

# 1979-2014年中国地面风速的长期变化趋势

王楠, 游庆龙, 刘菊菊

(南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作  
联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** 基于中国国家级地面气象站均一化风速月值数据集, 采用线性回归等方法分析了1979-2014年中国2268个台站地面风速演变的时空特征。结果表明: 中国地面风速总体呈显著下降趋势, 年平均风速变化速率为 $-0.142 \text{ m/s/10 a}$ ; 四个季节中春季平均风速下降趋势( $-0.18 \text{ m/s/10 a}$ )明显大于其他三个季节, 其次依次为冬季( $-0.135 \text{ m/s/10 a}$ )、夏季( $-0.13 \text{ m/s/10 a}$ )及秋季( $-0.129 \text{ m/s/10 a}$ ); 研究选取的台站中约82%的台站风速呈现下降趋势; 划分的七个区域中, 高原区和东北区风速下降趋势最明显, 华北区下降趋势最小, 但都通过了0.05显著性检验; 中国地面风速在1980s下降趋势最显著( $-0.235 \text{ m/s/10 a}$ ), 1990s下降趋势减缓( $-0.112 \text{ m/s/10 a}$ ), 2000-2014年下降趋势最小, 为 $-0.099 \text{ m/s/10 a}$ ; 研究期间地面风速与地面气温呈显著负相关, 表明近期中国气温变暖可能导致风速减弱。

**关键词:** 地面风速; 线性回归; 时空变化特征; 均一化资料

风作为一种重要的气象要素, 不仅可以反映大气流场的特征, 同时也是一种重要的气候资源。风能是可再生的清洁能源, 具有储量大、分布广的特点。在环境污染问题日益加重且化石能源紧缺的当今世界中, 风能等新型能源的开发利用愈发受到重视<sup>[1-2]</sup>。从1951-2010年, 温室气体造成的全球平均地表增温为 $0.5\sim 1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>, IPCC第五次评估报告期间发布的《可再生能源与减缓气候变化特别报告》<sup>[4]</sup>中指出, 风能在减少温室气体排放方面有巨大潜力。在对风能资源进行评估时, 通常会考虑有效风速、大风频率、风能密度的大小及稳定性等方面<sup>[5-8]</sup>, 而风速是其中重要的要素。因此, 深入了解风速变化的时空分布特征具有实际意义。

在过去50年间, 风速在南北半球热带地区及中纬度地区呈减少趋势, 而在高纬度地区(约 $>70^{\circ}$ 纬度)则呈增加趋势<sup>[9]</sup>。Vautard等<sup>[10]</sup>研究发现, 在欧洲、中亚、东亚及北美区域风速分别以每十年 $-0.09 \text{ m/s}$ 、 $-0.16 \text{ m/s}$ 、 $-0.12 \text{ m/s}$ 及 $-0.07 \text{ m/s}$ 的速率下降。Pryor等<sup>[11]</sup>分析了美国大陆地区157个站点的近地面风速, 发现在1973-2005年间大多数地区风速都呈下降趋势。不同的是, 在南极洲及阿拉斯加等地区风速均表现为增加趋势<sup>[12-14]</sup>。针对中国风速的变化, 也有许多学者进行了研究, 大量研究表明中国年平均地表风速在过去几十年呈现出显著减少趋势<sup>[15-22]</sup>, 且下降趋势均大于 $-0.1 \text{ m/s/10 a}$ 。另外, 一些学者对青藏高原、东北三省等区域的风速做了研究<sup>[23-28]</sup>, 均得出了风速减弱的理论(表1)。影

收稿日期: 2018-12-22; 修订日期: 2019-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0601702); 国家自然科学基金项目(41771069); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 王楠(1993-), 女, 陕西西安人, 硕士, 主要从事风速和风能变化研究。E-mail: nwang\_nuist@126.com

通讯作者: 游庆龙(1980-), 男, 湖南岳阳人, 教授, 主要从事青藏高原现代气候环境变化研究工作。

E-mail: yqingl@126.com

表 1 中国地面风速相关研究  
Table 1 Previous studies on observed surface wind speed changes in China

作者	研究区域	研究时段/年	台站数量 (是否均一化检验)	变化趋势/ (m/s/10 a)
Jiang 等 <sup>[20]</sup>	中国	1956-2004	535 (否)	-0.124
Guo 等 <sup>[21]</sup>	中国	1969-2005	652 (是)	-0.18
Chen 等 <sup>[22]</sup>	中国	1979-2007	540 (是)	-0.17
You 等 <sup>[23]</sup>	青藏高原中东部	1980-2005	71 (否)	-0.24
刘苏峡等 <sup>[24]</sup>	华北平原	1951-2006	104 (否)	-0.16
金巍等 <sup>[25]</sup>	东北三省	1971-2010	71 (否)	-0.23
张志斌等 <sup>[26]</sup>	西南	1969-2009	110 (否)	-0.24
唐宝琪等 <sup>[27]</sup>	华东四省一市	1961-2013	56 (否)	-0.139
黄小燕等 <sup>[28]</sup>	西北	1960-2009	112 (否)	-0.09

响风速变化的可能原因较多。赵宗慈等<sup>[29]</sup>对近 50 年中国风速变化的可能原因进行了综述,发现已有研究中对风速变化原因的探讨可分两大类:气候系统内部相互作用和人类活动的影响,包括的影响因子有亚洲季风、沙尘暴数、寒潮数、东亚温带气旋、海陆气压梯度减弱、城市化效应及空气污染加重等。陈练<sup>[30]</sup>研究发现地表气压梯度及北极涛动等对风速减小有一定影响。李艳等<sup>[31]</sup>认为下垫面的人为改变会影响我国近地层风能密度。

值得注意的是,均一化资料是进行气候变化研究的基础。已有研究发现,观测仪器、观测方式及观测环境的改变可能导致资料序列存在非均一性现象<sup>[32-34]</sup>。前人对风速的研究多是基于未订正的观测资料且选用台站较少,其研究结果存在一定程度的不确定性。因此,本文基于均一化资料对中国及各区域近地面风速变化特征进行研究,对中国风速及风能资源的分区和管理具有一定科学意义。

