/(次·季 ⁻¹)	0.36	5.4	0.38	7.7	0.40	11.3	0.32	5.3
逐日最大风速/(m·s ⁻¹)	0.36	6.3	0.43	16.8	0.33	8.2	0.45	12.8
风蚀气候因子	0.33	3.5	0.37	7.0	0.38	12.2	0.31	3.3

表 5 各风蚀气候指标与 2 个或多个大气海洋环流模式的多元小波相干值 (MWC) 和显著相干性百分比面积 (PSAC)

Table 5 Multiple wavelet coherence (MWC) and percent area of significant coherence (PSAC) between wind erosion climate indices and two or multiple atmospheric-oceanic circulation patterns

风蚀气候指标	APVII-AO		APVII-NP		APVII-PNA		NP-AO		NP-PNA		PNA-AO		APVII-PNA-AO	
	MWC	PSAC/%	MWC	PSAC/%	MWC	PSAC/%	MWC	PSAC/%	MWC	PSAC/%	MWC	PSAC/%	MWC	PSAC/%
起沙风速发生频次/ (次·季 ⁻¹)	0.63	9.8	0.63	6.8	0.63	9.4	0.59	4.4	0.68	11.1	0.64	8.9	0.80	22.7
逐日最大风速/ (m·s ⁻¹)	0.67	16.1	0.69	16.2	0.66	16.7	0.63	5.5	0.66	11.4	0.67	11.2	0.82	11.8
风蚀气候因子	0.61	7.0	0.60	6.1	0.62	11.4	0.55	1.6	0.63	9.7	0.63	10.7	0.80	11.5

3 讨论

3.1 风蚀气候指标时空格局变化的影响因素

根据逐日风速资料和气象资料计算风蚀气候指标, 将起沙风速发生频次、逐日最大风速和逐日极大风速作为风蚀潜能的评价指标, 可深入理解土壤风速的风险性, 也为风蚀防治提供支持。本研究表明, 东北黑土区 1960—2020 年春季起沙风速发生频次、逐日最大风速和风蚀气候因子呈显著下降的趋势, 但自 2014 年以来各风蚀气候指标呈明显的上升趋势。

风速是土壤风蚀最直接的动力来源^[40], 也是风蚀气候指标的核心因子之一。1960—2020 年东北黑土区风蚀气候指标的动态变化和东北地区春季地表风速变化较为一致。1960—2013 年风蚀气候指标减小的原因可能是地表风压力梯度减小和阿留申低压的减弱^[41-42], 而 2014 年后出现转折性增强趋势, 可能是由于一方面春季极端大风事件频发、逐日极大风速回升明显(图 2e), 提供了有利于风蚀发生的动力条件; 另一方面, 2014 年来东北黑土区春季风蚀发生的大气海洋环流模式发生改变, 如 PNA 等大气海洋环流模式出现与 1960—2013 年相反的相位, 提供了有利于风蚀发生的气候背景^[43]。因此, 逐日极大风速回升和大气海洋环流模式相位变化可能是东北黑土区春季风蚀气候指标时空格局自 2014 年来发生明显改变(图 2), 并在年代变化中呈现上升(表 2)的原因。

在空间分布上, 东北黑土区风蚀气候指标主要受地形等因素的影响, 呈现集中分布的特征。由于东北

黑土区面积较大, 6 个分区之间地形差异显著, 春季盛行的西北风受西、北两侧大小兴安岭山脉和东部丘陵阻挡, 在呼伦贝尔丘陵平原区(Ⅱ区)西部形成一个高值区。春季盛行的西北风翻越大兴安岭后海拔迅速降低, 出现“焚风效应”, 是松辽平原风沙区(Ⅳ区)和漫川漫岗区(Ⅴ区)气候干燥、风速较大的原因。逐日极大风速在大兴安岭东南山地丘陵区(Ⅲ区)西南部出现高值的原因可能与当地山脉较多, 大气条件不稳定相关, 未来此区域需要注意瞬时风速回升带来的潜在风蚀危害, 防范大风灾害和沙尘暴。

