

全球变暖背景下风电开发面临的气候服务挑战

常蕊¹, 肖潺^{1*}, 王阳¹, 杨方², 刘昌义²

(1. 国家气候中心, 北京市 海淀区 100081;

2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031)

Growing Challenge of Climate Service for Wind Energy Deployment Under Global Warming

CHANG Rui¹, XIAO Chan^{1*}, WANG Yang¹, YANG Fang², LIU Changyi²

(1. National Climate Center of China Meteorological Administration, Haidian District, Beijing 100081, China;

2. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: In the context of climate warming, global low-carbon energy transformation makes the production, transmission, and dispatching of clean energy, especially wind energy, increasingly dependent on weather and climate conditions. Therefore, in the deployment and utilization of clean energy, climate services appear to be of vital importance. In order to further understand the current situation of climate service technology in the field of wind energy resources development, and to explore the future trend of climate science and technology innovation, the research progresses in the long-term trend of wind energy, the impact of climate change on the wind resources, as well as the harmonious development of wind energy and environment are reviewed and analyzed. Meanwhile, the challenges from the efficient utilization of wind energy in the future are also discussed. Then, in view of the safe and stable operation of wind energy resources in the future, some suggestions about the development of the climate services technology are put forward: 1) the global and regional climate models provide the necessary conditions for the projected wind energy potential, and the uncertainty of the projection should be reduced through multi-model assembly and observation constraints; 2) Based on the down-scaling technology and product research and development, the climate prediction system for wind energy should be built to improve the efficiency of wind power utilization; 3) Through field observation, mechanism understanding and numerical model development, a more sophisticated evaluation method for the

climatic and environmental effects of large-scale wind power development should be established, which provides support for the design of environmental friendly power stations.

Keywords: climate change; wind energy deployment; climate service; wind power

摘要: 在全球气候变暖背景下, 以风能为代表的清洁能源生产、传输和调度对气候状况的依赖度越来越高, 清洁能源开发利用中的气候服务显得至关重要。为深入了解风能资源开发领域的气候服务技术现状, 并探索未来风电开发中的气候科技创新发展趋势, 研究综述了全球风能资源长期变化趋势、气候变化对风能资源开发潜力的影响及风能开发与气候环境和谐发展等方面的技术进展, 讨论了未来风能资源高效利用所面临的挑战。针对未来风能资源开发利用和安全运营指出: 全球和区域气候数值模式为风能资源开发潜力预估提供了必要条件, 但需通过多模式集合和“观测约束”等手段来减少预估的不确定性; 未来需通过动力降尺度技术及能源服务产品研发等, 构建面向风电开发的能源气候预测业务体系, 提高风能利用效率; 通过实地观测-机理认识-数值模型研发等, 建立大规模风电开发的气候环境效应科学评价方法, 以期有效支撑环境友好型清洁能源电站的规划设计。

关键词: 气候变化; 风能利用; 气候服务; 风力发电

0 引言

大力发展清洁能源, 是全球气候治理和实现碳中和目标的重要举措。预计到2050年, 全球总能源供应中的清洁能源比例将超过50%^[1], 能源清洁低碳转型加速已经成为全球发展趋势。风能作为重要的清洁能源之一, 将大气流动产生的动能转化为电能, 其开发利用受气候状况的直接影响。鉴于此, 2015年经世界

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1502803, 2018YFE0196000); 全球能源互联网集团有限公司科技项目(101662227)。

National Key Research and Development Program of China (2018YFB1502803, 2018YFE0196000); Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (101662227).

气象大会授权批准，将能源行业新增为世界气象组织（WMO）全球气候服务框架（GFCS）下，继农业、水资源、防灾减灾和公共卫生之后的第五大优先发展领域^[2]。全球气候服务框架的建立不仅为全球风能气候服务技术创新合作提供了一个重要平台，也强调了气候变化与风能利用之间的密切关联。

目前，历史的、预测的和预估的气候变化信息已渗透至风能资源开发潜力评估、能源气候预测、风能利用与气候环境和谐发展等若干层面。事实上，风力发电自20世纪30年代起步时就已经与气候特征紧密关联在一起，如当时的小型风机被广泛安装在多风的海岛区域、风机设计会充分考虑风速风向的不稳定性等。进入21世纪以后，伴随着清洁能源的快速发展，全球范围内实施了多个重大研发计划项目，如欧盟“地平线2020”计划、哥白尼气候变化服务计划等，用来促进包括气候科技创新在内的低碳能源技术研发。

