氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估

刘鸿波 董理 严若婧 张晓朝 郭辰 梁思超 屠劲林 冯笑丹 王雪璐

Evaluation of Near-Surface Wind Speed Climatology and Long-Term Trend over China's Mainland Region Based on ERA5 Reanalysis

LIU Hongbo DONG Li YAN Ruojing ZHANG Xiaochao GUO Chen LIANG Sichao TU Jinlin FENG Xiaodan WANG Xuelu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20101

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

武汉城市相对湿度气候学特征与长期变化趋势

Climatological Characteristics and Long-Term Trend of Relative Humidity in Wuhan

气候与环境研究. 2018, 23(6): 715 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17122

1901~2013年GPCC和CRU降水资料在中国大陆的适用性评估

Applicability Assessment of GPCC and CRU Precipitation Products in China during 1901 to 2013

气候与环境研究. 2017, 22(4): 446 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16122

CMIP5模式对中国东部夏季不同强度降水气候态和年代际变化的模拟能力评估

Capability Assessment of CMIP5 Models in Reproducing Observed Climatology and Decadal Changes in Summer Rainfall with Different Intensities over Eastern China

气候与环境研究. 2018, 23(1): 1 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16207

1961～2013年中国蒸发皿蒸发量时空分布特征及其影响因素

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Pan Evaporation in China from 1961 to 2013

气候与环境研究. 2020, 25(5): 483 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19130

基于统计年鉴和MODIS的中国区域土地利用/覆盖变化特征研究

Characteristics of Land Use/Cover Change over China Based on China Statistical Yearbook and MODIS Data

气候与环境研究. 2017, 22(6): 733 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16214

西南地区春季及其各月降水的气候特征分析

Climatic Characteristics of Rainfall over Southwest China during Spring and Spring Months

气候与环境研究. 2020, 25(6): 575 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19074

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. 2021. ERA5 再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 299−311. LIU Hongbo, DONG Li, YAN Ruojing, et al. 2021. Evaluation of Near-Surface Wind Speed Climatology and Long-Term Trend over China' s Mainland Region Based on ERA5 Reanalysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 299−311. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20101

ERA5 再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估

刘鸿波[1] 董理[1,2] 严若婧[1,2] 张晓朝[3] 郭辰[4] 梁思超[5]
屠劲林[5] 冯笑丹[5] 王雪璐[5]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049
3 中国华能集团有限公司，北京 100036
4 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司，北京 100081
5 华能新能源股份有限公司，北京 100081

摘 要 基于台站观测资料，评估了欧洲中期天气预报中心（ECMWF）最高时空分辨率的第五代大气再分析资料（ERA5）对 1979～2018 年间中国大陆区域 10 m 高度风速的气候特征及其变化趋势的再现能力，并同步对比分析了 ERA5 资料 100 m 高度风速的特征和长期趋势。结果表明，ERA5 资料 10 m 和 100 m 风速在空间分布、年—季节—月尺度演变的气候特征方面与台站观测非常一致，10 m 风速气候态空间相关系数达到 0.66。观测和再分析资料均显示，中国近地层风速呈现出显著的区域性特征，风速大值区主要分布在内蒙古、东北地区西部、新疆北部以及青藏高原西部地区，上述区域的风速季节差异也相对明显，春季风速最大。台站观测、ERA5 资料 10 m 和 100 m 全国平均风速在 4 月达到最大值，分别为 2.6、3.0、4.5 m s^{-1}，8 月为最小值，分别为 2.0、2.4、3.5 m s^{-1}。从月平均序列来看，ERA5 资料的 10 m 风速较台站观测偏高 0.3～0.5 m s^{-1}，而 100 m 的风速较 10 m 风速整体偏高 1.2～1.4 m s^{-1}。在风速变化方面，台站观测风速在中国陆地区域整体呈下降趋势–0.4 m s^{-1}（39 a）$^{-1}$，春季下降趋势最显著 [–0.5 m s^{-1}（39 a）$^{-1}$]，且 1979～1992 年冬季风速降幅最大 [–0.7 m s^{-1}（14 a）$^{-1}$]，2013 年以后风速逐渐增强。ERA5 资料两个高度层的风速在整个中国区域均没有明显的长期变化趋势，4 个季节风速变化趋势的空间分布与观测也存在差异，100m 风速的长期变化趋势与 10 m 一致但变化幅度大于 10 m 风速。总之，ERA5 资料对中国大陆区域气候平均风速具有较好的再现能力，但无法呈现台站观测风速的长期变化趋势。

关键词 ERA5 资料 10 m 风速 100 m 风速 气候特征 线性趋势 中国
文章编号 1006-9585(2021)03-0299-13 **中图分类号** P425.4 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20101

Evaluation of Near-Surface Wind Speed Climatology and Long-Term Trend over China's Mainland Region Based on ERA5 Reanalysis

LIU Hongbo[1], DONG Li[1,2], YAN Ruojing[1,2], ZHANG Xiaochao[3], GUO Chen[4], LIANG Sichao[5], TU Jinlin[5], FENG Xiaodan[5], and WANG Xuelu[5]

收稿日期 2020-08-26；**网络预出版日期** 2021-02-25
作者简介 刘鸿波，女，1981 年出生，博士，副研究员，主要从事边界层风场结构、极端降水演变机理及模拟分析研究。E-mail: hongboliu@mail.iap.ac.cn
资助项目 中国华能集团公司总部科技项目 HNKJ18-H31
Funded by The Headquarter Scientific Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (Grant HNKJ18-H31)

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *China Huaneng Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100036
4 *China Huaneng Group Cleaning Energy Technology Academy Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100081
5 *Huaneng Renewables Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100081

Abstract The ability of the most recently released high spatio-temporal resolution dataset, the fifth generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts atmospheric reanalysis data (ERA5), to reproduce near-surface wind speed climatology and the linear trend is analyzed over China's mainland during the period of 1979–2018. Results indicate that the 10-m and 100-m wind speeds are highly consistent with in situ station observations in both spatial distribution and annual –seasonal –monthly evolutions. The spatial correlation coefficient of the 10-m wind speed climatology between ERA5 and station observation is 0.66. The near-surface wind speed shows obvious regional characteristics with strong wind in Inner Mongolia, west of Northeast China, north of Xinjiang, and west of Tibet Plateau. Wind speeds in the above regions also exhibit a seasonal difference with peak intensity observed in spring. The strongest (weakest) national-averaged wind speed obtained from the station observation, 10-m, and 100-m ERA5 reanalysis is 2.6, 3.0, and 4.5 (2.0, 2.4, and 3.5) m s^{-1} in April (August), respectively. The 10-m ERA5 monthly-mean wind speeds are 0.3–0.5 m s^{-1} stronger than those of the observation and 1.2–1.4 m s^{-1} weaker than those of the 100-m wind speed. Since 1979, the observed wind speed shows an overall decreasing trend of −0.4 m s^{-1} (39 a) $^{-1}$. This trend is most obvious in spring [−0.5 m s^{-1} (39 a)$^{-1}$], with the biggest drop in the winter of 1979–1992 [−0.7 m s^{-1} (14a) $^{-1}$]. Since 2013, the surface wind speed has been increasing. ERA5 reanalysis fails to capture the above decreasing trends in both layers. Moreover, the spatial patterns of the linear trend in four seasons are also different from those of the observations. It is concluded that ERA5 performs well in reproducing the near-surface wind climatology over China but fails to capture the long-term trend.

