

我国风电开发利用的生态和气候环境效应研究建议

朱蓉¹, 石文辉², 王阳¹, 王伟胜², 黄其励³

(1. 国家气候中心, 北京 100081; 2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192; 3. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要: 截至 2017 年, 我国风电累计装机容量已连续 8 年位居世界第一。未来, 我国风电发展依然会维持较高比例增长, 在此形势下, 迫切需要认清风能资源开发对生态和气候环境的影响, 以保证风电可持续性发展。设立国家重大基础科学研究计划, 组织开展风电开发的生态和气候效应研究是十分必要的。建议通过观测实验、机理分析、数值模拟、影响评估以及适应和减缓措施研究, 提出 2050 年我国风电发展的规划布局; 研究建立风电项目开发建设对生态和环境影响的评价方法和指标体系; 建立国家风能开发区生态和气候环境监测网, 并与全国风电场的运行有效联系, 利用大数据和人工智能等技术, 定期评估整体和局地的生态、气候环境效应。

关键词: 风能开发利用; 生态和气候环境效应; 监测网; 定量评估; 适应和减缓

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A

Research Suggestions for Ecological and Climatic Environmental Effects of Wind Power Development in China

Zhu Rong¹, Shi Wenhui², Wang Yang¹, Wang Weisheng², Huang Qili³

(1. National Climate Center, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: Until 2017, the cumulative installed capacity of wind power in China had ranked first in the world for continuous 8 years. In the future, China's wind power will still maintain a high growth rate. Under such circumstances, it is urgent for us to get a clear understanding of the impacts of wind power development on ecological and climatic environment so as to ensure the sustainable development of wind power. It is very necessary to set up a national major research program on basic sciences to conduct researches on ecological and climatic effects of wind power development. It is suggested that a development planning and distribution of wind power in China in 2050 should be proposed through observation experiments, mechanism analysis, numerical simulation, effect assessment, and adaptation and mitigation measure study; an assessment method and an indicator system of impacts of wind power development on the ecological and climatic environment should be studied and established; an ecological and climatic environment monitoring network should be built in national wind power development regions and effectively connected with all wind farms of China, so as to regularly evaluate overall and local effects of ecological and climatic environment by using big data and artificial intelligence technology.

Keywords: wind energy development and utilization; ecological and climatic environmental effects; monitoring network; quantitative evaluation; adaptation and mitigation

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-05-25

通讯作者: 朱蓉, 国家气候中心, 研究员, 主要研究方向为风能资源数值模拟评估与大气边界层气象; E-mail: rongzhu@cma.gov.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.engsci.cn

一、前言

近 10 年我国风能资源开发力度很大，风电市场快速发展。截至 2017 年，全国累计装机容量约为 1.64×10^8 kW，与 2007 年相比，增长了约 29 倍，累计装机容量连续 8 年居世界第一。2017 年全国风电上网电量为 3.057×10^{11} kW·h，约占当年全社会用电量的 4.8% [1]。风电作为我国第三大电源，已经成为我国能源转型的核心内容和应对气候变化的重要途径。

未来我国风电市场仍将维持较高增长速度，风电将成为未来电力供应的重要支柱。2016 年 11 月 16 日，国家能源局发布的《风电发展“十三五”规划》指出，到 2020 年年底，风电累计并网装机容量将达 2.1×10^8 kW 以上；年发电量确保达到 4.2×10^{11} kW·h，约占全国总发电量的 6%。根据国家发展和改革委员会能源研究所以及国际能源署联合发布的《中国风电发展路线图 2050》，2050 年风电装机可达 1×10^9 kW，满足全国电力需求的 17%，风电将成为主力电源之一。

依据《中国风电发展路线图 2050》的预测推算，若风能资源装机容量系数取 2~3 MW/km²，2050 年我国建设风电场的面积将大约为 5×10^5 km²，相当于四川省的面积。由于我国风能资源分布十分不均，土地可利用面积比较高的风能资源丰富区主要集中在“三北”地区，“三北”地区新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、河北、黑龙江、吉林、辽宁 8 个省（区）的风能资源可开发面积占全国的 68%；土地可利用面积比较高的低风速风能资源主要分布在华北平原和黄淮平原，河北、河南、山东、安徽和江苏 5 省的低风速资源可开发面积占中东南部 19 省的 40%。因此，未来我国“三北”地区风电大基地建设运行的生态和气候环境效应、以及处于人口密集地区的华北和江淮平原低风速风能资源开发对生态环境、气候环境和人类活动的影响都是不可避免的问题。

