

## 1957—2009年黄土高原地区风速变化趋势

马芹<sup>1</sup>, 张晓萍<sup>1, 2\*</sup>, 万龙<sup>1</sup>, 马瞳宇<sup>1</sup>, 孙艳萍<sup>1</sup>, 徐金鹏<sup>1</sup>, 雷泳南<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院、水利部水土保持研究所 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)

**摘要:** 用88个气象站1957—2009年的月平均风速和最大风速日值资料, 采用距平累积法、5 a趋势滑动法、Mann-Kendall趋势检验法等分析了黄土高原地区风速的变化趋势及其空间分异等特征。结果表明: ①黄土高原地区1957—2009年多年平均风速为2.36 m/s, 水蚀区、水蚀风蚀交错区和风蚀区年均风速分别为2.36、2.17、2.60 m/s, 年际变化倾向率分别为-0.008 4、-0.009 4和-0.018 8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 并均通过了0.001的极显著性检验。3个区域均是冬、春季的平均风速对全年趋势演变贡献率较大, 年均风速也均在1981年发生偏强转为偏弱的跃变, 20世纪70年代以后平均风速逐渐减小。②黄土高原平均风速减少的主要原因是最大风速为5级或5级以上的发生日数减少。大风频率从1970年代至2000年代呈显著减少趋势, 风蚀区减少幅度最大, 减少了10%以上, 水蚀风蚀交错区减少1%~5%。到2000年代, 大多数站点的大风频率均降低为<2%。③水蚀风蚀交错区和风蚀区年均大风日数较多, 而水蚀区和黄土高原西部地区年均大风日数较少。根据大风年均发生日数, 将大风天气划分为大风天气较少区(年均大风日数<10 d)、较多区(10~50 d)、多发区(50~100 d)和频发区(>100 d)。大风较多区在黄土高原地区分布最广, 其次是较少区, 无频发区。70年代至90年代, 风蚀区和水蚀风蚀交错区的站点大多为大风较多区, 其中70年代中宁和包头为大风多发区; 2000年代以后, 大部分地区转为大风较少区。

**关键词:** 平均风速; 最大风速; 黄土高原地区

**中图分类号:** P425 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2012)12-2123-12

风是重要的气象要素之一。风速广泛应用于气候变化研究、风蚀强度评估、沙尘暴预测、大气污染评价等领域<sup>[1-2]</sup>, 其中大风是形成沙尘暴的主要原因, 它除了在地表裸露的沙尘源地及其附近形成沙尘暴灾害以外, 还能使土壤风蚀、沙化, 作物和树木产生机械性损害, 破坏生态环境, 危害农业生产<sup>[3]</sup>。多数研究表明, 中国大部分地区的风速有明显减小趋势: 王遵娅、丁一汇等<sup>[4]</sup>对中国近50 a气候变化研究表明, 中国大部分地区的风速均显著减小, 冬、春季较明显。任国玉等<sup>[5]</sup>认为, 近47 a来全国年平均风速经历了明显的减弱趋势, 每10 a减小速率约0.11 m/s。Xu等<sup>[6]</sup>利用305个国家基准气候站和基本气象站的地面资料, 分析了1969—2000年全国的风速变化, 认为中国年平均风速下降28%。中国气象局兰州干旱气象研究所、甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室、中国科学院寒区旱区环

收稿日期: 2011-11-24; 修订日期: 2012-05-16。

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KZXC2-XB3-13, KZZD-EW-04-03-03)。

第一作者简介: 马芹(1986-), 女, 山东济宁人, 硕士, 主要研究GIS/RS在水土保持中的应用。E-mail: mq\_hmily@126.com

\* 通信作者简介: 张晓萍(1971-), 女, 研究员, 主要研究方向为区域水土保持及生态水文方向。E-mail: zhangxp@ms.iswe.ac.cn

境与工程研究所的专家联合研究发现,西北多数地区近 40 a 来大风呈减少趋势,其中新疆西北部、甘肃河西走廊西部和陕西东部等地区减少最为明显<sup>[7]</sup>。

黄土高原西连青藏高原,东接华北平原,是中国东部季风区向西北干旱区的过渡地带<sup>[8]</sup>,从东南向西北,存在着水蚀、水蚀风蚀交错侵蚀及风蚀等不同区域。各分区的气候、土壤、水资源、植被覆盖度等自然条件存在着较大的差异,其中水蚀风蚀交错区的侵蚀尤其剧烈。因此,分区研究黄土高原地区的风速尤其大风特征,揭示其区域分布特点、变化规律、形成机理及其在全球变化背景下的发展情景,对于防灾减灾、合理利用气候资源、改善西北地区生态环境有深远意义<sup>[7]</sup>。

## 1 研究区概况

黄土高原地区西起日月山,东至太行山,南靠秦岭,北抵阴山,涉及青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南 7 省(区),位于我国中部偏北,经纬度为:  $34^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ ,  $101^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 。总人口  $8\,742.2\times 10^4$  人,农业人口  $6\,907.7\times 10^4$  人(2000 年)。全区总面积  $64.2\times 10^4\text{ km}^2$ ,其中水土流失面积  $45.4\times 10^4\text{ km}^2$ (水蚀面积  $33.7\times 10^4\text{ km}^2$ 、风蚀面积  $11.7\times 10^4\text{ km}^2$ ),多年平均输入黄河泥沙达  $16\times 10^8\text{ t}$ ,是我国乃至世界上水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区。黄土高原从东南向西北,气候依次为暖温带半湿润气候、半干旱气候和干旱气候,植被依次出现森林草原、典型草原和荒漠草原,土壤依次为褐土、垆土、黄绵土和灰钙土。其中黄绵土分布广泛,质地疏松,遇水容易溶解、崩塌,易受侵蚀。

