中国区域的地表风速还在减弱吗?

杨庆^{1*}, 李明星¹, 祖子清³, 马柱国^{1,2}

1. 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家海洋环境预报中心, 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081

* 通讯作者, E-mail: yangqing@tea.ac.cn

收稿日期: 2020-08-25; 收修改稿日期: 2020-12-28; 接受日期: 2021-02-07; 网络版发表日期: 2021-06-07

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFA0600404)、国家自然科学基金项目(批准号: 41705073、41530532和41506040)和江苏省气候变化协同创新中心资助

摘要 20世纪60年代以来, 全球地表风速呈现减弱趋势, 即所谓的全球“地表静化”现象. 然而, 最新研究指出全球地表风速在2010年前后出现了转折性变化, 呈现增大的趋势. 那么, 中国区域是否存在类似的现象呢? 为了回答这个问题, 本文基于1971~2019年地表风速的观测数据, 分析了中国地表风速长期趋势的转折性变化及其区域差异. 结果表明, 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, 即中国的“地表静化”可能在2014年终止了, 随后地表风速进入了显著的增强阶段. 但是, 这种转折性变化存在着明显的区域性和季节性特征. 例如, 在中国东北、新疆西部和青藏高原地区, 其年和季节地表风速分别在2013/2014年、1993/1994年和2000年左右出现了转折性增强趋势; 但在华北以西地区, 仅有秋冬季地表风速在2007年左右出现了转折性增强趋势; 中国南方仅有秋季地表风速在2012年左右出现了转折性增强趋势. 而“地表静化”在中国东部沿海、南部沿海、华北和新疆东部地区仍在持续.

关键词 地表风速, 地表静化, 转折性变化, 增强趋势

1 引言

风是描述大气运动的基本物理量, 反映空气的运动状态. 地表风速的大小能够调节地表蒸散速率, 引起地表与大气边界层热量和水汽交换, 影响地表水文状况, 改变局地的水循环(高歌等, 2006; Roderick等, 2007; Zheng等, 2009; McVicar等, 2012); 还会影响近地层气溶胶分布、空气污染、能见度、入射太阳辐射和植物生长等过程(Nathan和Muller-Landau, 2000;

McVicar等, 2012; 丁一汇和柳艳菊, 2014; 刘瑞婷等, 2014; Lin等, 2015). 另外, 风能与地表风速的三次方成正比(Lu等, 2009), 地表风速很小的变化就会对整个风能利用产生巨大的影响, 进而影响全球能源产业分布. 因此, 对地表风速变化的研究具有重要的科学意义和社会经济价值.

全球地表风速最显著的变化特征是自20世纪60年代以来的长期减弱趋势, 即全球“地表静化”现象(Roderick等, 2007). 大量研究指出, “地表静化”在全球范

中文引用格式: 杨庆, 李明星, 祖子清, 马柱国. 2021. 中国区域的地表风速还在减弱吗? 中国科学: 地球科学, 51(7): 1028–1042, doi: [10.1360/SSTe-2020-0228](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0228)
英文引用格式: Yang Q, Li M, Zu Z, Ma Z. 2021. Has the stilling of the surface wind speed ended in China? Science China Earth Sciences, 64(7): 1036–1049, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9738-4>

国内普遍存在(Vautard等, 2010; McVicar等, 2012; Wu等, 2018a). 在中国, 近40多年绝大部分地区地表风速均呈减弱趋势, 减弱速率的大值区恰恰位于风力资源丰富的西北、华北和东北地区(王遵娅等, 2004; 左洪超等, 2005; 任国玉等, 2005; Xu等, 2006; 赵宗慈等, 2016). 1979~2016年中国平均地表风速的减弱速率是全球平均减弱速率($-0.07\text{ m s}^{-1} (10\text{a})^{-1}$)的近2倍, 为 $-0.13\text{ m s}^{-1} (10\text{a})^{-1}$ (Azorin-Molina等, 2017; Tian等, 2019), 由此造成中国约80%的站点出现了风能损失, 损失量约为30%, 损失率远高于全球其他地区, 是全球风能损失的重灾区(Tian等, 2019), 而风能是中国实现《巴黎协定》中设定的碳减排目标的战略组成部分(国家发展和改革委员会等, 2018). 总体来说, “地表静化”引发了人们对全球变暖背景下东亚大气环流过程、中国陆地水循环、气象防灾减灾以及风能产业可持续发展的特别关注.

值得注意的是, 过去40多年来全球地表风速虽为显著的减弱趋势, 但并非均匀的持续减弱, 而是存在明显的年代际变化. 在2010年左右, 全球平均地表风速的长期趋势发生了转折性变化, 由显著的减弱趋势转为显著的增强趋势(Azorin-Molina等, 2017, 2018, 2020; 熊晨晓, 2019). 这说明全球整体上的“地表静化”在2010年左右终止了, 之后全球平均地表风速进入了大幅增强的阶段. 在亚洲、欧洲和北美, 地表风速分别在2001、2003和2012年左右出现了由显著减弱趋势到显著增强趋势的转折性变化, 终止了“地表静化”的进程(Zeng等, 2019). 其中, 亚洲地表风速的转折性增强趋势出现的年份最早, 中国地表风速观测是亚洲平均地表风速的主要数据来源, 台站占比超过50%(据Zeng等(2019)的附图4), 中国的地表风速是否也存在类似的转折性变化呢?