风能资源开发领域的气候科技不断创新，促进了能源低碳转型发展；以风电为代表的低碳能源行业转型发展，也对气候变化背景下的能源气候科技进步提出了新的挑战。

1 历史风速长期变化趋势

研究表明，近地面风速下降1%~5%将导致每年损失1.7%~8.6%的风能^[3]，因此全球气候变化引起的近地面平均风速的长期变化将直接影响风能资源的开发利用潜力。大量基于地面气象台站观测资料的研究发现，自1960年以来，全球及区域陆地近地面风速以减弱趋势为主，其中北半球的东亚、中亚、南亚、欧洲和北美，地面风速近30年下降了5%~15%^[4-10]，南半球澳大利亚的地面风速也呈现出减弱趋势^[11]（见表1），中国的风速变化曲线见图1。上述风速减弱现象被称为“全球地面风速静止（global stilling）”，相关学者认为植被生长活动增强或城市化引起的地表粗糙度增加^[12-15]，导致了全球地面风速减弱。

表1 观测的近地层风速变化趋势

Table 1 Trends of observed near-surface wind

研究者	区域	观测时段	风速变化特征
赵宗慈 ^[4]	欧洲	1979—2008	平均风速每10年减小0.09 m/s
VAUTARD R ^[13]	中亚	1979—2008	平均风速每10年减小0.16 m/s

续表

研究者	区域	观测时段	风速变化特征
TIAN Q ^[5]	北半球	1979—2016	北美30%、欧洲50%和亚洲80%的站点风能资源累积减小30%
PRYOR ^[6]	美国	1973—2005	观测风速显著减小
EARL N ^[8]	英国	1980—2010	平均风速显著减小
WAN ^[10]	加拿大	1953—2006	南部、西部风速减小，中北部风速增大
TROCOLI A ^[11]	澳大利亚	1975—2006	平均风速每10年减小0.09 m/s
JIANG Y ^[12]	中国	1956—2004	大风减少，小风增加，平均风速每10年减小0.12 m/s

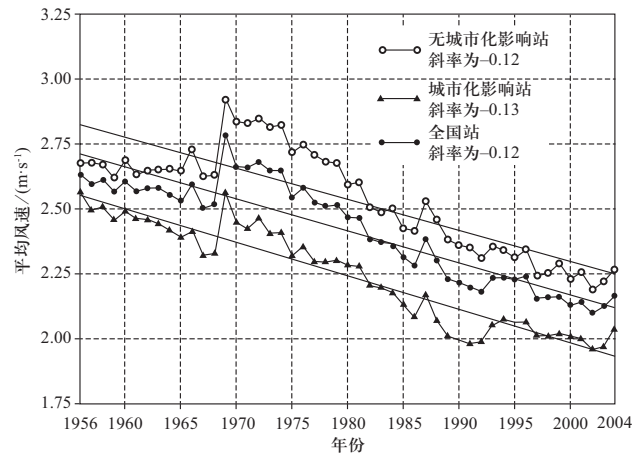


图1 中国全国站、城市化影响台站和无城市化影响台站年平均风速变化曲线（1956—2004，引自文献[12]）

Fig. 1 Trends of mean wind speeds for urban stations, rural stations and all stations in China from 1956 to 2004 (sourced from literature [12])

由于近地层风速随高度的变化取决于局地地形、地表条件以及大气稳定性，上述地面台站观测的风速变化趋势难以准确表征风机轮毂高度处的风能资源变化特征，而再分析资料因其均匀的时空覆盖优势逐渐成为风能资源长期变化趋势分析的重要数据源^[16-20]。目前适用于风能资源变化趋势分析的全球再分析资料包括美国的NCEP/DOE的再分析资料集R2^[21]、NCEP气候再分析资料集CFSR/CFSv2^[22]、NASA的气候再分析资料集MERRA-2^[23]、日本的JRA-55再分析资料^[24]和欧洲中期数值预报中心（ECMWF）的ERA40^[25]、ERA-interim^[26]及ERA5^[27]等，资料基本信息见表2。与实测资料的对比分析发现，再分析资料总体上可以较好地反映20世纪80年代以来北半球陆地区域风功率密度的减弱趋势^[28-30]，但由于每套再分析资料都有其自身特点，如美国的几

套再分析资料同化了大量的卫星观测资料；欧洲ECMWF的再分析资料则同化了台站观测资料；日本的再分析资料同化了大量近年来亚洲地区的观测资料，包括青藏高原和南海的科学考察资料^[31]等，造成了不同区域再分析产品再现近地层风速时空特征的能力不同。整体来看，JRA-55最适用于亚洲，CFS和MERRA-2分别在欧洲和北美洲表现最好^[28]。

表2 适用于风能资源历史变化趋势分析的再分析数据集
Table 2 Reanalysis datasets used for trend analysis of winds