黄土高原的气候特征为:雨量较少,雨季短促,干季时间较长,干湿季节明显;日光充足,日照时数多,无霜期较长,热量条件比较优越;冬春季节多大风,冬干、春旱现象比较明显。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

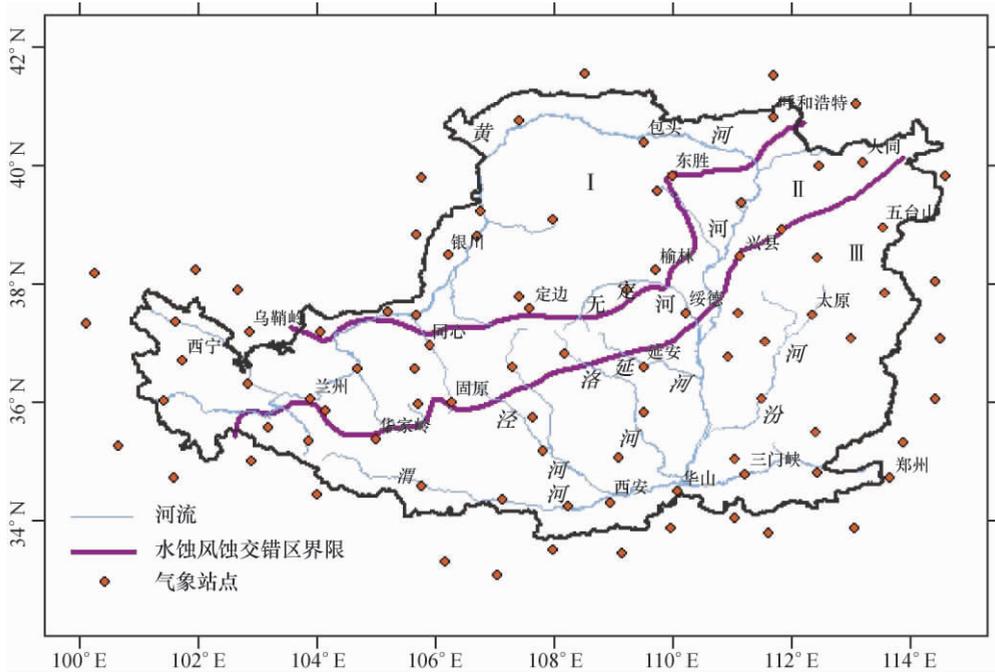
依据资料的连续性及最长时段性等标准,共选取黄土高原及毗邻地区符合条件的气象站 88 个(黄土高原区内共 60 个气象站点)(图 1)。地面气象站的月平均风速和最大风速日值资料为中国气象局国家气象信息中心提供。为了尽可能保证所有气象站数据资料长度的均一和稳定,月平均风速时间跨度取为 1957 至 2009 年,最大风速取为 1971 至 2009 年。

### 2.2 研究方法

文中采用距平累积法和 5 a 趋势滑动,进行气候变化的趋势分析。然后利用 Mann-Kendall 法和 Pettitt 方法进行趋势显著性分析和突变点分析。

Mann-Kendall 法是一种非参数的检验方法,样本不必遵从某一特定的分布,同时也不受个别异常值的干扰,能够客观地表征样本序列的整体变化趋势,研究显著性水平取 0.05,如果统计量小于显著性水平,则认为趋势是显著的,具体公式见文献[9-10]。Pettitt 分析方法是 1979 年提出的一种非参数统计检验方法,其核心是通过统计的方法检验时间序列要素均值变化的确切时间来确定跃变变化的确切时间<sup>[11]</sup>。最后在 ArcGIS 环境下通过样条函数法(Spline 插值法)绘制出风速变化的空间分布图,进行风速年际变化的空间差异分析,该方法已被国内外多数学者用来研究气候变化的空间分异<sup>[12-14]</sup>。

时段划分:年资料统计按照自然年算法,即每年的 1—12 月之和,四季资料以 3、4、5 月为春季,6、7、8 月为夏季,9、10、11 月为秋季,12 月至次年 1、2 月为冬季来统计。



注: I 代表风蚀区, II 代表水蚀风蚀交错区, III 代表水蚀区。

图 1 黄土高原地区气象站点的分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Loess Plateau

黄土高原地区按照侵蚀类型的不同,从北至南依次可划分为水蚀区、水蚀风蚀交错区及风蚀区<sup>[15]</sup>(图 1)。各区域的平均风速为在 ArcGIS 环境下通过 Spline 插值法插值后的面平均风速。