1 研究方法与数据来源

本文使用的资料为:(1)国家气象信息中心提供的中国国家级地面气象站均一化风速月值数据集(V1.0),包括 2479 个国家级台站的平均风速月值数据。该数据集订正了台站迁移、风速仪器换型、仪器更换、人工观测转自动观测及观测时次变化等多种人为原因造成的断点,改进了地面风速资料时间序列的均一性。计算前已对数据进行缺测值和异常值检验,剔除了缺测值及异常值个数大于 12 个的台站,最终用于研究的台站共 2268 个,研究期间可用台站数量如图 1a 所示,不同海拔范围内的台站数量如图 1b 所示。(2)国家气象信息中心提供的中国基本和基准气象站地面气温均一化数据集(已经过严格的质量控制和均一性检验及订正)和 2013-2014 年全国 837 个气象站的气温日值数据,剔除了缺测超过 31 天的台站,最终选取 701 个站点的数据进行研究。两种资料选取的研究时段均为 1979-2014 年,缺测值使用最近邻插补方法进行插补<sup>[35]</sup>。

本文采用线性回归、五点滑动平均对气候变化的趋势进行分析,利用皮尔逊相关系数对相关性进行分析,采用气象数据中常用的 Cressman 插值法将站点资料插值成分辨率为 0.25°×0.25°的格点资料<sup>[36-37]</sup>。季节划分方法参照任国玉等<sup>[16]</sup>:上年 12 月至当年 2 月为冬季,3-5 月为春季,6-8 月为夏季,9-11 月为秋季。

为了便于研究中国不同区域的风速变化特征,根据中国气候及地形特征大致将中国

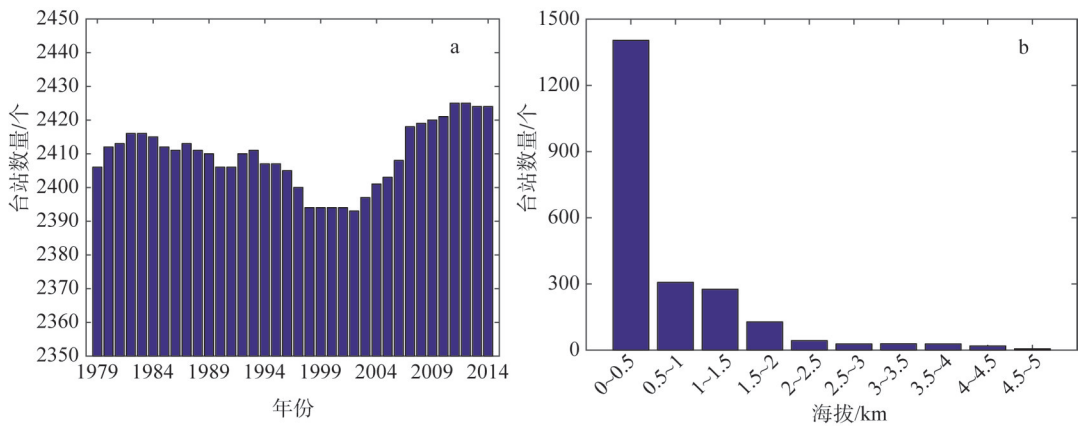


图1 研究时段内可用台站数与按海拔高度分类的台站数

Fig. 1 The number of stations available and the number of stations classified by altitude in the study period

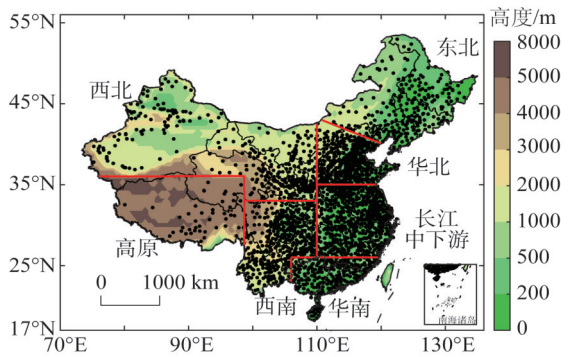
划分为以下7个区域（图2）：东北区（250个台站）、西北区（335个台站）、西南区（406个台站）、华北区（416个台站）、华南区（260个台站）、长江中下游区（551个台站）和高原区（50个台站）。

2 结果分析

2.1 中国风速的时间变化特征

2.1.1 全国风速时间变化特征

1979-2014年中国多年平均风速为2.14 m/s。分析月平均风速（表2）发现，2-6月的平均风速大于年平均值，其余月份均小于年平均值，其中4月最大，9月最小，且4月平均风速是9月的1.35倍。从季节分布来看，春季平均风速最大，为2.48 m/s，高于年平均值，其次为夏（2.06 m/s）冬（2.06 m/s）秋（1.95 m/s）季，均低于年平均值，其中秋季最小，总体呈现“春季大而夏



注：本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1606号的标准地图制作，底图无修改，下同。

图2 全国分区示意图

Fig. 2 Map showing sub-regions in China

表2 1979-2014年中国各月平均风速及其变化趋势

Table 2 Mean and trend of monthly wind speed in China from 1979 to 2014

月份		平均风速/(m/s)					
1-6		2.02	2.21	2.47	2.57	2.41	2.20
7-12		2.07	1.91	1.90	1.95	2.01	1.96
月份		变化趋势/(m/s/10 a)					
1-6		-0.155	-0.145	-0.162	-0.198	-0.18	-0.173
7-12		-0.126	-0.091	-0.104	-0.137	-0.147	-0.091

注：粗体均通过0.05显著性检验，下同。

秋冬季小型”。与Chen等<sup>[22]</sup>研究相比,平均风速最大和最小月份均相同,但在季节的排序上有差异,这可能与研究使用的资料、站点及时段不同有关。

从长期变化趋势来看,全国年平均风速在1979-2014年呈现显著减弱趋势,速率为 $-0.142\text{ m/s/10 a}$ (图3a)。另外,风速变化还呈现出显著的年代际特征,1980年代下降趋势最为显著,达到 $-0.235\text{ m/s/10 a}$ ;1990年代风速减小趋势减缓,为 $-0.112\text{ m/s/10 a}$ ;2000-2014年风速减小趋势最小,为 $-0.099\text{ m/s/10 a}$ 。