已有研究发现中国有些地区的地表风速发生了这种转折性变化. 例如, 西南地区、塔克拉玛干沙漠和南方农牧脆弱区的年和季节地表风速均在2000年以后转为增加趋势(Yang等, 2012; Liu等, 2019; 孙康慧等, 2019); 中国东部冬季的地表风速同期也转为增加趋势(Zha等, 2019a); 2002年以后, 青藏高原的年和季节地表风速也观测到了增加趋势(Lin等, 2013). 尽管上述地区的地表风速在2000年以后出现了明显的转折性增强趋势, 但是整个中国区域平均的地表风速近十几年仍呈减弱趋势, 仅减弱速率有所变缓(李艳等, 2008; Fu

等, 2011; Guo等, 2011; Chen等, 2013; Lin等, 2013; 王楠等, 2019; Zhang等, 2019a; 丁一汇等, 2020). 这主要是因为东北和东部沿海等地区地表风速在近十几年仍表现为大幅的减弱趋势(王楠等, 2019; Feng等, 2020). 上述中国区域的地表风速变化说明, 相对于全球其他区域, 中国地表风速的趋势变化更加复杂, 存在明显的区域差异和季节差异(Zha等, 2019a; Feng等, 2020).

然而, 聚焦中国地表风速长期趋势的转折性变化问题, 目前仍缺乏系统的量化分析. 中国区域的地表风速还在减弱吗? 本文拟基于1971~2019年中国地表风速观测数据回答这个问题, 重点检测近十几年来中国地表风速的长期趋势是否存在由减弱到增强的转折性变化, 并揭示这种转折性变化的时空特征, 为中国大气演变特征和风能利用提供量化的评估.

2 数据与方法

2.1 数据

本文所采用的数据包括以下几个部分.

(1) 中国地面气候资料日值数据集(V3.0): 该数据集包含了中国基本、基准气象站的地面基本气象要素逐日观测数据. 一共包含了824个站点, 时段为1951年1月1日至2019年12月31日, 时间分辨率为日. 经过质量控制(详细方法见网络版附录, <http://earthcn.scichina.com>), 本文保留了1971年1月1日至2019年12月31日共413个台站的地表风速数据(称为CMA, 表1和图1). 另外, 为了比较质量控制方法对分析结果的影响, 本文收集了Tian等(2019)基于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)筛选的351个台站的地表风速数据(称为CMA_Tian), 时段为1979年1月1日至2016年12月31日, 时间分辨率为日.

(2) 全球地表站点观测风速资料HadISD v2.0.2.2017f (Hadley Integrated Surface Database, <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisd/>)数据集(Dunn等, 2014): 该数据集是英国气象局哈德莱中心在NOAA NCDC的ISD (Integrated Surface Database)观测数据集的基础上, 经过一系列质量控制筛选得到的. 全球一共包含了8103个站点, 时间段为1931~2017年, 时间分辨率为6h.

(3) 全球地表站点观测风速资料GSOD (Global Surface Summary of the Day, <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/>)

表 1 文中所使用的地表风速数据集

序号	数据	来源	站点数	时段	分辨率
1	CMA	本文	413	1971~2019年	日
2	CMA_Tian	Tian等(2019)	351	1979~2016年	日
3	HadISD	Zeng等(2019)	255	1978~2017年	年
4	GSOD	Zeng等(2019)	306	1978~2017年	年
5	合集(ALL)	本文	633	1979~2016年	年

图 1 4套地表风速数据集中气象台站的分布及中国9个分区空间范围

pub/data/gsod/)数据集: 该数据集整合了美国空军DAT-SAV3地面数据和ISH (Integrated Surface Hourly)逐小时数据, 所有的数据都经历了完善的质量控制. 全球一共包含了28149个站点, 时间段为1929~2019年, 时间分辨率为逐小时.

基于上述GSOD和HadISD数据, Zeng等(2019)发现了全球平均地表速度在2010年由显著减弱趋势转为大幅增加趋势, 其中亚洲、欧洲和北美的地表风速分别于2001年、2003年和2012年发生了这种转折性变化. 为了比较不同数据集对分析结果的影响, 本文收集

了Zeng等(2019)公布的经过质量控制的GSOD和HadISD地表风速数据(Supplementary Dataset 1&2, <https://www.nature.com/articles/s41558-019-0622-6#Sec15>), 站点数分别为1434个和1542个, 其中中国境内站点数分别为306个和255个, 时间段为1978~2017年, 时间分辨率为年(表1). 另外, 为了最大限度地增加台站数目, 我们整合了上述4套地表风速数据集, 以CMA数据集为主, 去除了其余3套数据集中重叠(相距<10km)的台站, 称为合集(表1), 共有台站633个, 时间段为1979~2016年, 时间分辨率为年.

2.2 方法

本文采用分段线性回归模型(Piecewise Linear Regression Model)(Toms和Lesperance, 2003; Ryan和Porth, 2007)检测地表风速趋势变化的转变点. 该方法采用差分进化算法查找具有最优平方和误差的分段线性拟合函数, 采用 t 检验(Wilks, 2005)检测其拟合参数的显著性水平, 使其能够准确识别出时间序列的长期趋势发生显著性变化的时间节点, 如从增加趋势转为下降趋势、从强下降趋势转为弱下降趋势等. 目前, 该方法在各学科内被广泛使用(如Zeng等, 2019; Wang等, 2019). 本文采用台站算术平均的方法计算区域平均地表风速序列, 采用Pearson相关系数来量化不同序列的一致性, 采用最小二乘法来计算地表风速的长期趋势, 并用Mann-Kendall趋势分析方法对线性趋势加以验证; 采用 t 检验检测相关系数与线性趋势系数的显著性. 此外, 综合已有研究对中国地表风速变化特征区域性的认识, 将中国划分为9个分区, 如图1所示.