名称	研发机构	分辨率	时间范围
NCEP/DOE-R2	美国国家环境预报中心与能源部	2.5°×2.5° 逐6小时	1979至今
CFSR/CFSv2	美国国家环境预报中心	0.5°×0.5° 逐6小时	1979—2010/ 2011至今
MERRA-2	美国国家航空航天局	0.625°×0.5° 逐小时	1980至今
JRA-55	日本气象厅	1.25°×1.25° 逐小时	1958—2012
ERA5	欧洲中期数值预报中心	0.25°×0.25° 逐小时	1979至今

近期，研究表明全球地面风速经过几十年的减小后，从2010年开始逐渐快速反弹，增速是2010年以前下降速度的3倍，其中北美、欧洲和亚洲3个区域增长最为显著^[32-33]，同时指出上述气候尺度上的风速变化与大规模的海洋/大气振荡有关^[32]。

2 未来风能资源开发潜力

目前，针对未来风能资源开发潜力的研究主要依赖于全球耦合模式比较计划（coupled model inter-comparison project, CMIP）不同排放情景下的风速预估结果。尽管有研究指出全球气候模式对风速的模拟存在缺陷，模拟风速的减弱趋势低于实测风速，但仍有部分海-气耦合模式能再现地面风速的减弱特征^[34]，具备开展未来风能资源潜力预估的能力。鉴于此，相关学者利用全球或区域气候模式的集合预估资料分析发现：在温室气体高排放情景下，本世纪后期（2079—2099年）冬季（夏季）美国中部和中东部、加利福尼亚海岸以及美国南部和东部沿海的10 m风速每10年增加（减少）5%~10%^[35]；中排放情景下，本世纪中后

期（2061—2100年），欧洲中北部（南部）的年平均风力发电潜力很可能增加（减少），变化幅度保持在±10%，冬季变化更显著^[36-38]；中高排放情景下，本世纪中期美国西北部夏季风速减小5%~10%，轮毂处的发电潜力减少40%左右^[39]；高排放情景下，本世纪末南美副热带西海岸风速则小幅增加^[40]。将全球气候模式模拟结果与风功率曲线相结合，文献[41]在全球尺度上开展了气候变化对未来风能资源的影响评估，结果显示未来高排放和低排放情景下，至本世纪末，北半球中纬度地区的风能资源可能会减少，而热带和南半球的风能资源会增加，并认为上述风能资源的长期变化与北极升温引起的北半球温度梯度减弱及南半球海陆温差加大有关。

针对中国区域，文献[42]利用CMIP多个全球气候模式考虑高、中、低3种温室气体排放情景的集合预估结果，分析表明：本世纪中国区域近地层年平均风速呈减小的趋势，且排放浓度越强，变化趋势越显著，模式间的一致性越高。研究进一步指出，风速的变化趋势具有空间差异和季节差异：西部（东部）地区呈减小（增加）趋势；温室气体排放浓度越大，21世纪后期中国冬季（夏季）风速偏小（偏大）的范围越大，程度越明显。文献[43]利用区域降尺度研究发现，中等排放情景下，21世纪中期中国“三北”地区冬季风力发电潜力将增加5%以上，而其他季节（即春季、夏季和秋季）将显著减少（约6%）。

近期，中国气象局国家气候中心使用CMIP5计划中的3个全球气候模型多情景模拟结果驱动区域气候模式（RegCM4.4），完成了中国地区气候变化降尺度模拟试验，模式水平分辨率为25 km，垂直方向18层，模拟时段为1979—2099年。基于以上降尺度的集合预估结果，分析发现不同排放情景下，21世纪中期和末期，80 m轮毂高度处的风速南方地区一致增加，西部地区（包括西北及西南）则明显减少^[44]。

综上所述，全球和区域气候模式为风能资源开发潜力预估提供了必要基础，但大部分的研究也指出，需科学认识全球气候模式在未来风能资源潜力预估方面的不确定性。研究发现各气候模式在不同区域、不同季节、不同排放情景下的模拟性能存在差异，因此针对特定区域，需通过观测风场资料与历史模拟资料的对比分析，挑选出模拟性能较好的气候模式组，进而通过多模式集合和“观测约束”^[45]来减少未来风能资源潜力预估结果的不确定性。

3 全球变暖背景下的能源气候预测

全球气候变暖除了在上述年际-年代际尺度上影响清洁能源的开发潜力外，近地层风速在中长期时间尺度上的波动性和不稳定性也会给电力系统和电网运行调度带来巨大挑战，而月尺度-季节尺度的能源气候预测被认为是解决这一问题的有效手段之一。同时，气候变化引起的季节尺度能耗需求变化也会给风能资源开发带来潜在影响，例如寒冷的冬季供热能源需求量很大，但通常是干燥小风的，清洁能源供应减少；而供热需求较低的暖冬通常是湿润大风的，风电和水电的能源供应增加^[46]。因此，月尺度-季节尺度的气候预测也是能源供需结构调整优化的重要支撑。