总之，大规模、集中式开发风电是否会改变生态和气候环境，从而对人类活动产生不利影响已成为国内外学者和政策制定者越来越关注的问题，也是促进可再生能源开发利用可持续发展所必须面临的问题。

二、国内外大规模风电开发利用的生态和气候环境效应研究现状

国际上有关风能资源开发利用对区域生态和气候环境影响研究已有近 10 年的历史，取得了一些研究成果 [2~4]，大多数的结论偏向于风电场运行会对鸟类、蝙蝠和海洋生物有负面影响；还会带来噪音和视觉干扰；风电场建设对生态环境会带来森林砍伐和土壤流失等影响；风电机组的运行使夜间地面温度升高，可能会产生气候变化影响；文献一致认为需要做深入研究，并提出了一些研究计划建议。国内在这方面的研究尚处于科学人员根据个人兴趣开展研究的阶段 [5~7]，缺少风电场运行对环境、生态和气候影响事实的深入调研，缺乏区域风能资源开发对气候变化、大气环流，以及区域环境承载能力等方面的研究，更没有形成风电项目开发建设对环境影响的评价方法和指标体系。

（一）我国风电场运行对生态环境的影响尚无深入研究

现有的调查和研究表明：一方面，风电场运行导致场内鸟类及蝙蝠等飞行动物的活动下降；另一方面，风电机组运行的时候，每台风电机组产生的噪声值约为 96~104 dB (A)，对噪声比较敏感的动物就会选择回避。近 10 年来，国外已有不少由于风电机组转动导致鸟类和蝙蝠撞击伤亡的报道和相关研究 [8,9]。例如 2010 年美国对发生鸟类因撞击风电机组而死亡的 46 个风电场的调研报告表明，死亡率最高为 14 只 / (MW·a)，大多数风电场低于 4 只 / (MW·a) [10]。很多学者通过统计鸟类栖息地的数量和面积、迁徙路线、种群数量等方式评价风电机组对鸟类和蝙蝠的影响发现，转动的风电机组以及架空的输电线会导致鸟类和蝙蝠撞击伤亡，但大多数鸟类和蝙蝠会主动避免在此区域栖息和觅食 [9,11,12]。也有研究指出，风电机组转动对鸟类确实存在驱赶作用，但对鸟类的数量影响不大 [13]。大丰风电场位于江苏盐城国家资源保护区试验区的南部，在《江苏大丰（70 MW）风电项目生态环境影响评价专项报告》中，记录 2008 年 9 月 4—11 日一期建设项目靠近沿海滩涂和鱼塘附近由于电线造成 25 只鸟类撞击死亡。风电机组的噪声对候鸟和

旅鸟影响不大,对留鸟的影响很大。大多数鸟类对噪声具有较高的敏感性,在这种声环境条件下,丹顶鹤等对声音较为敏感的珍禽会选择回避。大丰风电场建设项目所在的竹川垦区,在 2005 年调查的时候还有一个族群的丹顶鹤(约 4~5 只)在此栖息。到 2009 年,调查结果显示风电场及周围 200 m 范围内无丹顶鹤踪迹 [14]。

海上风电场运行对生态的影响还鲜有研究。理论上讲,因风电机组植入海底的部分相当于人造岛礁,为鱼类提供更为安全的庇护场所,从而会增加鱼类的种类。但风电机组运行过程产生的噪声,可能会对近海鱼类活动和繁殖产生消极影响,但影响程度和鱼类的品种相关 [15]。