3.2 风蚀气候指标对大气海洋环流模式的响应

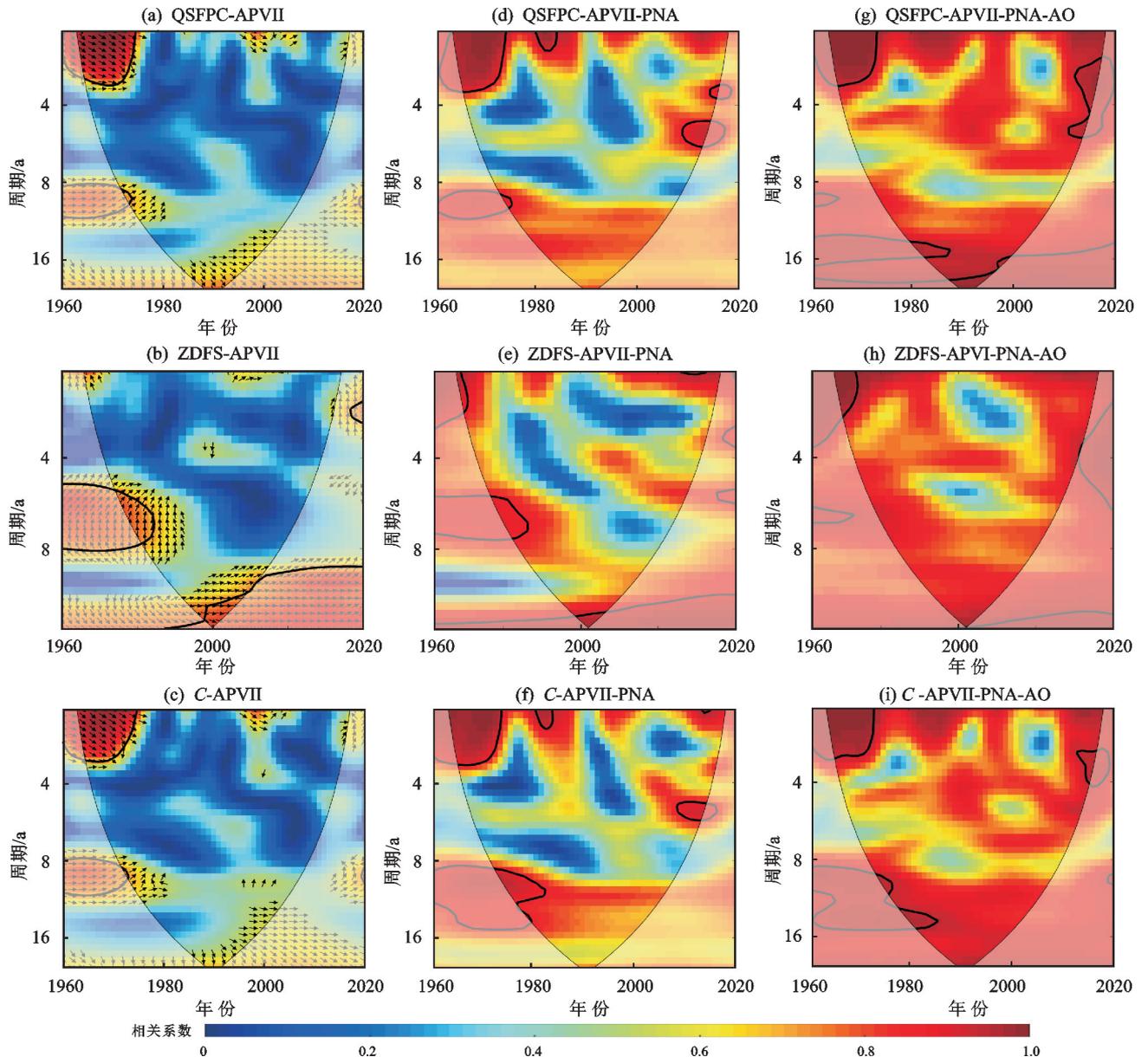
已有研究^[13]指出, 大尺度大气海洋环流模式是影响风蚀气候指标的一个重要气候因素, 它通过改变风速、温度和降水, 影响风蚀发生过程^[12], 进而改变风蚀气候指标。由于东北黑土区处于中高纬度地理位置, 靠近西伯利亚高压和北半球极涡, 大气海洋环流模式易于直接改变输送的冷空气强度及西风急流特征, 显著影响东北黑土区春季风蚀发生的气候条件, 而不同大气海洋环流模式之间存在一定的互馈关系。因此, 多大气海洋环流背景下东北黑土区风蚀气候指标与大气海洋环流模式之间存在复杂的交互机制。

