

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.020.

肖薇薇, 安彬. 1960—2017年黄土高原地区风速时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 103-109.

XIAO Weiwei, AN Bin. Spatiotemporal Variability of Wind Speed in the Loess Plateau During 1960—2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 103-109.

# 1960—2017年黄土高原地区风速时空变化特征

肖薇薇<sup>1,2</sup>, 安彬<sup>1,2</sup>

(1.安康学院 旅游与资源环境学院, 陕西 安康 725000; 2.陕西省院士专家工作站, 陕西 安康 725000)

**摘要:** [目的] 揭示黄土高原地区风速时空变化特征, 为区域防灾减灾提供参考。 [方法] 基于黄土高原 59 个气象站 1960—2017 年逐月风速实测数据, 采用线性回归、Mann-Kendall 检验和滑动 t 检验等方法, 对黄土高原地区历年及四季风速的时空变化趋势进行了研究。 [结果] (1) 1960—2017 年黄土高原年均风速以  $-0.0075 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$  速率显著下降, 春季降幅最大, 其次为冬、秋季, 夏季降幅最小; 年内月平均风速先升后降, 4 月风速下降最快, 7 月下降最慢。(2) 黄土高原历年及夏、秋、冬季风速均在 1980s 突变减少, 春季平均风速未发生突变, 冬季风速突变后较突变前降幅最大, 秋季最小。(3) 黄土高原历年平均风速、历年及四季风速变率均表现出西北高、东南低的特征, 站点呈下降趋势的春季最多, 夏季最少。(4) AO 指数的上升、气候变暖及地表植被覆盖增加等, 可能不同程度地造成黄土高原风速长期下降趋势。 [结论] 黄土高原区应将春季作为防风御风重点时段, 将西北部地区作为重点防御地区, 增强防灾减灾能力建设。

**关键词:** 风速; 气候倾向率; 时空变化; 黄土高原

中图分类号: P425.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0103-07

## Spatiotemporal Variability of Wind Speed in the Loess Plateau During 1960—2017

XIAO Weiwei<sup>1,2</sup>, AN Bin<sup>1,2</sup>

(1. School of Tourism & Environment, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China; 2. Academician Expert Workstation of Shaanxi Association for Science and Technology, Ankang, Shaanxi 725000, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to explore the temporal and spatial variation characteristics of wind speed in the Loess Plateau, and then provide reference for regional disaster prevention and mitigation. [Methods] Based on the measured monthly wind speed data of 59 meteorological stations in the Loess Plateau during 1960 to 2017, the temporal and spatial variation trend of wind speed over annual and four seasons in the Loess Plateau was studied by using linear regression, Mann-Kendall test and sliding t-test, etc. [Results] (1) The annual average wind speed in the Loess Plateau decreased significantly at the rate of  $-0.0075 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ , with the largest decline in spring, followed by winter and autumn, with the smallest decline in summer. The monthly average wind speed showed a tendency of increasing first but decreasing afterwards, with the fastest decline in April and the slowest decline in July. (2) The wind speed of annual average, summer, autumn and winter decreased abruptly in 1980s, and the average wind speed in spring did not change abruptly. After the abrupt change, the average wind speed declined the fastest in winter and the slowest in autumn. (3) The spatial distribution of the average wind speed and the change rate of annual and seasonal wind speed showed the characteristics of high in the northwest and low in the southeast. Meteorological

收稿日期: 2021-06-09

修回日期: 2022-07-10

资助项目: 安康市科技局项目(AK2021-SF-04); 陕西省教育厅科学研究计划项目(22JK0233); 安康学院校内专项项目(2021AYKFKT03)

第一作者: 肖薇薇(1983—), 女, 陕西安康人, 博士, 教授, 主要从事气候变化影响评估与风险管理研究。E-mail: 15054354@qq.com

通信作者: 安彬(1988—), 男, 江西九江人, 博士在读, 副教授, 主要从事区域环境影响评价与GIS应用。E-mail: leyang1007@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

logical stations with decline of wind speed were the most in spring, and the least in summer. (4) The rise of AO index, climate warming and the increase of surface vegetation cover might lead to the long-term downward trend of wind speed in the Loess Plateau. [Conclusion] In the Loess Plateau, spring should be taken as the key period in terms of wind prevention, and the northwest should be taken as the key prevention area in which the construction of disaster prevention and mitigation capacity should be strengthened.