Keywords ERA5 data, 10-m wind speed, 100-m wind speed, climatology, linear trend, China

1 引言

随着全球经济的快速发展，传统能源结构与经济可持续发展、环境保护之间的矛盾日益突出，人们对低成本、可再生的清洁能源开发利用的需求不断增加。相对于煤炭和石油等传统能源，风能作为一种可再生能源，除了经济节约之外，更重要的是对环境的友善，是传统能源的宝贵替代。风能的开发利用减少了人为能源制造过程中对环境的破坏和影响，是清洁能源发展的重点。预计到 2050 年，风能供电将占全球电力需求的 1/4～1/3（Veers et al., 2019）。因此，调查、分析气候变化及人类活动等自然和人为因素对未来风能资源及其变化趋势的影响已经成为气象、能源、电力、经济等多领域专家所共同关心的热点问题之一。

作为风能产品的基本要素之一，近地层风速在气候变化背景下的演变近年来日益受到关注，地表观测、全球再分析资料均被用来从不同的角度对全球和区域风速的变化进行分析（Torralba et al., 2017; Miao et al., 2020），这其中也包含中国区域近地面及对流层低层风速的气候特征及其变化趋势的研究（Lin et al., 2013; 郑祚芳等, 2014; Zhang R H et al., 2019）。现有分析表明，自 20 世纪 70 年代起，北半球中纬度大陆地区近地面年平均风速整体呈现出减小的趋势（任国玉等, 2005; Xu et al., 2006; Vautard et al., 2010; Jiang et al., 2010; 王楠等, 2019）。就整个中国地区而言，风速的下降以强风的减弱更为明显（Guo et al., 2011; Zhang and Wang, 2020）。台站观测和再分析资料的诊断分析及模式数值模拟结果表明，中国区域近地面风速减小的可能原因分自然因素和人为因素两方面，前者包括气候变化背景下海陆热力差异、南北热力差异减小导致对流层低层气压梯度力的减弱，进而造成东亚冬季风和夏季风的减弱（大气环流因素，Xu et al., 2006; Guo et al., 2011），以及因气候变化导致的地表植被增加带来的地表粗糙度增大造成的风速下降等（Vautard et al., 2010；Zhang Z T et al., 2019）；后者包括人类活动伴随的土地利用变化和城市化导致的地表粗糙度的变化，以及气溶胶排放引起的地表辐射收支变化导致的气压梯度力的变化等（Bichet et al.,

2012; Han et al., 2016; Wu et al., 2018; 丁一汇等, 2020）。由于地表风速的变化存在明显的区域性特征，并且上述自然因素和人为因素并不是完全独立的（如气溶胶排放也会引起大气环流的变化），因此对于特定地区地表风速变化趋势的成因分析需综合考量各种潜在因素。与此同时，随着观测资料的更新，研究表明自 2010 年前后，北美、欧洲、东亚地区地表风速开始增加，这与植被和城镇化影响会造成风速持续下降的研究结果是矛盾的，因此风速的年代际变化（下降—上升）还会受到海气耦合系统内部振荡（如太平洋年代际振荡，北大西洋年代际振荡，北太平洋阿留申低压的变化等）的影响和调制（Zeng et al., 2019; Zhang and Wang, 2020）。

事实上，对地表风速长期气候状态的全面分析在一定程度上依赖于分析资料的质量，风速的演变更是存在显著的区域差异，因此对风速的分析还需考虑区域因素。中国幅员辽阔，大陆地形基本上分为 3 个阶梯，因此近地面风速会因观测站点的海拔高度不同而呈现不同的变化（陈昊明, 2009），同时西部地区因站点相对稀疏，对其气候状态的认识也较为有限。再分析资料因受预报系统和模式系统性偏差的限制，导致不同资料间近地面及对流层低层风速的气候分布和演变趋势存在较大的差异。在北半球中纬度大陆地区，欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的 ERA-Interim、美国的 MERRA-2、CFS 再分析资料均显著高估了气候平均 10 m 风速，相比之下，日本的 JRA-55 再分析资料对风速低估，偏差较小，上述资料系统性偏差同时存在季节和区域差异（Torralba et al., 2017; Miao et al., 2020）；对于北半球陆地区域（中国地区），现有再分析资料无法再现观测风速的趋势和年代际变化（Zhang and Wang, 2020）。

尽管再分析资料存在一定的不确定性，然而在观测资料时间长度有限、空间分布不均的前提下，长时间序列、高时间和空间分辨率的全球再分析资料在对地表风速气候特征分析以及风能资源的认识和评估方面依然有潜在优势。2017 年，ECMWF 发布了目前为止时空分辨率最高的全球再分析资料 ERA5。ERA5 利用其先进的模式和资料同化系统融合了大量的历史观测资料，由于短时预报准确性的提高，ERA5 资料的预报精度高于其前身 ERA-Interim（ERA5 资料南、北半球 500 hPa 位势高度的 365 d 平均距平相关系数高于 ERA-Interim）；由于时空分辨率的提高，ERA5 资料对热带气旋的刻画（中心气压数值及位置、气旋结构精细的时间演变）也更加准确；在日降水量、月降水时间演变方面 ERA5 资料与观测也较 ERA-Interim 更为接近（Hersbach et al., 2020）。美国国家航空航天局发布的 MERRA-2 再分析资料也是当前应用较为广泛的高时空分辨率全球再分析资料，Olauson（2018）评估了 ERA5 和 MERRA-2 这两套资料对欧洲地表风场的再现能力，结果表明 ERA5 表现总体好于 MERRA-2。目前，尚没有利用最新发布的 ERA5 资料对中国区域近地层风速开展研究的工作。因此，本文将基于台站观测资料，评估 ERA5 再分析资料对中国区域近地层风场气候特征及其变化趋势的再现能力，同时丰富对中国区域近地层风能资源的认识。

2　资料和方法

ERA5 为 ECMWF 第五代全球大气再分析资料，资料起始时间为 1979 年，并持续更新至实时 5 d 以内，其空间分辨率为 31 km（约为 0.28°），时间分辨率为逐小时（https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation [2020-07-15]）。ERA5 相对于其他再分析资料提供了 100 m 风场资料的输出，而这一高度正好是风电塔（风机轮毂）所在高度附近，是风电场最为关注的层次之一，且该高度层受下垫面的影响也相对较小。本文将同步分析并对比 ERA5 资料 10 m 和 100 m 高度的风速特征（两个高度均处于近地层）。ERA5 资料的分析时段为 1979～2018 年，共 40 年。春、夏、秋、冬四个季节分别为 3～5、6～8、9～11、12 月至次年 2 月。本研究关注中国区域近地层风速的气候特征，因此首先计算了原始资料每小时 10 m 和 100 m 水平风速，再把小时风速资料处理到月平均进行相关的分析，文中的标准偏差（SD）反映了近地层风速的年际变化，近地层风速线性趋势的分析均应用了显著性为 90% 的置信度检验（Student’s t 检验）。

为验证 ERA5 再分析资料的可信度，本文所用的台站观测为国家气象信息中心提供的中国地面气候资料日值数据集 V3.0 的日平均风速（http://data.cma.cn/[2020-07-15]）。由于 2018 年一些台站数据缺失，因此台站资料的分析时段为 1979～2017 年，全国共 826 个站点。ERA5 再分析资料也插值到台站进

行相应的对比。

3 结果分析

3.1 近地层风速年—季节—月平均气候特征

图 1 展示了 1979～2017 年台站观测及 1979～2018 年 ERA5 资料中国区域 39（40）年气候平均 10 m 和 100 m 风速及其年际标准偏差的空间分布。台站及 ERA5 资料 10 m 年平均风速均集中在 1～5 m s^{-1}，其中大风区（风速大于 3 m s^{-1}）分布在东北三省西部、内蒙古、新疆北部、青海以及西藏中西部，除了内陆成片的风速大值区外，东部沿海地区（30°N 以北）风速也相对较大。相比之下，中国中部、南部地区风速整体偏弱（1～3 m s^{-1}）。台站观测在中国东部地区一些高山站点风速很高（大于 5 m s^{-1}）。总体来说，ERA5 资料反映的年

