

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. 应用气象学报,2020,31(1):1-12.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200101

气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展

丁一汇¹⁾²⁾³⁾* 李霄¹⁾²⁾⁴⁾ 李巧萍³⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

²⁾(中国科学院大学,北京 100049)

³⁾(国家气候中心,北京 100081)

⁴⁾(中电投电力工程有限公司,上海 200233)

摘 要

气候变暖背景下,中国地面风速在过去几十年整体呈减弱趋势,对风能资源开发产生了显著影响。近 50 年来,中国地面风速平均减小速率为 $0.10\sim 0.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/(10\text{ a})$,但存在明显的季节、区域和风速段差异。作为地面风的主要驱动力,对流层低层气压梯度力整体呈减弱趋势,这主要是全球变暖背景下欧亚大陆与西太平洋之间以及欧亚大陆高/低纬度地区之间的热力差异减弱所致。东亚季风的年代际变化特征和地面风速变化密切相关,其变率受到不同时间和空间尺度气候因子的影响,其中西伯利亚高压减弱是东亚冬季风减弱的主要因素,而东亚夏季风的年代际减弱主要是由于太平洋年代际振荡与北大西洋年代际尺度振荡分别向暖/冷相位的转换。研究表明:未来随着温室气体排放量增加,中国地面风速减弱趋势将更显著,这将促进低风速风电技术的发展和低纬度地区风能开发。

关键词: 地面风速; 风能; 气候变暖; 气压梯度; 东亚季风

引 言

作为可再生能源的重要组成部分,风能在世界能源体系清洁化转型过程中发挥着关键作用。中国风能资源开发潜力大,分布面积广,近年来发展迅速。截至 2018 年底,风电累计装机容量达 $1.84\times 10^8\text{ kW}$,成为我国第三大电力来源^[1],未来仍将是清洁能源发展的重点。但大量研究表明:近几十年中国多数地区地面风速总体上呈减弱趋势^[2-10],地面风速减小对风能资源开发将产生重大影响^[11],因此,有必要研究其成因和未来变化趋势。

关于中国地面风速减小可能原因的研究,主要从自然和人类强迫两个方面展开。王遵娅等^[2]认为冬季显著增暖导致中国寒潮发生频率和强度减弱,另外,中国大陆气压的增加,减小了与西伯利亚高压的气压差,也使得冬季风减小。江滢等^[3]认为亚洲

纬向环流加强、经向环流指数减弱,导致东亚季风减弱,是中国平均风速减小的主要原因。除上述原因外,赵宗慈等^[12]还论述了南海季风、南亚季风减弱趋势的影响,以及温带气旋和西北太平洋台风呈减少趋势等可能原因。李艳等^[13]通过对中国地面观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料中风功率密度长期变化趋势差异的比较(OMR 方法),提出人类活动导致的下垫面变化是中国陆地地面风能变化的主要原因。查进林^[14]也采用 OMR 方法定量评估了中国地面风速受土地利用影响的程度,认为城市化率每增加 10%,相应地区的风速将降低约 $0.11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。刘学锋等^[15]发现城市化和观测环境改变对河北地面风速变化贡献约为 25%。

近百年来,全球气候持续变暖成为气候变化的主要特征^[16],根据世界气象组织发布的《2016 年全球气候状况声明》,2016 年全球地表平均温度比 1961—1990 年平均值(14.0°C)高出 0.83°C ,从 20 世

2019-09-27 收到,2019-11-28 收到再改稿。

资助项目:国家重点研发计划重点专项(2018YFC1505806),国家自然科学基金重大项目(41790471)

* 邮箱: dingyh@cma.gov.cn

纪80年代中期开始,全球表面平均温度以 $0.2^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 左右的速率上升。亚洲陆地表面温度的上升趋势与全球一致,升温速率达 $0.28^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 。而过去几十年,中国地面风速的变化与地面温度具有较好的负相关关系^[17],在空间分布上,这种负相关也有明显体现,中国变暖最明显的 40°N 以北地区^[18],年平均风速、大风日数、沙尘日数的减小最多,而变暖较弱的西南地区,其年平均风速减小较少^[3,9,19]。气候变暖和地面风速减弱之间是否有直接联系,以及气候变暖背景下,影响地面风速的主要因素发生的变化值得探讨,本文对近年来国内外的相关研究成果进行了梳理,着重阐述海陆热力-气压差异、东亚季风变率和相关气候因子的改变如何影响地面风速变化,从而揭示中国地面风速的长

期变化特征和主要原因以及未来可能的变化趋势,为风能资源的可持续开发提供参考。

1 中国地面风速的变化特征

1.1 总体趋势

近几十年来,中国地面风速总体呈减弱趋势,该特征被国内外众多研究所揭示(表1、图1)。尽管不同研究所用观测台站数不同,研究时间段也有一定差异,但中国地面风速减小的趋势一致,全国平均减小速率为 $0.1\sim 0.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/(10\text{ a})$,部分区域可达 $0.29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/(10\text{ a})$ 。图1给出了1961—2016年中国平均风速变化距平(相对于1971—2000年)。可见,地面风速的减弱趋势上,叠加了显著的年代际波

表1 近几十年中国年平均地面风速变化研究结果统计

文献	气象站分布	时段	风速变化/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/(10\text{ a}))$
文献[2]	全国区域(729站)	1954—2000年	-0.11
文献[4]	全国区域(323站)	1951—2002年	-0.10
文献[5]	东北地区(87站)	1961—2010年	-0.25
文献[6]	长江流域(128站)	1960—2015年	-0.065
文献[7]	北方风蚀区(155站)	1971—2015年	-0.17
文献[8]	新疆地区(10站)	1984—2013年	-0.29(最大)
文献[13]	全国区域(604站)	1960—1999年	-0.12
文献[17]	全国区域(305站)	1969—2000年	-0.22
文献[20]	全国区域(726站)	1969—2005年	-0.18
文献[21]	全国区域(472站)	1960—2009年	-0.1
文献[22]	全国区域(大于700站)	1961—2014年	-0.13
文献[23]	全国区域(535站)	1956—2004年	-0.12
文献[24]	全国区域(540站)	1971—2007年	-0.17
文献[25]	全国区域(524站)	1958—2015年	-0.109
文献[26]	京津冀地区(154站)	1978—2014年	-0.1(冬季)