**Keywords:** wind speed; climate tendency rate; temporal and spatial change; the Loess Plateau

风速作为气候系统的重要参数,对水文循环和生态系统起着重要作用<sup>[1]</sup>,同时风能也是重要的可再生清洁能源,受到众多学者的关注。从近年研究来看,全球各地风速存在普遍下降现象。Mcvicar等<sup>[2]</sup>总结发现全球热带及中纬地区风速下降平均幅度为 $0.014 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ,1980s以来澳大利亚年均风速以 $-0.010 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ 下降<sup>[3]</sup>;但也存在年均风速呈增加趋势地区,如阿拉斯加<sup>[4]</sup>、南极洲等<sup>[5]</sup>。丁一汇等<sup>[6]</sup>研究发现,中国近50年来地面风速平均减小速率为 $0.10 \sim 0.22 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ ,且存在明显季节、区域差异。相关研究也表明我国东北三省<sup>[7]</sup>、西南地区<sup>[8]</sup>、北方风蚀区<sup>[9]</sup>、长江流域<sup>[10]</sup>等地年际及四季风速均呈不同程度减弱趋势。区域平均风速下降的主要原因可能与西伯利亚高压的减弱密切相关<sup>[11]</sup>,也有学者总结认为导致我国风速减小的可能原因是气候系统内部的相互作用和人类强迫等方面<sup>[12]</sup>。值得注意的是,有研究指出中国区域平均年地表风速在2014年左右出现了转折性增强趋势,且这种转折性变化有着明显的区域性和季节性特征<sup>[13]</sup>。

黄土高原位于 $33^{\circ}41' \sim 41^{\circ}16' \text{N}$ , $100^{\circ}52' \sim 114^{\circ}33' \text{E}$ ,处于我国东部季风区向西北干旱区的过渡地带,受水、风等主要外营力作用,水土流失面积广泛,占全区总面积 $6.42 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的70.72%<sup>[14]</sup>,是典型的生态脆弱区。目前,针对黄土高原全区<sup>[14]</sup>、陕甘宁<sup>[15]</sup>、风蚀区<sup>[16]</sup>及甘肃陇东<sup>[17]</sup>风速研究,均表明年际风速呈下降趋势。但这些研究时间尺度较短、涉及的区域较小,难以反映出整个黄土高原风速的最新变化特征。基于此,文中选取黄土高原59个气象站逐月风速数据,运用气候统计分析和ArcGIS空间分析法,对其1960—2017年风速时空变化特征进行分析,以期黄土高原地区防灾减灾、风能资源开发利用提供科学依据。

## 1 资料与方法

本文选取了黄土高原地区59个气象站逐月风速数值资料(图1),所有数据均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),并对所获取数据进行严格的质量核查(包括剔除研究时段内迁址的台站、零星缺测采用研究时段的多年平均值进行插补等)。依据站

点的缺失数据低于2%、观测时间最长原则,确定研究时段为1960年1月—2017年12月。季节划分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—翌年2月)。年际及季节风速的变化趋势采用线性拟合<sup>[18]</sup>计算,并检验其显著性,分为趋势显著( $p < 0.01$ )、趋势较显著( $p < 0.05$ )和趋势不显著( $p > 0.05$ )。综合Mann-Kendall检验和滑动t检验法<sup>[18]</sup>判断风速序列是否发生突变;空间分布的可视化表达采用ArcGIS中样条函数插值分析。此外,选用大气环流中具有代表性的北极涛动(Arctic Oscillation,简称AO)指数以分析其对风速变化的影响,该数据从美国国家大气海洋局(NOAA)气候预测中心(<https://www.esrl.noaa.gov>)获取。

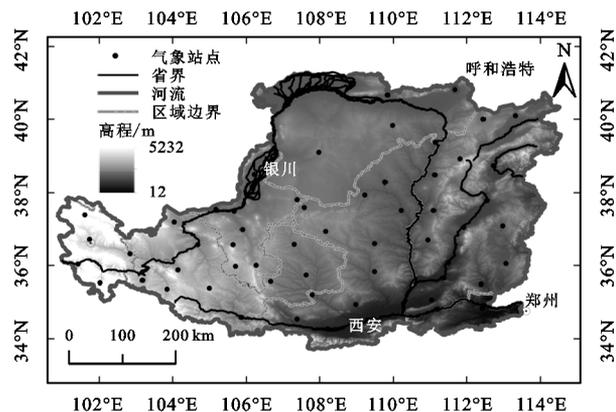


图1 黄土高原59个气象站点分布

## 2 结果与分析

### 2.1 风速时间变化特征

由图2可知,1960—2017年黄土高原地区历年平均风速为 $2.204 \text{ m}/\text{s}$ ,低于1957—2009年该区多年平均风速( $2.36 \text{ m}/\text{s}$ )<sup>[14]</sup>,但高于全国多年平均风速( $2.14 \text{ m}/\text{s}$ )<sup>[8]</sup>;年风速以 $0.0075 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ 的速率显著递减( $p < 0.01$ ),低于全国1958—2017年平均风速下降速率 $[0.0109 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})]$ <sup>[11]</sup>。全区内年平均风速最小值为2011年的 $1.933 \text{ m}/\text{s}$ ,最大值为1969年的 $2.639 \text{ m}/\text{s}$ 。从年代际均值变化情况看,年平均风速呈先上升而后下降趋势,1970s平均风速达 $2.429 \text{ m}/\text{s}$ ,为近58年最高;20世纪70年代以来,平均风速持续下降至2000s的 $2.044 \text{ m}/\text{s}$ ,但2010—2017年平均风速较2000s小幅上升 $0.028 \text{ m}/\text{s}$ 。