亚洲(北半球)极涡指数(APVII)主要通过影响极地冷空气向东北黑土区的扩散活动, 进而影响东北黑土区大风、沙尘天气的发生。1960—2020 年, 亚洲极涡强度呈现减弱的趋势^[44], 导致极地向东北黑土区输送的冷空气强度减弱, 难以形成大风、沙尘天气, 可能是东北黑土区各春

季风蚀气候指标在 1960—2013 年显著减少的原因。

太平洋—北美遥相关指数(PNA)被认为与中国北部沙尘暴频率存在显著正相关^[45],当 PNA 处于正

相位,东太平洋的西风急流偏强,东北黑土区的风蚀动力增大,可能是 PNA 与东北黑土区风蚀气候指标呈现正相关(表 4)的原因之一。



注: QSFPC 为起沙风速发生频次; ZDFS 为逐日最大风速; C 为风蚀气候因子。

图 4 各风蚀气候指标与单个、2 个和多个大气海洋环流模式的小波相干谱

Fig.4 Wavelet coherence spectra of wind erosion climate indices with single, two and multiple atmospheric-oceanic circulation patterns

AVPII-PNA 大气海洋双环流模式对风蚀气候因子指标的相干性均低于 AVPII,说明 AVPII 是东北黑土区风蚀气候指标的主导环流模式。PNA 对于 AVPII 呈现一定的抑制作用,可能是由于 PNA 正模式相关的阿留申低压的加深显著削弱极地涡旋的强度^[46]。由于 AVPII 的减弱,虽然正模式的 PNA 可能导致东太平洋更强的西风急流,但由于 PNA 与极涡复杂的相互作用,AVPII-PNA 双环流模式对东北黑土区春季风蚀气候的影响并不显著。

总体上,东北黑土区春季风蚀气候指标的主导大

气海洋环流模式是亚洲极涡强度(AVPII),且也受太平洋—北美遥相关指数(PNA)的直接影响;而北极涛动(AO)和北太平洋涛动(NP)对东北黑土区春季风蚀气候指标无显著影响。

3.3 本研究的启示意义

东北黑土区是我国最大的商品粮生产基地,商品粮产量约占全国的 1/3,是我国粮食安全的“压舱石”^[16]。研究表明,东北黑土区自 2014 年以来各风蚀气候指标呈明显的上升趋势,而东北黑土区春季风蚀气候指标的主导大气海洋环流模式是亚洲极涡

强度(AVPII),且也受太平洋—北美遥相关指数(PNA)的直接影响。因此,可以预见随着气候变暖和地表风速增加,东北黑土区春季发生风蚀的风险会相应增加,在一定程度上对区域粮食生产构成潜在威胁。因此,为保障东北黑土地粮食安全,在今后的风蚀防治中,需要重点关注风速和大气海洋环流模式变化,尤其是极大风速、亚洲极涡强度和太平洋—北美遥相关指数活动,切实做好春季极端大风下驱动的风蚀风险预警和防治。

4 结论

(1)东北黑土区 1960—2020 年春季起沙风速发生频次、逐日最大风速、风蚀气候因子年际变化均呈显著下降趋势,并在 1990 年左右发生显著突变,但逐日极大风速呈现波动变化后迅速回升的趋势。1960—2020 年,起沙风速发生频次为 5~30 次/季,平均值为 17 次/季;逐日最大风速为 6.1~8.7 m/s,平均值为 7.4 m/s;逐日极大风速为 9.8~12.2 m/s,平均值为 11.0 m/s;风蚀气候因子值为 19.5~101.1,平均值为 52.2。

(2)东北黑土区风蚀指标的月际变化趋势为 4 月 > 5 月 > 3 月,年代间呈现波动—下降—上升的变化趋势,1980—2000 年各指标加速下降,2000—2013 年下降率变小,而 2014 年后迅速上升趋势明显。因此,需要做好未来风蚀危险增加的预警。

(3)东北黑土区各风蚀气候指标呈现自西北向东南递增后递减的空间分布,高值区主要分布在中部平原,低值区分布在东南丘陵和西北山区。地形是影响风蚀气候指标空间分布的主要因素。

(4)东北黑土区春季风蚀气候指标的主导大气海洋环流因素是亚洲极涡强度(AVPII),且也受太平洋—北美遥相关指数(PNA)的直接影响,但与亚洲极涡强度、太平洋—北美遥相关指数二者叠加(AVPII-PNA)呈现不显著的相关关系。亚洲极涡强度、太平洋—北美遥相关指数和北极涛动指数三环流模式(AVPII-PNA-AO)叠加作用对起沙风速发生频次有显著影响。