3 中国地表风速趋势变化检测和时空特征

3.1 年平均地表风速

基于4套地表风速数据集(表1), 图2给出了中国区域平均的年地表风速序列及其趋势变化的统计特征. 4条地表风速序列(图2左列)虽然具有相似的年际变率, 相互之间均为显著正相关, 相关系数为0.66~0.99, 并且1979~2016年均表现为显著的减弱趋势, 速率为 $-0.005 \sim -0.013 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($p < 0.05$), 但是其年代际变化却存在明显差异. 其中, GSOD和HadISD显示中国地表风速的长期趋势在2000年左右发生了转折性变化(图2i和2l), 由显著减弱趋势转为显著增加趋势. 这说明整体上中国的“地表静化”在2000年左右终止了, 随后地表风速进入了显著增加阶段(图2h和2k), 增加速率为 $0.014 \sim 0.016 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$. 这与亚洲地表风速在约2001年以后转为明显增加趋势(Zeng等, 2019)的结果相一致. CMA显示1971~2019年中国地表风速的长期趋势出现了两次转折性变化, 第一次发生在1989年左右(图2c), 地表风速从大幅减弱趋势转为弱的减弱趋势(李艳等, 2008; Guo等, 2011; Chen等, 2013), 即后期(P2, $-0.007 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$)的减弱速率变小, 仅为前期(P1, $-0.028 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$)的约1/4, 但减弱趋势均通过了0.05的显著性检验; 第二次发生在2014年左右(图2c), 地表风

速结束了持续的减弱趋势转为明显的增加趋势(中国气象局气候变化中心, 2019; Zhang和Wang, 2020), 增加速率为 $0.011 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (P3). 与CMA相似, CMA_Tian也显示中国地表风速在20世纪80年代后期(图2f)出现了转折性变化, 地表风速从大幅减弱趋势转为弱的减弱趋势(图2e). 但是, 在近十几年CMA_Tian并未出现类似于CMA的转折性增强趋势, 这可能是由于其缺少最近3年的数据.

上述结果显示, 整体而言, 中国地表风速的长期趋势存在由减弱到增强的转折性变化, 但是其转折增强趋势出现的年份在不同数据间存在巨大的差异. GSOD和HadISD显示地表风速的转折性增强趋势始于2000年左右, 而CMA则显示地表风速在约2014年以后才进入增加阶段. 对于这种转折性变化时间点的差异, 我们将会在4.1节详细讨论.

考虑台站的数目和空间代表性、数据的质量控制等都可能对分析结果造成不同程度的影响, 为了获得更可靠的结果, 我们合并了这4套数据集, 去除了重叠的台站, 基于合集数据重新计算了中国区域平均年地表风速, 并分析了其时空变化特征(图3和4). 结果显示(图3a), 1979~2016年中国区域平均年地表风速呈现显著的减弱趋势($-0.010 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $p < 0.05$), 其中约70%的台站呈现减弱趋势, 东北地区是地表风速减弱的大值区(图4a). 地表风速的长期趋势在1990和2014年左右出现了两次转折性变化(图3c), 从大幅减弱趋势(P1, $-0.028 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$)转为相对较弱的减弱趋势(P2, $-0.005 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$), 再转为增加趋势(P3, $0.047 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (图3b). 因为CMA占合集台站数约65%, 所以合集的结果与CMA结果(图2a)近似. 中国的“地表静化”可能于2014年左右终止了, 随后地表风速进入了明显增加阶段.

为了揭示地表风速趋势变化的时空特征, 根据上述两个趋势转变年份, 将研究时段划分为3段: 1979~1989、1990~2013和2014~2016年. 1979~1989年地表风速的减弱趋势最明显, 中国绝大部分地区的地表风速呈现减弱趋势, 其中呈显著减弱趋势的台站占比约46.4%(图4b); 1990~2013年地表风速的减弱趋势变缓, 呈减弱趋势和增加趋势的台站各占约50%(图4c), 其中东北地区仍以减弱趋势为主; 2014~2016年地表风速以增加趋势为主, 且呈增加趋势的台站主要分布在中国东部和东北地区, 西部和西南地区则仍以减

图2 中国年平均地表风速及其趋势转变特征

左列: 年平均地表风速序列(m s^{-1})及其分段线性回归拟合线, 其中TP、TP1和TP2分别为长期趋势发生转变的年份, 灰线为随机采样40%站点计算的年平均地表风速序列的分段线性回归拟合线($N=300$); 基于300次随机采样结果, 统计TP、TP1和TP2的概率密度分布(右列)以及由TP、TP1和TP2分割的各时段内地表风速趋势系数($\text{m s}^{-1} \text{a}^{-1}$)的概率密度分布(中列)

弱趋势为主(图4d)。

考虑到图4中所显示的地表风速趋势变化的区域性特征, 以及已有研究中指出的不同地区地表风速变化的差异性(Zha等, 2019a; Feng等, 2020), 我们将中国进一步划分为9个分区(图1), 旨在更详细地回答中国哪些地区的地表风速仍在减弱, 哪些地区的地表风速已经发生了转折性变化。

基于合集数据的结果, 中国南方(图5h)、南部沿海(图5c)、新疆西部(图5f)和青藏高原(图5i)地区的地表风速均发生了由减弱趋势向增加趋势的转折性变化, 转折年份分别出现在2001、1989、1993和2000年左右。其中, 青藏高原和新疆西部地区地表风速的变