对比各个季节平均风速变化趋势发现(图3b~图3e):春季平均风速下降趋势最为显著( $-0.18\text{ m/s/10 a}$ ),其次是冬季( $-0.135\text{ m/s/10 a}$ ),再次是夏季( $-0.13\text{ m/s/10 a}$ ),秋季平均风速下降趋势最小( $-0.129\text{ m/s/10 a}$ ),四季中仅春季平均风速下降趋势大于年平均风速下降趋势,总体呈现出“春季下降趋势大而夏秋冬下降趋势小”的特征。4月风速下降趋势最显著,为 $-0.198\text{ m/s/10 a}$ ,8月及12月是风速下降趋势最弱的月份,为 $-0.091\text{ m/s/10 a}$ 。

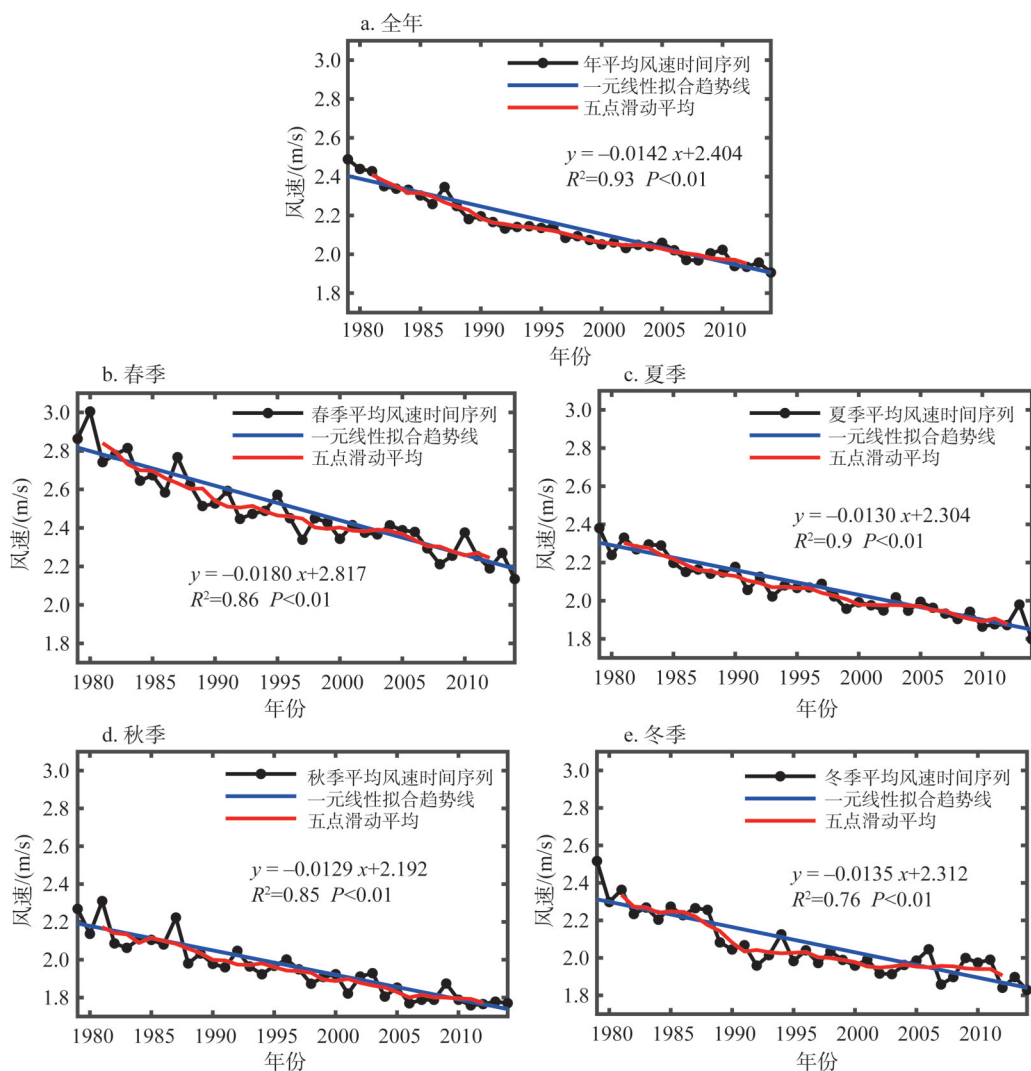


图3 1979-2014年中国全年及各季节平均风速时间序列

Fig. 3 Time series of annual and seasonal mean wind speed in China during 1979 to 2014



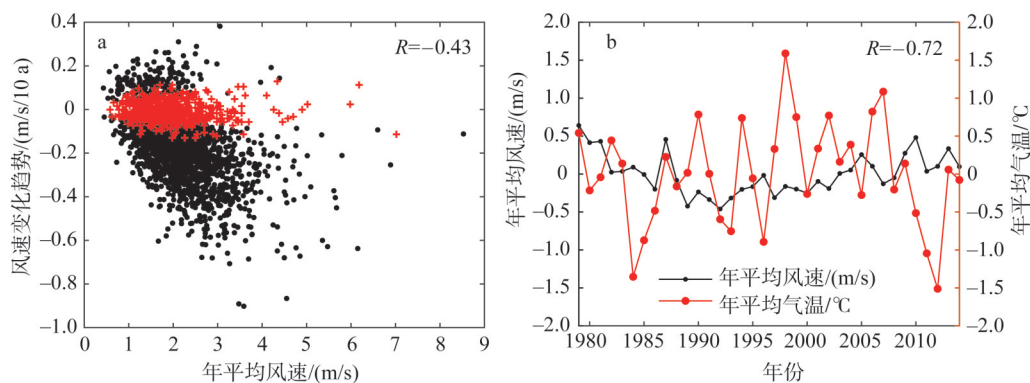
年平均风速变化趋势与年平均风速之间存在一定联系, 其相关系数为 $-0.43$  (图4a), 表明风速越大, 其变化趋势越大。江滢等<sup>[38]</sup>在研究中指出, 中国平均风速的减弱主要是日平均风速大于等于 $3\text{ m/s}$ 的日数减小所导致的, 此结论与本文中风速越大, 其下降趋势越大的结论相符。除此之外, 年平均风速与年平均气温之间也存在显著的负相关 (图4b), 相关系数为 $-0.72$ , 这在一定程度上表明气温增加会导致风速减小。张莉等<sup>[39]</sup>研究认为, 平均风速和大风日数的减少可能和北半球不同纬度地带的差异变暖有密切联系。王新敏等<sup>[40]</sup>研究指出, 20世纪后半叶, 北半球冬季温带气旋频数呈现出中高纬度增加, 中低纬度减少的变化特点, 且人类活动导致的全球变暖可能是造成北半球气旋路径向北偏移的主要原因, 而任国玉等<sup>[16]</sup>和江滢等<sup>[38]</sup>认为气旋活动减弱可能会导致风速减弱, 这与气温增加会导致风速的减小的结论相对应, 且与风速在中纬度地区减少, 在高纬度地区增加<sup>[41]</sup>的事实相符。