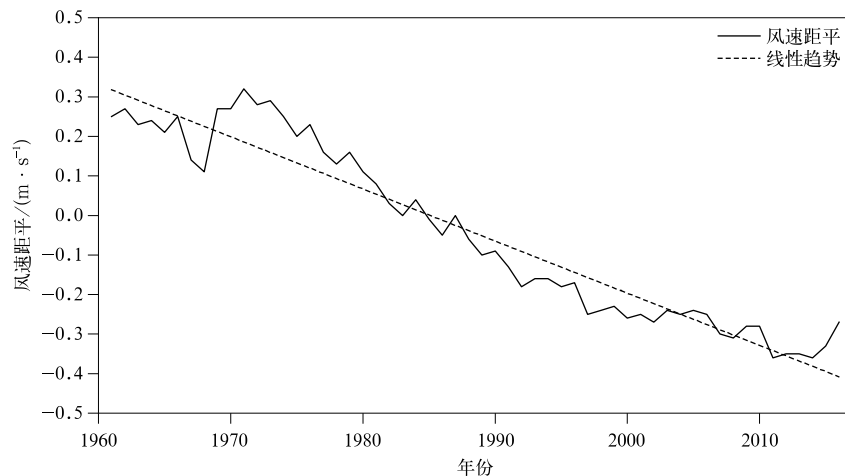


图1 1961—2016年中国地面气象站10 m高度年平均风速距平^[22]

Fig. 1 Annual mean surface wind speed anomalies over China from 1961 to 2016(from Reference [22])

动,20世纪60年代到80年代初期风速为正距平,之后转为负距平。Guo等^[20]研究显示,1990年风速下降速率发生了转折,之后的下降速率明显变小;Lin等^[21]将风速变化趋势分为1960—1973年(上升)、1974—2001年(下降)、2002—2009年(变化趋势不显著)3个阶段。

1.2 空间分布

从空间分布看,风速减小体现在中国大部分地区,但空间差异明显^[20]。其中,内蒙古中西部、黑龙江西南部、辽宁西南—河北东北部、甘肃西北部—青海北部、新疆天山地区和南部等北方地区、浙江与福建沿海以及西藏的东南部风速降幅大^[20],西北地区东部、黄淮及长江中下游地区降幅较大,西南和华南降幅低于全国平均水平^[2],降幅最小的是四川盆地^[20]、长江中上游地区^[6],而云南中西部、重庆南

部、贵州西南部、广西西部、甘肃南部等局部地区则存在风速增加的情况,多数区域位于西南^[25]。

从海拔高度看,地面风速变化速率与海拔高度呈正相关,在风速增加阶段,高海拔地区风速增加速率高于低海拔地区,在风速减弱阶段,其减弱速率也高于低海拔地区。这说明地表风速对地形高度的变化更为敏感^[21]。

1.3 季节变化

从季节分布看,中国地面风速减小在4个季节均有体现,但存在明显差异,总体上春季、冬季风速下降趋势高于夏季、秋季^[2]。其中,春季下降速率最高,达 $0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$;冬季次之,为 $0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,夏季降幅最低,仅为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ ^[20](图2)。

从不同风速段变化情况看,地面各风速段在全

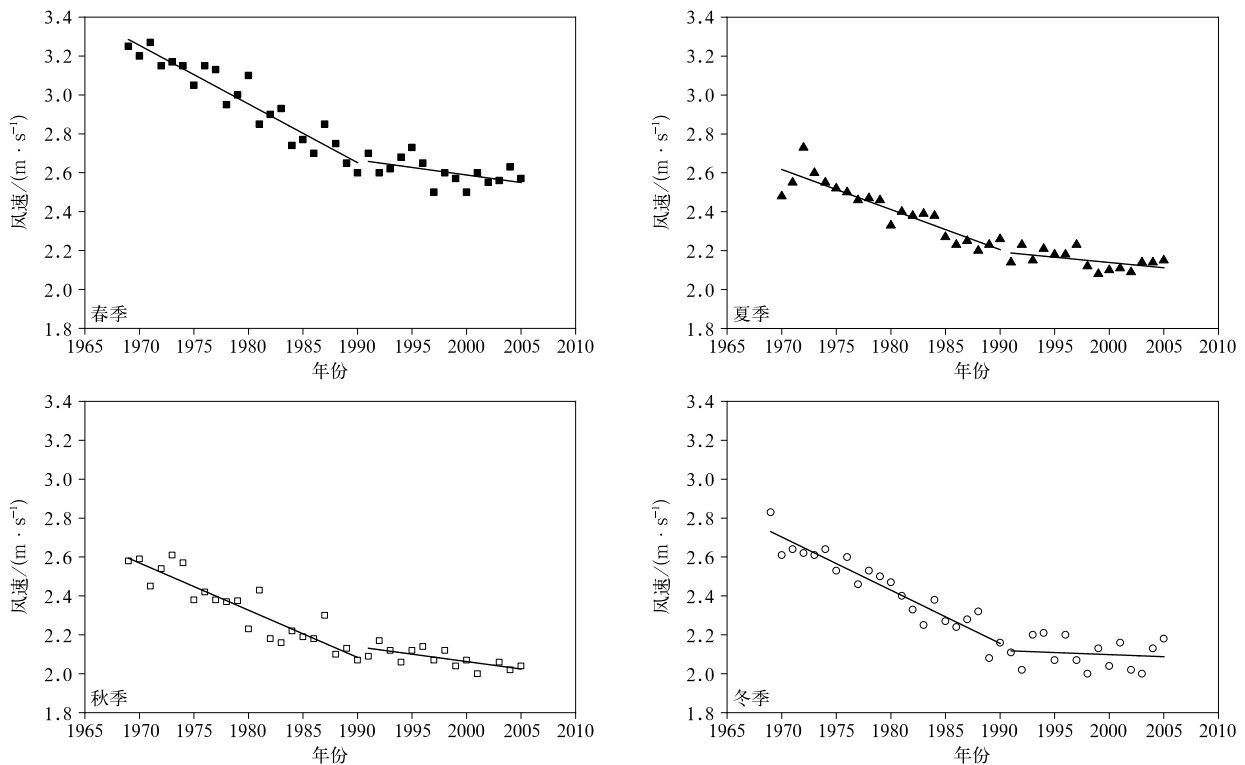


图2 1969—2005年中国季节平均地面风速时间演变(1990年为变化趋势分界点,数据源自文献^[20])

Fig. 2 Temporal variations of seasonal mean wind speed averaged in China from 1969 to 2005(1990 is the turning point, data from Reference ^[20])

年均有下降,但高风速段下降更显著,风速较高的冬春两季,下降程度也较高^[20]。Jiang等^[27]对最大风速变化趋势的研究显示:春季最大风速的下降幅度最高,达到 $1.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,相应地,阵风与寒潮日数、沙尘暴次数也有所减少。

2 中国地面风速变化原因

风的本质是大气的运动,从动力学角度看,驱动力和阻力的改变是导致风速变化的关键因素^[28]。

2.1 地面拖曳力的增加

地面拖曳力的增加主要是由于下垫面(地表粗糙度)的改变,目前对风速减弱的研究主要集中在土地利用和城市化的影响。陈练^[24]采用城市站和乡镇站风速变化速率的差值,计算得到中国大中城市地区的城市化对风速减弱的贡献率约为18%。郑祚芳等^[29]采用经验正交函数分析(EOF)方法对近40年北京20个气象站地面风速资料进行了分析,结果表明:方差占比为27.1%的第2模态与站点下垫面以及和市区的距离有关,即反映了下垫面改变的影响。