化特征在4套数据集间以及各个台站间(网络版附图1~3)均具有高的一致性, 结果稳定可信。这也与前人的结果(Yang等, 2012; Lin等, 2013; Liu等, 2019)一致, 他们发现青藏高原、西南地区 and 西部塔克拉玛干沙漠的地表风速均在约2000年以后转为明显的增加趋势。然而, 中国南方和南部沿海地区地表风速的变化特征在4套数据集间以及各个台站间(网络版附图1~3)存在一定的差异。合集结果中中国南方和南部沿海地区地表风速在2001与1989年以后的增加趋势, 其贡献分别来自于GSOD和HadISD在2009/2010年与1990/1991之后的大幅增加趋势, 而CMA和CMA_Tian则显示地表风速仍为持续的减弱趋势。

图3 基于4套数据的合集(ALL)计算的中国年平均地表风速及其趋势转变特征

东北(图5a)和华北(图5d)地区的地表风速经历了大幅的减弱阶段,到相对较弱的减弱阶段,再分别于2014年和2003年左右转入增加阶段。值得注意的是,与华北地区相比,东北地区地表风速的变化特征在4套数据集间以及各个台站间(网络版附图1~3)具有更高的一致性,结果可信度高。对于华北地区,尤其是其地表风速在2003年以后的趋势变化,4套数据集的结果相反。其中,GSOD和HadISD显示其地表风速在2003年之后为显著的增加趋势,速率为 $0.022\sim 0.026\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$,而CMA和CMA_Tian却显示其为明显的减弱趋势,速率为 $-0.009\sim -0.011\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$ 。

1979~2016年中国东部沿海(图5b)、新疆东部(图5g)和华北以西(图5e)地区的地表风速整体表现为持续的减弱趋势。其中,华北以西地区的地表风速在1989~1994年间出现了阶段性的增加趋势。在新疆东部地区,合集结果中其地表风速在1997年由显著的减弱趋势($-0.033\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$)转为弱的减弱趋势($-0.005\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$),CMA和CMA_Tian结果与此基本一致,但GSOD和HadISD却显示在1997年之后地表风速转为了显著的增加趋势,增加速率为 $0.005\sim$

$0.008\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$ 。

上述表明,中国有些地区地表风速的趋势变化对数据集的选取敏感。因此,我们将会在4.1节详细讨论GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian数据的差异。

3.2 季节平均地表风速

图6给出了中国区域平均的季节地表风速序列及其趋势变化特征。需要注意的是,因本文中GSOD和HadISD数据仅为年值(表1),故本节中季节地表风速的分析仅基于CMA和CMA_Tian,及二者的合集数据。从CMA结果(图6左列)来看,中国春季的地表风速最大,平均为 2.81 m s^{-1} ,秋季最小(2.24 m s^{-1});1971~2019年季节地表风速均呈显著的减弱趋势,其中春季的减弱速率最大,为 $-0.018\text{ m s}^{-1}\text{ a}^{-1}$;与年平均地表风速(图2a)相似,自20世纪80年代末之后,季节地表风速的减弱趋势均变缓,其中夏季和秋季地表风速在2012年左右转为增加趋势,春季和冬季地表风速在2012年以后虽也呈现增加趋势,但未通过显著性检验。CMA_Tian(图6中列)和二者合集数据(图6右列)的结果与上述基本一致。因此,为了保留最新数据,接下来仅用

图4 中国年平均地表风速的趋势系数($\text{m s}^{-1} \text{a}^{-1}$)

填色表示通过了0.05的显著性检验, 数值分别表示正负趋势台站所占百分比, 基于4套数据的合集。(a) 1979~2016年; (b) 1979~1989年; (c) 1990~2013年; (d) 2014~2016年

1971~2019年的CMA数据分析中国9个分区季节地表风速的演变特征(图7)。

总体来说, 1971~2019年中国各个分区季节地表风速具有与年平均地表风速基本一致的年际变率和长期趋势(图7)。中国东北、新疆西部和青藏高原地区的季节地表风速也发生了由持续减弱趋势到显著增加趋势的转折性变化, 转折年份分别出现在2013、1994和2000年左右; 1971~2019年中国东部沿海、南部沿海、华北和新疆东部地区的季节地表风速表现为持续的减弱趋势, 近十几年来未出现转折性的增加趋势, 其中南部沿海和华北地区在20世纪90年代左右出现了短暂的增加趋势, 随后又转为持续的减弱趋势。华北以西和中国南方地区, 季节地表风速的趋势变化略有差异。其中, 在华北以西地区, 春夏季地表风速与年平均地表风速的变化特征一致, 均在20世纪90年代左右出现了阶段性的增加趋势, 随后转为持续至今的减弱趋势, 但秋冬季地表风速在2007年左右出现了转折性增强趋势;

在中国南方, 秋季地表风速在2012年左右出现了转折性增强趋势, 而其他季节地表风速与年平均地表风速在1971~2019年均表现为持续的减弱趋势, 近十几年来未出现转折性的增加趋势。

4 讨论

4.1 地表风速数据的比较和不确定性

对于中国地表风速的变化特征(图2和5), CMA与CMA_Tian的结果基本一致, 二者重合台站280个, 占比超过68%; GSOD和HadISD的结果也基本一致, 二者重合台站240个, 占比超过78%。但是, GSOD/HadISD的结果与CMA/CMA_Tian的结果间存在明显差异, 尤其是判定中国地表风速出现转折性增强趋势的时间点上, 二者的结果差异巨大。因此, 有必要详细比较GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian数据的异同。