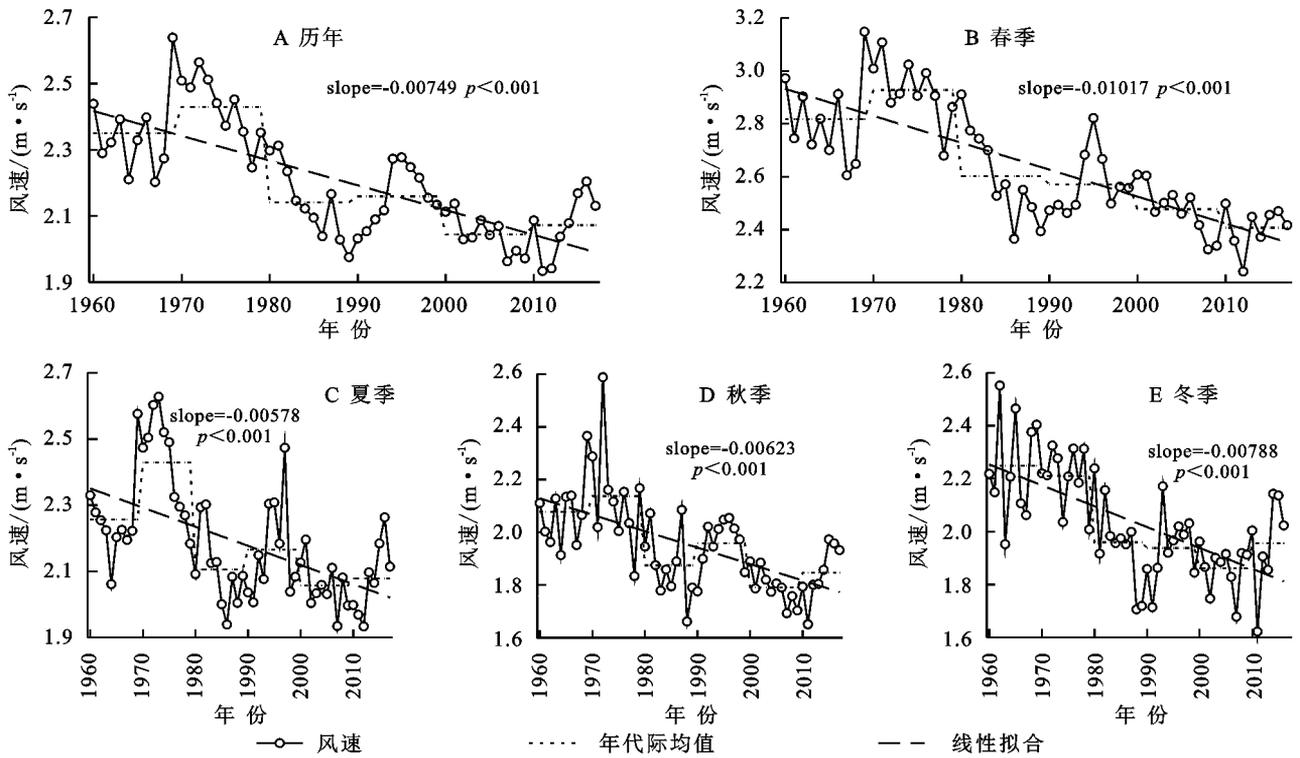


图 2 1960—2017 年黄土高原地区历年及季节平均风速变化趋势

从季节长期变化情况看,1960—2017 年黄土高原四季风速均呈显著下降趋势( $p < 0.01$ ),春季风速下降幅度最大[ $0.010 2 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ],其次是冬季[ $0.007 9 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ],秋季[ $0.006 2 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ],夏季降幅最小[ $0.005 8 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ].表明春、冬季是导致全区年风速下降的主要原因。整体上,春、夏、秋季风速年代际均值都经历了小幅上升、而后转为下降的过程,均在 1970s 达到最高值,分别为 2.928,2.429,2.137 m/s。但略有不同的是,春季风速在 1970s 以后持续下降,夏、秋季风速则在 1970s 以后经历了低—高一低—高的阶段。冬季风速在 1960s 为各年代际最高值,达 2.249 m/s,之后持续下降至 2000s 的 1.861 m/s,但 2010—2017 年较 2000s 小幅上升 0.094 m/s。值得注意的是,历年及四季风速年代际均值 1970s—1980s 降幅最为明显,介于 0.250(冬季)~0.325 m/s(春季)。

表 1 显示了黄土高原地区年内 1—12 月平均风速变化趋势。可以看出,全区月平均风速呈先升后降的变化特征。平均风速最大出现在 4 月(2.766 m/s),5 月次之(2.620 m/s);最小出现在 9 月,为 1.911 m/s,其余各月平均风速则在 1.918~2.540 m/s。从逐月平均风速的均方差看,近 58 年来 1 月平均风速变化幅度最大,4 月次之,9 月最小。年内各月风速均呈显著下降趋势( $p < 0.01$ ),平均速率为  $-0.007 5 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。其中下降趋势最大出现在 4 月[ $0.011 6 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ],5 月次之[ $0.009 9 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ],最小的则出现在 7 月[ $0.004 0 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ]。进一步计算发现,春季平均风速最大,达到 2.642 m/s,高于历年平均风速;夏季(2.186 m/s)和冬季(2.033 m/s)次之,秋季最小(1.951 m/s),均低于历年平均风速。表明近 60 年黄土高原地区四季风速呈春大秋小,与全国年内风速分布特征一致<sup>[8]</sup>。