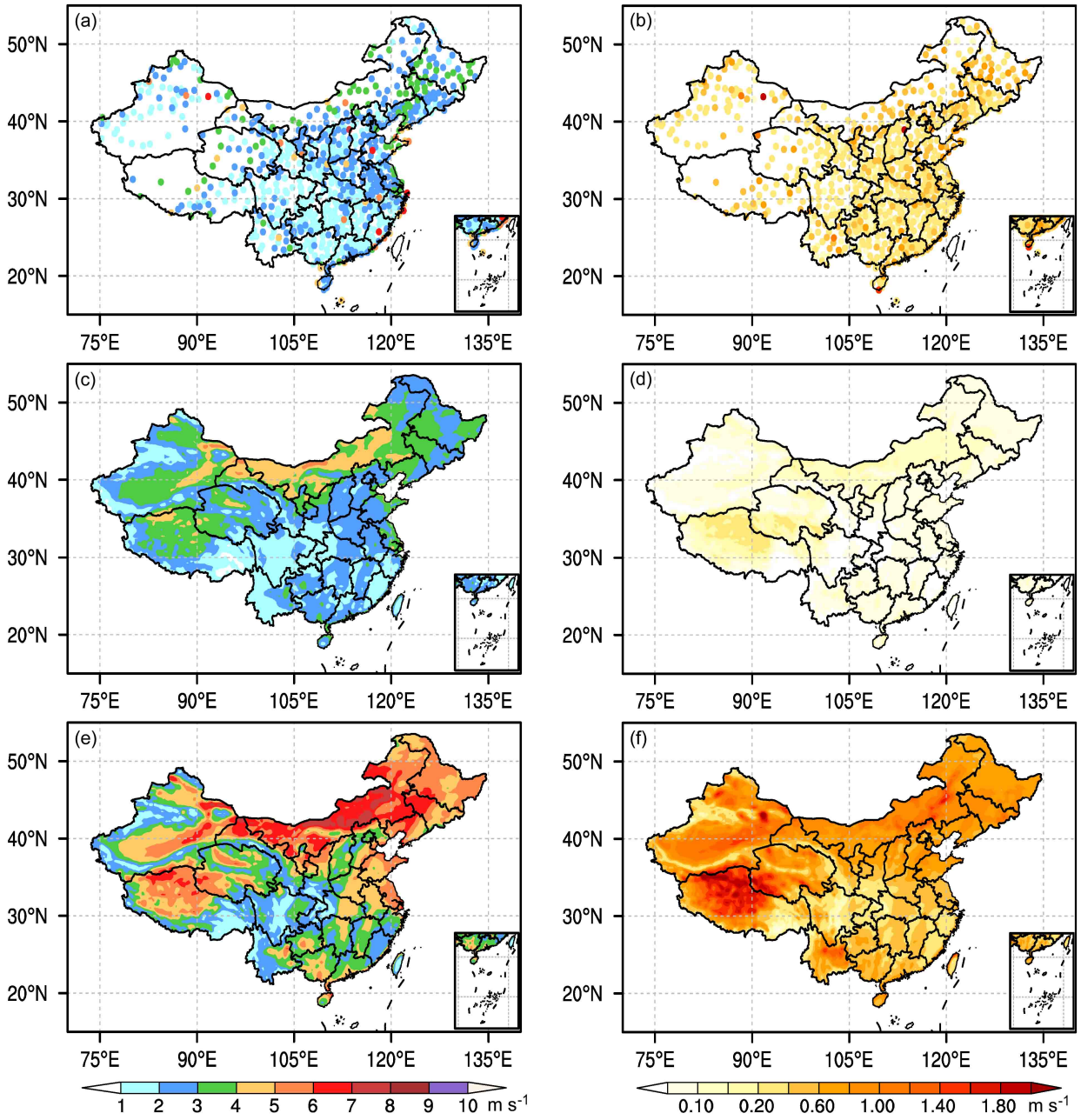

图 1 中国区域（a）1979～2017 年平均台站观测地表风速、1979～2018 年平均 ERA5 再分析资料（c）10 m 风速和 100 m 风速及其标准偏差（右列）的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of (a) the annual mean for in situ observed surface wind speed, (b) 10-m wind speed and (c) 100-m wind speed of ERA5 reanalysis and their standard deviation (right) over China during 1979–2017 (station)/ 1979–2018 (ERA5 reanalysis)

平均 10 m 风速分布与台站观测大体一致，在 826 个观测站点二者气候态的空间相关系数达到 0.66（通过置信度为 99% 的 *t* 检验）；在新疆南部的塔里木盆地，台站观测的风速较弱（1～2 m s^{-1}），ERA5 资料风速有明显高估（大于 3 m s^{-1}）。此外，ERA5 资料具有均一的空间分布，从而较台站观测能够更加完整并细致地刻画 100°E 以西地区地面风速的空间特征，如青藏高原中西部的风速大值区。ERA5 资料 100 m 高度的风速范围在 1～8 m s^{-1}，较 10 m 风速普遍偏强，其大风区（风速大于 5 m s^{-1}）的空间分布与 10 m 高度风速一致（对比图 1c 和 1e）。中国地区近地层风速的气候分布与地形密切相关，青藏高原西部及内蒙古所处的内蒙古高原风速普遍比东部平原地区风速强，四川盆地、青藏高原东南部、东部平原和低海拔地区风速相对弱。台站观测及 ERA5 资料两个高度层的年平均风速标准偏差量值分布与年平均风速量值的空间分布相似，即风速大的站点/地区其年际变化也相对大。然而，台站观测的年平均风速标准偏差明显高于 ERA5 资料，特别是在中东部地区二者的差异更为明显（对比图 1b 和 1d），ERA5 资料 10 m 年平均风速标准偏差在变化最大的青藏高原西北部地区也只有 0.2～0.4 m s^{-1}（图 1d）。100 m 高度年平均风速的标准偏差同样显著高于 10 m，在内蒙古东部、新疆东部及青藏高原西部可达 1.4 m s^{-1} 以上，云南地区尽管 100 m 风速相对较弱，但其年际变化较大，风速标准偏差仍可以超过 1.0 m s^{-1}（图 1f）。

台站观测及 ERA5 资料的 10 m 风速都存在明显的季节变化，且 ERA5 的风速偏强（图 2 和图 3）。以两大风速大值区为例，青藏高原西部冬春两季风速强，夏秋两季风速弱；内蒙古地区四季风速都相对较大，其中春季风速最大，冬、秋两季风速大值区位于内蒙古的东部地区，而夏季位于西部地区。然而，在新疆地区，春、夏两季风速强，秋季次之，冬季最弱，台站和 ERA5 资料在这一地区比较一致（尽管 ERA5 资料新疆南部地区风速较台站观测明

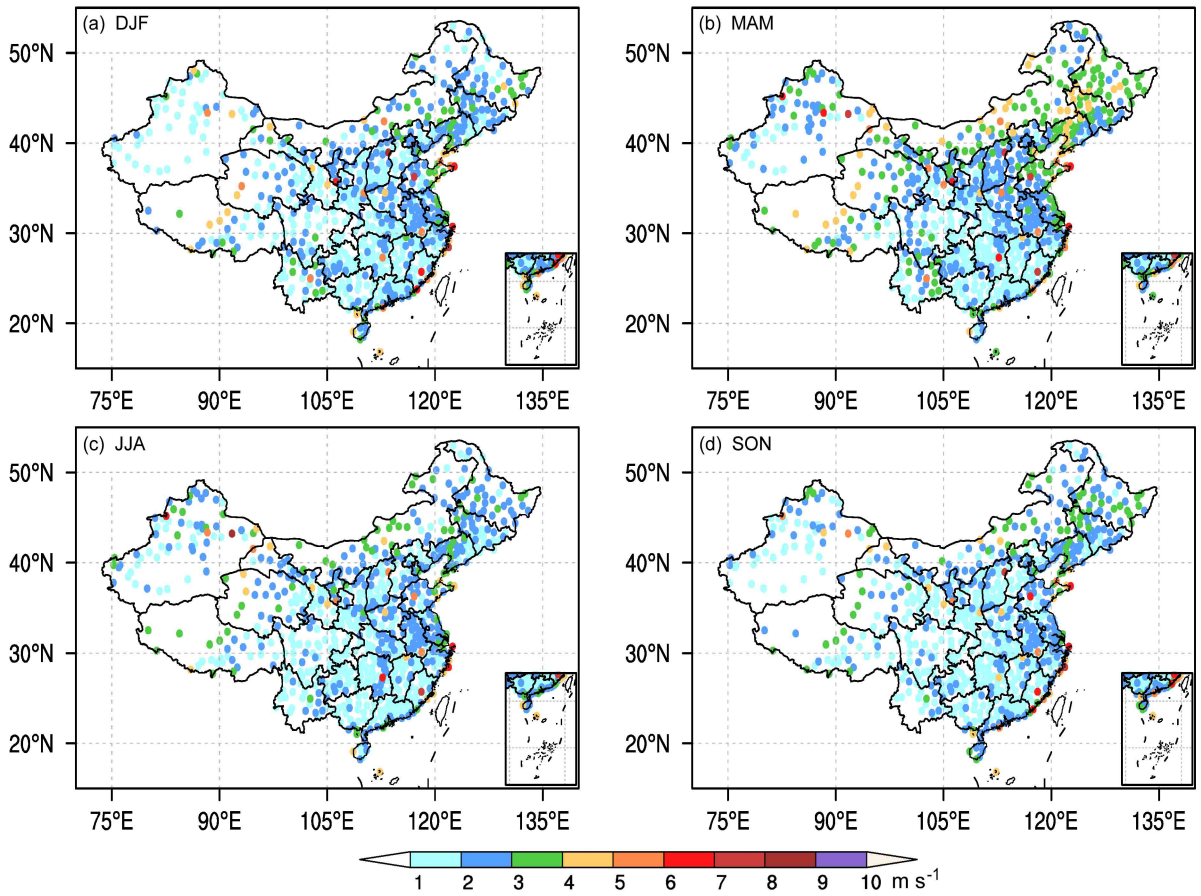

图 2　1979～2017 年台站观测风速（a）冬季（DJF）、（b）春季（MAM）、（c）夏季（JJA）、（d）秋季（SON）季节平均的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of the seasonal mean for in situ observed surface wind speed in (a) winter (DJF), (b) spring (MAM), (c) summer (JJA), and (d) autumn (SON) during 1979–2017