### 3 结果与分析

#### 3.1 平均风速的空间分布

图 2 是在 ArcGIS 环境下通过 Spline 插值法作出的黄土高原地区多年平均风速的空间分布图。1957—2009 年黄土高原地区 53 a 平均风速为 2.36 m/s,各站点多年平均风速在 0.8~8.3 m/s 之间。3 个高山站——五台山、华家岭、华山多年平均风速在 4.0~8.3 m/s 之间;其余地区多年平均风速在 0.8~4.0 m/s 之间,大致由西北到东南逐渐减小:其中东胜及其周围地区风速较大,为 3.0~4.0 m/s,约占黄土高原地区总面积的 5.1%(图 3);其次为内蒙古部分地区、毛乌素沙地和黄土高原的西北风入风口——陇西地区,风速一般在 2.5~3.0 m/s 之间,约占总面积的 22.0%;再次为陕北北部、山西北部和黄土高原的东南季风入风口——太行山脚下的河南地区,平均风速介于 2.0~2.5 m/s,约占黄土高原地区总面积的 30.7%;而陕西关中、陕北南部、山西南部、甘肃和青海等地区风速较低,平均风速均在 2 m/s 以下,约占黄土高原地区总面积的 38.7%。总体上,高山站的平均风速高于其它地区,整个区域大致从西北到东南呈逐渐减小趋势。季节的平均风速与年平均风速的空间分布基本一致,春季的平均风速较大,为 2.82 m/s;夏季、冬季平均风速相差较小,分别为 2.28 m/s 和 2.24 m/s,均小于年均值;秋季最小,仅为 2.11 m/s。由此可见,黄土高原风速变化的一个重要特点是季节变化十分显著,春季风较大。

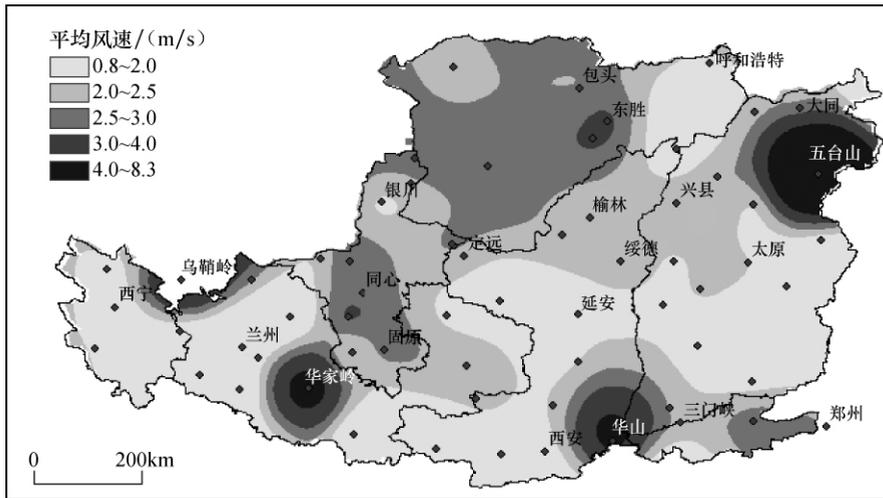


图2 黄土高原地区 1957—2009 年多年平均风速的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the annual mean wind speed in the Loess Plateau from 1957 to 2009

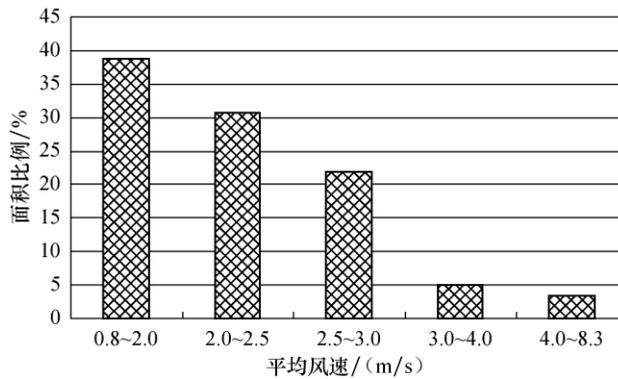


图3 各级风速所占面积比例

Fig. 3 Area percentage of the annual mean wind speed

### 3.2 平均风速的年际变化

#### 3.2.1 年代际变化

黄土高原地区 20 世纪 80 年代之前平均风速偏高,之后偏低,特别是 70 年代以后平均风速逐渐减小,2000 年代平均风速比多年均值低 0.28 m/s (表 1)。80 年代之前春季年均风速偏高,70 年代以后逐渐减小,春季平均风速在 2000 年代比多年均值低 0.32 m/s; 年均夏季风速仅在 60—70 年代偏高,80 年代以后减小明显,2000 年代比多年均值低 0.21 m/s; 秋、冬季变化与春季类似,2000 年至今年均风速分别比多年均值低 0.27 m/s 和 0.32 m/s。年均风速的年代际变化无明显的区域差异,各年代大多都是风蚀区年均风速较大,水蚀区次之,水蚀风蚀交错区最低,且 3 个区域的年均风速均是 70 年代以后逐渐减小。水蚀区内有五台山和华山 2 个高山站,故其平均风速要大于水蚀风蚀交错区。春、夏、秋季平均风速的年代际变化与年均风速的年代际变化区域差异较一致,而冬季 70 年代—2000 年代水蚀区的平均风速反而要大于风蚀区,这也是因为 3 个高山站的原因。同时也说明了风蚀不仅跟风速有关,而且跟下垫面联系密切。