表 1 黄土高原地区年内逐月平均风速变化特征

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
均值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.947	2.202	2.540	2.766	2.620	2.362	2.150	2.045	1.911	1.918	2.024	1.960
均方差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.286	0.233	0.237	0.278	0.270	0.214	0.192	0.212	0.177	0.216	0.253	0.240
速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	-0.0092	-0.0079	-0.0091	-0.0116	-0.0099	-0.0077	-0.0040	-0.0056	-0.0046	-0.0056	-0.0085	-0.0063

注:下划线表示通过 0.01 显著性水平检验。

## 2.2 风速突变特征

从历年平均风速的 M-K 突变统计曲线(图 3)来看,正序列 UF 和逆序列 UB 曲线在  $\pm 1.96$  显著性水平线( $\alpha = 0.05$ )内于 1983 年相交,且 UF 统计量于 1985 年突破  $-1.96$ ,可知黄土高原历年平均风速在

1983 年突变下降,突变前较突变后年均风速下降 0.286 m/s。春季风速正逆序列曲线相交于多点,且 UF 统计量于 1986 年突破  $-1.96$ ,但这些交点均在显著性水平线外,表明春季平均风速未发生突变。冬、夏季风速正逆序列曲线在显著性水平线内分别相交

于1981年、1983年,且UF统计量在之后的1984年、1988年突破了-1.96,表明冬、夏季平均风速分别在1981年、1983年突变下降,突变前较突变后风速下降0.312 m/s,0.238 m/s。秋季风速正逆曲线在显

著性水平线内于1985年、1987年相交,在显著性水平线外相交于1992年、1989—1996,1999—2017年UF统计量突破-1.96,结合滑动t检验得知突变为1985年,并计算出突变前较突变后下降0.204 m/s。