值得注意的是,气候变暖促使全球中高纬度地区植被覆盖率上升,导致地表粗糙度增加,也是造成地面拖曳力增加的重要原因。Myneni等^[30]采用NOAA高分辨率气象卫星数据AVHRRs的分析表明:包括中国北部、西伯利亚东北部在内的全球45°~70°N纬度带归一化植被指数(NDVI)在1981—1991年上升速度高于全球其他纬度地区,而该地区同期地表温度上升,尤其是冬季和春季,这与前述风速减弱区域和季节减弱程度具有较好的一致性。张学霞等^[31]研究也表明:1982—1999年中国植被呈增加趋势的区域约为68.1%,且这些区域和前述温度上升及风速减小的区域也有较高的重合度,尤其是35°~40°N纬度带。

但郑祚芳等^[29]研究表明:方差占比为60.2%的第1模态与站点下垫面以及和市区的距离基本无关,所有站点资料的变化趋势具有较高的一致性,反映了气候系统内在变化因素的影响。另外值得注意的是,1990年前后中国地面风速变化速率发生了转折,虽然1990年以后中国城市化进程明显加速,风速下降速率却减小了^[20]。这说明地面风速减弱趋势虽与下垫面改变造成的拖曳力增加有关,但大气环流驱动力的减弱才是主导性因素。

2.2 气候变暖对气压/热力梯度力的影响

气压梯度力作为风的主要驱动力,其变化和地面风速存在明显的相关性。Zhang等^[25]的研究显示:东北亚850 hPa位势高度距平与北方地面纬向风在全年均呈显著负相关,其中秋季相关系数达到-0.725;中国南方与北方位势高度差距平和经向风在全年也呈显著负相关,在夏季与南方地面纬向风相关尤为显著,相关系数达到0.649。

气候变暖背景下,气压梯度力在过去几十年出现了明显的减弱。Guo等^[20]通过850 hPa地转风

研究气压梯度力变化,发现1969—2005年其秋季平均变化趋势为 $-0.059 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,冬季为 $-0.098 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。探空资料和再分析资料印证了这一点,张爱英等^[32]采用1980—2006年全国119个探空站14个等压面的月平均风速,分析了我国高空对流层风速变化的时间和空间特征,发现对流层中下层总的风速变化趋势为 $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。赵佳莹等^[33]利用1980—2008年中国103个探空站资料和多种再分析资料,也发现大部分地区对流层下层、中层和高层平均风速存在减弱趋势,且速率与Guo等^[20]计算结果基本一致。

气压梯度力的变化主要由热力梯度变化导致,两者相关系数达0.88^[21]。由于比热容的不同,陆地相对海洋对气候变暖的响应程度更高,这导致过去几十年东亚大陆与西太平洋间的冬季海陆热力差异的变率整体上发生了减弱,为了证实这一点,贺圣平^[34]引入了一个海陆热力差异指数,其定义为东亚大陆范围内表面温度的区域平均与西太平洋范围内海表温度异常的区域平均值之差。该指数的年际变化和滑动标准差在20世纪90年代中期前有明显的减弱过程。另外,杨明等^[35]对1957—2000年中国东部地区和附近海域850 hPa夏季海陆温差的分析,以及李霞等^[36]对南海与中国大陆的温差分析也均显示为递减趋势。

另外,欧亚大陆高纬度地区和低纬度地区变暖程度也存在差异,中国高纬度、低纬度地区间的500 hPa位势高度差以及温度差的年际变率与高空观测风速、地面风速的变化趋势同步^[21],且与上述海陆热力差异变率也基本一致。Xiong等^[37]的研究也反映了高纬度与低纬度间变暖程度的差异导致的西北风减弱,1961—2005年秋季50°N以北的西伯利亚地区气候变暖显著,其地面温度为正距平,而50°N以南区域升温相对较低,尤其是蒙古南部和中国内蒙古北部地区及塔里木盆地、中国西南部区域的地面温度为负距平,同期50°N以北地区的海平面气压场为负距平而以南地区为正距平,南北向气压梯度下降,由于中国秋季主要盛行西北风,导致风速减弱。

海陆热力差异、南北热力差异同时减小,无疑会造成东西向和南北向气压梯度力的同步减弱,进而减弱地面风速。Zhou等^[26]对1979—2015年京津冀地区冬季7个小风年的研究验证了这个结论。小风年期间欧亚大陆地表温度在高纬度地区呈正距

平,低纬度区域呈中性或负距平,同时,热带中东太平洋和北太平洋海表温度为正距平,而热带西太平洋海表温度为负距平,导致陆地和海洋间的热力梯度减弱。从海平面气压场以及 500 hPa 位势高度场的响应发现,欧亚大陆高纬度和中纬度地区间(南北向),以及乌拉尔山脉地区与中国东北—日本海区域(东西向)的气压差均减小^[26],两种情形分别造成北风和西风的减弱。

这些研究充分揭示了热力梯度-气压梯度-地面风速之间的同步关系,说明气候变暖背景下,对流层低层热力/气压梯度力的变化作为主要驱动力的减弱,是导致地面风速减弱的关键因素。

2.3 东亚季风的变化

中国位于典型季风区,地面风速变化很大程度上由东亚季风决定。季风主要受陆地和海洋之间的气压/热力梯度驱动,因此,季风区地面风速的变化与温度变化有必然联系,气候变暖背景下东亚季风发生了怎样的变化,进而影响地面风速,是人们关注的焦点。

从季节分布看,冬春两季地面风能资源占全年的 59%^[38],则首先讨论东亚冬季风变化。从低层风场看,东亚冬季风主要表现为亚洲东部中高纬度地区强劲的西北风和低纬度地区的东北风^[18],在过去几十年,东亚冬季风年代际变化特征十分显著^[39]。

对比东亚冬季风和中国地面温度、地面风速的时间序列,存在两个明显的共同点:一是 1985 年前后,之前季风整体偏强、温度偏低、风速偏高,之后季风转为偏弱、温度偏高、风速偏弱;二是 2005 年前后,季风又开始偏强,温度虽然偏高但冬季升温速率趋缓,风速仍偏弱但降低趋势不再明显。另外,值得注意的是,东亚冬季风从 1990 年开始,虽然仍为负距平(至 2005 年前后),但变化趋势发生了转折,开始由弱变强,中国冬季地面风速的变化对此也有响应,1990 年之后的减弱速率明显降低^[20]。

这种现象说明两个问题:一是冬季气温长期的变暖趋势上叠加的年代际的波动和东亚季风的波动具有较高的反相性,即冬季风的强弱与温度的变化整体上呈负相关^[40],邵鹏程等^[41]对 22 个冬季风指数和中国 160 个站 1948—2009 年冬季平均气温进行相关分析的结论与此相同,施晓晖等^[42]采用区域气候模式进行敏感性试验的结果也表明,东亚冬季风的年代际减弱可能与东亚大陆东部的年代际增温有关。二是东亚冬季风虽然和中国冬季地面风速的