尽管风能资源气候预测是一个具有较大挑战性的技术难题，但近年来，随着全球气候模式研究快速发展及能源行业实际应用需求的不断增长，利用气候模式预测未来月尺度-季节尺度的能源变化趋势，包括风速、气温、湿度、太阳辐射、云量、降水、海浪等要素的研究逐渐成为关注焦点^[47]。

为此，欧洲哥白尼气候变化服务计划先后启动了欧洲气候与能源融合（ECEM）^[48]及能源领域的气候信息（CLIM4ENERGY）^[49]两个重大项目，旨在从次季节-季节，甚至更长期的气候预测技术研发方面为能源部门提供定制化的气候服务，即通过分析气候变化引起的能源需求及供应变化，为欧洲地区提供气象（风速、太阳辐射、气温等）和能源（容量系数、能源需求等）的中长期预测及与能源供需相联系的潜在气候风险信息，从而助力能源企业提前做好季节调度计划，提高风能开发的气候变化适应水平。

在全球能源气候预测服务技术研发中，为了降低预测的不确定性，哥白尼计划引入了来自欧洲中期数值预报中心（ECMWF）、英国气象局（Met Office）、法国气象局（Météo-France）、德国天气预报服务公司（Deutscher wetterdienst, DWD）、欧洲地中海气候变化中心（CMCC）、美国国家环境预报中心（NCEP）等6家机构的全球气候模式预测结果进行集合预测，最终提供未来6个月全球 $1^\circ \times 1^\circ$ ，6小时分辨率的10 m风速、2 m气温露点、表面气压及12小时分辨率标准等压面上的风速、湿度和温度的季节预测产品^[50]。2018年以来，上述项目成果逐渐发展成为一个气候服务系统，作为哥白尼气候变化服务项目的一部分已进入运行服务阶段，是清洁能源气候服务领域中一个重要的组成部分。

上述全球气候模式的多圈层耦合特征使其无法精确解析或再现引起气候变化的所有物理过程，导致全球模式的模拟预测存在系统性偏差^[51]。一方面需要进行必要的偏差订正^[52]，提供更有效的气候服务信息，已有研究利用ERA再分析资料对全球气候模式预测的10 m风速和气温进行偏差校正，取得了较好的应用服务效果。另一方面，相比于全球气候模式，区域气候模式具备较高的时空分辨率、更完善的物理参数化方案，对局地强迫引起的气候特征具有更好的模拟能力^[53-57]。鉴于此，利用区域气候模式具有针对性的风能资源次季节-季节尺度的气候预测服务工作逐渐展开。如美国AWS Truepower是全球较早发布月尺度风速预测的机构之一；近期，中国国电投集团电力气象实验室与法国美迪公司合作，尝试提供中国区域未来1~3个月的风速趋势预测产品；中国气象局国家气候中心利用自主研发的全球气候模式BCC_CSM驱动区域气候模式BCC_CWRF^[57]，开展东亚区域30 km分辨率未来10~30天、月、季尺度的常规气候预测业务，其风场预测产品在风能资源预测方面具有较大的应用潜力。

尽管相关研究在风能资源气候预测方面取得了初步结果，为未来风电的高效开发利用提供有效支撑，但上述研究成果在实际应用过程中，需充分考虑气候模式预测的不确定性；同时需通过降尺度、后处理等技术手段研发更具风电行业服务针对性的气候预测产品。

4 大规模风能利用对气候环境的影响

近年来，大规模风电开发造成近地层大气湍流、平均风速和地表粗糙度的改变引起的气候环境效应也成为风电领域的一个热点问题。基于风电场内外少量气象探测资料的分析表明：风电场内部相对于外部存在白天降温、夜间升温的现象^[58-60]；风机轮毂所处高度湍流显著增强^[61]；陆上风电场下游观测到风速衰减现象，当入流风速为8~9 m/s时，风电场下风方向11 km处的风速与原风速的比值为0.9^[62]，当气流经过海上风电场后，根据不同的环境风速、大气稳定度及风电场装机规模，在风电场下游5~20 km范围内，风速恢复比例为2%以内^[63]，也有观测显示风电场对下游地面风速的削弱程度有限^[64]。导致上述研究结论不确定性较大的根本原因是缺乏足够的对比观测资料，进而限制了对风电场运行影响的物理机制的认识。

目前,已有的少量风电场内外气象条件对比观测平台位于美国加州、苏格兰Black Law、产丹麦等地。中国在这方面暂时没有建立相应的观测平台,而中国风电累计装机量居世界第一位,包含8个千万千瓦级的大型风电基地,且未来还会不断发展,这些都为进一步开展相关的气候影响观测评估提供了有力条件。