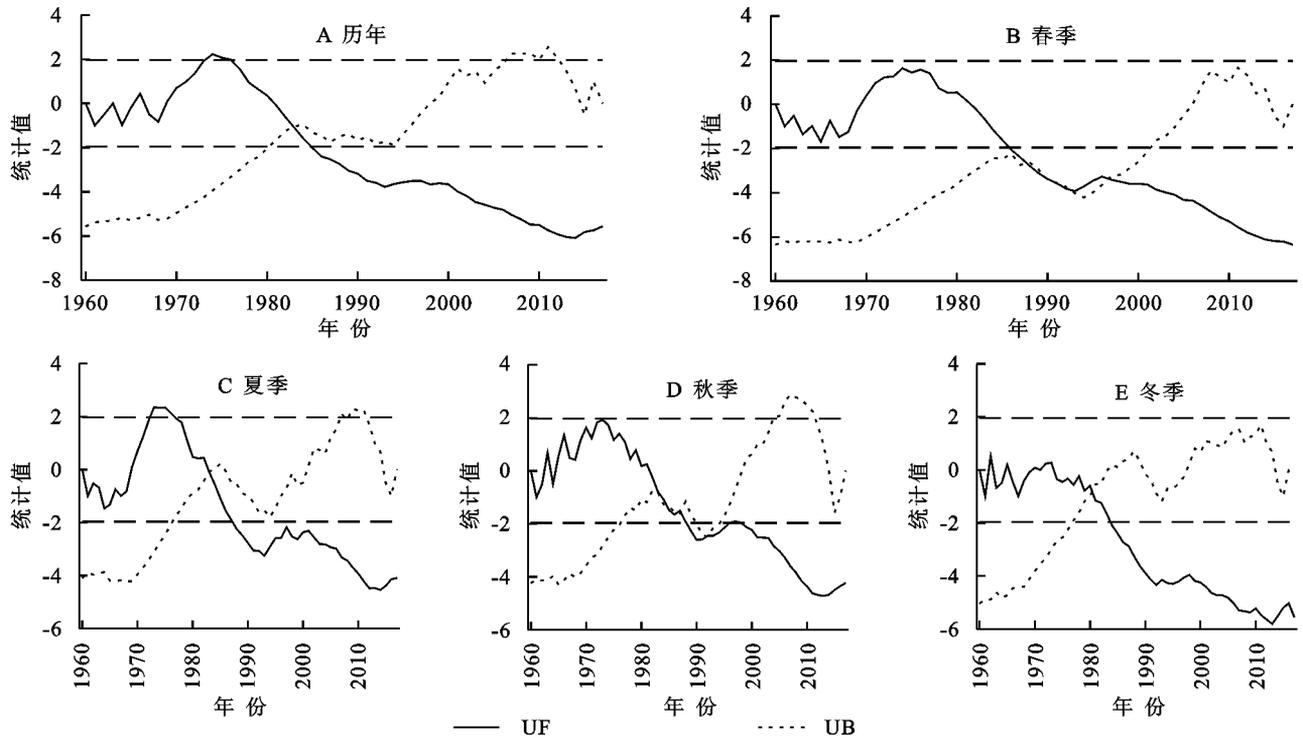


图3 1960—2017年黄土高原地区历年及季节平均风速M-K突变统计曲线

### 2.3 风速变化的空间特征

由表2可知,研究期内黄土高原历年风速呈下降趋势的站点比例达76.27%,其中有37,33站点通过 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 显著性检验;而呈上升趋势且通过 $p < 0.05$ 显著性检验的站点仅有8个。从四季风速呈下降趋

势的站点数量看,春季以48站最多且37站点通过 $p < 0.05$ 显著性检验,夏季以43站最少且仅有28站点下降趋势显著( $p < 0.05$ )。表明春季对全区风速下降趋势具有较高的贡献率。此外,春季风速呈上升趋势的站点中仅3个通过 $p < 0.05$ 显著性检验,远低于其他季节。

表2 黄土高原59站历年及季节平均风速变化趋势统计特征

时序	下降趋势站点百分比/(%)(站点数/个)				上升趋势站点百分比/(%)(站点数/个)			
	总百分比	$p < 0.01$	$p < 0.05$	$p > 0.05$	总百分比	$p < 0.01$	$p < 0.05$	$p > 0.05$
历年	76.27(45)	55.93(33)	62.71(37)	13.56(8)	23.73(14)	8.47(5)	13.56(8)	10.17(6)
春季	81.36(48)	59.32(35)	62.71(37)	18.64(11)	18.64(11)	3.39(2)	5.08(3)	13.56(8)
夏季	72.88(43)	40.68(24)	47.46(28)	25.42(15)	27.12(16)	13.56(8)	15.25(9)	11.86(7)
秋季	76.27(45)	64.41(38)	59.32(35)	16.95(10)	23.73(14)	10.17(6)	16.95(10)	6.78(4)
冬季	74.58(44)	54.24(32)	61.02(36)	13.56(8)	25.42(15)	11.86(7)	15.25(9)	10.17(6)

从黄土高原历年平均风速的空间分布看(图4),黄土高原多年均风速介于1.215~4.746 m/s,大致上呈西北高东南低的空间分布特征。地处青藏高原东北缘的青海、甘肃多年平均风速偏低,多数站点在1.667 m/s以下;特殊的是,陇东华家岭站多年平均风速为黄土高原最大处,与该站海拔较高密切相关。山西中南部、陕西中部风速较低,变化于1.667~2.144 m/s。陕北、晋西北及豫西北地区的多年风速偏大,一般在2.144~2.552 m/s;内蒙古南部的毛乌素沙区及宁夏中南部多年平均风速较大,为2.552~3.073 m/s;以上地区多年平均风速高于整个研究区

平均值,与这些区域地处黄土高原东南季风和西北风入风口有关<sup>[14]</sup>。黄土高原风速年变率呈西北大、中部小、东南偏大的空间分布特征。河西走廊东端景泰站和阴山南麓包头站年均风速降幅最大,达到-0.039~-0.030 m/(s·a);风速年变率呈不明显下降的站点主要集中秦岭北麓沿线。黄土高原西南部的黄河沿岸及东中部年均风速呈较明显的上升趋势,其中甘肃榆中站以0.015 6 m/(s·a)上升最为明显。对比黄土高原平均风速及年变率的空间分布特征,可以发现,年均风速较大的站点其风速下降速率也较大,该特性与长江流域<sup>[2]</sup>研究结果一致。