表 1 黄土高原地区年及季节平均风速的年代际变化

Table 1 Interdecadal change of the annual and seasonal mean wind speed in the Loess Plateau from 1960 to 2009 (m/s)

		年均风速	春季风速	夏季风速	秋季风速	冬季风速
水蚀区	1960 年代	2.43	2.75	2.14	2.16	2.64
	1970 年代	2.63	3.02	2.42	2.39	2.68
	1980 年代	2.30	2.68	2.11	2.08	2.34
	1990 年代	2.27	2.58	2.16	2.10	2.22
	2000 年代	2.13	2.49	2.04	1.89	2.09
水蚀风蚀交错区	1960 年代	2.31	2.84	2.25	2.05	2.10
	1970 年代	2.35	2.92	2.38	2.08	2.04
	1980 年代	2.07	2.59	2.04	1.82	1.82
	1990 年代	2.02	2.50	2.02	1.84	1.73
	2000 年代	1.99	2.43	2.03	1.76	1.73
风蚀区	1960 年代	2.82	3.41	2.71	2.49	2.67
	1970 年代	2.94	3.59	3.00	2.58	2.61
	1980 年代	2.49	3.05	2.56	2.16	2.17
	1990 年代	2.44	2.95	2.50	2.22	2.11
	2000 年代	2.13	2.64	2.16	1.86	1.86

### 3.2.2 年际变化

黄土高原水蚀区、水蚀风蚀交错区和风蚀区年均风速总体上均呈显著减小趋势,年际变化倾向率分别为  $-0.0084$ 、 $-0.0094$  和  $-0.0188 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 并均通过了 0.001 的极显著性检验,且减小趋势基本一致,均是 20 世纪 70 年代值略高,之后波动减小,进入 2000 年后,风速减小到  $2.0 \text{ m/s}$  左右。水蚀区、水蚀风蚀交错区和风蚀区年均风速分别为  $2.36$ 、 $2.17$ 、 $2.60 \text{ m/s}$ ,水蚀区中除去五台山和华山 2 个高山站之后的年均风速为  $1.94 \text{ m/s}$ ,低于水蚀风蚀交错区的年均风速,符合黄土高原年均风速大致从西北到东南逐渐减小的规律。对逐年平均风速进行距平分析和 5 a 滑动距平分析(图 4),可以看出,1957—2009 年 3 个地区的逐年距平曲线和 5 a 滑动平均曲线风速均呈下降趋势,与全国风速显著减小的气候趋势一致。进一步分析,可得出黄土高原区平均风速具有明显的阶段性,可分为偏强期和偏弱期,由 Pettitt 突变检测<sup>[16-17]</sup> 3 个区域中,1981 年均为突变年份,在 1957 年至 1981 年,黄土高原地区平均风速偏强,1982 年到 2009 年为偏弱期。

春、夏、秋、冬四季的平均风速在 3 个区域中均呈显著减小趋势,且除水蚀区的夏季外(呈 0.01 的显著性减少趋势),其它区域中的各季节都通过了 0.001 的极显著性检验。四季对全年趋势演变贡献率的大小表现出明显的区域差异,水蚀区中四季对全年趋势演变贡献率:冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,且差异较大,最大的超过了 40%,最小的仅为 11.9%;水蚀风蚀交错区中四季对全年趋势演变贡献率:春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季,最大的为 32.4%,最小的为 19.7%;风蚀区中四季对全年趋势演变贡献率:春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季,且差别不大。总的来说,冬、春季对全年趋势演变贡献率较大,夏、秋季对全年趋势演变贡献率较小。

### 3.3 最大风速变化特征

在黄土高原水蚀区、水蚀风蚀交错区和风蚀区共选取具有代表性的 13 个站点 1971—2009 年的最大风速日值资料来分析最大风速变化特征。大风标准以原国家气象局 1990 年 5 月试行的《重要天气预报质量评定办法》中的规定为依据,即指各站定时气象观测平均风力达到 6 级或以上的风。某一日中有大风出现,称为大风日<sup>[7]</sup>。