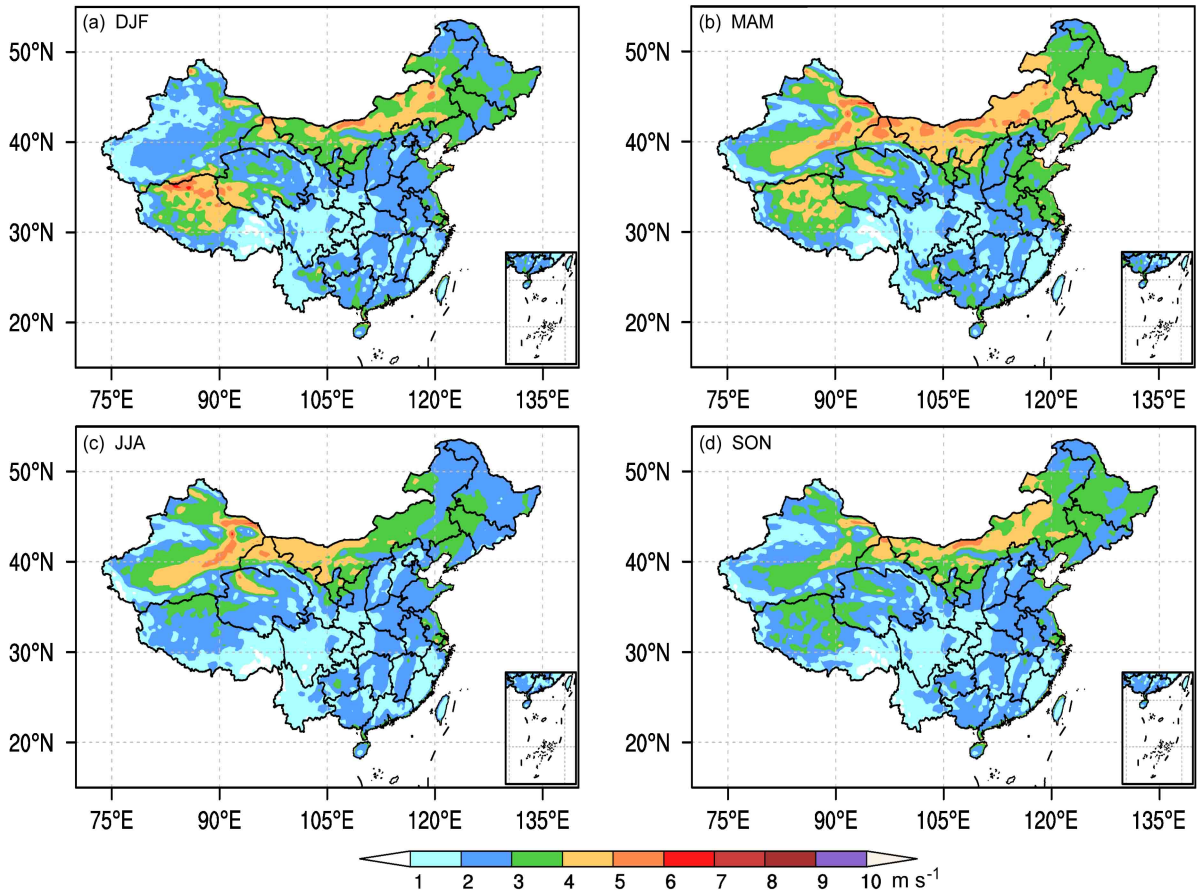

图 3 1979～2018 年中国区域 ERA5 资料 10 m 风速（a）冬季（DJF）、（b）春季（MAM）、（c）夏季（JJA）、（d）秋季（SON）季节平均的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the seasonal mean for 10-m wind speed of ERA5 reanalysis in (a) winter (DJF), (b) spring (MAM), (c) summer (JJA), and (d) autumn (SON) during 1979–2018

显偏强）。在中国其他地区除春季风速较强外，其他季节风速相对较弱且差异不明显。同时，ERA5 资料 100 m 高度的风速季节变化仍然与 10 m 风速空间分布相似，且风速普遍偏高 2～3 m s^{-1}，这里将不再赘述（对比图 3 和图 4）。

中国大陆地区所有台站及全国范围区域平均月风速演变如图 5 所示。在两个高度层上，两套资料的月平均风速在上半年（1～6 月）明显高于下半年（7～12 月），且下半年风速变化幅度较小（100 m 略大些）。台站、ERA5 资料插值到台站以及 ERA5 全国平均的 10 m 和 100 m 风速均在 4 月达到最大值，分别为 2.6、2.9、3.0、4.5 m s^{-1}；8 月为最小值，分别为 2.0、2.4、2.4、3.5 m s^{-1}，风速年较差分别为 0.6、0.6、0.6、1.0 m s^{-1}。ERA5 资料的风速明显高于台站观测（偏高 0.3～0.5 m s^{-1}；年平均正偏差为 0.4 m s^{-1}），春季风速较强时二者的差异略小。尽管台站观测的风速偏弱，但各个月份风速的标准偏差即年际变化很大（0.5 m s^{-1}），插值到台站的 ERA5 资料 10 m 风速标准偏差只有台站观测的 1/2（约 0.25 m s^{-1}），ERA5 资料全国范围区域平均的 10 m 和 100 m 风速标准偏差分别约为 0.25、0.4 m s^{-1}。

3.2 近地层风速的变化趋势

图 6 可见，台站观测风速整体呈现显著的下降趋势，其由 1979 年的 2.5 m s^{-1} 逐年减弱至 2011～2012 年的 2.1 m s^{-1}，此后 5 年风速逐渐增强。这种风速减弱的趋势变化与 Guo et al.（2011）、Lin et al.（2013）的结果非常一致，并且风速趋势的转折点与 Zhang and Wang（2020）的研究吻合。ERA5 资料能够较好地再现 1979～2017 年年平均 10 m 风速的年际变化，即风速偏强、偏弱年，如 1987 年、1996 年、2002 年、2010 年，但是却无法呈现台站观测风速在 1979～2012 年（2013～2017 年）的持续下降（明显增加）趋势。ERA5 资