变化走势不完全一致,但仍有显著影响。

东亚夏季风在 20 世纪 60 年代中期和 70 年代末分别发生了两次减弱,并一直持续到 90 年代中期,90 年代中期后有所增强,但总体仍处于较弱的状态^[43-44],与地面风速表现出较为一致的变化趋势。与冬季风不同的是,夏季风的减弱普遍被认为和全球变暖没有直接联系,而主要是自然的气候变化过程^[43-45]。

多数研究认为,全球变暖对东亚夏季风起增强作用^[46-48]。一方面,由于陆地对气候变暖的响应比海洋更显著,海陆热力差异增加,会增强夏季风环流;另一方面,由于北半球增暖强于南半球,也会影响北半球夏季跨赤道气流的强度,从而增强东亚夏季风。此外,北极增暖和海冰融化会减小北半球和中纬度地区间的经向气压梯度和热力梯度,导致中纬度地区西风急流减弱,经向环流加强,也有利于东亚夏季风增强^[49],但上述增强作用被自然减弱周期所掩盖。

最近有研究发现,气溶胶对东亚季风的减弱也有贡献,与温室气体有利于低层环流增强不同,气溶胶对低层环流主要起减弱作用,这是由于气溶胶引起的地表冷却效应减小了海陆温差^[49]以及位能和动能相互转化的影响^[50],Liu 等^[51]研究也表明,北半球硫酸盐气溶胶排放可能是导致东亚夏季风空前减弱的主要因素。

2.4 气候因子的变化

中国地处欧亚大陆东部,东临太平洋,由于海洋的比热容大于陆地,获得和失去热量比陆地要慢,冬季蒙古—西伯利亚陆地迅速降温,气流下沉形成西伯利亚高压。而此时低纬度地区和海上温度相对较高,气压相对较低,由此形成的气压梯度力是东亚冬季风的主要驱动力,其指数相关性达到了 0.8^[52]。在气候变暖背景下,西伯利亚高压指数在 1970—2003 年整体为负距平,其位置显著东移,这种变化在过去至少 400 年没有出现^[53],另外,西伯利亚高压面积异常和冬季北半球平均陆面温度的年代际分量变化有关,面积偏小时往往对应着温度偏高^[54]。分析表明:西伯利亚高压和地面经向风的相关性在春季、秋季、冬季都非常显著,其中冬季最高,达到 -0.745(春季和秋季分别为 -0.575 和 -0.663),但与地面纬向风相关性较弱,因此,西伯利亚高压对中国地面风速的影响主要体现在冬半年的北风,1958—2015 年西伯利亚高压总体变化趋势为

$-0.069 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$, 对应北风的变化趋势为 $-0.021 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ [25]。

北极涛动(Arctic Oscillation, 简称 AO)指数由海平面气压场 EOF 第 1 模态系数定义, 其强度变化与北半球中高纬度西风带以及中高纬度地区冬季温度密切相关 [55]。分析表明: AO 主要是通过影响 35°N 以北地区的表面温度、海平面气压和 500 hPa 东亚大槽, 进而影响东亚冬季风 [38]。 35°N 以北东亚地区的地表温度和 AO 指数呈明显的正相关, 因此, 气候变暖往往对应着 AO 指数偏强, 而 AO 指数和中国区域平均风速的年际变化具有很好的反相关关系, 这主要是由于 AO 能够调制北极地区近地面冷空气的运动, 在 AO 负位相且指数下降阶段, 极地近地面冷空气影响欧亚大部分地区, 随着冷空气东移可直接影响中国东北地区 and 寒潮关键区, 西伯利亚地区冷空气堆积, 加强了西伯利亚高压, 东亚大槽加强加深, 这种天气系统配合可诱发寒潮大风天气 [56]。而 AO 指数偏强的年份, 东亚西风急流的强度偏弱, 东亚中高纬度地区北风偏弱, 东亚冬季风偏弱, 中国地区同期地面风速易偏小 [24]。

太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation,

简称 PDO)是与 ENSO 形态类似的气候变化模态, 其周期约为 20~30 年, PDO 指数采用 20°N 以北太平洋海表温度距平的第 1 特征向量定义 [57]。PDO 指数在冬季和阿留申低压、蒙古高压存在同步“跷跷板”变化, 纬向海陆气压差也相应发生变化, 因此, PDO 与东亚冬季风的强度变化具有密切关系 [58]。冬季 PDO 指数与低通滤波的东亚冬季风指数的相关系数为 -0.55 (图 3), 同时与中国冬季大部分站点气温呈正相关 [39]。PDO 的冷暖位相转换对东亚冬季风年代际变率也具有显著影响, 20 世纪 70 年代中期, PDO 由冷位相向暖位相转换, 北太平洋海表温度减弱, 热带东太平洋和南印度洋海表温度升高, 东亚冬季风减弱 [59], 并一直持续至 1990 年前后。研究表明: PDO 和北大西洋年代际尺度振荡(AMO)的协同作用是东亚夏季风 30~40 年周期振荡的主要驱动因素, 20 世纪 60—70 年代 PDO 和 AMO 分别由冷位相和暖位相向暖位相和冷位相转换, 东亚夏季风发生了年代际减弱, 而 90 年代末情况相反 [43, 60]。另外, PDO 的位相转换对全球变暖速率有明显的影响, 当处于冷位相时, 气候变暖趋缓或停滞, 而在暖位相时, 气候变暖则会加速 [61]。

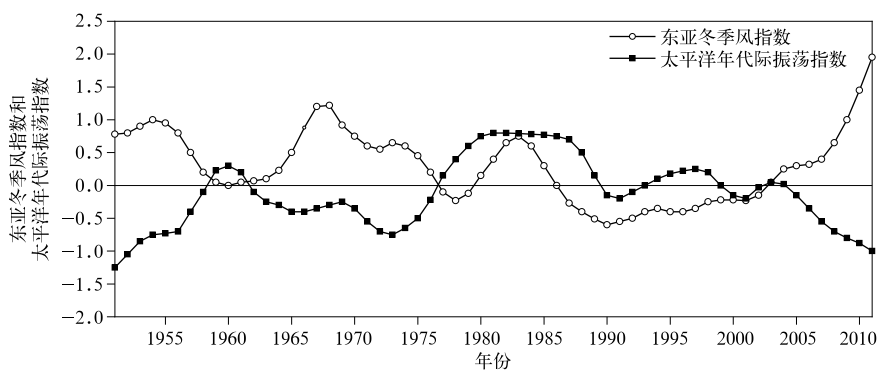


图 3 1951 年以来东亚冬季风指数与冬季北太平洋年代际振荡指数的时间序列 [39]

Fig. 3 Time series of the East Asian winter monsoon index and winter PDO index (from Reference [39])