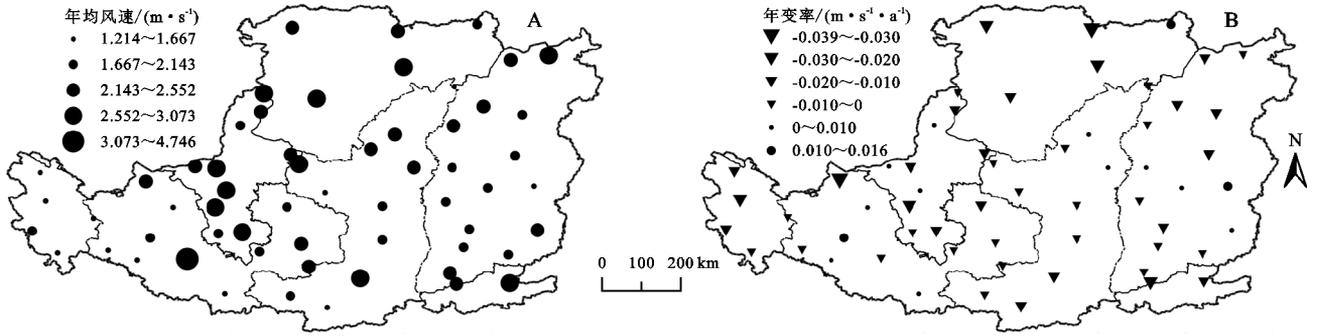


图 4 黄土高原历年平均风速及其变率的空间分布

分析图 5 可知,黄土高原四季风速变率与年均风速较为相似,均呈西北大、中部小、东南偏大的空间分布特征。其中,甘肃景泰站春、夏、秋季风速变率最

大,冬季最大则在内蒙古包头站;黄土高原东部的榆社站春季上升幅度最为大,夏、秋季则在东北部的呼和浩特站,冬季则在西部的榆中站。

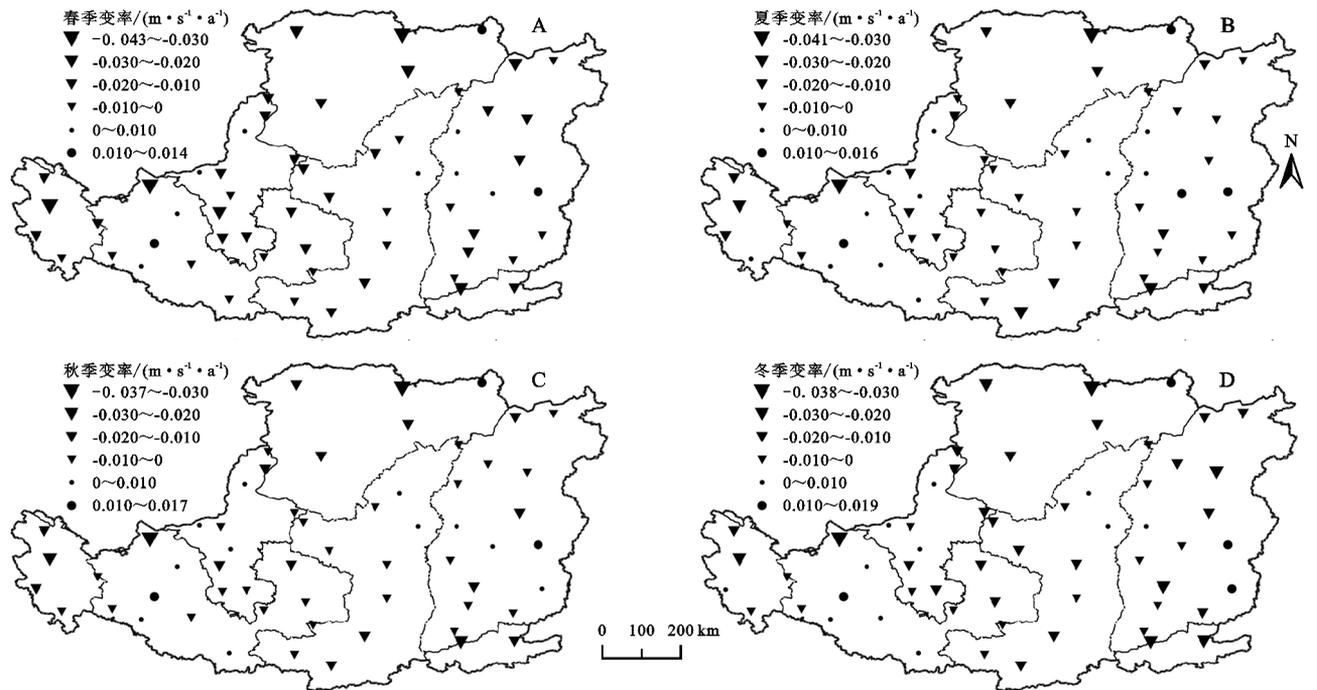


图 5 黄土高原季节风速变率的空间分布

### 3 风速变化的影响因素

#### 3.1 大气环流变化

众多探讨风速下降原因的研究证实,大气环流指数的变化是导致中国风速减小的主要原因<sup>[8,11-12]</sup>,且 30°N 以北的地区受 AO 指数影响尤为明显<sup>[6]</sup>。基于此,本文计算了黄土高原历年及四季平均风速与 AO 指数的相关性,发现 1960—2017 年 AO 指数呈较显著上升趋势( $p < 0.05$ ),与历年、春、夏、冬季风速皆呈显著负相关,相关系数分别为 -0.380, -0.378, -0.324, -0.377。这表明黄土高原历年及冬、春、夏季平均风速的下降与 AO 指数的上升密切相关。