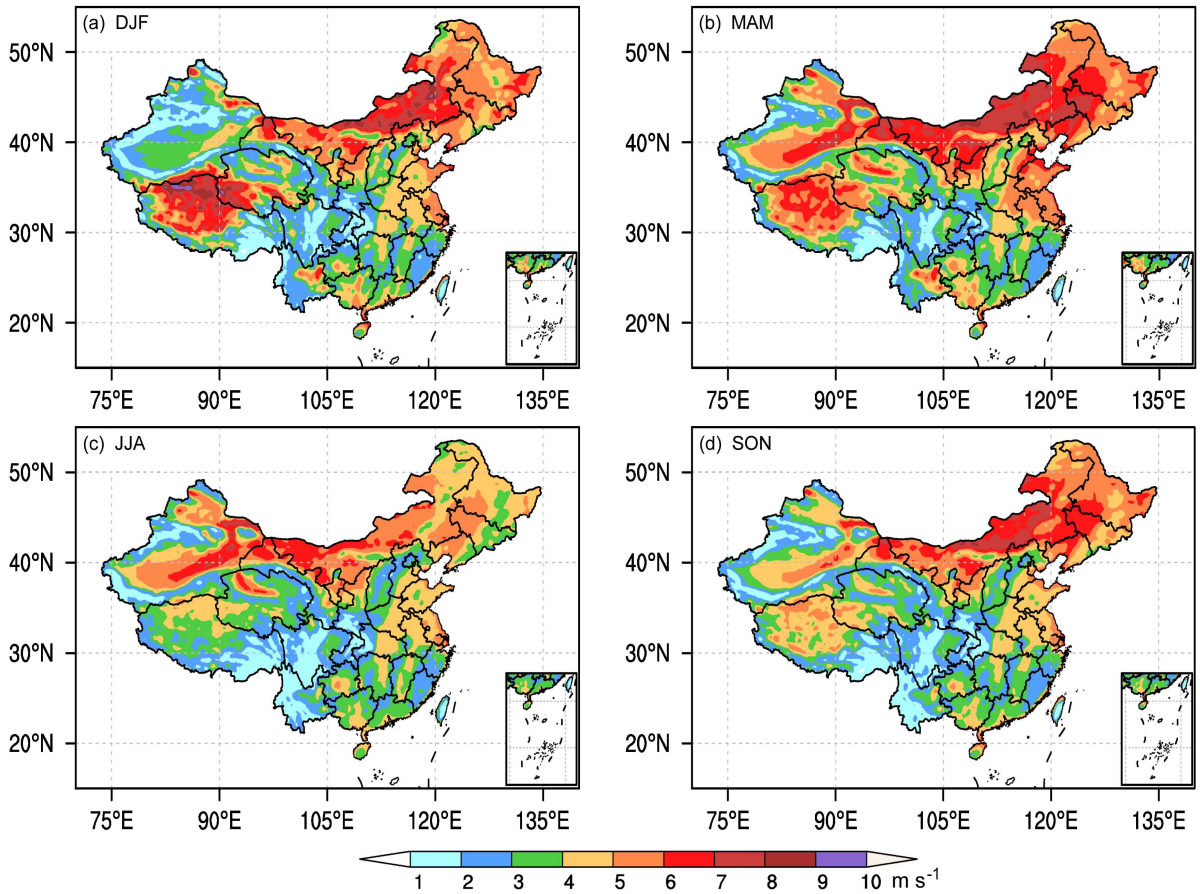

图 4　同图 3，但为 ERA5 资料 100 m 风速

Fig. 4　Same as in Fig. 3, but for 100-m wind speed of ERA5 reanalysis

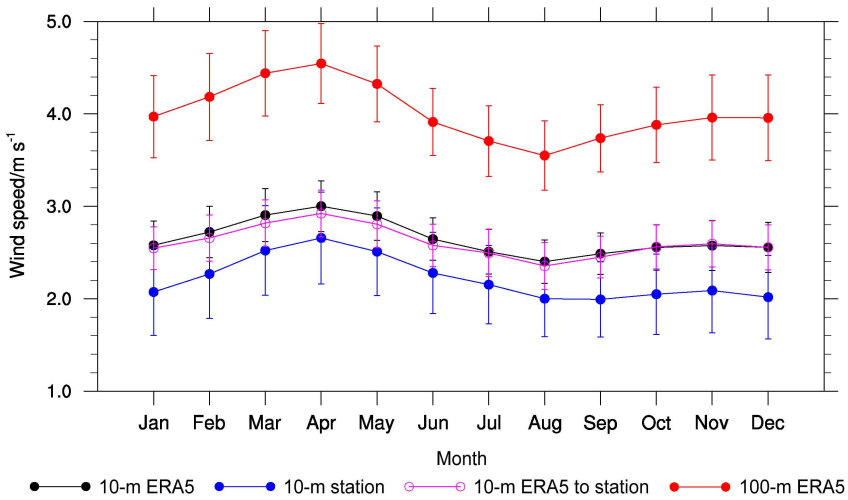

图 5　1979～2017 年台站观测平均 10 m 风速、ERA5 资料 10 m 风速插值到台站观测后平均、1979～2018 年中国区域平均 ERA5 资料 10 m 和 100 m 逐月月平均风速序列（竖立的直线为各自的标准偏差，单位：m s^{-1}）

Fig. 5　Time series of the monthly mean for in situ observed surface wind speed, 10-m ERA5 interpolated wind speed, and 10-m and 100-m wind speeds of ERA5 reanalysis and their respective standard deviation (vertical lines, units: m s^{-1}) during 1979–2018 (station)/1979–2018 (ERA5 reanalysis)

料插值到台站后与中国区域平均的地表风速演变序列相差无几，只是强度略弱，在 100 m 高度层风速多年的变化趋势同样并不明显，只是年际变化幅度略大。从四个季节来看，台站观测风速在平均风速最强的春季整体线性下降趋势最显著 [−0.5 m s^{-1}（39 a）$^{-1}$]；冬季风速在 1979～1992 年降幅最大

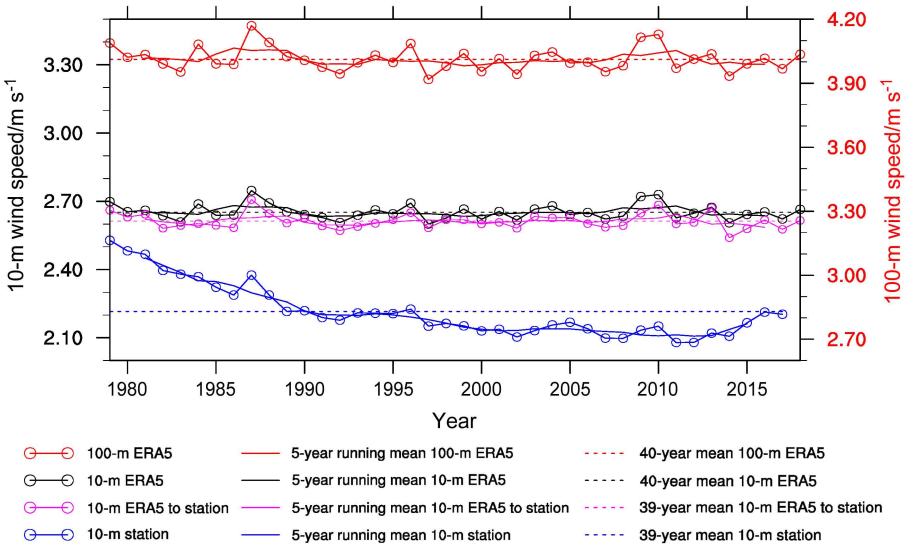

图 6 1979～2017 年台站观测平均 10 m 风速、ERA5 资料 10 m 风速插值到台站观测后平均、1979～2018 年中国大陆区域平均 ERA5 资料 10 m 和 100 m 年平均风速时间序列以及 5 年滑动平均风速及 40 年平均风速（单位：m s^{-1}）

Fig. 6 Time series of the annual mean for in situ observed surface wind speed, 10-m ERA5 interpolated wind speed, and 10-m and 100-m wind speeds of ERA5 reanalysis with the 5-year running mean wind speed and 40-year mean wind speed (units: m s^{-1}) during 1979 –2017 (station)/1979–2018 (ERA5 reanalysis)

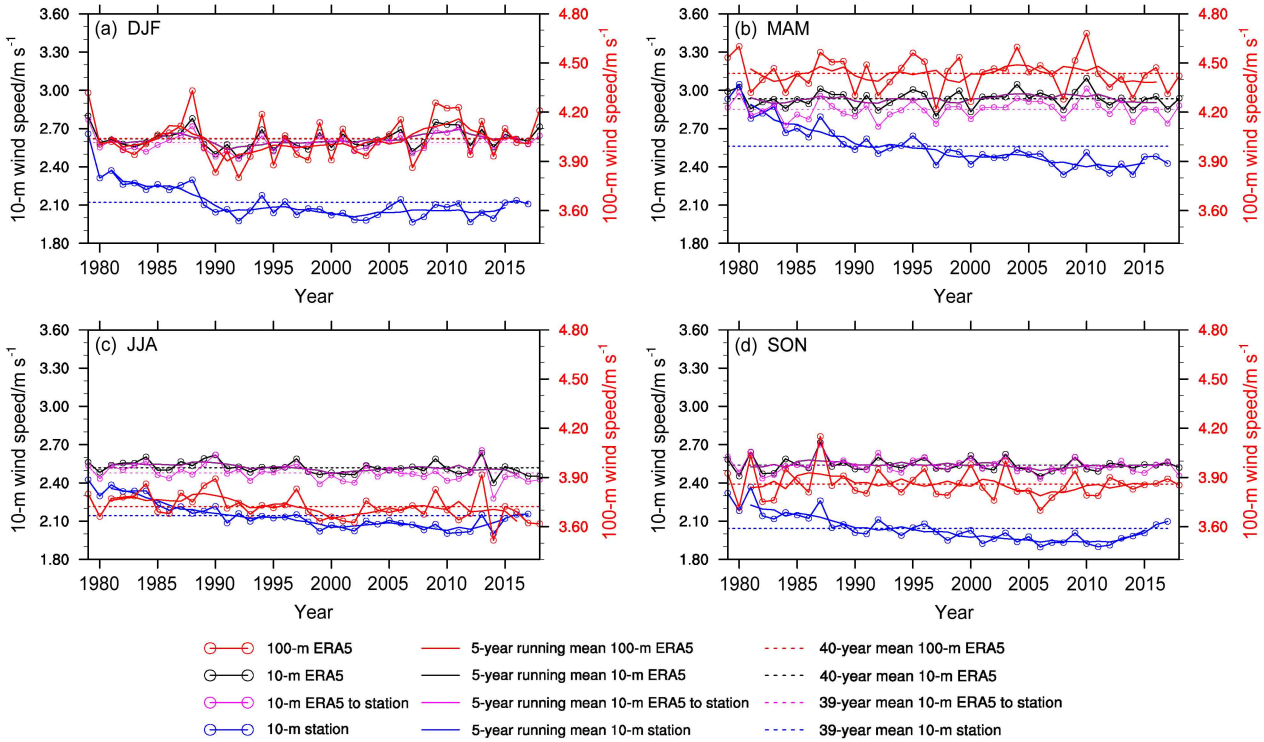

图 7 同图 6，但为（a）冬季（DJF）、（b）春季（MAM）、（c）夏季（JJA）、（d）秋季（SON）季节平均风速的时间序列

Fig. 7 Same as in Fig. 6, but for (a) winter (DJF), (b) spring (MAM), (c) summer (JJA), and (d) autumn (SON)