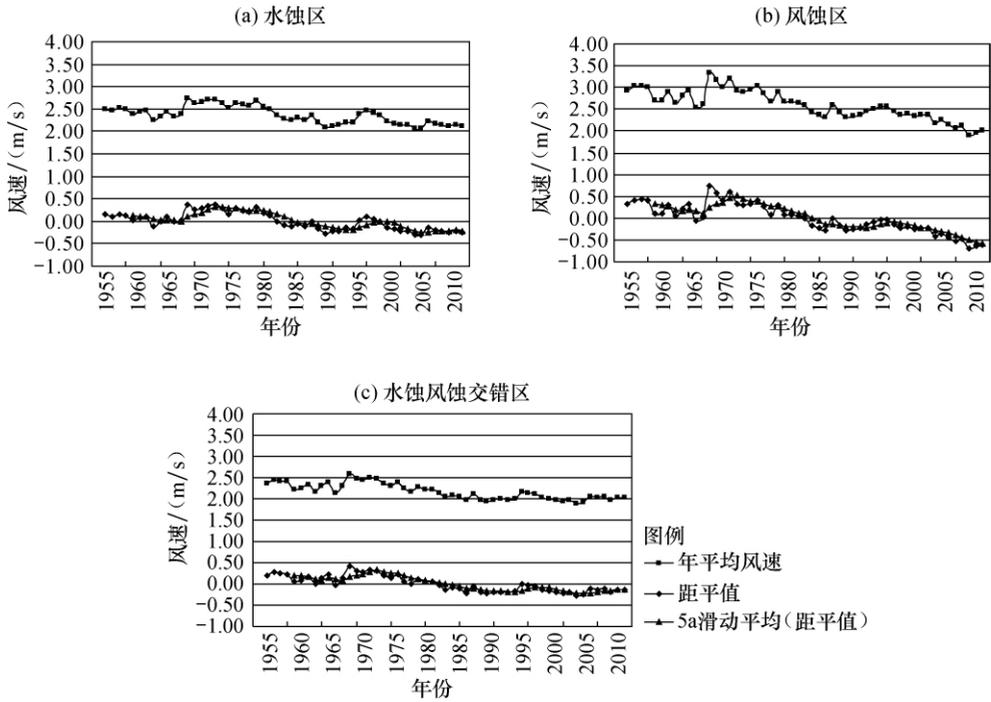


图 4 黄土高原各地区平均风速年际变化趋势及距平

Fig. 4 Annual trends and departure of the mean wind speed in different regions on the Loess Plateau

表 2 黄土高原地区 1957—2009 四季平均风速演变趋势

Table 2 Trends of seasonal and wind speed in different regions on the Loess Plateau

	趋势显著性	年变率/( $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ )	对全年趋势演变贡献率/%	
水蚀区	春季	***	-0.009 4	28.0
	夏季	**	-0.004 0	11.9
	秋季	***	-0.007 1	21.1
	冬季	***	-0.014 0	41.7
	全年	***	-0.008 4	100.0
水蚀风蚀交错区	春季	***	-0.012 2	32.4
	夏季	***	-0.007 4	19.7
	秋季	***	-0.008 0	21.3
	冬季	***	-0.010 4	27.7
	全年	***	-0.009 4	100.0
风蚀区	春季	***	-0.021 3	28.3
	夏季	***	-0.016 1	21.4
	秋季	***	-0.014 8	19.7
	冬季	***	-0.019 8	26.3
	全年	***	-0.018 8	100.0

注: \*\*、\*\*\* 分别代表变化趋势通过了 0.01、0.001 的显著性趋势检验; 贡献率 = 季节年变率/(4 × 全年年变率)。

### 3.3.1 最大风速发生频率的时空变化特征

最大风速按风力大小共分 7 个级别(表 3), 系统分析各级别风速在不同年代大风日数

及发生频率。最大风速的发生频率是指该级别最大风速发生的日数占所统计总日数的比例。

表 3 风速级别划分

Table 3 Wind speed hierarchies

级别	3 级以下	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级	7 级以上
风速/(m/s)	<3.4	3.4~5.4	5.5~7.9	8.0~10.7	10.8~13.8	13.9~17.1	>17.1

分析表 4 和图 5, 可得出从 20 世纪 70 年代至 2000 年代, 各站点日最大风速为 5 级以下的发生频率呈显著增加趋势。然而, 各站点日最大风速为 5 级或 5 级以上的发生频率呈显著减少趋势, 尤其以风蚀区减少幅度最大。从 70 年代至 2000 年代, 包头 5 级或 5 级以上的风发生频率由 46% 降为 5% 左右, 减少了约 41%, 固原减少约 31%, 东胜、中宁也减少 20% 以上。水蚀风蚀交错区和水蚀区各站点日最大风速为 5 级或以上的风发生频率减少了约 5%~20%, 仅绥德、延安两个站点无明显变化。由此, 可以推断: 黄土高原地区平均风速的显著减小趋势主要是由于 5 级或 5 级以上的风发生频率减少造成的。

表 4 各站点日最大风速为 5 级或 5 级以上的发生频率

Table 4 Frequency of maximum wind speed  $\geq 5$  grades

(%)

		1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000 年代
水蚀区	西安	7.09	5.10	3.49	0.52
	延安	0.88	0.99	0.66	0.11
	太原	24.47	15.89	17.23	10.59
水蚀风蚀交错区	绥德	27.66	27.54	25.38	27.65
	吴旗	17.26	10.57	10.46	8.49
	固原	41.93	32.99	22.80	11.00
	兰州	4.50	2.71	0.96	0.42
	西宁	26.57	13.02	2.93	1.21
风蚀区	包头	46.10	25.53	13.26	4.71
	东胜	37.47	26.17	21.46	13.25
	榆林	30.83	18.91	14.16	15.88
	银川	20.38	16.12	16.39	12.82
	中宁	42.67	34.30	36.20	21.09

结合表 5 和图 5, 分析 20 世纪 70 年代至 2000 年代大风发生日数及频率的变化, 结果表明: 在 70 年代, 水蚀区的西安和延安以及西部的兰州站点的大风发生频率均在 1% 以下, 太原、吴旗和西宁在 3%~7% 之间, 而位于风蚀区和水蚀风蚀交错区的其余站点的大风发生频率约在 8%~20% 之间, 其中包头、中宁大风发生频率最高, 分别为 20% 和 17% 左右。