与此同时,由于观测资料在时空尺度及气象要素种类上都十分有限。为了获取研究所需要的更多气象要素、更长时间、更广空间的数据,学者们往往借助数值模拟手段来研究风电场的气候效应。早期的数值模式是通过改变风电场所在位置的地表粗糙度的方式来模拟风电开发对气候的影响。模拟估算表明,如果用风能满足全球能源的需求,风能开发对1 km以下的大气层能量的损失大约为0.006%~0.008%,比气溶胶污染和城市化对大气能量的损耗小一个量级^[65];如果风电能够满足10%的全球电力需求,则会导致内陆地表增温1℃以上^[66];Frandsen等人通过设置900 km²范围的大规模风电场模拟发现,大型风电场下风向风速减弱的影响经过30~60 km的距离就可以恢复^[62];也有研究表明风电场对地表粗糙度的改变,导致过去几十年里,中国、荷兰及美国等中纬度以北区域地表风速减小5%~15%,且小风速减小更明显^[67];风机叶片运转增加了大气的垂直混合动力和热量,在夏季的清晨,通常会导致近地表空气变暖变干^[68];也有模拟发现,白天风机的扰动增加了地表的水汽通量,通过蒸发降低温度^[69];温度模拟结果表明,叶片转动在正温度梯度下产生增温效应,在负温度梯度下产生降温效应^[58],但其影响程度相对于人类温室气体排放造成的气候效应而言是可以忽略的^[70]。

为了在区域尺度上细致刻画风机对大气边界层气象要素的影响,Fitch等人通过叶片转动减少动能和增加气流扰动实现对风机气候效应的显式参数化^[71],并成功将其嵌套至中尺度WRF数值模式中,为科学开展风电场的气候效应评价工作奠定了基础。检验分析表明,上述数值模式能较好地重现风电场区域内近地层气象要素(地表温度)的时空变化特征^[72]。在此基础上,Haan等人利用该模块对英国和丹麦2个海边风电场的模拟研究发现,风机运转能够在下风向几千米的范围内削减近15%(3 m/s)的风速^[73];Fitch模型在挪威风电场的模拟也表现出类似的风速减弱特征^[74];Sun等人利用该模块,通过敏感性数值试验的手段对中国大规模开发风电场的潜在气候效应进行定评估,发现在当前风电发展情景下,风电场能够对中国的局

地和区域气候产生影响,能够同时引起某些区域内低层(2 m温度、100 m水平风速)和高层(500 hPa位势高度场)大气的变化,但这种变化要远小于气候本身的年际自然变率^[75]。除此之外,胡菊等人通过定常调整地表动力学粗糙长度和近地层大气交换特征,在区域气候模型(RegCM)中实现对风机气候效应过程的数值参数化,并在甘肃河西走廊酒泉风电基地开展了敏感性数值试验,对该区域大规模风电开发的气候效应进行了评价^[76]。

综上所述,风电场的气候效应可大致归纳如下:首先,风电场需要提取大气环境中的动能来制造电能,从而可以将风机作为大气中的动能汇;其次,风机在转动的过程中会搅动大气,增加大气中的混合运动,从而能够将风机作为大气中的湍流源;最后,风电场的建设会改变原本的下垫面类型,增加地表的粗糙度^[77]。数值模型能在多大程度上刻画这一物理过程直接影响着最终评估结论的科学合理性。尽管现有的数值模拟研究取得了初步进展,但数值模式对风电机组运行与大气湍流运动相互作用的数学物理表达尚存在较大不确定性^[78]。因此,迫切需要开展更多的外场对比观测实验、认识影响机理、建立更加复杂精确完备的评估模型,开展科学评估。同时,在开展科学评估过程中,时刻牢记清洁能源开发带来的二氧化碳减排等巨大的全球效益^[79]。

5 小结与建议

全球气候变化及清洁能源快速发展背景下,全球范围内持续开展包括能源气候服务技术创新在内的低碳能源技术研发,以促进能源气候服务精细化发展。目前,能源气候服务创新技术已渗透至风电开发潜力预测预估、风能利用与气候环境和谐发展等方面,并深刻改变能源发展的前景和世界能源格局。本文通过大量文献调研,系统梳理了全球风能资源长期变化的观测事实;全球变化引起的未来风能资源开发潜力评估和气候预测技术;风能资源大规模开发对气候环境的影响等。针对未来中国风能资源高效利用和安全运营,建议开展如下能源气候服务技术研发。

1) 分区域分时段深入评估各全球气候模式对大气边界层风场的模拟能力,在特定区域范围内,择优降尺度,进而通过多模式集合和“观测约束”来减少风能资源潜力预估结果的不确定性,有效提升未来几十年风电开发潜力预估的可信度。

2) 基于自主研发的区域气候数值模式, 结合欧洲哥白尼气候变化服务计划中的多模式集合及后处理预测技术, 构建面向能源行业的气候(轮毂平均风速、最大风速、气温)和能源(风电容量系数、能源供需)的延伸期-月尺度至季节尺度的气候预测业务体系, 预测未来风能资源的时空变化特征, 科学利用有效风速段产能、利用资源空窗期完成检修维护, 提高风能利用效率。