在合并4套数据集时, 我们发现GSOD/HadISD与

图 5 中国9个分区区域平均的年地表风速

分段线性回归拟合线是基于合集数据(ALL), TP、TP1和TP2为长期趋势发生转变的年份

CMA/CMA_Tian数据间重合了171对台站(距离在10km以内), 这些台站在中国范围内的分布较均匀(图8a)。接下来, 我们将基于这些重合台站, 揭示GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian数据的差异。1979~2016年年平均地表风速为显著正相关的台站有170对, 占比约99%, 说明这些重合台站的地表风速具有相似的年际变率。但是, 它们之间的均值和长期趋势的差异明显, 并且这些差异随着时间逐渐增大。如图8b所示, 这些重合台站年平均地表风速的均方根误差(RMSE)呈显著的增加趋势, 并在2007年左右发生了转折性变化, 由较弱的增加趋势转为大幅的增加趋势。对比1979~2016年年平均地表风速的趋势系数, 我们发现GSOD/HadISD的结果均大于CMA/CMA_Tian的结果, 并且这种现象在2000~2016年更加明显(图8c)。

为了更直观和定量地阐述GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian数据的差异, 我们进一步挑选了10对重合的台站(图8a), 要求每对台站之间的距离小于1km和RMSE大于所有重合台站的75百分位数。图9给出了这10对台站的年平均地表风速序列。从图中可以清楚地看出, 在前20多年GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian的地表风速曲线具有基本一致的均值、年际变率和长期趋势, 但在近十几年二者的差异逐渐增大, 尤其是长期趋势。对于第3对(图9c)和第9对(图9i)台站, GSOD/HadISD显示在2008年以后地表风速呈显著的增加趋势, 而CMA/CMA_Tian则显示其为减弱趋势; 对于其余台

图6 中国季节平均地表风速及其分段线性回归拟合结果

TP、TP1和TP2分别为长期趋势发生转变的年份, 灰线为随机采样40%站点计算的年平均地表风速序列的分段线性回归拟合线($N=300$)

站, GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian的结果虽然同号, 但是GSOD/HadISD的变化速率远大于CMA/CMA_Tian的变化速率, 例如, 在第2对台站(图9b), GSOD/HadISD的增长速率($0.060\text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$)是CMA/CMA_Tian的($0.005\text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$)约11倍。

气象台站的迁址或观测仪器、规则和方法等的变化都会导致观测序列出现系统性偏差, 这类系统性偏差可能对观测要素变化趋势的评估造成巨大影响(严中伟等, 2014; Li等, 2011, 2016)。目前, 均一化是校订这类系统性偏差的常用方法。那么, GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian数据的差异是否与地表风速的均一化处理有关呢? 为了回答这个问题, 我们搜集了与重合台站对应的均一化的年平均地表风速数据(Li等, 2011)。在图9c、9g和9i中, 均一化的地表风速与CMA/CMA_Tian在2004/2005年前后存在一定的差异, 这对应于2004/2005年中国气象观测方法从手动到自动的

转变(Cao等, 2016)。整体来说, 在地表风速的均值、年际变率和长期趋势方面, 均一化的地表风速与CMA/CMA_Tian的结果更为接近, 而与GSOD/HadISD的结果则存在较大的差异(图9)。这说明GSOD/HadISD与CMA/CMA_Tian数据的差异并非源于地表风速的均一化处理。

此外, 无论是基于国家气候信息中心整编的1961~2018年1637站中国国家级地面气象站均一化风速月值数据集V1.0, 还是1960~2017年2419个台站的逐日地表风速数据集, 所计算的中国年平均地表风速的时间变化序列(图1.20, 中国气象局气候变化中心, 2019; Zhang和Wang, 2020)均与本文中CMA/CMA_Tian(图2a和2d)和合集的结果(图3a)一致, 即从20世纪70年代开始表现为持续的减弱趋势, 从2014年左右开始转为了增加趋势。Zhang和Wang(2020)指出自中国气象观测从手动变更为自动以来(2005~2017年)的年

图 7 1971~2019年中国9个分区区域平均的季节地表风速

同色竖虚线指示各区季节地表风速长期趋势发生转变的年份, 为便于比较附上了年平均地表风速, 本图仅基于CMA数据

平均地表风速为不显著的弱增加趋势, 速率为 $0.002\text{m s}^{-1}\text{a}^{-1}$, 而GSOD(图2g)和HadISD(图2j)的结果则显示为显著的大幅增加趋势, 速率分别为 0.018 和 $0.020\text{m s}^{-1}\text{a}^{-1}$, 偏大了约8~10倍。

即使去掉这些重合的台站(图8a), 仅用4套数据集中各自剩余的台站计算中国区域平均的年地表风速序列, 其时间变化特征也与所有台站平均的结果相似(网络版附图4), 即GSOD/HadISD显示中国地表风速在2002左右出现了转折性增强趋势, 而CMA显示地表风速在2014年左右才出现转折性增强趋势。

综上所述, GSOD/HadISD数据可能存在一定的不确定性, 这仍需要有更多的元数据来加以验证。本文中CMA/CMA_Tian数据给出的中国地表风速变化的时

空特征更为可信。

4.2 地表风速转折性增强的可能原因

地表风速的变化是一个复杂的物理过程, 受到气候系统内部变率和人类活动的共同影响, 在不同的时空尺度上, 其主导因素不同(McVicar等, 2012; Wu等, 2018a; Zhang等, 2019b)。关于全球“地表静化”, 目前已有的研究认为其主要成因有两方面: (1) 地表粗糙度增加造成的拖曳力增加(Vautard等, 2010; Bichet等, 2012; Wu等, 2016, 2017, 2018b; Zha等, 2019b; Zhang等, 2019b), 包括土地覆盖变化和城市化等, 例如, Vautard等(2010)指出欧亚大陆地表风速的减弱主要源于植被覆盖率上升所引起的地表粗糙度的增加, 其贡献率约