### 2.1.2 各区域风速时间变化特征

在前文划分的七个区域中, 东北区年平均风速最大, 为 $2.74\text{ m/s}$ , 其次是高原区, 为 $2.40\text{ m/s}$ , 西南区最小, 为 $1.67\text{ m/s}$ 。各区域年平均风速按大小排序为: 东北>高原>华北>西北>长江中下游>华南>西南 (表3)。

各区域风速的季节分布有所不同, 除华南区外, 其余区域春季平均风速均明显大于其他季节。华南地区平均风速的季节差异较小, 且其中冬季平均风速最大。分析原因是春季为我国气旋活动最频繁的季节, 在北方气旋中, 蒙古气旋和东北低压出现频数较多<sup>[42]</sup>, 发展较强的蒙古气旋在其任何部位都可以出现大风, 因此东北区、华北区、西北区春季风速较大。冬季亚洲大陆受蒙古高压控制, 这类高压进入我国的路径有四条, 三北地区是冷高压入侵中国的前沿, 从三北地区向南, 冷空气逐渐变暖, 此时气压差也变小, 因此风速由北向南逐渐减小<sup>[43]</sup>。

各区域全年及四季风速变化趋势如表3所示。七个区域的年平均风速下降趋势按大小排序为: 高原>东北>西北>长江中下游>华南>西南>华北。高原区年平均风速下降趋势最为明显 (图5), 下降速率为 $-0.206\text{ m/s/10 a}$ , 其次为东北区, 下降速率为 $-0.188\text{ m/s/10 a}$ , 华北区的下降速率最小, 为 $-0.113\text{ m/s/10 a}$ 。七个区域的春季平均风速的下降趋势均明显



注: 左图黑点表示通过0.05显著性检验的站点, 红色‘+’是未通过的, 相关系数 $R$ 均通过0.05显著性检验。

图4 1979-2014年平均风速与年平均风速变化趋势及年平均风速与年平均气温的时间序列

Fig. 4 Relationship between trends and annual mean of wind speed and time series of annual mean wind speed and annual mean temperature in China during 1979-2014

表3 各区域年及四季平均风速及其变化趋势

Table 3 Annual mean and trend of surface wind speed in all sub-regions

	平均风速/(m/s)					变化趋势/(m/s/10 a)				
	年	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬
东北	2.74	3.38	2.41	2.63	2.53	-0.188	-0.234	-0.158	-0.205	-0.161
华北	2.23	2.76	2.06	1.96	2.15	-0.113	-0.145	-0.088	-0.110	-0.119
华南	2.09	2.11	2.01	2.05	2.18	-0.140	-0.160	-0.132	-0.124	-0.143
西北	2.20	2.62	2.30	1.96	1.92	-0.150	-0.192	-0.15	-0.139	-0.125
西南	1.67	2.01	1.59	1.43	1.66	-0.125	-0.187	-0.116	-0.088	-0.112
高原	2.40	2.84	2.25	2.06	2.43	-0.206	-0.302	-0.185	-0.167	-0.173
长江中下游	2.11	2.28	2.11	1.96	2.09	-0.147	-0.167	-0.141	-0.133	-0.150
全国	2.14	2.48	2.06	1.95	2.06	-0.142	-0.180	-0.130	-0.129	-0.135

大于其余三个季节，尤以高原区和西南区为甚。

2.2 风速的空间变化特征

2.2.1 风速的空间分布特征

从1979-2014年全国多年平均风速空间分布来看（图6a），中国绝大多数台站平均风速在1~3 m/s范围内，其台站个数为1896个，约占所研究站点的84%。平均风速大于4 m/s的台站仅有58个，约占所研究站点的3%。平均风速大于3 m/s的台站主要分布在三北地区、高原区及沿海地区，西南区大多数台站的平均风速都小于2 m/s。从1979-2014年中国大陆各省份的平均风速及变化趋势来看，内蒙古多年平均风速为3.08 m/s，其中多数台站的平均风速均大于3 m/s，是我国大陆地区平均风速最大省份。上海市平均风速仅次于内蒙古，为2.81 m/s。重庆市平均风速仅1.25 m/s，是大陆地区平均风速最小的省份。以重庆为中心，其周边地区风速均较小（包括陕西南部、四川东部、贵州北部、湖南西部及湖北西部），该地区平均风速普遍小于2 m/s，且全国平均风速小于1 m/s的台站大多都位于该区域内。

风速总体空间分布特征为：三北地区风速大，而南方地区风速小；青藏高原和内蒙古高原风速大，而四川盆地风速小；东南沿海、山东沿海及两广沿海等沿海地区风速大，而越向内陆风速越小。该特征与段春锋<sup>[44]</sup>研究特征相似。

从四季多年平均风速空间分布图来看（图6b~图6e），各季节多年平均风速的空间分布特征与全年多年平均风速空间分布特征相似，但春季风速普遍大于其他三个季节，尤以云南东部、四川西部、华北南部及东北地区最为明显。西南区及华南区除云南东部及沿海地区外，大部分站点四季风速都较小。