此外,还有研究表明,风电场的建设增加了扰动区域的土壤容重、pH 值和总孔隙度,降低了土壤电导率、含水量和全盐,同时也降低了土壤养分 [7]。但是否会对风电场占地范围之外的土壤产生影响,影响范围和强度有多大,目前尚无相关研究。值得注意的是,风电场对局地气候的影响,势必造成土壤温室气体排放的变化,会对土壤的碳、氮等元素的循环过程产生重大影响 [16~18]。另外,风电场通过对降雨的影响间接改变土壤水分的输入量 [19]。也有研究假设风电场会改变土壤的水分蒸发,但目前这一结论并未得到实验的验证 [20]。在风电场占地范围之外,由于土壤对外部的干扰是滞后且缓慢的,风电场对土壤的影响可能需要 20~25 年,甚至更长的时间才能表现出来 [21]。

总体而言,我国在风能开发利用对生态环境影响方面的研究还只是对一些现象的观察,缺乏有组织地系统性的科学研究。

(二) 国外风电场运行对气候环境影响的研究结论 千差万别,国内此类研究寥寥无几

近年来,风电场运行对气候环境影响的研究越来越多,也有一些研究开始分析风电场可能对气候变化的影响,并提出了一些值得重视的问题。主要研究技术手段是卫星反演和数值模拟,观测实验类的研究屈指可数,如在苏格兰 Black Law 风电场开展的地面气象观测实验 [4]。

风电机组在将风能转化为电能的过程中,会影响陆面—大气之间的能量、动量、质量和水汽的传输。有研究表明,如果全部用风能满足全球对能源

的需求,风能开发对 1 km 以下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 [22];也有研究表明,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 10 °C 以上 [23]。有研究表明,风电场运行导致的热量和降雨量增加,要比欧洲绝大部分地方的自然气候变化弱得多;也有研究表明,风电场的运行会导致局地的干旱。美国特拉华州大学的研究表明,装机容量 300 GW 以上的近海风电场可以使飓风近海面风速减小 25~41 m/s、降低风暴潮发生率 6%~79% [24]。致使研究结论千差万别的根本原因有两个:第一,目前对风电场运行影响近地层湍流能量交换的物理机制认识不够;第二,风电开发的气候影响是通过数值模拟进行评估的,而数值模式中对风电机组运行与大气湍流运行相互作用的数学物理表达尚存在很大的不确定性。

认识风电场运行影响近地层湍流能量交换物理机制的最好方法是开展观测实验。苏格兰 Black Law 风电场建于 2005 年,拥有 54 台风电机组,容量 1.24×10^5 kW。为研究气候变化影响,场区 18.6 km² 内布设了 101 个温度和湿度探测仪。碰巧 2012 年夏季该风电场由于运维管理关闭一个月,Armstrong 等人 [4] 通过对风电场正常运行和关闭两个时间段的观测实验数据对比分析得到,在风电机组运行的夜间地面最大增温 0.18 °C、湿度增加 0.03 g/m³。这种风电机组对气温和气候的影响,随着距离的增加呈对数下降趋势。同时,这种对地面小气候的影响,包括了土壤温度、土壤含碳量和生态系统碳循环等的不确定因素的影响。Zhou 等人 [3] 采用 2003—2011 年德克萨斯中西部地区的卫星数据进行分析,发现在这个拥有 4 座全球最大风电场的区域内,夏季夜晚气温比附近没有风电场的地区高 0.65 °C。Walsh-Thomas 等人 [25] 采用文献 [3] 的方法,通过分析 1984—2011 年 Landsat 5 卫星反演资料,研究了美国加利福尼亚州南部 San Geronio Pass 风电场运行对风电场区及其周边地区地面温度的影响,表明风电场下游 12 km 范围内的地面增温趋势很明显。

我国在风电开发的气候环境效应研究方面,清华大学和中国气象局有专家根据个人兴趣开始着手研究,但尚无明确研究结论。例如,Chang 等人 [5] 基于 MODIS LST 数据,采用文献 [3] 的方法进行

了进一步研究，分析了我国西北部的瓜州县的大型风场对环境的影响。研究表明，在风电场附近地区，夜间具有明显的升温趋势，但在白天并不明显。这种夜间的升温趋势在夏季最强（ $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}/8\text{年}$ ），其次是秋季（ $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/8\text{年}$ ），和冬季最弱（ $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/8\text{年}$ ），春季没有观察到有明显变暖趋势。