图8 CMA/CMA_Tian与GSOD/HadISD数据集的比较

(a) CMA/CMA_Tian与GSOD/HadISD数据集重叠台站(171对)的空间分布, 填色表示站点间距离小于1km和RMSE大于所有重合台站的75百分位数的站点对; (b) 171对站点年平均地表风速RMSE(m s^{-1})的时间序列, 及其分段线性回归拟合结果; (c) 1979~2016年(2000~2016年)171对站点年平均地表风速趋势系数($\text{m s}^{-1} \text{a}^{-1}$)的散点图

为25~60%; 查进林(2015)指出城市化率每增加10%, 对应地区的地表风速将降低约 0.11m s^{-1} ; (2) 大气环流驱动力的减弱(Lin等, 2013; Wu等, 2018c; 丁一汇等, 2020), 对流层低层热力/气压梯度力的减弱是导致地表风速减弱的重要因素。然而, 对于近十几年以来全球地表风速的转折性增强趋势的形成原因, 目前的研究相对较少。

已有的研究多认为导致全球地表风速转折性增强的主要原因可能与大尺度环流系统的年代际变化有关(如Zhang和Wang, 2020)。例如, 纬向西风的增强可能导致了2000年以后中国西南地区地表风速的增强(Yang等, 2012); 东亚地表气温和气压空间变率的增加可能导致了2003年以后韩国地表风速的增强(Kim和Paik,

2015); 2000年以后西伯利亚海平面气压明显增强, 可能导致了我国东部经向气压梯度力的增加和冬季地表风速的增强(Zha等, 2019a)。

此外, 也有研究指出气候系统内部变率, 尤其是年代际尺度的海洋-大气模态, 如太平洋年代际振荡(PDO)(Mantua等, 1997)、大西洋年代际振荡(AMO)(Kerr, 2000)、北大西洋涛动(NAO)(Earl等, 2013)和北极涛动(AO)(Chen等, 2013)等的位相变化, 可能会引起地表风速的年代际变化或趋势的改变(Pryor和Barthelmie, 2011; Tian等, 2019; Zeng等, 2019)。在中国, Wu等(2018c)发现在年代际尺度上PDO指数与地表风速序列间存在显著正相关, 相关系数为0.74; Fu等(2011)发现PDO在2000年发生了由正到负的位相转变, 对应了

图9 对比10对站点(图8a中绿色站)的年平均地表风速

绿线为Li等(2011)均一化的地表风速序列, 右上角的两个数字分别表示各站点对间的距离(km)和RMSE

地表风速由减弱趋势转为增强趋势。PDO和AMO的协同作用是东亚夏季风30~40年周期振荡的主要驱动力, 20世纪60~70年代二者的位相转变引起了东亚夏季风的年代际减弱; 20世纪90年代末至21世纪初, PDO和AMO的位相再次发生转变, 引起了东亚夏季风的年代际增强(Yang等, 2017; 丁一汇等, 2018)。相应地, 20世

纪70年代以后, 中国地表风速显著减弱(Xu等, 2006), 而自90年代末以后, 地表风速的减弱趋势明显变缓。这说明全球年代际海温变化可以通过影响东亚大尺度环流, 改变东亚季风的强度, 进而影响中国地表风速的强弱, 引起地表风速的年代际变化。因此, 从全球年代际海温变化入手, 对比揭示中国典型地区地表风速的

转折性增强与持续减弱的形成原因及其动力学机制是我们下一步的研究内容。

5 结论

本文分析了1971~2019年中国地表风速的变化特征,检测了近十几年来地表风速的长期趋势是否存在由减弱到增强的转折性变化,并揭示这种转折性变化的时空特征。旨在回答中国区域的地表风速是否仍在减弱的问题,主要结论如下。

(1) 总体来说,1971~2019年中国年平均地表风速的趋势变化经历了三个不同的阶段。1971~1989年地表风速呈大幅减弱趋势;1990~2013年地表风速的减弱趋势明显变缓,减弱速率仅为前期的约1/4;2014年之后地表风速出现了转折性的增强趋势。这就是说,中国的“地表静化”可能于2014年终止了,地表风速进入了明显的增强阶段。

(2) 中国季节地表风速的趋势变化特征与年平均地表风速近似,均在20世纪80年代末之后,地表风速的减弱趋势明显变缓,其中夏、秋季地表风速均在2012年左右出现了转折性增强趋势。

(3) 中国地表风速的趋势变化存在明显的区域性:在中国东北、新疆西部和青藏高原地区,其年和季节地表风速均出现了由持续减弱趋势到显著增加趋势的转折性变化,“地表静化”终止的年份分别出现在2013/2014、1993/1994和2000年左右,其中新疆西部是中国“地表静化”终止最早的地区;在中国东部沿海、南部沿海、华北和新疆东部地区,除20世纪90年代左右出现了短暂的增加趋势外,1971~2019年其年和季节地表风速均表现为持续的减弱趋势,即这些地区的“地表静化”仍在持续,近十几年来未出现转折性增加趋势。