ENSO 是海洋与大气相互作用中最强的年际变化信号。研究表明: ENSO 是亚洲季风年际变率的主要强迫因子, 在 El Niño 年, 东亚冬季风通常偏弱, 而在 La Niña 年偏强 [62-67]。从 El Niño 年冬季 500 hPa 高度距平场(图略)可知, 欧亚中高纬度为高度场负距平, 而东亚地区东部为高度场正距平, 即东亚大槽偏弱, 东亚冬季风偏弱, 偏北风和冷空气活

动均较弱; 而 La Niña 年冬季 500 hPa 高度场的分布相反, 乌拉尔山地区高度场为正距平, 东亚东部为负距平, 东亚冬季风偏强 [67]。东亚夏季风在 El Niño 的发展期通常偏弱, 在衰退期偏强, 而在 La Niña 发展期, 东亚夏季风通常偏强, 但衰退期偏弱的异常未通过显著性检验 [64]。

PDO 是 ENSO 年际变化的重要背景, PDO 暖

相位时,东南太平洋气压降低,有利于 El Niño 事件发生,而 PDO 处于冷位相时,有利于 La Niña 事件发生^[68]。1982—1983 年、1997—1998 年、2014—2016 年发生的 3 次超强 El Niño 事件,和 PDO 暖位相完全相对应,也验证了这一点。ENSO 对东亚季风的影响并非简单的线性关系,20 世纪 70 年代中期到 2000 年,ENSO 和东亚冬季风的关系减弱^[69],同期东亚冬季风和 PDO 的负相关关系也减弱,同期 AO 指数主要为负位相,考虑到其与东亚冬季风的负相关关系,这段时间东亚冬季风受到了 AO 和 PDO 不同位相的共同调制,但 AO 占据了主导^[34]。但东亚夏季风在 70 年代后与 ENSO 的相关性变得显著,这可能是由于 PDO 转换为暖位相,也可能和印度洋海表温度异常偏高以及西北太平洋对流层下部的反气旋增强有关^[48]。可见,东亚季风的变率受不同时间和空间尺度气候因子的协同影响。

3 中国未来地面风速变化趋势

相对于过去几十年中国地面风速的变化事实,人们更加关心未来的变化趋势,目前主要是通过改变气候模式中的排放情景进行预估。江滢等^[70]采用 CMIP5(CMIP3)的 23(19)个模式等权重集成,对 2006—2100 年近地层年平均风速变化趋势进行了预估。结果表明:中国年平均风速减小的程度随温室气体排放浓度增加而增加,同时预估风速减小的模式数量也随之增多(表 2)。从季节分布看,在 RCP8.5 情景下,21 世纪春季、秋季、冬季中国平均风速均呈减小趋势,而夏季上升;在 RCP2.5/4.5 情景下,秋季、冬季为减小趋势,春季、夏季为上升趋

势。Xiong 等^[37]研究也表明未来秋季风速呈减小趋势,其使用 110 km 水平分辨率的 BCC-CSM1.1m 模式对 2018—2100 年中国地面风速的模拟显示,在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,未来中国北方秋季风速呈下降趋势,其中 RCP8.5 情景下更为显著。

未来东亚季风变化趋势的预估结果普遍与上述地面风速趋势一致^[71]。姜大膀等^[46]对 CMIP5 模式中等排放情景下 10 m 高度纬向风定义的东亚冬季风进行了分析,结果显示:21 世纪东亚冬季风整体强度为略微减弱趋势,但 25°N 以北和以南分别显示为减弱和变强的不同趋势。同样采用 CMIP5 模式,王政琪^[72]对 500 hPa 位势高度定义的东亚冬季风分析也显示为减弱趋势,而 300 hPa 纬向风、850 hPa 风场及海平面气压梯度 3 个指数变化趋势不明显。东亚夏季风的模拟显示,2001—2030 年相对于 1961—1990 年呈增强趋势,尤其是东南季风^[73],另外,根据 850 hPa 经向风以及海平面气压计算,其强度在 21 世纪相对于 1980—1999 年略有增加^[46-47]。但 Liu 等^[74]指出,传统的多模式分析存在较大的标准偏差,采用集合模式回归(EPR)方法进行改进后,未来东亚夏季风在全球升温 1.5°C 和 2°C 情景下,呈明显的减弱趋势,这说明由于季风系统的复杂性,其未来变化趋势的预估仍存在较大的不确定性。未来年际尺度上季风的变率很可能增加,Cai 等^[75]利用 CMIP5 中的 17 个模式评估了在未来全球变暖的场景下 El Niño 的变化,发现太平洋东部强 El Niño 事件的数量将增加,Turner 等^[76]的研究也表明:正常季风年在气候变暖下将减少,偏弱和偏强的季风年将增加。

气候变暖背景下,并非所有地区的风速都呈减

表 2 多模式集合预估 2006—2100 年中国季节平均和年平均风速的变化趋势(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/(100 \text{ a})$)^[70]

Table 2 Annual and seasonal mean wind speed change trends projected by global climate model ensemble from 2006 to 2100 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/(100 \text{ a})$) (from Reference [70])				
时段	集合成员	RCP 2.5	RCP 4.5	RCP 8.5
春季	23 个模式集合	0.04	0.01	-0.04
	优选 6 个模式集合	0.01	0.04	-0.02
夏季	23 个模式集合	0.01	0.06	0.01
	优选 6 个模式集合	0.01	0.11	0.07
秋季	23 个模式集合	0.02	-0.02	-0.17
	优选 6 个模式集合	-0.04	-0.02	-0.16
冬季	23 个模式集合	0.02	-0.06	-0.11
	优选 6 个模式集合	-0.01	-0.01	-0.03
全年	23 个模式集合	0.01	-0.02	-0.06
	优选 6 个模式集合	0.00	0.00	-0.05

弱趋势,不同地区在不同时间尺度上的表现存在较大差异, Karnauskas 等^[77]采用 CMIP5 中的 10 个全球模式,分别在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下,对全球范围内风能资源未来的变化情况进行了模拟,发现 21 世纪(2020—2040 年、2080—2100 年)北半球中纬度地区的风速可能会降低,如日本、蒙古、北美、地中海地区,而热带地区和南半球则会增加,如巴西、澳大利亚、西非、南非等地区。

4 气候变化对风能资源开发的影响

作为风电行业的“燃料”,风速降低必将对风能资源开发产生重大影响。首先是资源开发潜力下降, Sherman 等^[38]利用 1979—2015 年 MEERA 再

分析资料对中国风能资源开发潜力的变化情况进行了较为细致的量化分析,并采用金风 1.5 MW 风电机组功率曲线将地面以上 80 m 高度可开发风能资源转化为发电量,结果表明:中国总体上风能潜力呈下降趋势(图 4),分区域(表 3)看,中国北方和东部沿海等风能开发较为集中区域降幅较高,其中内蒙古西部和甘肃北部的部分地区达到 15%~17%。