3) 通过开展更多的外场对比观测实验、认识风电场运行的气候影响机理、建立更加复杂精确完备的数值参数化模型, 进而构建大规模风电开发气候环境效应的科学评价体系, 开展已建大规模风电场的气候环境后评价及未来不同产业发展情景下的气候环境影响预评估工作, 为实现气候友好型清洁能源电站规划设计提供方法指导, 为经济社会高质量发展提供有力的气象保障。

综上所述, 通过更长期的气候预估预测技术研发为能源部门提供定制化的气候服务, 即通过分析气候变化引起的能源需求及供应变化, 为清洁能源行业提供气象和能源的中长期预测预估信息, 从而助力能源企业提前做好调度计划, 提高风能开发的气候变化适应水平。同时, 有效评估可再生能源电站运行的潜在气候效应, 促进绿色能源开发与环境保护和谐发展。

参考文献

- [1] 中国石油经济技术研究院. 2050年世界与中国能源展望(2019版)[R]. 北京, 2019.
- [2] TROCCOLI A, WMO Secretariat. Climate services for the energy sector: a new gfcfs priority area[J/OL]. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/climate-services-energy-sector-new-priority-area-gfcfs>.
- [3] PRYOR S C, BARTHELMIE R J. Assessing climate change impacts on the near-term stability of the wind energy resource over the United States[J]. *PNAS*, 2011, 108(20): 8167-8171.
- [4] 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 全球大风在减少吗? [J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 149-151.
ZHAO Zongci, LUO Yong, JIANG Ying. Is global strong wind declining?[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(2): 149-151(in Chinese).
- [5] TIAN Q, HUANG G, HU K M, et al. Observed and global climate model based changes in wind power potential over the Northern Hemisphere during 1979–2016[J]. *Energy*, 2019, 167: 1224-1235.
- [6] PRYOR S C, BARTHELMIE R J, YOUNG D T, et al. Wind speed trends over the contiguous United States[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D14): D14105.
- [7] ZHANG Z T, WANG K C, CHEN D L, et al. Increase in surface friction dominates the observed surface wind speed decline during 1973–2014 in the Northern Hemisphere lands[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(21): 7421-7435.
- [8] EARL N, DORLING S, HEWSTON R, et al. 1980–2010 variability in U.K. surface wind climate[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(4): 1172-1191.
- [9] AZORIN-MOLINA C, GUIJARRO J A, MCVICAR T R, et al. Trends of daily peak wind gusts in Spain and Portugal, 1961–2014[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(3): 1059-1078.
- [10] WAN H, WANG X L, SWAIL V R. Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(5): 1209-1225.
- [11] TROCCOLI A, MULLER K, COPPIN P, et al. Long-term wind speed trends over Australia[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(1): 170-183.
- [12] JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z C, et al. Changes in wind speed over China during 1956–2004[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3/4): 421-430.
- [13] VAUTARD R, CATTIAUX J, YIOU P, et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(11): 756-761.
- [14] JACOBSON M Z, TEN HOEVE J E. Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(3): 1028-1044.
- [15] ZHA J L, WU J, ZHAO D M. Changes of probabilities in different wind grades induced by land use and cover change in Eastern China Plain during 1980–2011[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2016, 17(4): 264-269.
- [16] KISS P, JÁNOSI I M. Comprehensive empirical analysis of ERA-40 surface wind speed distribution over Europe[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(8): 2142-2151.
- [17] KUBIK M L, BRAYSHAW D J, COKER P J, et al. Exploring the role of reanalysis data in simulating regional wind generation variability over Northern Ireland[J]. *Renewable Energy*, 2013, 57: 558-561.
- [18] BADGER J, FRANK H, HAHMANN A N, et al. Wind-climate estimation based on mesoscale and microscale modeling: statistical-dynamical downscaling for wind energy applications[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(8): 1901-1919.
- [19] BETT P E, THORNTON H E, CLARK R T. Using the Twentieth Century Reanalysis to assess climate variability for the European wind industry[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 127(1): 61-80.
- [20] PRYOR S C, BARTHELMIE R J, BUKOVSKY M S, et al. Climate change impacts on wind power generation[J]. *Nature*