(4) 中国地表风速的趋势变化也存在明显的季节性特征:在华北以西地区,其年与春夏季地表风速均在20世纪90年代左右出现了短暂的增加趋势,随后转为持续至今的减弱趋势,但其秋冬季地表风速却在2007年左右出现了转折性增强趋势,即仅有秋冬季的“地表静化”终止了;在中国南方,仅有秋季地表风速在2012年左右出现了转折性增强趋势,而年与其他季节地表风速在1971~2019年均表现为持续的减弱趋势,近十几年来未出现转折性的增加趋势,即仅有秋季的“地表静化”终止了。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所的李珍博士和田群博士提供的中国地表风速数据,感谢南方科技大学的曾振中博士分享的经过质量控制的GSOD和HadISD地表风速数据。

参考文献

- 丁一汇,柳艳菊. 2014. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. 中国科学: 地球科学, 44: 37–47
- 丁一汇,司东,柳艳菊,王遵娅,李怡,赵亮,宋亚芳. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化. 大气科学, 42: 533–558
- 丁一汇,李霄,李巧萍. 2020. 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, 31: 1–12
- 高歌,陈德亮,任国玉,陈峪,廖要明. 2006. 1956~2000年中国潜在蒸散量变化趋势. 地理研究, 25: 378–387
- 国家发展和改革委员会,中国宏观经济研究院能源研究所,国家可再生能源中心. 2018. 中国可再生能源展望2018(CREO2018). 技术报告. 北京: 国家可再生能源中心
- 李艳,王元,储惠芸,汤剑平. 2008. 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, 53: 2646–2653
- 刘瑞婷,韩志伟,李嘉伟. 2014. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析. 气候与环境研究, 19: 164–172
- 任国玉,郭军,徐铭志,初子莹,张莉,邹旭凯,李庆祥,刘小宁. 2005. 近50年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 63: 942–956
- 孙康慧,曾晓东,李芳. 2019. 1980~2014年中国生态脆弱区气候变化特征分析. 气候与环境研究, 24: 455–468
- 王楠,游庆龙,刘菊菊. 2019. 1979~2014年中国地面风速的长期变化趋势. 自然资源学报, 34: 1531–1542
- 王遵娅,丁一汇,何金海,虞俊. 2004. 近50年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 62: 228–236
- 熊晨晓. 2019. 近44年全球陆域近地面风速时空特征及其与气压梯度力的关系. 硕士学位论文. 昆明: 云南大学
- 严中伟,李珍,夏江江. 2014. 气候序列的均一化——定量评估气候变化的基础. 中国科学: 地球科学, 44: 2101–2111
- 查进林. 2015. 中国地区土地利用/覆盖变化影响近地面地表风速的分析. 硕士学位论文. 昆明: 云南大学
- 赵宗慈,罗勇,江滢,黄建斌. 2016. 近50年中国风速减小的可能原因. 气象科技进展, 6: 106–109
- 中国气象局气候变化中心. 2019. 中国气候变化蓝皮书(2019). 北京: 中国气象局气候变化中心. 20
- 左洪超,李栋梁,胡隐樵,鲍艳,吕世华. 2005. 近40 a中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系. 科学通报, 50: 1125–1130
- Azarin-Molina C, Dunn R J H, Mears C A, Berrisford P, McVicar T R. 2017. Surface winds [in “State of the climate in 2016”]. Bull Am Meteorol Soc, 98: S37–S39