[−0.7 m s^{-1}（14 a）$^{-1}$]，其后风速线性趋势不明显；夏秋两季风速降幅较小 [约−0.3 m s^{-1}（39 a）$^{-1}$，图 7]。ERA5 资料两个高度层的风速在四个季节都没有显著的线性变化趋势，5 年滑动平均的风速与年平均风速相近。需要指出的是，ERA5 再分析资料所表现出的风速偏强及无明显风速变化趋势并不是其独有的。在 Miao et al.（2020）、Wang and Zhang（2020）针对北半球大陆地区和中国地区 10 m 风速变化的

分析中，ECMWF 的 ERA-Interim、美国的 MERRA、MERRA-2、CFSR 再分析资料均无法再现观测资料所呈现的东亚地区风速下降趋势，并且 ERA-Interim、CFS 和 MERRA-2 资料在东亚地区的风速也明显高于台站观测。相比较之下，只有日本的 JRA-55 再分析资料呈现出较弱的负偏差，并且能够再现东亚区域风速的下降趋势，但其降幅较观测明显偏弱。究其原因，JRA-55 在陆地上对地表风速相对较好的再现能力主要是由于该资料在生成过程中同化了台站观测的地表风场资料，而其他再分析资料并没有类似的处理（Torralba et al., 2017）。

尽管台站观测的风速从年平均和季节平均的角度在中国大陆区域整体都呈现一致的下降趋势，但在空间分布上，风速增加与下降并存且幅度相当（图 8）。在东北三省、内蒙古、青海、西藏、山东、江苏等省份，除了极少数站点外，风速在四个季节都呈现不同程度的下降趋势，春季降幅最大，其中东北三省西部四个季节的风速降幅均超过了 −0.16 m s^{-1}（10 a）$^{-1}$（图 8b）。风速变强的站点主要集中在平均风速相对较弱的中国中部和南部地区（甘肃、宁夏、陕西、山西、四川东部、重庆、湖北、云南、广东、广西、福建），夏秋两季增幅较大，其中广东、广西和福建大部分站点夏季风速增幅均超过 0.12 m s^{-1}（10 a）$^{-1}$（图 8c）。上述风速线性趋势的空间分布与 Fu et al.（2011）、Miao et al.（2020）、Zhang and Wang（2020）的分析结果相似，但因分析时段的差异，量值有所不同。由于不同地区风速长期变化趋势存在差异，正如丁一汇等（2020）、Zhang and Wang（2020）所分析的，近地层风速变化趋势的影响因子很多，并且不同区域的影响因素也存在差异。特定区域风速变化趋势的成因分析需结合气候背景、对流层低层环流场、土地利用变化、观测台站周边环境等因子综合展开分析。相关内容超出了本文的研究主题，因此不再展

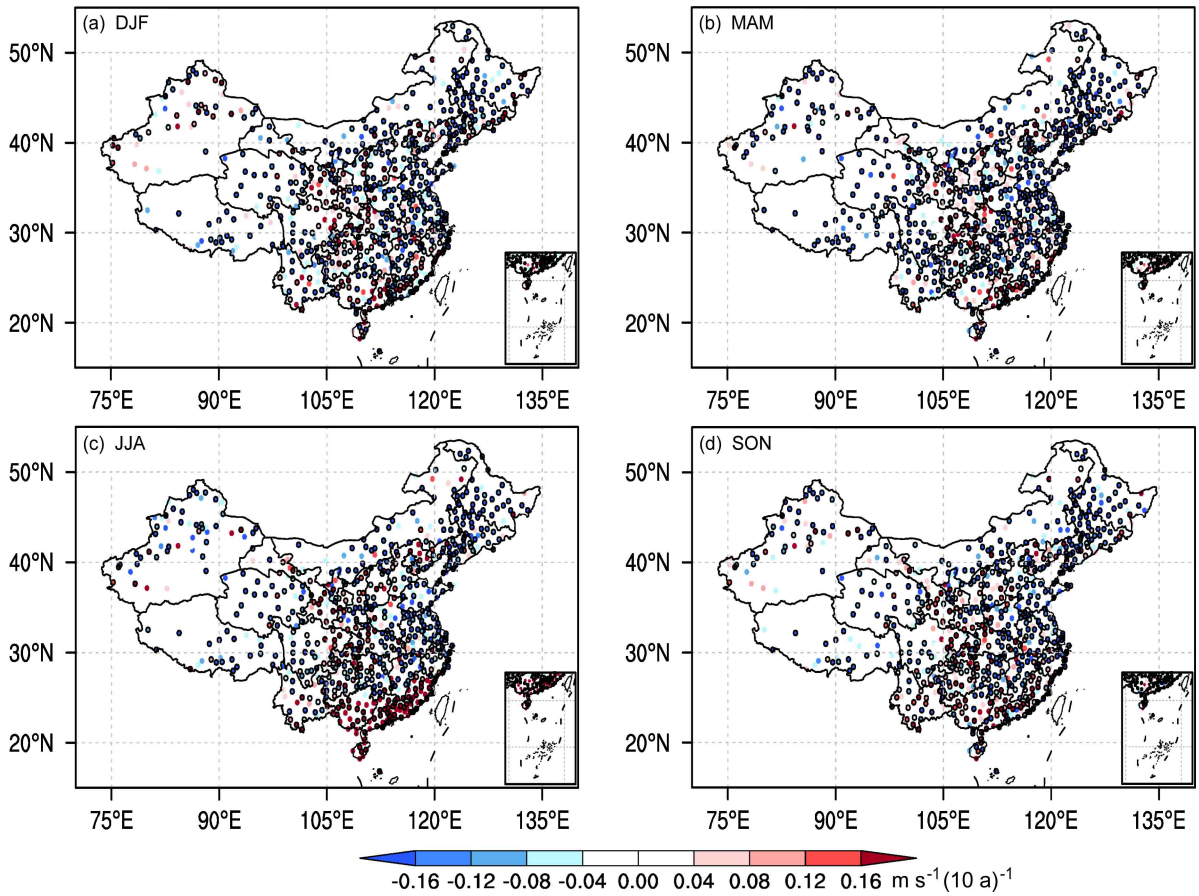

图 8　1979～2017 年（a）冬季（DJF），（b）春季（MAM），（c）夏季（JJA），（d）秋季（SON）台站观测风速季节平均的线性趋势。黑色圆圈点表示通过 90% 信度检验的台站

Fig. 8　Spatial distribution of the linear trend of the seasonal mean for in situ observed surface wind speed in (a) winter (DJF), (b) spring (MAM), (c) summer (JJA), and (d) autumn (SON) during 1979–2017. Dots with a black circle denote the results that are significant at the 90% confidence level

开讨论。

对于 ERA5 资料，尽管区域平均的年/季节平均风速变化趋势并不突出，10 m 风速变化趋势在中国大陆地区的空间分布却呈现出了季节和区域差异，但风速的增强或减弱幅度依然显著低于台站观测，且趋势变化与观测不一致（图 9）。具体来看，冬季青藏高原大部风速增加 [大于 0.04 m s^{-1}（10 a）$^{-1}$]，青海省南部风速则为下降趋势 [大于－0.04 m s^{-1}（10 a）$^{-1}$]；新疆北部和内蒙古西部分别为较弱的风速增加和下降趋势。春夏两季，青藏高原大部和华南沿海部分地区风速下降 [大于–0.08 m s^{-1}（10 a）$^{-1}$]，内蒙古大部和河西走廊在两个季节风速均有所增强（图 9b 和 9c）。秋季的风速变化趋势最弱，仅内蒙古东部—东北地区—广东沿海呈现相对较弱的下降趋势（图 9d）。中国中部以及南部地区台站观测到的风速增强信号在 ERA5 资料中并没有体现。100 m 风速变化趋势的空间分布与 10 m 类似，但其增加或降低的幅度更大（图 10），造成这种现象的可能原因在于，在中国（东亚）地区，大气环流驱动力的改变是近地层风速变化的主导因素，对流层低层风速的变化主要受气压梯度力控制（Zeng et al., 2019；Zhang and Wang, 2020），由于 100 m 高度受大气环流影响更大，而 10 m 风速受下垫面影响较大，因此 100 m 高度处风速变化的趋势（增强和减弱）强于 10 m 风速。