三、我国组织开展风电开发的生态和气候环境效应研究的必要性

（一）风电大基地建设必须提前认清其生态和气候环境效应

我国风能资源丰富区主要分布于“三北”地区和东南沿海，位于“三北”地区的6个风电基地（新疆哈密、甘肃酒泉、蒙东和蒙西、河北张北、吉林东部）累计装机容量约占全国累计装机总容量的44%。尽管目前开始重视中东部和南部的低风速资源开发，但实现未来2030年 $3\times 10^8\text{ kW}$ 和2050年 $1\times 10^9\text{ kW}$ 装机容量的发展目标，在风能资源丰富区的大规模、集中式开发的战略布局仍然存在。科学合理地规划开发，避免产生区域性生态和气候环境负面影响，是我们必须面对的问题。此外，大型工程建设的生态和气候环境可行性研究必须先行，才能达到保护生态环境、防灾减灾的目的。因此，为保障风电的可持续发展，迫切需要尽快开展大规模风电发展的生态和气候环境效应研究。

（二）制定有利于适应气候环境变化和减缓政策措施的必要条件

风能资源的大规模利用将减少温室气体的排放，从而减弱温室效应，减缓未来全球气候变暖，但如果开发过程中土地利用/土地覆盖性质、地表辐射—能量平衡以及近地层大气湍流能量交换的变化造成地面温度升高，就会抵消一部分气候变化减缓作用，目前这种综合效应还不清楚。此外，针对“风电开发引起北京雾霾”等社会上的疑虑，也需要给出科学合理、有说服力的回应。

（三）我国已具备开展大规模风电开发的生态和气候环境效应研究所必备的条件

国际上已有的研究，除了一些基于卫星探测的地表温度变化分析以外，大多数是理想化的数值模

拟实验，缺乏从实地观测和科学实验到机理归因、再到数学建模和情景预测的系统性研究，其中观测实验是认清影响机制和方法验证的关键。我国风电累计装机总量居世界第一，酒泉风电基地是世界上规模最大的风电场。今后除了8个风电基地还将继续发展以外，中东部和南部的分散式开发也会迅速发展，这些都为开展风电开发前后的生态和气候环境对比观测研究提供了充分条件。此外，张北风电试验基地以及一些大学和科研机构的风洞都具备提供相关实验研究的能力。大规模风电开发的生态和气候环境效应的研究内容涵盖范围广，涉及的学科领域包括空气动力学、大气边界层气象学、气候学、动植物生态学和恢复生态学，以及能源系统工程等，通过设立国家重大基础科学研究计划，可以组织跨学科、跨行业的专家学者和工程技术人员开展联合攻关。

四、研究建议

设立国家重大基础科学研究计划，组织空气动力学、生态学、气候学、环境保护和风电行业的专家，开展风电开发对生态和气候环境影响的调查、外场观测和实验室研究；认识风电机组运行对动植物和大气环境的影响机理；建立参数化数值模式系统，预估不同风电发展情景下的气候变化影响，并提出适应和减缓措施。预期研究成果包括：

（1）在保障风电维持高速发展的同时充分保护生态和环境的前提下，提出2050年我国风电发展的规划布局。

（2）建立风电项目开发建设对生态和环境影响评价方法和指标体系，为相关风电开发的生态和气候环境保护的政策和措施提供科学支撑。

（3）通过对项目所设立的大范围外场观测实验的科学评估，保留有价值的观测点，形成长期运行的风电开发区生态和气候环境监测网。监测风电场及其影响区域内的鸟类等动物活动和植被生长变化；观测气象要素和大气边界层湍流通量的长期变化情况。