- Azarin-Molina C, Dunn R J H, Mears C A, Berrisford P, McVicar T R. 2018. Surface winds [in “State of the climate in 2017”]. *Bull Am Meteorol Soc*, 99: S41–S43
- Azarin-Molina C, Dunn R J H, Ricciardulli L, Mears C A, McVicar T R, Nicolas J P, Compo G P, Smith C A. 2020. Land and ocean surface winds [in “State of the climate in 2019”]. *Bull Am Meteorol Soc*, 101: S63–S65
- Bichet A, Wild M, Folini D, Schär C. 2012. Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model. *Geophys Res Lett*, 39: L11701
- Cao L, Zhu Y, Tang G, Yuan F, Yan Z. 2016. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations. *Int J Climatol*, 36: 4384–4392
- Chen L, Li D, Pryor S C. 2013. Wind speed trends over China: Quantifying the magnitude and assessing causality. *Int J Climatol*, 33: 2579–2590
- Dunn R J H, Willett K M, Morice C P, Parker D E. 2014. Pairwise homogeneity assessment of HadISD. *Clim Past*, 10: 1501–1522
- Earl N, Dorling S, Hewston R, von Glasow R. 2013. 1980–2010 variability in U.K. surface wind climate. *J Clim*, 26: 1172–1191
- Feng Y, Que L, Feng J. 2020. Spatiotemporal characteristics of wind energy resources from 1960 to 2016 over China. *Atmos Ocean Sci Lett*, 13: 136–145
- Fu G, Yu J, Zhang Y, Hu S, Ouyang R, Liu W. 2011. Temporal variation of wind speed in China for 1961–2007. *Theor Appl Climatol*, 104: 313–324
- Guo H, Xu M, Hu Q. 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005. *Int J Climatol*, 31: 349–358
- Kim J C, Paik K. 2015. Recent recovery of surface wind speed after decadal decrease: A focus on South Korea. *Clim Dyn*, 45: 1699–1712
- Kerr R A. 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 288: 1984–1985
- Li Z, Yan Z, Tu K, Liu W, Wang Y. 2011. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations. *Adv Atmos Sci*, 28: 408–420
- Li Z, Cao L, Zhu Y, Yan Z. 2016. Comparison of two homogenized datasets of daily maximum/mean/minimum temperature in China during 1960–2013. *J Meteorol Res*, 30: 53–66
- Lin C, Yang K, Qin J, Fu R. 2013. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960. *J Clim*, 26: 2891–2903
- Lin C, Yang K, Huang J, Tang W, Qin J, Niu X, Chen Y, Chen D, Lu N, Fu R. 2015. Impacts of wind stilling on solar radiation variability in China. *Sci Rep*, 5: 15135
- Liu Z Y, Dong Z B, Zhang Z C, Cui X J, Xiao N. 2019. Spatial and temporal variation of the near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, Northwest China. *Theor Appl Climatol*, 138: 433–447
- Lu X, McElroy M B, Kiviluoma J. 2009. Global potential for wind-generated electricity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 10933–10938
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Amer Meteor Soc*, 78: 1069–1079
- McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Li L T, Van Niel T G, Thomas A, Grieser J, Jhajharia D, Himri Y, Mahowald N M, Mescherskaya A V, Kruger A C, Rehman S, Dinpashoh Y. 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *J Hydrol*, 416–417: 182–205
- Nathan R, Muller-Landau H C. 2000. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. *Trends Ecol Evol*, 15: 278–285
- Pryor S C, Barthelmie R J. 2011. Assessing climate change impacts on the near-term stability of the wind energy resource over the United States. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108: 8167–8171
- Roderick M L, Rotstain L D, Farquhar G D, Hobbins M T. 2007. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophys Res Lett*, 34: L17403
- Ryan S E, Porth L S A. 2007. A tutorial on the piecewise regression approach applied to bedload transport data (CreateSpace Independent Publishing Platform). Technical Report. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service
- Tian Q, Huang G, Hu K, Niyogi D. 2019. Observed and global climate model based changes in wind power potential over the Northern Hemisphere during 1979–2016. *Energy*, 167: 1224–1235
- Toms J D, Lesperance M L. 2003. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 84: 2034–2041
- Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, Thépaut J N, Ciais P. 2010. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nat Geosci*, 3: 756–761
- Wang M, Wang J, Chen D, Duan A, Liu Y, Zhou S, Guo D, Wang H, Ju W. 2019. Recent recovery of the boreal spring sensible heating over the Tibetan Plateau will continue in CMIP6 future projections. *Environ Res Lett*, 14: 124066
- Wilks D S. 2005. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 648
- Wu J, Zha J, Zhao D. 2016. Estimating the impact of the changes in land use and cover on the surface wind speed over the East China Plain during the period 1980–2011. *Clim Dyn*, 46: 847–863
- Wu J, Zha J, Zhao D. 2017. Evaluating the effects of land use and cover change on the decrease of surface wind speed over China in recent

- 30 years using a statistical downscaling method. *Clim Dyn*, 48: 131–149
- Wu J, Zha J, Zhao D, Yang Q. 2018a. Changes in terrestrial near-surface wind speed and their possible causes: An overview. *Clim Dyn*, 51: 2039–2078
- Wu J, Zha J, Zhao D, Yang Q. 2018b. Effects of surface friction and turbulent mixing on long-term changes in the near-surface wind speed over the Eastern China Plain from 1981 to 2010. *Clim Dyn*, 51: 2285–2299
- Wu J, Zha J, Zhao D, Yang Q. 2018c. Changes of wind speed at different heights over eastern China during 1980–2011. *Int J Climatol*, 38: 4476–4495
- Xu M, Chang C P, Fu C, Qi Y, Robock A, Robinson D, Zhang H M. 2006. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed. *J Geophys Res*, 111: D24111
- Yang X, Li Z, Feng Q, He Y, An W, Zhang W, Cao W, Yu T, Wang Y, Theakstone W H. 2012. The decreasing wind speed in southwestern China during 1969–2009, and possible causes. *Quat Int*, 263: 71–84
- Yang Q, Ma Z, Fan X, Yang Z L, Xu Z, Wu P. 2017. Decadal modulation of precipitation patterns over Eastern China by sea surface temperature anomalies. *J Clim*, 30: 7017–7033
- Zeng Z, Ziegler A D, Searchinger T, Yang L, Chen A, Ju K, Piao S, Li L Z X, Ciais P, Chen D, Liu J, Azorin-Molina C, Chappell A, Medvigy D, Wood E F. 2019. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nat Clim Chang*, 9: 979–985
- Zha J, Wu J, Zhao D, Tang J. 2019a. A possible recovery of the near-surface wind speed in Eastern China during winter after 2000 and the potential causes. *Theor Appl Climatol*, 136: 119–134
- Zha J, Zhao D, Wu J, Zhang P. 2019b. Numerical simulation of the effects of land use and cover change on the near-surface wind speed over Eastern China. *Clim Dyn*, 53: 1783–1803
- Zhang R, Zhang S, Luo J, Han Y, Zhang J. 2019a. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958–2015. *Theor Appl Climatol*, 137: 2785–2801
- Zhang Z, Wang K, Chen D, Li J, Dickinson R. 2019b. Increase in surface friction dominates the observed surface wind speed decline during 1973–2014 in the Northern Hemisphere lands. *J Clim*, 32: 7421–7435
- Zhang Z, Wang K. 2020. Stilling and recovery of the surface wind speed based on observation, reanalysis, and geostrophic wind theory over China from 1960 to 2017. *J Clim*, 33: 3989–4008
- Zheng H, Liu X, Liu C, Dai X, Zhu R. 2009. Assessing contributions to panevaporation trends in Haihe River Basin, China. *J Geophys Res*, 114: D24105

(责任编辑: 温之平)