4 结论与讨论

（1）高时空分辨率的 ERA5 再分析资料能够较好地呈现中国大陆区域近地层风速的气候特征。ERA5 资料 10 m 风速与台站观测地表风速空间相关系数达 0.66（通过显著性为 99% 的 t 检验），气候平均正偏差为 0.4 m s^{-1}，在年—季节—月尺度演变的气候特征方面与台站观测一致，ERA5 资料 100 m 风速较 10 m 和台站观测风速普遍偏高。台

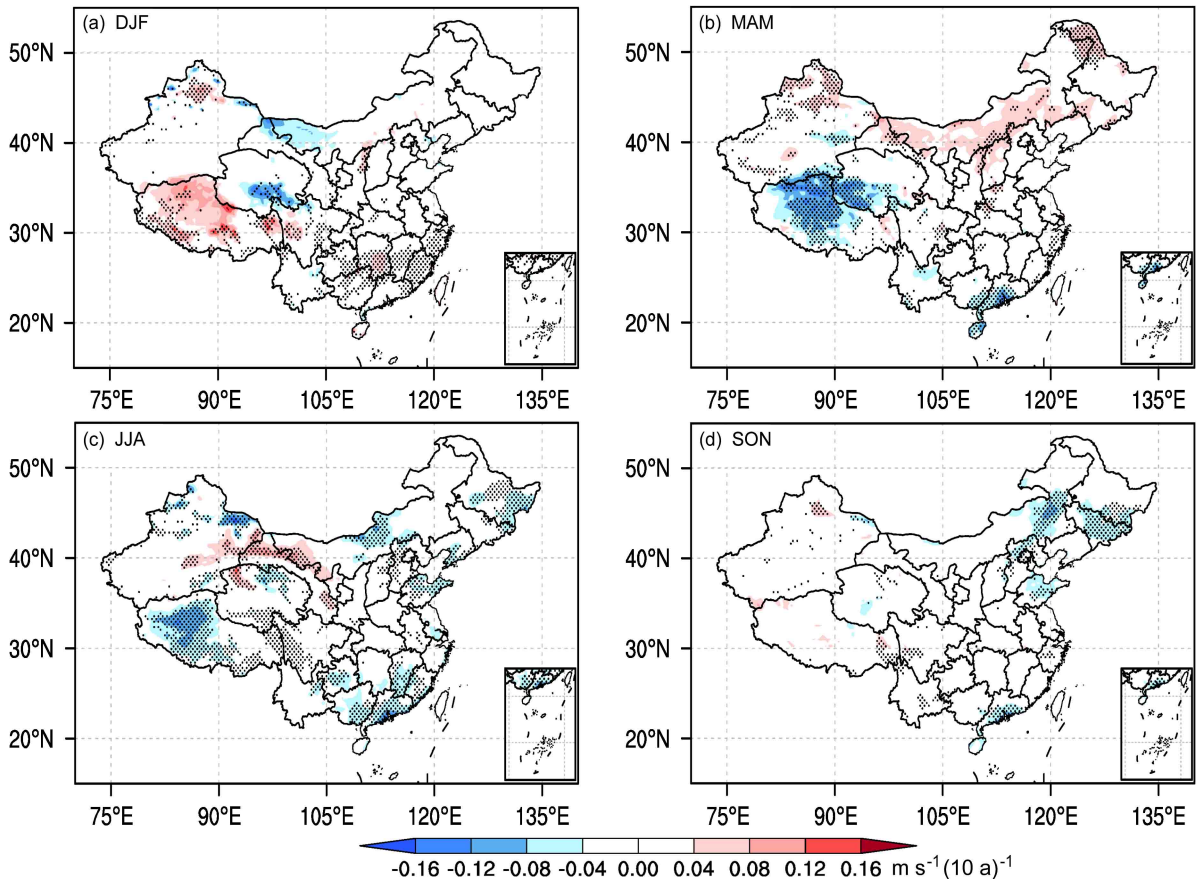

图 9 中国地区 1979～2018 年（a）冬季（DJF）、（b）春季（MAM）、（c）夏季（JJA）、（d）秋季（SON）季节平均的 ERA5 资料 10 m 风速线性趋势空间分布。黑点表示通过 90% 信度检验的区域

Fig. 9 Spatial distribution of the linear trend of the seasonal mean for 10-m wind speed of ERA5 reanalysis in (a) winter (DJF), (b) spring (MAM), (c) summer (JJA), and (d) autumn (SON) during 1979–2018. Black dots denote the results that are significant at the 90% confidence level

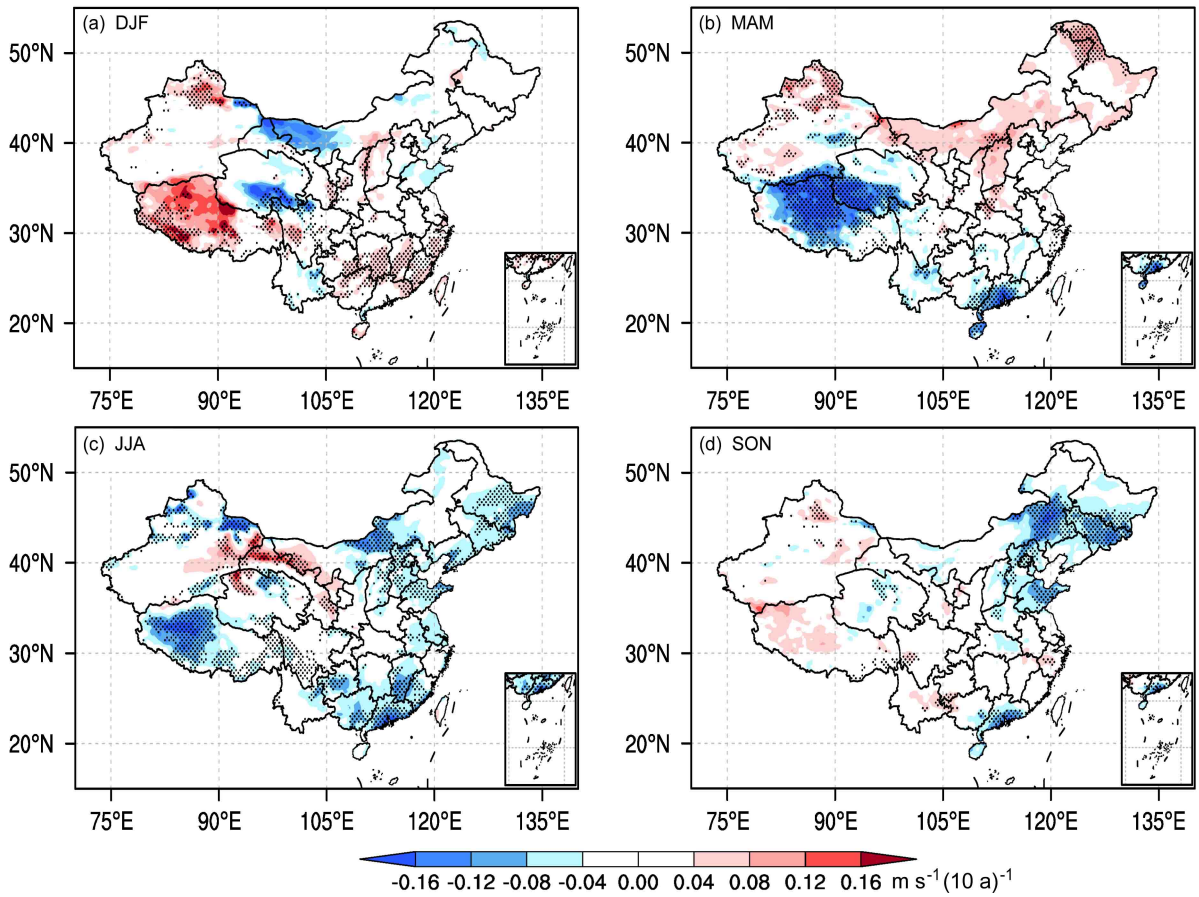

图 10　同图 9，但为 ERA5 资料 100 m 风速

Fig. 10　Same as in Fig. 9, but for 100-m wind speed of ERA5 reanalysis

站观测和再分析资料均显示，中国近地层风速具有显著的区域性特征，内蒙古、东北地区西部、新疆北部以及青藏高原西部地区均为风速大值区，四川及周边地区、新疆南部、中国南方地区风速相对较小（ERA5 资料在新疆南部近地层风速较强）。区域平均风速显示近地层风速在 1～6 月较强（4 月风速最大），7～12 月较弱且月际差异较小（8 月风速最小）。ERA5 资料在各月份都存在系统性的正偏差，多年月平均 10 m 风速较台站观测偏强 0.3～0.5 m s^{-1} 不等。在垂直方向，ERA5 资料 100 m 的风速较 10 m 风速整体偏高 1.2～1.4 m s^{-1}。