#### 3.2 区域变暖

全球气候变暖是一个毋庸置疑的事实<sup>[19]</sup>。Mcvicar 等<sup>[2]</sup>研究指出极地地区升温幅度高于赤道,致使极地与

赤道温度差缩小,进而使中纬度地区风速下降。大量研究证实欧亚大陆气温上升是我国风速减小的关键影响因素之一<sup>[8,20-21]</sup>。我国西南<sup>[8]</sup>、南北疆<sup>[20]</sup>风速与最低温度之间呈较明显的负相关。Xu 等<sup>[21]</sup>研究证实了中国冬、夏季气温不对称变化显著影响了风速。总体上,黄土高原历年及四季的平均最高和最低气温、平均气温皆表现出显著上升趋势;除春季外,最高气温的升温幅度最大(表 3)。更为重要的是,黄土高原历年平均风速与平均最高气温和最低气温、平均气温均呈负相关,且通过了 0.01 显著性水平检验。季节上,黄土高原季节风速与最高气温和最低气温、平均气温均表现为负相关,其中,春季风速与最高气温,春、秋和冬季风速与最低气温,春、秋季风速与平均气温通过显著性检验。由此表明,黄土高原地区气候变暖,尤其是最低气温的显著增温是导致风速下降的重要因素之一。

表3 黄土高原1960—2017年气温变化及其与风速的相关性

指标		历年	春季	夏季	秋季	冬季
变化趋势/ ( $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )	平均最高气温	0.304	0.358	0.170	0.307	0.418
	平均最低气温	0.373	0.345	0.294	0.314	0.561
	平均气温	0.315	0.350	0.190	0.277	0.478
	平均最高气温	-0.349	-0.370	0.011	-0.181	-0.080
相关系数	平均最低气温	-0.596	-0.579	-0.255	-0.528	-0.382
	平均气温	-0.475	-0.497	-0.052	-0.389	-0.254
	平均最高气温	-0.349	-0.370	0.011	-0.181	-0.080

注:下划线表示通过0.01显著性水平检验。

### 3.3 其他可能因素

相关研究表明,随着地表植被覆被增加引起地表粗糙度的增加,致使拖曳力有所增加、风速逐渐减小<sup>[2,22-23]</sup>。整体上,黄土高原地区植被覆盖度由41.78%(1987年)增加到53.23%(2015年),特别是2000年以来退耕还林还草工程的实施,极大地改善了该地区的植被覆盖状况,黄土高原的植被覆盖度呈西北低、东南高<sup>[23]</sup>,与风速的空间分布耦合明显。快速发展的城镇化现象对风速变化也造成一定影响<sup>[24]</sup>。黄土高原县城城镇化水平由23.83%(1990年)上升至54.33%(2015年),空间上东中部高而西部低<sup>[24]</sup>,其可能加剧了黄土高原风速的下降。此外,风速观测仪器型号、仪器距地高度的频繁变动<sup>[25]</sup>和观测场周围环境变化<sup>[26]</sup>、风电场快速建设等<sup>[27]</sup>,均对风速长期趋势产生不可忽略的影响。

## 4 结论

(1) 整体上,1960—2017年黄土高原历年、四季平均风速均呈显著下降趋势,其下降幅度春季 $[0.010\ 2\ \text{m}/(\text{s}\cdot\text{a})]$ >冬季 $[0.007\ 9\ \text{m}/(\text{s}\cdot\text{a})]$ >历年 $[0.007\ 5\ \text{m}/(\text{s}\cdot\text{a})]$ >秋季 $[0.006\ 2\ \text{m}/(\text{s}\cdot\text{a})]$ >夏季 $[0.005\ 8\ \text{m}/(\text{s}\cdot\text{a})]$ 。此外,全区年内月平均风速呈先升后降的变化特征,逐月风速4月降幅最大,7月降幅最小。M-K突变分析结果表明,黄土高原历年及夏、秋、冬季风速均在1980s突变减少,春季平均风速未发生突变。突变后较突变前风速减少幅度冬季 $(0.312\ \text{m/s})$ >历年 $(0.286\ \text{m/s})$ >夏季 $(0.238\ \text{m/s})$ >秋季 $(0.204\ \text{m/s})$ 。

(2) 黄土高原历年均风速呈西北高、东南低,风速年变率呈西北大、中部小、东南偏大的空间分布特征,76.27%站点呈下降趋势;四季风速变率的空间分布与年均风速相似,站点呈下降趋势春季最多,夏季最少。此外,年均风速较大的站点其风速下降速率也较大。

(3) AO指数的上升与黄土高原的气候变暖、地表植被覆盖增加、城镇化的快速发展、风速观测仪器型号及其环境变化等因素,不同程度地造成全区风速长期下降趋势。风速变化受多方面影响,其内在机制还需进一步深入探索。