1971—2007 年各季节风能密度均呈下降趋势,但速率有所不同,其中春季最高,为 $9.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/(10 \text{ a})$,冬季为 $8.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/(10 \text{ a})$,秋季为 $6.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/(10 \text{ a})$,夏季最小,为 $4.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/(10 \text{ a})$ ^[24]。

风能资源潜力的下降必然影响风电技术发展和风电开发策略。首先,低风速风电机组将继续迅猛发展,采用更大的单位千瓦扫风面积和更高的塔筒,

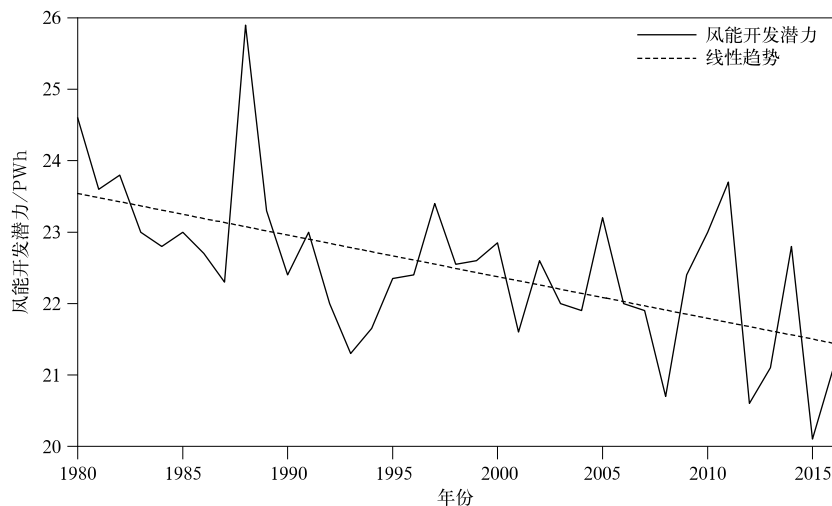


图 4 1979—2015 年中国风能开发潜力变化趋势^[38]

Fig. 4 Total electricity generation potential in China from 1979 to 2015 (from Reference [38])

表 3 1979—2015 年中国风电装机量较大地区
风能潜力变化幅度^[38]

Table 3 Decadal trends of wind potential in China
with abundant wind farms during 1979—2015
(from Reference [38])

区域	变化幅度/(%/10 a)
内蒙古西部	-15.3 ± 3.4
甘肃	-16.8 ± 4.4
内蒙古东部	-2.7 ± 2.7
新疆	-11.4 ± 2.9
黑龙江	-4.3 ± 3.2
河北	-8.0 ± 2.8
吉林	-9.0 ± 3.4
山东	-12.2 ± 3.3
江苏	-2.4 ± 3.3

设计更高气动效率的叶片及智能化控制系统,可有效提高风能利用效率,在役风场对叶片延长等技术的需求会进一步增加。其次,优先选择资源丰富的区域建设风场有助于获得更高的收益,但同时也需要充分评估气候变化对未来 25 年发电量的影响,以降低长期运营风险,如 2009 年建设的甘肃酒泉风电基地,由于对风速减弱估计不足,以及限电因素的叠加影响,项目投产后未达到设计收益水平。而对于低风速风电场,这种风险评估更为重要。因此,风资源评估和选址技术需要由静态的空间分布研究向空间分布与时间变化并重的方向发展,这有助于投资决策阶段财务内部收益率(IRR)的精确计算,该指标是风电场投资决策主要依据,通常情况下,IRR 达

到 8%~12%,项目才能通过投资决策。当电价一定时,发电量和初始投资对 IRR 影响最大^[78],其中发电量在主要风速区间内与风速的三次方成正比,风速变化幅度与 IRR 接近 1:1。但目前在设计阶段,气候变化导致的发电量不确定性通常只按照 3%考虑^[79],存在较大的低估风险。因此,国外的通常做法是引入发电量置信率的概念,对 IRR 进行修正,由于技术水平的限制,置信率一般取 P90 和 P75 等标准值^[78],未进一步细化,如果能够对风资源长期变化进行更准确的评估,则置信率的取值依据将更科学,项目的风险评估也将更可控。

气候的年际变化对风能也有明显影响。研究表明:ENSO 处于正位相期间,中国 55%地面台站的平均风速会低于多年平均水平^[80],因此,风电场在 El Niño 年输出功率明显低于常年,其中个别月份降低幅度可达到约 10%^[81]。对风电行业,这意味着未来“大小年”现象将更加严重,不利于发电计划与调度管理,未来通过短期和年际气候预测与风电场发电量预测技术的结合,将有助于该问题的解决。

5 结论和讨论

本文梳理了近年来关于中国地面风速变化方面的研究成果,对中国地面风速总体减弱的趋势进行了分析,讨论了气候变暖条件下,中国地面风速降低的原因,在此基础上对未来风速变化预测情况进行了论述,并分析了风速变化对风能资源开发的影响。得到以下主要结论:

1) 过去近 50 年中国地面风速、对流层低层风速整体上呈下降趋势,其中地面风速下降大于高空,地面高风速段下降幅度大于低风速段;风速变化存在明显的区域和季节差异,中国北方的大部分地区 and 东南沿海等地减弱幅度较大,西南地区减弱幅度较小;春季减弱幅度最大,夏季最小。

2) 气候变暖背景下,热力梯度、气压梯度、地面风速之间存在同步变化关系,说明对流层低层热力/气压梯度力作为主要驱动力,其减弱是导致地面风速减弱的重要因素。

3) 地面风速的变化和东亚季风密切相关,年代际尺度上,西伯利亚—蒙古地区地面温度升高大于西太平洋,西伯利亚高压和海陆气压梯度力的减弱是导致东亚冬季风减弱的重要原因,另外 AO 与 PDO 等气候因子也具有显著影响。PDO 和 AMO

的协同作用是东亚夏季风在 20 世纪 70 年代发生减弱的主要因素。年际尺度上,ENSO 是影响东亚季风变化的重要因子。因此,季风变率是不同时间尺度影响因子协同作用的结果,地面风速的变化也表现为多尺度变率的特征。

4) 基于不同排放情景条件的数值模拟研究显示:21 世纪东亚冬季风轻微减弱或趋势不明显,夏季风有所增强,但在空间和季节分布上均存在较大差异。地面风速的这种减弱趋势对风能开发潜力、投资策略、技术开发均可产生显著影响,未来风速的变化趋势和空间分布特征值得深入研究。

影响地面风速变化的因素较多,本文总结的研究内容主要集中在热力/气压梯度和东亚季风的变化,虽然多数研究成果认为气候变暖在过去几十年对东亚冬季风起减弱作用,但 2000 年后,北极变暖和海冰融化增加了准定常乌拉尔阻塞的发生频率,使欧亚中纬度地区温度出现负距平,对北半球冬季变暖起到了“冷却”作用,反而可能增强东亚冬季风^[82]。有学者提到,对季风未来变化的模拟存在较高的模式和指数依赖^[46],且模式间存在较大的偏差^[74],模式的分辨率也具有显著影响^[72],因此,对未来的预估还存在较大的不确定性。