（2）台站观测风速 1979～2012 年间在中国大陆区域整体呈下降趋势，2013 年以后风速逐渐增强。从四个季节风速趋势的空间分布来看，风速大值区的风速下降幅度更大，中国中部和南部风速相对较弱的地区风速则呈现增强趋势。ERA5 资料在中国大陆区域两个高度层的逐年风速强度演变与观测的变化一致，但都没有明显的长期变化趋势，并且在季节尺度上风速变化趋势的空间分布与台站观测也存在差异。在垂直方向，ERA5 资料 100 m 高度的风速变化趋势与 10 m 风速一致，但是强度普遍偏大。

尽管 ERA5 是目前时空分辨率最高的全球再分析资料，但是与其他再分析资料相似，10 m 地表风速变量依然相对于台站观测存在系统性正偏差，虽然对风速的年际变化有很好的再现能力但却无法再现观测风速在中国近几十年的变化趋势。上述问题的可能原因在于，其一，由于 10 m 风速非模式预报变量，该变量的计算会受到每个模式不同诊断方法（如模式底层不同稳定度的假设条件）的影响，进而可能带来一定的系统性偏差，增加了再分析资料中 10 m 风速的不确定性（Torralba et al., 2017）。其二，尽管现有再分析资料同化了大量的观测数据，但因模式地形与实际地形的差异以及模式对大气边界层过程的不恰当描述，同化系统依然无法对陆地表面的风速进行有效同化（Zeng et al., 2019）。其三，正如 Zhang Z T et al.（2019）、Zhang and Wang（2020）的研究所指出的，地表粗糙度、海气耦合

系统年代际变化对北半球风速自 1970s 以来的减弱趋势贡献很大，而地表粗糙度的变化在再分析资料的生成过程中考虑得较少（或地表粗糙度的动态变化在再分析资料中不能时时体现），且现有的再分析资料的模式系统并非海气耦合模式，无法体现年代际尺度海气相互作用，这也是 ERA5 及其他再分析资料无法再现地表风速长期趋势变化的重要原因。

正如本文研究所揭示的，由于中国区域近地层风速空间差异显著且中国地形复杂，后续研究有必要结合地表观测、探空和测风塔等风速垂直观测资料对 ERA5 资料分区域开展更加细致的近地层风速特征分析，即评估对象不再局限于地表风速，从而丰富对再分析资料在不同区域和不同高度层的可信度及潜在的系统性偏差的认识。另一方面，由于中国大陆地区地表风速的趋势变化存在显著的区域性、季节和年代际差异，因此风速变化的影响因素相对复杂，需要根据特定的区域开展细致的分析，其成因分析不仅有助于理解风速趋势变化的可能机制，更能够为未来近地层风速的演变提供可能的指示，这对于风电行业的规划和布局具有重要的参考价值。因此，中国大陆内部更小范围的区域尺度风速趋势变化和成因分析也是我们未来研究工作的重点之一。

参考文献（References）

Bichet A, Wild M, Folini D, et al. 2012. Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model [J]. Geophys. Res. Lett., 39(11): L11701. doi:10.1029/2012GL051685

陈昊明. 2009. 风场日循环对长江流域降水日变化的影响 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 134pp. Chen Haoming. 2009. The influences of diurnal wind cycle on the diurnal variation of precipitation over the Yangtze River valley [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 134pp.

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 [J]. 应用气象学报, 31(1): 1−12. Ding Yihui, Li Xiao, Li Qiaoping. 2020. Advances of surface wind speed changes over China under global warming [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 31(1): 1−12. doi:10.11898/1001-7313.20200101

Fu C B, Yu J J, Zhang Y C, et al. 2011. Temporal variation of wind speed in China for 1961–2007 [J]. Theor. Appl. Climatol., 104(3–4): 313−324. doi:10.1007/s00704-010-0348-x

Guo H, Xu M, Hu Q. 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969−2005 [J]. Int. J. Climatol., 31(3): 349−358. doi:10.1002/joc.2091

Han S J, Tang Q H, Zhang X Z, et al. 2016. Surface wind observations affected by agricultural development over Northwest China [J]. Environ. Res. Lett., 11(5): 054014. doi:10.1088/1748-9326/11/5/054014

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 146(730): 1999−2049. doi:10.1002/qj.3803

Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. 2010. Changes in wind speed over China during 1956−2004 [J]. Theor. Appl. Climatol., 99(3 –4): 421−430. doi:10.1007/s00704-009-0152-7

Lin C G, Yang K, Qin J, et al. 2013. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960 [J]. J. Climate, 26(9): 2891−2903. doi:10.1175/JCLI-D-12-00093.1

Miao H Z Y, Dong D H, Huang G, et al. 2020. Evaluation of Northern Hemisphere surface wind speed and wind power density in multiple reanalysis datasets [J]. Energy, 200: 117382. doi:10.1016/j.energy.2020.117382

Olauson J. 2018. ERA5: The new champion of wind power modelling? [J]. Renewable Energy, 126: 322−331. doi:10.1016/j.renene.2018.03.056

任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. 气象学报, 63(6): 942−956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63(6): 942−956. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.06.011

Torralba V, Doblas-Reyes F J, Gonzalez-Reviriego N. 2017. Uncertainty in recent near-surface wind speed trends: A global reanalysis intercomparison [J]. Environ. Res. Lett., 12(11): 114019. doi:10.1088/1748-9326/aa8a58

Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, Thépaut J N, et al. 2010. Northern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness [J]. Nat. Geosci., 3(11): 756−761. doi:10.1038/NGEO979

Veers P, Dykes K, Lantz E, et al. 2019. Grand challenges in the science of wind energy [J]. Science, 366(6464): eaau2027. doi:10.1126/science.aau2027

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 [J]. 自然资源学报, 34(7): 1531−1542. Wang Nan, You Qinglong, Liu Juju. 2019. The long-term trend of surface wind speed in China from 1979 to 2014 [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 34(7): 1531−1542. doi:10.31497/zrzyxb.20190715

Wu J, Zha J L, Zhao D M, et al. 2018. Changes in terrestrial near-surface wind speed and their possible causes: An overview [J]. Climate Dyn., 51(5–6): 2039−2078. doi:10.1007/s00382-017-3997-y

Xu M, Chang C P, Fu C B, et al. 2006. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969−2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 111(D24): D24111. doi:10.1029/2006JD007337

Zeng Z Z, Ziegler A D, Searchinger T, et al. 2019. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production [J]. Nature Climate Change, 9(12): 979−985. doi:10.1038/s41558-019-0622-6

Zhang Z T, Wang K C, Chen D L, et al. 2019. Increase in surface

friction dominates the observed surface wind speed decline during 1973−2014 in the Northern Hemisphere lands [J]. J. Climate, 32(21): 7421−7435. doi:10.1175/JCLI-D-18-0691.1

Zhang R H, Zhang S Y, Luo J L, et al. 2019. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958−2015 [J]. Theor. Appl. Climatol., 137(3–4): 2785−2801. doi:10.1007/s00704-019-02769-0

Zhang Z T, Wang K C. 2020. Stilling and recovery of the surface wind speed based on observation, reanalysis, and geostrophic wind theory over China from 1960 to 2017 [J]. J. Climate, 33(10): 3989−4008. doi:10.1175/JCLI-D-19-0281.1

郑祚芳, 高华, 刘伟东. 2014. 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 [J]. 太阳能学报, 35(5): 881−886. Zheng Zuofang, Gao Hua, Liu Weidong. 2014. Influence of climate change and human activities of the near-surface wind energy potential over Beijing [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese), 35(5): 881−886. doi:10.3969/j.issn.0254-0096.2014.05.024