参考文献:

- [1] IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023[R]. Geneva: IPCC, 2023: 35-115.
- [2] 丁一汇,李霄,李巧萍.气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J].应用气象学报,2020,31(1):1-12.
DING Y H, LI X, LI Q P. Advances of surface wind speed changes over China under global warming[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(1): 1-12.
- [3] 杨振康,杨婉蓉,刘志娟,等.气候变化对东北三省土壤

风蚀的影响[J].应用生态学报,2023,34(9):2429-2435.
YANG Z K, YANG W R, LIU Z J, et al. Effects of climate change on wind erosion in the three provinces of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(9): 2429-2435.

- [4] 邹学勇,张春来,程宏,等.土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J].地球科学进展,2014,29(8):875-889.
ZOU X Y, ZHANG C L, CHENG H, et al. Classification and representation of factors affecting soil wind erosion in A model[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(8): 875-889.
- [5] LI J, GARSHICK E, HUANG S D, et al. Impacts of El Niño-Southern Oscillation on surface dust levels across the world during 1982—2019[J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: e144566.
- [6] WANG X M, CHEN F H, DONG Z B. The relative role of climatic and human factors in desertification in semiarid China[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(1): 48-57.
- [7] 董玉祥.沙漠化灾害危险度评价的初步研究[J].自然灾害学报,1993,2(3):103-109.
DONG Y X. Assessment on the hazard degree of desertification disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 1993, 2(3): 103-109.
- [8] 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: 162-165.
- [9] WOODRUFF N P, SIDDOWAY F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5): 602-608.
- [10] 陈首序,董玉祥.1960—2019 年中国沿海地区风蚀气候侵蚀力的变化及其影响因素分析[J].地理科学,2023,43(3):552-563.
CHEN S X, DONG Y X. Variations and driving factors of wind erosion climatic erosivity in coastal areas of China from 1960 to 2019[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(3): 552-563.
- [11] 张克新,赵莉,彭娇婷,等.1960—2019 年河西地区风蚀气候侵蚀力时空演变及其影响因素分析[J].地理科学,2023,43(12):2240-2246.
ZHANG K X, ZHAO L, PENG J T, et al. Temporal-spatial distribution characteristics in wind erosion climatic erosivity and its influencing factors in Hexi Area from 1960 to 2019[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(12): 2240-2246.
- [12] LOU J P, WANG X M, CAI D W. Spatial and temporal variation of wind erosion climatic erosivity and its response