气候因子变化、城市化和土地利用、气溶胶效应等因素本身也具有高度的复杂性,且与地面风速变化直接相关的研究有限,需进一步探讨。另外,随着风电装机规模的快速增加,中国已经形成了 7 个千万千瓦级别的风电基地,单个基地的空间分布达上百千米,且未来规划的规模更加宏大,这不仅会改变地表粗糙度,也将对大气的能量收支产生一定影响,其局地气候效应也值得关注。

参 考 文 献

- [1] 中国电力企业联合会. 2018 年全国电力工业统计快报数据一览表. [2019-01-22]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongj/tongjinxinxi/niandushuju/2019-01-22/188396.html>.
- [2] 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):229-236.
- [3] 江滢,罗勇,赵宗慈,等. 中国及世界风资源变化研究进展. 科技导报,2009,27(13):96-104.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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. 热带地理,2018,38(5):660-667.

- [7] 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.干旱区地理,2018,41(5):65-73.
- [8] 刘慧芝,徐长春,李佳秀,等.新疆地区最大风速变化及其环流指数验证分析.人民黄河,2017,39(8):19-25.
- [9] 张莉,丁一汇,任国玉.我国北方沙尘天气演变趋势及其气候成因分析.应用气象学报,2005,16(5):583-592.
- [10] 刘学锋,任国玉,梁秀慧.河北地区边界层内不同高度风速变化特征.气象,2009,35(7):46-53.
- [11] 陈城,任国玉.全球及中国风速变化及对风能影响的新认知.气候变化研究快报,2016,5(1):41-47.
- [12] 赵宗慈,罗勇,江滢,等.近50年中国风速减小的可能原因.气象科技进展,2016,6(3):106-109.
- [13] 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.
- [14] 查进林.中国地区土地利用/覆盖变化影响近地面风速的分析.昆明:云南大学,2015.
- [15] 刘学锋,江滢,任国玉,等.河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响.高原气象,2009,28(2):433-439.
- [16] 王绍武,姚檀栋.近百年中国年气温序列的建立.应用气象学报,1998,9(4):392-401.
- [17] Xu M, Chang C P, Fu C, et al. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969 - 2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed. *J Geophys Res*, 2006, 111 (D24), DOI:10.1029/2006JD007337.
- [18] 梁苏洁.近50年中国冬季气温和冬季风以及区域环流的年代际变化研究.北京:中国气象科学研究院,2014.
- [19] 陈少勇,郭忠祥,高蓉,等.我国东部季风区冬季气温的气候变暖特征.应用气象学报,2009,20(4):478-485.
- [20] Guo H, Xu M, Hu Q. Changes in near-surface wind speed in China: 1969 - 2005. *Inter J Climatol*, 2011, 31(3):349-358.
- [21] Lin C, Yang K, Qin J, et al. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960. *J Climate*, 2013, 26(9):2891-2903.
- [22] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化监测公报(2016年).北京:科学出版社,2017.
- [23] 江滢,罗勇,赵宗慈.全球气候模式对未来中国风速变化预估.大气科学,2010,34(2):323-336.
- [24] 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.
- [25] Zhang R H, Zhang S Y, Luo J L, et al. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958 - 2015. *Theor Appl Climatol*, 2019, 137(3/4):2785-2801.
- [26] Zhou B Y, Zheng F, Zhu J. Analysis of the inter-annual variations and influencing factors of wind speed anomalies over the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2017, 10(4):312-318.
- [27] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C. Maximum wind speed changes over China. *Acta Meteor Sinica*, 2013, 27(1):63-74.
- [28] Wu J, Zha J, Zhao D, et al. Changes in terrestrial near-surface wind speed and their possible causes: an overview. *Climate Dyn*, 2018, 51:2039-2078.
- [29] 郑祚芳,高华,刘伟东.北京地区近地层风能资源的气候变异及下垫面改变的影响.太阳能学报,2014,35(5):883-888.
- [30] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature(London)*, 1997, 386(6626):698-702.
- [31] 张学霞,葛全胜,郑景云.1982-1999年中国植被生长季节变动分析//第九次中国青年地理工作者学术研讨会论文集摘要集,2003:591-594.
- [32] 张爱英,任国玉,郭军,等.近30年我国高空风速变化趋势分析.高原气象,2009,28(3):680-687.
- [33] 赵佳莹,徐海明.中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析.气候与环境研究,2014,19(5):587-600.
- [34] 贺圣平.20世纪80年代中期以来东亚冬季风年际变率的减弱及可能成因.科学通报,2013,58(8):609-616.
- [35] 杨明,徐海明,李维亮,等.近40年东亚季风变化特征及其与海陆温差关系.应用气象学报,2008,19(5):522-530.
- [36] 李霞,梁建茵,郑彬.南海夏季风强度年代际变化基本特征.应用气象学报,2007,18(3):330-339.
- [37] Xiong Y, Xin X, Kou X. Simulation and projection of near-surface wind speeds in China by BCC-CSM models. *J Meteor Res*, 2019, 33(1):152-161.
- [38] Sherman P, Chen X, McElroy M B. Wind-generated electricity in China: Decreasing potential, inter-annual variability and association with changing climate. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):16294.
- [39] 丁一汇,柳艳菊,梁苏洁,等.东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系.气象学报,2014,72(5):835-852.
- [40] 郭其蕴.东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系.应用气象学报,1994,5(2):218-225.
- [41] 邵鹏程,李栋梁.东亚冬季风指数的分类和比较.气象科学,2012,32(2):226-235.
- [42] 施晓晖,徐祥德.东亚冬季风年代际变化可能成因的模拟研究.应用气象学报,2007,18(6):776-782.
- [43] 丁一汇,司东,柳艳菊,等.论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化.大气科学,2018,42(3):533-558.
- [44] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(3):376-386.
- [45] 姜大膀,王会军.20世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性.科学通报,2005,50(20):2256-2262.
- [46] 姜大膀,田芝平.21世纪东亚季风变化:CMIP3和CMIP5模式预估结果.科学通报,2013,58(8):707-716.
- [47] 孙颖,丁一汇.全球变暖情景下南亚和东亚夏季风变化对海陆增温的不同响应.科学通报,2011,56(增刊II):2424-2433.
- [48] Chen W, Wang L, Feng J, et al. Recent progress in studies of the variabilities and mechanisms of the East Asian monsoon in a changing climate. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(9):887-901.
- [49] 吴国雄,李占清,符淙斌,等.气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展.中国科学(地球科学),2015,45(11):1609-1627.
- [50] 马肖琳,高西宁,刘煜,等.气溶胶对东亚冬季风影响的数值模