- Reviews Earth & Environment, 2020: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0101-7>.
- [21] KANAMITSU M, EBISUZAKI W, WOOLLEN J, et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(11): 1631-1644.
- [22] SAHA S, MOORTHI S, PAN H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1058.
- [23] BOSILOVICH M, LUCCHESI R, SUAREZ M. MERRA-2: file specification [R/OL]. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1), 2016: 7(7), 1-73. http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes.
- [24] EBITA A, KOBAYASHI S, OTA Y, et al. The Japanese 55-year reanalysis "JRA-55": an interim report[J]. *SOLA*, 2011, 7: 149-152.
- [25] UPPALA S M, KÄLLBERG P W, SIMMONS A J, et al. The ERA-40 re-analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(612): 2961-3012.
- [26] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [27] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [28] MIAO H, DONG D H, HUANG G, et al. Evaluation of Northern Hemisphere surface wind speed and wind power density in multiple reanalysis datasets[J]. *Energy*, 2020, 200: 117382.
- [29] ZHENG C W, LI C Y, PAN J, et al. An overview of global ocean wind energy resource evaluations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1240-1251.
- [30] HOLT E, WANG J. Trends in wind speed at wind turbine height of 80 m over the contiguous United States using the north American regional reanalysis (NARR)[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(12): 2188-2202.
- [31] 吴国雄, 林海, 邹晓蕾, 等. 全球气候变化研究与科学数据[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 15-22.
WU Guoxiong, LIN Hai, ZOU Xiaolei, et al. Research on global climate change and scientific data[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 15-22(in Chinese).
- [32] ZENG Z Z, ZIEGLER A D, SEARCHINGER T, et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 979-985.
- [33] LI Y P, CHEN Y N, LI Z, et al. Recent recovery of surface wind speed in northwest China[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(12): 4445-4458.
- [34] ZHA J L, WU J, ZHAO D M, et al. Future projections of the near-surface wind speed over Eastern China based on CMIP5 datasets[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(3/4): 2361-2385.
- [35] KULKARNI S, HUANG H P. Changes in surface wind speed over north America from CMIP5 model projections and implications for wind energy[J]. *Advances in Meteorology*, 2014: 1-10.
- [36] PRYOR S C, BARTHELMIE R J, KJELLSTRÖM E. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model[J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25(7/8): 815-835.
- [37] REYERS M, MOEMKEN J, PINTO J G. Future changes of wind energy potentials over Europe in a large CMIP5 multi-model ensemble[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(2): 783-796.
- [38] HUEGING H, HAAS R, BORN K, et al. Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(4): 903-917.
- [39] SAILOR D J, SMITH M, HART M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(11): 2393-2406.
- [40] GARREAUD R D, FALVEY M. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(4): 543-554.
- [41] KARNAUSKAS K B, LUNDQUIST J K, ZHANG L. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions [J]. *Nature Geosci*, 2018, 11(1): 38-43.
- [42] 江滢, 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[J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 56-63.
JIANG Ying, XU Xiyang, LIU Hanwu, et al. Projection of surface wind by CMIP5 and CMIP3 in China in the 21st century[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(6): 56-63(in Chinese).
- [43] GUO J H, HUANG G H, WANG X Q, et al. Projected changes in wind speed and its energy potential in China using a high-resolution regional climate model[J]. *Wind Energy*, 2020, 23(3): 471-485.
- [44] WU J, HAN Z, YAN Y, et al. Evaluation and future projection of wind energy potentials over China using an ensemble of dynamical downscaling simulations[J]. *Wind Energy*, 2020.
- [45] STOTT P A, MITCHELL J F B, ALLEN M R, et al. Observational constraints on past attributable warming and predictions of future global warming[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(13): 3055-3069.
- [46] GAVIN C. Seasonal variations in electricity demand [R/OL]. 2014. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/295225/Seasonal_variations_in_electricity_demand.pdf.
- [47] Why climate matters for energy [EB/OL]. [2020-10-23] <https://clim4energy.climate.copernicus.eu/discovery-space>.
- [48] European climate energy mixes [EB/OL]. [2020-10-23]. <https://>