（4）把国家风能开发区生态和气候环境监测网以及全国风电场的运行有效联系。利用大数据和人工智能等技术，定期评估整体和局地的生态、环境效应。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家能源局. 2017年风电并网运行情况 [EB/OL]. (2018-02-01) [2018-03-15]. http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm.
National Energy Administration of the PRC. Wind power grid operation in 2017 [EB/OL]. (2018-02-01) [2018-03-15]. http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm.
- [2] Dai K, Bergot A, Liang C, et al. Environmental issues associated with wind energy – A review [J]. *Renewable Energy*, 2015, 75: 911–921.
- [3] 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.
- [4] Armstrong A, Burton R, Lee S E, et al. Ground-level climate at a peatland wind farm in Scotland is affected by wind turbine operation [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(4): 044024.
- [5] 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.
- [6] 李国庆, 张春华, 张丽, 等. 风电场对草地植被生长影响分析: 以内蒙古灰腾梁风电场为例 [J]. *地理科学*, 2016, 36(6): 959–964.
Li G Q, Zhang C H, Zhang L, et al. Analysis of the effect of wind farm on the growth of grassland vegetation: An example of Huitengliang wind farm in Inner Mongolia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 959–964.
- [7] 李智兰. 风电场建设对周边扰动区域土壤养分和植被的影响 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4): 61–66.
Li Z L. The effect of wind farm construction on soil nutrient and vegetation in surrounding disturbed area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(4): 61–66.
- [8] Kunz T H, Arnett E B, Erickson W P, et al. Ecological impacts of wind energy development on bats: Questions, research needs, and hypotheses [J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2007, 5(6): 315–324.
- [9] Wang S F, Wang S, Smith P. Ecological impacts of wind farms on birds: Questions, hypotheses, and research needs [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44(c): 599–607.
- [10] Loss S R, Will T, Marra P P, et al. Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States [J]. *Biological Conservation*, 2013, 168(12): 201–209.
- [11] Hernández-Pliego J, Lucas M D, Muñoz A R, et al. Effects of wind farms on Montagu's harrier (*Circus pygargus*) in southern Spain [J]. *Biological Conservation*, 2015, 191: 452–458.
- [12] Peste F, Paula A, Silva L P D, et al. How to mitigate impacts of wind farms on bats? A review of potential conservation measures in the European context [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2015, 51(51): 10–22.
- [13] Erickson W P, Johnson G D, Strickland D M, et al. Avian collisions with wind turbines: A summary of existing studies and comparisons to other sources of avian collision mortality in the United States National Wind Coordinating Committee resource document [R]. Washington DC: Western Ecosystems Technology, 2001.
- [14] 宋文玲. 风电场工程对盐城自然保护区的累积生态影响研究 [D]. 南京: 南京师范大学(硕士学位论文), 2011.
Song W L. The study on the cumulative ecological impact of wind farm projects on natural reserve in Yancheng [D]. Nanjing: Nanjing Normal University (Master's thesis), 2011.
- [15] Andersson M H. Offshore wind farms-ecological effects of noise and habitat alteration on fish [D]. Stockholm: Stockholm University (Doctoral dissertation), 2011.
- [16] Bardgett R D, Freeman C, Ostle N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks [J]. *ISME Journal*, 2008, 2(8): 805–814.
- [17] Allison S D, Wallenstein M D, Bradford M A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 336–340.
- [18] Zhou J Z, Xue K, Xie J P, et al. Microbial mediation of carbon-cycle feedbacks to climate warming [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(2): 106–110.
- [19] Lee H, Schuur E A G, Inglett K S, et al. The rate of permafrost carbon release under aerobic and anaerobic conditions and its potential effects on climate [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 515–527.
- [20] Roy S B, Pacala S W, Walko R L. Can large wind farms affect local meteorology [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D19): 12–25.
- [21] Euskirchen E S, McGuire A D, Chapin F S, et al. Changes in vegetation in northern Alaska under scenarios of climate change, 2003–2100: Implications for climate feedbacks [J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(4): 1022–1043.
- [22] Sta M R V, Jacobson M Z. New parameterization for the interaction between wind turbines and the atmosphere [R]. Chapel Hill: The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, 2010.
- [23] Fitch A C. Climate impacts of large-scale wind farms as parameterized in a global climate model [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28: 6160–6180.
- [24] Jacobson M Z, Archer C L. Saturation wind power potential and its implications for wind energy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2013, 109(39): 15679–15684.
- [25] Walsh-Thomas J M, Cervone G, Agouris P, et al. Further evidence of impacts of large-scale wind farms on land surface temperature [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(8): 6432–6437.