风速的分布与地形以及控制我国气候的天气系统有关，内蒙古地区的地势较为平

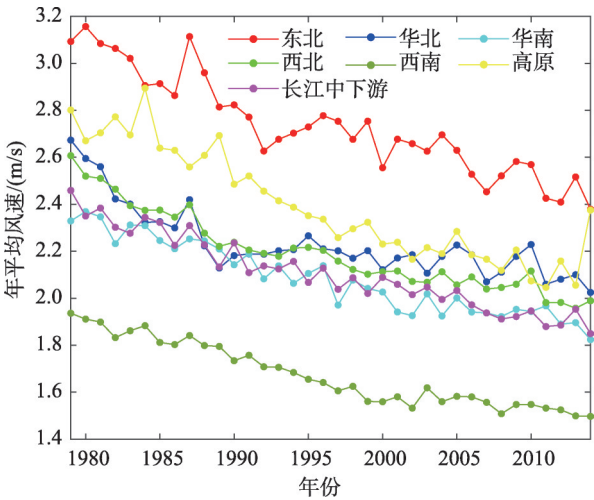


图5 1979-2014年各区域年平均风速时间序列

Fig. 5 Time series of annual mean wind speed in all sub-regions during 1979-2014

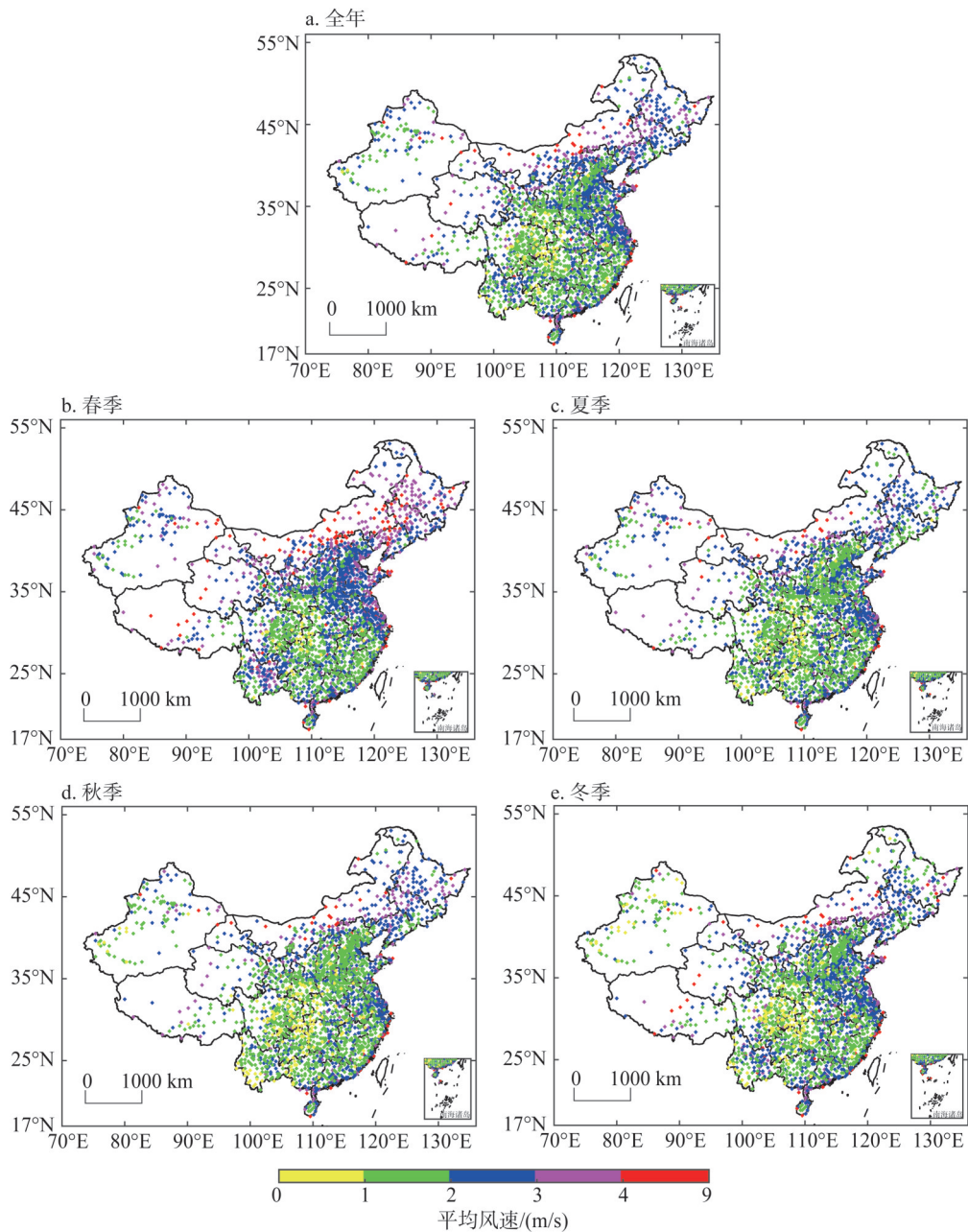


图6 1979-2014年中国平均风速空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of annual and seasonal mean wind speed in China during 1979-2014

坦，寒潮大风和气旋大风易对其造成影响。东北平原是东北地区主要的风速大值区，该地区常年受到西风带控制且冬半年受蒙古高压、东北低压影响较大。高原地区海拔高，地形开阔，尤其是冬半年受西风带以及西北气流的影响，风速较大<sup>[45]</sup>。

2.2.2 风速变化趋势的空间分布特征

从1979-2014年全国年平均风速变化趋势的空间分布来看（图7a），全国大部分台站

的风速呈减少趋势，共1868个，约占所研究台站的82%，其中通过0.05显著性检验的有1523个，约占总数的67%；呈增加趋势的共400个，通过0.05显著性检验的仅有185个。绝大多数台站的变化趋势都在-0.4~0.1 m/s/10 a范围内，共1996个。从风速年代际变化来看（表4），下降趋势较大（-2.0~-0.4 m/s/10 a）的站点的个数明显减少，表明风速下降趋势在减缓，此结论与各区域风速时间变化特征的结论相对应，整体来看，风速变化趋势有集中的倾向。高原区及东北区风速减弱趋势较明显，而华北区南部及西南区东部风速变化趋势较不明显。从中国大陆各省份的平均风速变化趋势来看，黑龙江、西藏、海南、上海、宁夏及内蒙古减小趋势最大，均超过了-0.2 m/s/10 a，且上海风速减小趋势最大，为-0.34 m/s/10 a；陕西、重庆及福建减弱趋势最小，均小于-0.1 m/s/10 a，且重庆减小趋势最小，仅-0.06 m/s/10 a。