各站点的大风日数及频率从 70 年代至 2000 年代均呈现显著减少趋势, 减少最显著区域为风蚀区。位于风蚀区的各站点的大风发生频率均减少了 10% 以上, 其中包头、中宁地区大风频率分别由 70 年代的 20%、17% 降为 2000 年代的 0.4%、3.6%; 而水蚀风蚀交错区大风频率减少在 1%~5% 之间。到 2000 年代, 除中宁、银川、榆林、绥德等站点的大风发生频率为 3%~4% 外, 其余站点的大风出现频率均 <2%。绥德在 70 年代、80 年代、90 年代、2000 年代大风日数所占比例无明显变化, 分别为 10.64%、10.09%、9.12%、11.22%。

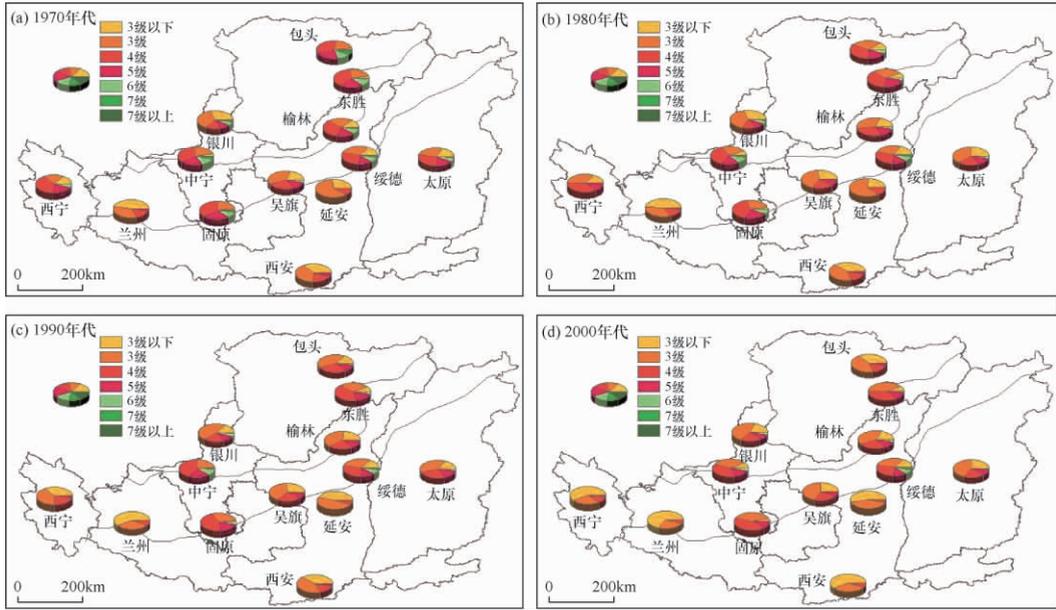


图5 各级别风速在不同年代发生频率

Fig. 5 Wind speeds at all levels proportional distribution in different years

表5 各站点大风发生频率

Table 5 Frequency of maximum wind speed  $\geq 6$  grades

(%)

		1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000 年代
水蚀区	西安	0.93	0.63	0.44	0.00
	延安	0.03	0.05	0.00	0.03
	太原	6.98	3.27	2.60	1.32
水蚀风蚀交错区	绥德	10.64	10.09	9.12	11.22
	吴旗	3.44	1.54	1.13	0.77
	固原	11.17	6.99	3.00	1.02
	兰州	0.52	0.19	0.00	0.00
风蚀区	西宁	4.5	0.74	0.33	0.33
	包头	19.97	6.20	1.91	0.39
	东胜	11.44	4.42	3.16	1.65
	榆林	9.99	3.85	1.93	4.03
	银川	8.76	6.96	5.45	3.80
	中宁	17.08	12.90	9.78	3.64

3.3.2 年均大风发生日数时空变化特征

从图6可以看出黄土高原地区年均大风日数的空间分布具有以下特征:

(1) 黄土高原地区大风日数的空间分布差异较大。从空间分布上看,年均大风日数较少的地区为水蚀区及水蚀风蚀交错区的西部地区,而水蚀区和水蚀风蚀交错区的东部,以及风蚀区年均大风日数较高。年均大风日数最多的站点是宁夏的中宁和陕北的绥德站点,分别为38.49 d和36.38 d,即大风出现的重现期小于10 d;而位于水蚀区的延安和西安站点,以及甘肃兰州站点,年均大风日数很少,分别为0.1、1.86和0.69 d。

(2) 根据年均大风日数,将黄土高原地区划分为大风天气较少区(年均大风日数小于 10 d)、较多区(年均大风日数 10~50 d)、多发区(年均大风日数 50~100 d)和频发区(年均大风日数大于 100 d)<sup>[7]</sup>。用 70 年代—2000 年代的年均大风日数资料分析,黄土高原无大风多发区和频发区,大部分地区为大风较多区,即每年大风天气在 10~50 d 之间,有 8 个站;其次是较少区,有 5 个站,分别是延安、吴旗、西安、兰州、西宁,从图 6 中可以看出该 5 个站点均位于水蚀区和水蚀风蚀交错区的西部。

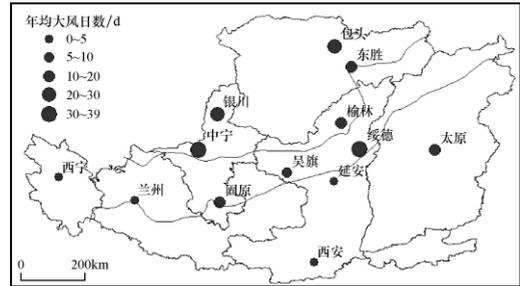


图 6 黄土高原地区年均大风日数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of annual average strong wind days in the Loess Plateau