- climate.copernicus.eu/european-climate-energy-mixes.
- [49] Climate Information for the Energy sector [EB/OL]. [2020-10-23].<https://climate.copernicus.eu/climate-information-energy-sector>.
- [50] Seasonal forecasts [EB/OL]. [2020-10-23]. <https://climate.copernicus.eu/seasonal-forecasts>.
- [51] DOBLAS-REYES F J, HAGEDORN R, PALMER T N. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - II. Calibration and combination[J]. *Tellus A*, 2005, 57(3): 234-252.
- [52] TORRALBA V, DOBLAS-REYES F J, MACLEOD D, et al. Seasonal climate prediction: a new source of information for the management of wind energy resources[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(5): 1231-1247.
- [53] GIORGI F, COPPOLA E, SOLMON F, et al. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains[J]. *Climate Research*, 2012, 52: 7-29.
- [54] GAO X J, SHI Y, HAN Z Y, et al. Performance of RegCM4 over major river basins in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(4): 441-455.
- [55] 刘冠州, 梁信忠. 新一代区域气候模式 (CWRF) 国内应用进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(7): 781-787.
LIU Guanzhou, LIANG Xinzong. Progress of the climate extension of weather research and forecast (CWRF) model application in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(7): 781-787(in Chinese).
- [56] LIANG X Z, SUN C, ZHENG X H, et al. CWRF performance at downscaling China climate characteristics[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(3/4): 2159-2184.
- [57] 王冰笛, 李清泉, 沈新勇, 等. 区域气候模式CWRF对东亚冬季风气候特征的模拟[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(3): 319-330.
WANG Bingdi, LI Qingquan, SHEN Xinyong, et al. Climatological characteristics of the east Asian winter monsoon simulated by CWRF regional climate model[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(3): 319-330(in Chinese).
- [58] BAIDYA ROY S, TRAITTEUR J J. Impacts of wind farms on surface air temperatures[J]. *PNAS*, 2010, 107(42): 17899-17904.
- [59] CHANG R, ZHU R, GUO P. A case study of land-surface-temperature impact from large-scale deployment of wind farms in China from Guazhou[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 790.
- [60] ZHOU L M, TIAN Y H, ROY S B, et al. Impacts of wind farms on land surface temperature[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 539-543.
- [61] RHODES M E, LUNDQUIST J K. The effect of wind-turbine wakes on summertime US Midwest atmospheric wind profiles as observed with ground-based Doppler lidar[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 149(1): 85-103.
- [62] FRANSEN S T, JØRGENSEN H E, BARTHELMIE R, et al. The making of a second-generation wind farm efficiency model complex[J]. *Wind Energy*, 2009, 12(5): 445-458.
- [63] CHRISTIANSEN M B, HASAGER C B. Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2/3): 251-268.
- [64] 朱蓉. 大规模风电开发对城市大气环境污染影响的初步研究[J]. *风能*, 2014(5): 48-53.
- [65] STA M R V, JACOBSON M Z. New parameterization for the interaction between wind turbines and the atmosphere[C]// *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*. May 23-27, 2010, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- [66] WANG C, PRINN R G. Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(4): 2053-2061.
- [67] VAUTARD R, CATTIAUX J, YIOU P, et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(11): 756-761.
- [68] BAIDYA ROY S. Can large wind farms affect local meteorology?[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(D19): D19101.
- [69] ADAMS, A S, KEITH D W. Understanding the impacts of wind farms on climate [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(3): 307-309.
- [70] KEITH D W, DECAROLIS J F, DENKENBERGER D C, et al. The influence of large-scale wind power on global climate[J]. *PNAS*, 2004, 101(46): 16115-16120.
- [71] FITCH A C. Climate impacts of large-scale wind farms as parameterized in a global climate model[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(15): 6160-6180.
- [72] XIA G, CERVARICH M C, ROY S B, et al. Simulating impacts of real-world wind farms on land surface temperature using the WRF model: validation with observations[J]. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(12): 4813-4836.
- [73] HAAN B D, HARTMANN H, DIJKE D V, et al. Route to operational WRF wind farm forecasting [C]// *Proceedings of the WRF Users Workshop*. Boulder, 2014: 31.
- [74] BYRKJRDAL Ø, BREDESEN R E, KECK R E, et al. Properties of a wind farm wake as simulated by a numerical weather prediction model for the Smøla wind farm [C]// *The European Wind Energy Association*. Barcelona, 2014: 0337.
- [75] SUN H W, LUO Y, ZHAO Z C, et al. The impacts of Chinese wind farms on climate [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, 123(10): 5177-5187.
- [76] 胡菊, 王姝. 甘肃酒泉大型风电基地对区域气候的影响研究[J]. *全球能源互联网*, 2018, 1(2): 120-128.
HU Ju, WANG Shu. Impact of large-scale wind power base located in Gansu Jiuquan on regional climate[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2018, 1(2): 120-128(in Chinese).

- [77] 孙宏伟. 中国风电场的气候效应研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [78] 朱蓉, 石文辉, 王阳, 等. 我国风电开发利用的生态和气候环境效应研究建议[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 39-43.
ZHU Rong, SHI Wenhui, WANG Yang, et al. Research suggestions for ecological and climatic environmental effects of wind power development in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 39-43(in Chinese).
- [79] KEITH D W, DECAROLIS J F, DENKENBERGER D C, et al. The influence of large-scale wind power on global climate[J]. PNAS, 2004, 101(46): 16115-16120.

收稿日期: 2020-10-27; 修回日期: 2020-11-11。



常蕊

作者简介:

常蕊 (1982), 女, 高级工程师, 研究方向为风能太阳能资源评估及气候变化, E-mail: changrui@cma.gov.cn。

肖潺 (1981), 男, 高级工程师, 研究方向为气候分析及气候影响评估。通信作者, E-mail: xiaochan@cma.gov.cn。

(责任编辑 张鹏)

JGEEI

JGEEI