- 拟. 应用气象学报, 2018, 29(3): 333-343.
- [51] Liu Y, Cai W J, Sun C F, et al. Anthropogenic aerosols cause recent pronounced weakening of Asian Summer Monsoon relative to last four centuries. *Geophys Res Lett*, 2019, DOI: 10.1029/2019GL082497.
- [52] Wu B Y, Wang J. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian Winter Monsoon. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(19): 1897.
- [53] D'Arrigo R, Jacoby G, Wilson R, et al. A reconstructed Siberian High index since A. D. 1599 from Eurasian and North American tree rings. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(5): L05705.
- [54] 蓝柳茹, 李栋梁. 西伯利亚高压的年际和年代际异常特征及其对中国冬季气温的影响. 高原气象, 2016, 35(3): 662-674.
- [55] 据建华, 吕俊梅, 任菊章. 北极涛动年代际变化对华北地区干旱化的影响. 高原气象, 2006, 25(1): 74-81.
- [56] 梁苏洁, 赵南, 丁一汇. 北极涛动主模态下北极冷空气的优势路径和影响地区的研究. 地球物理学报, 2019, 62(1): 19-31.
- [57] 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展. 大气科学, 2004, 28(6): 979-992.
- [58] 卢楚翰, 管兆勇, 李永华, 等. 太平洋年代际振荡与南北半球际大气质量振荡及东亚季风的联系. 地球物理学报, 2013, 56(4): 117-128.
- [59] Dong X, Xue F. Phase transition of the Pacific decadal oscillation and decadal variation of the East Asian summer monsoon in the 20th century. *Adv Atmos Sci*, 2016, 33(3): 330-338, DOI: 10.1007/s00376-015-5130-7.
- [60] 丁一汇, 李怡. 亚非夏季风系统的气候特征及其长期变率研究综述. 热带气象学报, 2016, 32(6): 786-796.
- [61] Tollefson J. Climate change: The case of the missing heat. *Nature*, 2014, 505(7483): 276-278.
- [62] Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J Meteor Soc Japan*, 1996, 74: 49-62.
- [63] 穆明权, 李崇银. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息 I. 观测资料分析. 大气科学, 1999, 23(3): 276-285.
- [64] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. 大气科学, 2002, 26(5): 595-610.
- [65] Wang B, Wu R, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [66] Zhang R, Li T, Wen M, et al. Role of intraseasonal oscillation in asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the rainfall over southern China in boreal winter. *Climate Dyn*, 2015, 45(3/4): 559-567.
- [67] 吴萍. 水汽输送对我国降水变异及大气污染条件的影响. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
- [68] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 2003, 61(6): 641-654.
- [69] Wang H J, He S P. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s. *Chin Sci Bull*, 2012, 57(27): 3535-3540.
- [70] 江澄, 徐希燕, 刘汉武, 等. CMIP5 和 CMIP3 对未来中国近地层风速变化的预估. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 58-65.
- [71] Akio Kitoh. The Asian Monsoon and its future change in climate models: A review. *J Meteor Soc Japan*, 2017, 95(1): 7-33.
- [72] 王政琪. CMIP5 全球模式对东亚冬季气候特征模拟能力评估与未来变化预估. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
- [73] 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. SRES A2 情景下未来 30 年我国东部夏季降水变化趋势. 应用气象学报, 2008, 19(6): 770-780.
- [74] Liu J, Xu H, Deng J. Projections of East Asian summer monsoon change at global warming of 1.5°C and 2°C. *Earth System Dynamics Discussions*, 2018(9): 427-439.
- [75] Cai W, Borlace S, Lengaigne M, et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nat Clim Change*, 2014, 4(2): 111-116.
- [76] Turner A G, Annamalai H. Climate change and the South Asian summer monsoon. *Nat Clim Change*, 2012, 2(8): 587-595.
- [77] Karnauskas K B, Lundquist J K, Zhang L. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience*, 2017, 11: 38-43.
- [78] 李伟, 姚晖, 王焕奇, 等. 发电量估算不确定性对风电项目投资决策的影响. 风能, 2014(9): 78-81.
- [79] 董莎. 基于变动风速的风电项目全寿命周期综合效益研究. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [80] Chen L, Li D, Pryor S C. Wind speed trends over China: quantifying the magnitude and assessing causality. *Inter J Climatol*, 2013, 33: 2579-2590.
- [81] Harper B. Statistical Methods for Quantifying Uncertainty in ENSO on Wind Power in the Northern Great Plains // AGU Fall Meeting Abstracts, 2006.
- [82] Yao Y, Luo D H, Dai A G, et al. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural Blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part I: Insights from observational analyses. *J Climate*, 2017, 30(10): 3549-3568.

Advances of Surface Wind Speed Changes over China Under Global Warming

Ding Yihui¹⁾²⁾³⁾ Li Xiao¹⁾²⁾⁴⁾ Li Qiaoping³⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

³⁾ (*National Climate Center, Beijing 100081*)

⁴⁾ (*CPI Power Engineering Company Ltd, Shanghai 200233*)

Abstract

Previous studies indicate that surface wind speed (SWS) over China is declining continuously during past decades under global warming, and this has significant impact on wind energy resources. Based on a series of researches, spatial and temporal characteristics of SWS and its main causes are discussed. Overall, the SWS over China significantly weakens during the past fifty years. The average decreasing rate is $0.1-0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ per 10 years, but there are obvious differences in season, region and wind speed. The largest decreasing rate occurs in spring and winter while the smallest occurs in summer. Wind speed of north and east coast areas dropped more sharply than southwest. Furthermore, top percentiles of wind speed dropped more sharply than the bottom percentiles. The change of large-scale pressure gradient force (PGF) is a direct cause of the decrease of SWS, and climate warming exacerbates the weakening of PGF. This is mainly due to increases of surface temperature in the middle and high latitudes of Eurasia continent, which is more significant than that in low latitudes and the western Pacific. In particular, the weakening Siberian high (SH) caused by warming reduces the PGF between land and the adjacent ocean, which is the main factor leading to the weakening of the East Asian winter monsoon (EAWM). For the deficit of East Asian summer monsoon (EASM), phase transition of the Pacific decadal oscillation (PDO) and the Atlantic multi-decadal oscillation (AMO) from cold/warm to the opposite is the main cause, and surface cooling of East China Plain caused by the aerosol radiation effect may also play an important role. Besides, some researches indicate that aerosols can reduce the EAWM through thermodynamic process. Thus, the variability of East Asia Monsoon is the result of synergistic effects of climate factors at different spatial and time scales. Controlled experiments show that the SWS of China will decline more sharply as the greenhouse gases (GHG) emission increases. The weakened SWS influences wind energy development significantly, low speed wind technology boomed, and more wind farms will be developed in low latitudes as regions with abundance wind resources in North China experienced severe SWS deficit. To assess risks precisely, confidence probability of long-term electricity production should be considered during the decision making process of the investment of wind farms.

Key words: surface wind speed (SWS); wind energy; global warming; pressure gradient; East Asian monsoon