表4 各年代不同风速变化趋势范围的台站个数  
Table 4 The number of stations classified by trend of wind speed in different periods

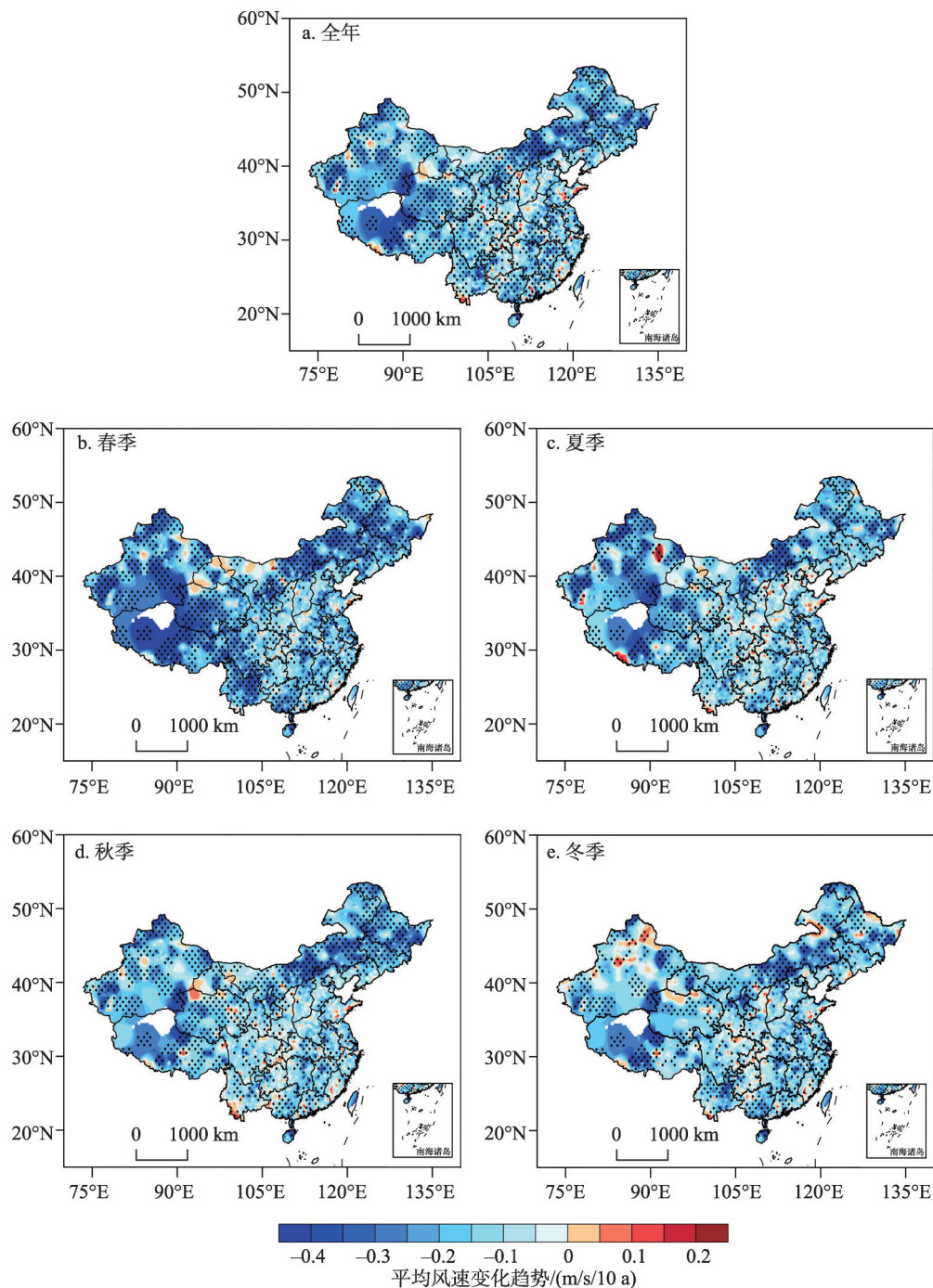
风速变化趋势范围/(m/s/10 a)	1980-1989年	1990-1999年	2000-2014年
-2.0~-0.4	716	497	333
-0.4~-0.2	506	417	484
-0.2~0	484	516	641
0~0.2	327	390	463
0.2~2.0	235	448	347

四季平均风速变化趋势空间分布特征与全年平均风速变化趋势空间分布特征相似（图7b~图7e），总体上高原区和东北区减弱趋势较明显，而华北区南部及其往西南方向至贵州一带风速变化较不明显，且新疆北部地区风速呈增趋势的站点在冬季明显增多。春季平均风速整体减弱趋势明显强于其他三个季节，春季呈减少趋势的站点共1945个，夏秋冬季节分别为1778个、1805个和1786个，其中通过0.05显著性检验的站点分别有1691个、1565个、1577个及1501个。

3 结论与讨论

- （1）1979-2014年全国多年平均风速为2.14 m/s。4月平均风速最大，9月平均风速最小。季节上呈现“春季大而夏秋冬季小”的特征。风速空间分布特征为：三北地区风速大，而南方地区风速小；青藏高原和内蒙古高原风速大，而四川盆地风速小；东南沿海、山东沿海及两广沿海等沿海地区风速大，而越向内陆风速越小。
- （2）1979-2014年年平均风速呈现显著减弱趋势，变化速率为-0.142 m/s/10 a。季节上呈现“春季大而夏秋冬季小”的特征。从年代际变化来看，风速下降趋势在减缓。从空间分布上来看，全国约82%的台站风速呈减弱趋势，高原区及东北区风速减弱趋势较明显，而华北区南部及西南区东部风速变化趋势较不明显。
- （3）年平均风速与其变化趋势及年平均气温之间存在显著的负相关关系，即风速越大，其变化趋势越大，这也在一定程度上表明气温增加会导致风速减少。
- 本文采用线性回归、Cressman插值等方法，基于2268个国家级台站的风速月值数据，分析了气候变暖背景下中国近36年风速变化的时间和空间特征，但未对风速变化的