(4) 未来,黄土高原区应将春季作为防风御风重点时段,同时关注秋、冬两季风速变化;应将西北部地区年均风速高值区作为重点防御地区,加强防灾减灾能力建设。

### 参考文献:

- [1] Mohammad R K, Hossein A, Hemila H. An investigation of near surface wind speed trends in arid and semi-arid regions of Iran[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013,114(1/2):153-168.
- [2] Mcvcar T R, Roderick M L, Donhue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. Journal of Hydrology, 2012,416(3):182-205.
- [3] Donohue R J, Mcvcar T R, Roderick M L. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2010,386(1/4):186-197.
- [4] Lynch A H, Curry J A, Brunner R D, et al. Toward an integrated assessment of the impacts of extreme wind events on Barrow, Alaska[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004,85(2):209-222.
- [5] Turner J, Steve R C, Gareth J M, et al. Antarctic climate change during the last 50 years[J]. International Journal of Climatology, 2005,25(3):279-294.
- [6] 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.
- [7] 金巍,任国玉,曲岩,等.1971—2010年东北三省平均地面风速变化[J].干旱区研究,2012,29(4):648-653.
- [8] 张志斌,杨莹,张小平,等.我国西南地区风速变化及其影响因素[J].生态学报,2014,34(2):471-481.
- [9] 韩柳,王静璞,王光镇,等.中国北方风蚀区风速变化时空特征分析[J].干旱区地理,2018,41(5):65-73.
- [10] 李悦佳,贺新光,卢希安,等.1960—2015年长江流域风速的时空变化特征[J].热带地理,2018,38(5):660-667.
- [11] Zhang Ruhua, Zhang Shiyun, Luo Jiali, et al. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958—2015[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019,137(3/4):2785-2801.
- [12] 赵宗慈,罗勇,江滢,等.近50年中国风速减小的可能原因[J].气象科技进展,2016,6(3):106-109.
- [13] 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.
- [14] 马芹,张晓萍,万龙,等.1957—2009年黄土高原地区风速变化趋势[J].自然资源学报,2012,27(12):2123-2134.
- [15] 芦佳玉,延军平,王鹏涛,等.全球气候变暖背景下陕甘宁地区风速时空变化特征[J].中国沙漠,2017,37(3):554-561.
- [16] 范清成,王飞,穆兴民,等.近50年黄土高原风蚀区风

- 速的区域变化特征分析[J].水土保持通报,2011,31(3):40-43.
- [17] 师玮,周俊菊,胡子瑛,等.甘肃省陇东地区近 55 年风速时空变化特征[J].生态学杂志,2017,36(12):3594-3601.
- [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] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [20] 何毅,杨太保,陈杰,等.1960—2013 年南北疆风速变化特征分析[J].干旱区地理,2015,38(2):249-259.
- [21] Xu Xingkui, Levy Jason K, Lin Zhaohui, et al. An investigation of sand-dust storm events and land surface characteristics in China using NOAA NDVI data[J]. Global and Planetary Change, 2006,52(1/4):182-196.
- [22] 毛东雷,蔡富艳,杨余辉,等.新疆策勒 4 个典型下垫面近地层风速脉动特征[J].干旱区研究,2017,34(1):126-135.
- [23] 郭永强,王乃江,褚晓升,等.基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J].中国环境科学,2019,39(11):4804-4811.
- [24] 宋永永,马蓓蓓,李武斌,等.黄土高原县域城镇化的地域分异与动因机制[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2019,47(4):9-21.
- [25] 黄晓龙,杨雪,李涛,等.建站至 2016 年四川气象台站元数据变动特征分析[J].高原山地气象研究,2017,37(4):84-90.
- [26] 刘学锋,梁秀慧,任国玉,等.台站观测环境改变对我国近地面风速观测资料序列的影响[J].高原气象,2012,31(6):1645-1652.
- [27] 王恰.中国风电产业 40 年发展成就与展望[J].中国能源,2020,42(9):28-32,9.

(上接第 97 页)

- [20] 丁文峰,张平仓,任洪玉.近 50 年来嘉陵江流域径流泥沙演变规律及驱动因素定量分析[J].长江科学院院报,2008,25(3):23-27.
- [21] Gao P, Deng J C, Chai X K, et al. Dynamic sediment discharge in the Hekou-Longmen region of Yellow River and soil and water conservation implications[J]. Science of the Total Environment, 2017,578:56-66.
- [22] Hu B Q, Wang H J, Yang Z S, et al. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang(Yangtze River) basin and their implications [J]. Quaternary International, 2011,230(1):34-43.
- [23] Searcy J K, Hardison C H. Double-Mass Curves[M]. Washington D C: United States Government Printing Office, 1960.
- [24] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [25] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, et al. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches [J]. Science of the Total Environment, 2018,639:773-784.
- [26] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation change at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2001,37(3):701-708.
- [27] 张春林,凡炳文,刘国华.近 58 年来洮河流域水沙演变特征与驱动力分析[J].人民黄河,2014,36(8):10-14.
- [28] 牛最荣,崔亮.气候变化和人类活动对洮河输沙量变化的影响分析[J].水利水电技术,2016,47(5):80-83,88.

(上接第 102 页)

- [11] 孟二浩.基于改进的 EMD 混合模型月径流预测研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [12] Zhang X P, Lin P F, Chen H, et al. Understanding land use and cover change impacts on run-off and sediment load at flood events on the Loess Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2018,32(4):576-589.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998,454(1971):903-995.
- [14] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1:1-41.
- [15] 高隽.人工神经网络原理及仿真实例[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [16] 茆美琴,龚文剑,张榴晨,等.基于 EEMD-SVM 方法的光伏电站短期出力预测[J].中国电机工程学报,2013,33(34):17-24,15.
- [17] Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C, et al. Time Series Analysis: Forecasting and Control [M]. John Wiley & Sons, 2015.