- to ENSO in the Otindag Desert, China[J]. *Atmosphere*, 2019,10(10):e614.
- [13] WANG Y Q, YANG H M, FAN W B, et al. Dynamic variability of wind erosion climatic erosivity and their relationships with large-scale atmospheric circulation in Xinjiang, China[J]. *Atmosphere*, 2022,13(3):e419.
- [14] SHEN Y P, ZHANG C L, LIU X Y, et al. The effect of wind speed averaging time on the study of soil wind erosion on typical land surfaces[J]. *Aeolian Research*, 2022,54:e100763.
- [15] PETKOVIĆ D, NIKOLIĆ V, MITIĆ V V, et al. Estimation of fractal representation of wind speed fluctuation by artificial neural network with different training algorithms[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017,54:172-176.
- [16] 东北黑土地白皮书编写组. 东北黑土地白皮书(2020)[M]. 北京: 中国科学院, 2021:15.
Writing Group of White Paper on Northeast Black Land. White Paper on Northeast Black Land(2020)[M]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2021:15.
- [17] 林艺, 李和平, 肖波. 东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J]. *水土保持学报*, 2017,31(4):44-50.
LIN Y, LI H P, XIAO B. Influencing factors of wind erosion and their quantitative relationships with erosion rate in black soil area of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(4):44-50.
- [18] 李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2019,33(4):110-118.
LI S L, LI H P, LIN Y, et al. Effects of tillage methods on wind erosion in farmland of Northeastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(4):110-118.
- [19] 全国水土保持规划编制工作领导小组办公室, 水利部水利水电规划设计总院. 中国水土保持区划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016:95-96.
Office of the Leading Group for the Compilation of National Soil and Water Conservation Plans, General Institute of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources. Soil and water conservation regionalization in China[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2016:95-96.
- [20] 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. *中国水土保持*, 2008(12):26-30.
YAN B X, YANG Y H, LIU X T, et al. Present status of soil erosion and evolution tendency of black soil region of northeast[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12):26-30.
- [21] ZHONG K Y, ZHENG F L, XU X M, et al. Discriminating the precipitation phase based on different temperature thresholds in the Songhua River Basin, China[J]. *Atmospheric Research*, 2018,205:48-59.
- [22] GUAN Y H, ZHENG F L, ZHANG X C, et al. Trends and variability of daily precipitation and extremes during 1960—2012 in the Yangtze River Basin, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2017,37(3):1282-1298.
- [23] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006,111(D5):eD05109.
- [24] THOMPSON D W J, WALLACE J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998,25(9):1297-1300.
- [25] 国家气候中心. 逐月大气环流指数定义说明文档[EB/OL]. [2024-07-19]. https://cmdp.ncc-cma.net/download/Monitoring/Index/Index_definition.docx.
National Climate Centre. Monthly Atmospheric Circulation Index Definition Document[EB/OL]. [2024-07-19]. https://cmdp.ncc-cma.net/download/Monitoring/Index/Index_definition.docx.
- [26] WALLACE J M, GUTZLER D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. *Monthly Weather Review*, 1981,109(4):e784.
- [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.
DONG Y X, KANG G D. Study on the wind erosion climatic erosivity in arid and semi-arid areas in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994,8(3):1-7.
- [28] 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.
QI D L, LI X D, SU W J, et al. Tendency of spatiotemporal evolution of wind erosion climatic erosivity in Qinghai Province in recent 50 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015,22(6):234-239.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地面气象观测规范 风向和风速: GB/T 35227—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for surface meteorological observation—wind direction and wind speed: GB/T 35227—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风能资源术语: GB/T 31724—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Terminologies of wind energy resource; GB/T 31724—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [31] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): e245.
- [32] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [33] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [34] NG E K W, CHAN J C L. Geophysical applications of partial wavelet coherence and multiple wavelet coherence [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(12): 1845-1853.
- [35] HU W, SI B C. Technical note: Multiple wavelet coherence for untangling scale-specific and localized multivariate relationships in geosciences[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3183-3191.
- [36] YANG W C, JIN F M, SI Y J, et al. Runoff change controlled by combined effects of multiple environmental factors in a headwater catchment with cold and arid climate in Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: e143995.
- [37] 王一菲, 郑粉莉, 张加琼, 等. 冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 34-41.
WANG Y F, ZHENG F L, ZHANG J Q, et al. Effects of freeze-thaw on wind erosion in the typical Mollisol region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 34-41.
- [38] 杨新, 郭江峰, 刘洪鹤, 等. 东北典型黑土区土壤风蚀环境分析[J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 4443-4448.
YANG X, GUO J F, LIU H H, et al. Soil wind erosion environment in black soil region in Northeastern China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 4443-4448.
- [39] 杨婉蓉, 刘志娟, 高伟达, 等. 近 39 年东北地区风蚀气候侵蚀力及其对气候变化的响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 132-138.
YANG W R, LIU Z J, GAO W D, et al. Wind erosion climatic erosivity and its response to climate change in Northeast China in recent 39 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 132-138.
- [40] 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.
YANG X H, HE Q, LI H J, et al. Calculation and analysis on wind erosion climatic erosivity in the Tarim Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(4): 990-995.
- [41] 杨庆, 李明星, 祖子清, 等. 中国区域的地表风速还在减弱吗? [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(7): 1028-1042.
ANG Q, LI M X, ZU Z Q, et al. Is the surface wind speed in China still weakening? [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(7): 1028-1042.
- [42] ZHANG Z T, WANG K C. Stilling and recovery of the surface wind speed based on observation, reanalysis, and geostrophic wind theory over China from 1960 to 2017[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(10): 3989-4008.
- [43] GONG D Y, MAO R, FAN Y D. East Asian dust storm and weather disturbance: Possible links to the Arctic Oscillation[J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 26(10): 1379-1396.
- [44] GREER K R, GONCHARENKO L P, HARVEY V L, et al. Polar vortex strength impacts on the longitudinal structure of thermospheric composition and ionospheric electron density [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(9): ee2023JA031797.
- [45] GONG D Y, MAO R, SHI P J, et al. Correlation between east Asian dust storm frequency and PNA[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(14): eL14710.
- [46] GARFINKEL C I, HARTMANN D L. Different ENSO teleconnections and their effects on the stratospheric polar vortex[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D18): eD18114.