注：黑点表示通过0.05显著性检验的站点。

图7 1979-2014年中国平均风速变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of changing trend of annual and seasonal mean wind speed in China during 1979-2014

原因进行深入探讨。前人的研究中对风速变化原因的探讨总体可分为气候系统内部相互作用及人类活动影响两部分，其影响及贡献分析等值得今后做更加深入的探究。

## 参考文献(References):

- [1] 廖顺宝, 刘凯, 李泽辉. 中国风能资源空间分布的估算. 地球信息科学学报, 2008, 10(5): 551-556. [LIAO S B, LIU K, LI Z H. Estimation of grid based spatial distribution of wind energy resource in China. Journal of Geo-Informaton Science, 2008, 10(5): 551-556.]
- [2] 郑崇伟, 潘静. 全球海域风能资源评估及等级区划. 自然资源学报, 2012, 27(3): 364-371. [ZHENG C W, PAN J. Wind energy resources assessment in global ocean. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3): 364-371.]
- [3] 秦大河, THOMAS S. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. [QIN D H, THOMAS S. Highlights of IPCC Working Group I Fifth Assessment Report. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(1): 1-6.]
- [4] IPCC. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011.
- [5] 郑崇伟. 21世纪海上丝绸之路: 风能的长期变化趋势. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(3): 399-405. [ZHENG C W. Wind energy trend in the 21<sup>st</sup> Century Maritime Silk Road. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(3): 399-405.]
- [6] 郑崇伟. 21世纪海上丝绸之路: 风能资源详查. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(1): 16-22. [ZHENG C W. Wind energy evaluation of the 21<sup>st</sup> Century Maritime Silk Road. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(1): 16-22.]
- [7] 郑崇伟, 高悦, 陈璇. 巴基斯坦瓜达尔港风能资源的历史变化趋势及预测. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(4): 617-626. [ZHENG C W, GAO Y, CHEN X. Climatic long term trend and prediction of the wind energy resource in the Gwadar Port. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(4): 617-626.]
- [8] 毛慧琴, 宋丽莉, 黄浩辉, 等. 广东省风能资源区划研究. 自然资源学报, 2005, 20(5): 679-683. [MAO H Q, SONG L L, HUANG H H, et al. Study on the wind energy resource division in Guangdong province. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 679-683.]
- [9] MCVICAR T R, RODERICK M L, DONOHUE R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. Journal of Hydrology, 2012, 416(3): 182-205.
- [10] VAUTARD R, JULIEN C, PASCAL Y, et al. Northern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 756-761.
- [11] PRYOR S C, BARTHELMIE R J, TAKLE G S. Wind speed trends over the contiguous USA. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114, D14105, Doi: 10.1029/2008JD011416.
- [12] ADDICKS K. An analysis of temperatures and wind speeds above Dome C, Antarctica. Astronomy & Astrophysics, 2005, 415(2): 739-746.
- [13] TURNER J, STEVE R C, GARETH J M, et al. Antarctic climate change during the last 50 years. International Journal of Climatology, 2005, 25(3): 279-294.
- [14] 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. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(2): 209-222.
- [15] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236. [WANG Z Y, DING Y H, HE J H, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. Acta Meteor Sinica, 2004, 62(2): 228-236.]
- [16] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. [REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942-956.]
- [17] XU M, CHANG C P, FU C B, et al. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed. Journal of Geophysical Research, 2006, 111, D2411, Doi: 10.1029/2006JD007337.
- [18] FU G B, YU J J, ZHANG Y C, et al. Temporal variation of wind speed in China for 1961-2007. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 104(3-4): 313-324.
- [19] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化监测公报. 北京: 气象出版社, 2014. [National Climate Center. China Climate Change Monitoring Bulletin. Beijing: China Meteorological Press, 2014.]
- [20] JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z C, et al. Changes in wind speed over China during 1956-2004. Theoretical & Applied Climatology, 2010, 99(3-4): 421-430.
- [21] GUO H, XU M, HU Q. Changes in near-surface wind speed in China: 1969-2005. International Journal of Climatology, 2011, 31(3): 349-358.
- [22] CHEN L, LI D, PRYOR S C. Wind speed trends over China: Quantifying the magnitude and assessing causality. International Journal of Climatology, 2013, 33(11): 2579-2590.
- [23] YOU Q L, KANG S C, FLUGEL W A, et al. Decreasing wind speed and weakening latitudinal surface pressure gradients in the Tibetan Plateau. Climate Research, 2010, 42(1): 57-64.