分别利用 70 年代、80 年代、90 年代和 2000 年代的资料计算年均大风日数(表 6),可以看出,70 年代—90 年代,风蚀区和水蚀风蚀交错区的站点大多为大风较多区,其中 70 年代中宁和包头为大风多发区,年均大风日数分别为 65.5 d 和 54.3 d。而进入 2000 年代以后,随着大风日数的减少,部分站点如中宁、银川、榆林、绥德仍为大风较多区,除绥德外,年均大风日数均在 10~20 d 之间,其它大部分站点变为大风较少区。从 70 年代—2000 年代,位于水蚀区的西安和延安站点一直为大风较少区,年均大风日数 < 3 d。绥德地区年均大风日数变化不大,且有上升趋势。

表 6 各站点大风日数及所属大风分区

Table 6 The number gale days and gale sub-regions

(d)

		1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000 年代
水蚀区	西安	3.0(+)	2.3(+)	1.6(+)	0(+)
	延安	0.1(+)	0.2(+)	0(+)	0.1(+)
	太原	22.6(++)	11.8(++)	9.4(+)	4.8(+)
水蚀风蚀交错区	绥德	34.8(++)	34.2(++)	32.4(++)	40.5(++)
	吴旗	11.3(++)	5.6(+)	4.1(+)	2.8(+)
	固原	36.0(++)	25.5(++)	10.9(++)	3.7(+)
	兰州	1.7(+)	0.7(+)	0(+)	0(+)
	西宁	14.8(++)	2.7(+)	0.1(+)	0.1(+)
风蚀区	包头	65.5(+++)	22.6(++)	6.9(+)	1.4(+)
	东胜	37.3(++)	16.1(++)	11.5(++)	6.0(+)
	榆林	31.1(++)	13.8(++)	6.8(+)	14.6(++)
	银川	28.7(++)	25.4(++)	19.8(++)	13.8(++)
	中宁	54.3(+++)	47.1(++)	35.5(++)	13.2(++)

注:++++代表大风频发区,+++代表大风多发区,++代表大风较多区,+代表大风较少区。

#### 4 结论

(1) 黄土高原地区 1957—2009 年年均风速为 2.36 m/s,整个区域从西北到东南呈逐渐减小趋势,春季的平均风速较大,为 2.82 m/s。黄土高原整体与 3 个分区均是 20 世纪 80 年代之前平均风速偏高,70 年代以后逐渐减小。四季平均风速的年代际变化趋势与年均风速基本一致。

(2) 水蚀区、水蚀风蚀交错区和风蚀区年均风速分别为 2.36 m/s(除去高山站为 1.94 m/s)、2.17 m/s、2.60 m/s,年际变化倾向率分别为  $-0.0084$ 、 $-0.0094$  和  $-0.0188 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,三个区域平均风速均呈极显著( $P < 0.001$ )减小趋势,且 1981 年均为突变年份。四季的平均风速在三个区域中也均呈显著减小趋势,其中冬、春季对全年趋势演变贡献率较大,夏、秋季较小。

(3) 平均风速减小的主要原因是各站点日最大风速为 5 级或 5 级以上的发生频率呈显著减少趋势。各站点的大风日数及频率从 1970 年代至 2000 年代均呈现显著减少趋势,减少最显著区域为风蚀区,减少了 10% 以上。到 2000 年代,大多数站点的大风出现频率均  $< 2\%$ 。

(4) 风蚀区和水蚀风蚀交错区年均大风日数较多。风蚀区的中宁年均大风日数为 38.49 d,是黄土高原地区大风最频繁发生的地方,大风出现的重现期小于 10 d;而水蚀区的延安是黄土高原地区大风日数最少的地方。

(5) 根据年均大风日数,将大风天气划分为大风较少区(年均大风日数  $< 10$  d)、较多区(10~50 d)、多发区(50~100 d)和频发区( $> 100$  d)。大风较多区在黄土高原地区分布最广,其次是较少区,无频发区。1970 年代—90 年代,风蚀区和水蚀风蚀交错区的站点大多为大风较多区,其中 70 年代中宁和包头为大风多发区;而 2000 年以后,大部分地区转为大风较少区。从 1970 年代至 2000 年代,水蚀区站点一直为大风较少区。