- [24] 刘苏峡, 邱建秀, 莫兴国. 华北平原1951年至2006年风速变化特征分析. 资源科学, 2009, 31(9): 1486-1492. [LIU S X, QIU J X, MO X G. Wind velocity variation from 1951 to 2006 in the North China Plain. Resources Science, 2009, 31(9): 1486-1492.]
- [25] 金巍, 任国玉, 曲岩, 等. 1971-2010年东北三省平均地面风速变化. 干旱区研究, 2012, 29(4): 648-653. [JIN W, REN G Y, QU Y, et al. Change in surface mean wind speed of Northeast China during the period of 1971-2010. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 648-653.]
- [26] 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. 生态学报, 2014, 34(2): 471-481. [ZHANG Z B, YANG Y, ZHANG X P, et al. Wind speed changes and its influencing factors in Southwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 471-481.]
- [27] 唐宝琪, 延军平, 刘永林, 等. 全球气候变暖下华东4省1市风速变化特征. 浙江大学学报: 理学版, 2015, 42(5): 575-583. [TANG B Q, YAN J P, LIU Y L, et al. The various characteristics about wind speed of Shandong, Jiangsu, Anhui, Zhejiang provinces and Shanghai in the East China under the global warming. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2015, 42(5): 575-583.]
- [28] 黄小燕, 张明军, 王圣杰, 等. 西北地区近50年日照时数和风速变化特征. 自然资源学报, 2011, 26(5): 825-835. [HUANG X Y, ZHANG M J, WANG S J, et al. Characteristics of variation in sunshine duration and wind speed in the last 50 years in Northwest China. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 825-835.]
- [29] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 近50年中国风速减小的可能原因. 气象科技展, 2016, 6(3): 106-109. [ZHAO Z C, LUO Y, JIANG Y, et al. Possible reasons of wind speed decline in China for the last 50 Years. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(3): 106-109.]
- [30] 陈练. 气候变暖背景下中国风速(能)变化及其影响因子研究. 南京: 南京信息工程大学, 2013. [CHEN L. Changes and their impact factors of wind speed (energy) over China under the background of climate warming. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.]
- [31] 李艳, 王元, 储惠芸, 等. 中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响. 科学通报, 2008, 53(21): 2646-2653. [LI Y, WANG Y, CHU H Y, et al. Climate variability of surface wind energy resources and influence of human-induced changes in underlying surfaces in land area of China. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(21): 2646-2653.]
- [32] 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. 高原气象, 2012, 31(6): 1645-1652. [LIU X F, LIANG X H, REN G Y, et al. Impact of the observational environment change on surface wind speed in China. Plateau Meteorology, 2012, 31(6): 1645-1652.]
- [33] 刘小宁. 我国40年年平均风速的均一性检验. 应用气象学报, 2000, 11(1): 27-34. [LIU X N. The homogeneity test on mean annual wind speed over China. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(1): 27-34.]
- [34] 曹丽娟, 鞠晓慧, 刘小宁, 等. PMFT方法对我国年平均风速的均一性检验. 气象, 2010, 36(10): 52-56. [CAO L J, JU X H, LIU X N, et al. Penalized maximal  $F$  test for the homogeneity study of the annual mean wind speed over China. Journal of Meteorological Research, 2010, 36(10): 52-56.]
- [35] DUDANI S A. The distance-weighted  $k$ -nearest-neighbor rule. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1976, 6(4): 325-327.
- [36] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术: 第2版. 北京: 气象出版社, 2007. [WEI F Y. Modern Climate Statistic Diagnosis and Prediction Technology. 2<sup>nd</sup> edition. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]
- [37] CRESSMAN G P. An operational objective analysis system. Monthly Weather Review, 1959, 87(10): 367-374.
- [38] 江滢, 罗勇, 赵宗慈, 等. 近50年中国风速变化及原因分析//中国气象学会年会, 2007. [JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z C, et al. Analysis of wind speed changes and reasons in China in recent 50 years. In: The Annual Meeting of Chinese Meteorological Society, 2007.]
- [39] 张莉, 任国玉. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析. 气象学报, 2003, 61(6): 744-750. [ZHANG L, REN G Y. Change in dust storm frequency and the climatic controls in Northern China. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(6): 744-750.]
- [40] 王新敏, 邹旭恺, 翟盘茂. 北半球温带气旋的变化. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 154-157. [WANG X M, ZOU X K, ZHAI P M. Researches on extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(3): 154-157.]
- [41] 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 全球大风在减少吗?. 气候变化研究展, 2011, 7(2): 149-151. [ZHAO Z C, LUO Y, JIANG Y. Is global strong wind declining?. Advances in Climate Change Research, 2011, 7(2): 149-151.]
- [42] 王艳玲, 郭品文. 春季北方气旋活动的气候特征及与气温和降水的关系. 大气科学学报, 2005, 28(3): 391-397. [WANG Y L, GUO P W. Climatic characteristics of northern cyclone activity in spring and their relationship to rainfall and temperature in China. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(3): 391-397.]
- [43] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2000: 131-145. [ZHU Q G, LIN J R, SHOU S W, et al. Principles and Technique of Synoptic Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 131-145.]

- [44] 段春锋. 中国地面风速变化及其影响因子的研究. 南京: 南京信息工程大学, 2009. [DUAN C F. Study on the variation of surface wind speed and its affecting factors in China. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2009.]
- [45] 田莉. 中国北方地区地面风速变化特征及其影响因子研究. 兰州: 兰州大学, 2012. [TIAN L. Studies on characteristics and impact factors of the surface wind speed changes in the Northern China. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]

## The long-term trend of surface wind speed in China from 1979 to 2014

WANG Nan, YOU Qing-long, LIU Ju-ju

(Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD); Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST), Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Based on the monthly homogenized data, this paper explored the spatial and temporal changes of surface wind speed of 2268 stations in China during 1979-2014. In this paper, the linear regression and the five-point moving average are used to examine the trend of the climate change. The Pearson correlation coefficient is used to analyze the correlation. The Cressman interpolation method commonly used in meteorological data is adopted to interpolate the site data to grid data. In order to study the changes of surface wind speed in different parts of the country, China is divided into seven regions. The results are shown as follows. The mean surface wind speed in China generally showed a significant downward trend with an annual rate of  $-0.142$  m/s/10 a, and it decreased with the largest trend magnitude in spring ( $-0.18$  m/s/10 a), followed by winter ( $-0.135$  m/s/10 a), summer ( $-0.13$  m/s/10 a) and autumn ( $-0.129$  m/s/10 a). Furthermore, about 82% (1868) of the selected stations showed a downward trend of surface wind speed. The significantly declining trend was found in the Tibetan Plateau and northeastern sub-regions classified in this paper, with the declining trend in North China being the smallest, and all passed the 0.05 significance test. In terms of interdecadal changes, the downward trend is slowing down. The declining trend of the whole country was most significant in the 1980s ( $-0.235$  m/s/10 a), and was slowed down to  $-0.112$  m/s/10 a in the 1990s, then turned to the smallest in 2000-2014 with a rate of  $-0.099$  m/s/10 a. During the study period, there was a significant negative correlation between surface wind speed and surface air temperature, indicating that the recent warming of China may cause the wind speed to weaken.

**Keywords:** surface wind speed; linear regression; spatial and temporal variations; homogenized data