#### 参考文献(References):

- [1] 强明瑞,肖舜,张家武,等. 柴达木盆地北部风速对沙尘暴事件降尘的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 290-295. [QIANG Min-rui, XIAO Shun, ZHANG Jia-wu, et al. Impact of wind velocity on dustfall during dust storm events in northern Qaidam Basin, China. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2): 290-295.]
- [2] 马淑红,戈峰,陈晓光,等. 古尔班通古特沙漠瞬间最大风速时空分布特征[J]. 资源科学. 2007, 29(4): 46-53. [MA Shu-hong, GE Feng, CHEN Xiao-guang, et al. The spatial-temporal distribution of maximum instantaneous wind speed and the control of active dunes in Gurbantunggut Desert. *Resources Science*, 2007, 29(4): 46-53.]
- [3] 许炯心. 基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 53-67. [XU Jiong-xin. Erosion Processes of the Middle Yellow River Based on the Coupling of the Climate Landscape Vegetation. Beijing: Science Press, 2009: 53-67.]
- [4] 王遵娅,丁一汇,何金海,等. 近年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236. [WANG Zun-ya, DING Yi-hui, HE Jin-hai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236.]
- [5] 任国玉,郭军,徐铭志. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. [REN Guo-yu, GUO Jun, XU Ming-zhi. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956.]
- [6] XU Ming, CHANG Chih-pei, FU Cong-bin. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, D24.
- [7] 李耀辉,张存杰,高学杰. 西北地区大风日数的时空分布特征[J]. 中国沙漠. 2004, 24(6): 715-723. [LI Yao-hui, ZHANG Cun-jie, GAO Xue-jie. Temporal and spatial characteristics of gale weather over Northwest China. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(6): 715-723.]
- [8] 杨勤业,袁宝印. 黄土高原地区自然环境及其演变[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 200-229. [YANG Qin-ye, YUAN Bao-yin. Natural Environment of Loess Plateau and Its Evolution. Beijing: Science Press, 1991: 200-229.]
- [9] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 62-76. [WEI Feng-ying. Modern Climate Statistics Diagnosis and Forecasting Technology. Beijing: Meteorological Press, 1999: 62-76.]
- [10] 马柱国,邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. 大气科学, 2006, 30(3): 464-474.

- [MA Zhu-guo, SHAO Li-juan. Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(3): 464–474. ]
- [11] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126–135.
- [12] Price D T, Mckenney D W, Nalder I A, *et al.* A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2000, 101: 81–94.
- [13] Yan H, Nix H A, Hutchinson M F, *et al.* Spatial interpolation of monthly mean climate data for China [J]. *International Journal of Climate*, 2005, 25(10): 1369–1379.
- [14] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 地理学报, 2008, 63(3): 257–269. [JIA Wen-xiong, HE Yuan-qing, LI Zong-xing, *et al.* The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. region. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(3): 257–269. ]
- [15] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000, 11(5): 57–60. [TANG Ke-li. Important and urgency of govern the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau. *Soil and Water Conservation in China*, 2000, 11(5): 57–60. ]
- [16] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437–447. [QIU Xin-fa, LIU Chang-ming, ZENG Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 437–447. ]
- [17] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43a 来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79–85. [LI Lin, LI Feng-xia, GUO An-hong, *et al.* Study on the climate change trend and its catastrophe over “San-jiangyuan” region in recent 43 years. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 79–85. ]

## Spatial and Temporal Trends of Wind Speed on the Loess Plateau during 1957 – 2009

MA Qin<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ping<sup>1,2</sup>, WAN Long<sup>1</sup>, MA Tong-yu<sup>1</sup>, SUN Yan-ping<sup>1</sup>,  
XU Jin-peng<sup>1</sup>, LEI Yong-nan<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture & Forest University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming in Loess Plateau, Yangling 712100, China)

**Abstract:** An analysis of spatial and temporal trends of mean wind speed and maximum wind speed during 1957 – 2009 was performed on the Loess Plateau based on the monthly observed wind speed data at 88 meteorological stations. The cumulative departure analysis, a five-year moving average and the nonparametric methods of Mann-Kendall test, were used for data analysis. Results indicated that:

1) The annual mean wind speed (1957 – 2009) was 2.36 m/s on the Loess Plateau, annual mean wind speeds of water erosion region, wind-water erosion crisscross region and wind erosion region were respectively 2.36 m/s, 2.17 m/s and 2.60 m/s, and the mean wind speeds respectively decreased at the rate of  $-0.0084 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $-0.0094 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  and  $-0.0188 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , and respectively showed a significant decreasing trend ( $P < 0.001$ ). And on the seasonal scale, the contribution rates of spring and winter for annual wind speed were higher, summer and autumn were lower. For annual mean wind speeds in the three regions, the change point of the decreasing trend was in 1981, and after the 1970s, the wind speed decreased significantly.

2) The reason why the mean annual wind speed decreased significantly is that the decreasing of the frequency of the daily maximum wind speed with a scale  $\geq 5$ . The frequency of the gale on the Loess Plateau showed a significant decreasing trend from the 1970s to the 2000s, the magnitude of decrease is the greatest in wind erosion region, by over 10%. By the 2000s, the frequency of gale in most stations on the Loess Plateau is  $< 2\%$ .

3) In most parts of wind-water erosion crisscross region and the wind erosion region, the number of gale days is more but it is less in the water erosion region and the east of the Loess Plateau. According to the annual mean frequency of gale days in the Loess Plateau, four sub-regions can be divided. They are fewer gale region ( $< 10 \text{ d}$ ), more gale region ( $10 - 50 \text{ d}$ ), much more gale region ( $50 - 100 \text{ d}$ ) and frequent region ( $> 100 \text{ d}$ ). Most parts of the Loess Plateau fall into the more gale region, and then fewer gale region and non-frequent region. From the 1970s to the 1990s, most parts of wind erosion region and wind-water erosion crisscross region belong to much more gale region. The Baotou and Zhongning stations belong to more gale region. After the year 2000, most parts of the Loess Plateau turn to the fewer gale region.

**Key words:** mean wind speed; maximum wind speed; the Loess Plateau