

党冰,刘勇洪,杜吴鹏,等,2023. 陆/海风电场群对局地湍流和风切变影响差异初步分析[J]. 气象,49(12):1495-1508. Dang B, Liu Y H, Du W P, et al, 2023. Preliminary analysis on the influence difference of the inland/offshore wind farm group on local turbulence intensity and wind shear exponent[J]. Meteor Mon, 49(12):1495-1508(in Chinese).

## 陆/海风电场群对局地湍流和 风切变影响差异初步分析\*

党 冰<sup>1</sup> 刘勇洪<sup>2,3</sup> 杜吴鹏<sup>1</sup> 陈可仁<sup>4</sup>

1 北京市气候中心,北京 100089

2 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081

3 灾害天气国家重点实验室,北京 100081

4 龙源(北京)风电工程设计咨询有限公司,北京 100034

**提 要:** 风电场存在着明显的局地气候效应,但陆/海两种不同类型风电场是否存在局地风环境效应的明显差异? 以河北尚义陆地风电场和江苏如东海上风电场为例,利用风电场周边气象站及测风塔典型年份观测资料,开展了陆/海风电场对湍流强度(TI)和风切变指数(WSE)的影响差异初步分析研究。研究表明:陆/海风电场对 TI 和 WSE 会产生显著影响;其中,陆/海风电场对 TI 均为增强效应,建设后年均 TI 分别增加 31%和 37%,最大增幅分别发生在春季(47%)和冬季(49%);影响差异主要为陆地风电场 TI 增幅在高层明显大于低层,夜间大于白天,而海上风电场不同高度 TI 增幅及日变化则较为平稳;陆/海风电场对 WSE 影响差异显著,陆地风电场建设后 WSE 白天增加、夜晚降低,日变化明显减小,年均降低 8%,最大降幅发生在秋季(12%);海上风电场建设后 WSE 白天、夜晚均明显增加,年均增加 24%,最大增幅发生在春季(37%)。

**关键词:** 陆/海风电场群,测风塔,风速,湍流强度,风切变指数

**中图分类号:** TM614, P425

**文献标志码:** A

**DOI:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2023. 052801

## Preliminary Analysis on the Influence Difference of the Inland/Offshore Wind Farm Group on Local Turbulence Intensity and Wind Shear Exponent

DANG Bing<sup>1</sup> LIU Yonghong<sup>2,3</sup> DU Wupeng<sup>1</sup> CHEN Keren<sup>4</sup>

1 Beijing Climate Center, Beijing 100089

2 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081

4 Longyuan (Beijing) Wind Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Beijing 100034

**Abstract:** Wind farms have obvious impact on the local climate. However, whether there exist obvious differences in environmental effects of local wind between the inland and offshore wind farms still need to be explored. Based on the inland wind farm data from Shangyi, Hebei Province and offshore wind farms in Rudong, Jiangsu Province and the data of meteorological observation and wind gradient tower around wind farm the influence difference of the inland and offshore wind farms on local wind environment, turbulence intensity (TI) and wind shear exponent (WSE) are preliminarily analyzed. The results show that the inland

\* 国家重点研发计划(2018YFB1502801)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J046)、北京市科技计划课题(Z201100008220002)和北京市气象局“新时代高层次科技创新人才计划”共同资助

2022 年 4 月 2 日收稿; 2023 年 6 月 19 日收修定稿

第一作者:党冰,主要从事气候评估及应用研究. E-mail:dangb07@163.com

通讯作者:刘勇洪,主要从事城市气候与卫星遥感应用研究. E-mail:lyh7414@163.com

and offshore wind farms have significant effects on TI and WSE. The constructed inland and offshore wind farms have an enhancement effect on TI, and the average annual TI increased by 31% and 37%, respectively. The largest increment occurred in spring (47%) and winter (49%) in inland and offshore wind farms respectively. Moreover, the TI increasing range of high-level was greater than that in low-level, and greater at night than in day in inland wind, while the TI increasing range was relatively stable at different heights and diurnal variation in offshore wind farms. In terms of WSE, the constructed inland and offshore wind farms have significant differences in their influences on WSE. The WSE increased during the day and decreased at night, and the diurnal variation was significantly reduced with the average annual WSE decreased by 8%, and the largest decline in WSE in autumn (12%) in the inland wind farms. By contrast, the WSE increased obviously during both day and night with average annual WSE increased by 24%, and the largest rise seen in spring (37%) in offshore wind farms.

**Key words:** inland/offshore wind farm, wind gradient tower, wind speed, turbulence intensity (TI), wind shear exponent (WSE)

## 引 言

由于化石能源的不可再生性,以及其在燃烧过程中排放的温室气体和污染气体带来的气候环境问题日益严重,开发、利用可再生能源已成为世界各国急需解决的问题(Dincer and Acar, 2015; 李国庆和李晓兵, 2016; 陈正洪等, 2018)。风能作为一种洁净的、储量极为丰富的可再生能源,越来越受到广泛重视(Garrigle and Leahy, 2015; Phillips, 2015; 叶小岭等, 2019)。我国风能资源储量丰富,总储量为 322 600 GW,实际可开发量为 25 300 GW(薛桁等, 2001; 梁红等, 2021)。近年来我国风电发展迅速,据全球风能协会公布的数据显示,2021 年中国风力发电装机总量达 338.31 GW,占世界总装机容量的 40.4%;其中海上风电发展迅猛,2021 年新增装机量 16.9 GW,约占全球新增装机量 80%。由于风能的能量密度小,发展风能需要较大的集能面积,因此大规模建设风力发电场会改变地表粗糙度,从而改变陆表和大气的热交换过程;同时由于风机涡轮振动、风能转化为电能,改变了自然界原有的能源循环模式,导致风电场对局地或区域气候可能产生影响(Buckley et al, 2005; 张雪婷等, 2019; 蒋俊霞等, 2019)。由此,大型风电场建设和运行对气候和环境的影响受到越来越多的关注(Fitch, 2015; Li et al, 2018; 梁红等, 2021)。

关于大型风电场建设运行对局地风环境的影响已有大量研究。Christiansen and Hasager(2006)利用 SAR 雷达数据发现丹麦地区海上风电场的平均风

速减小 8%~9%,对下风向的影响范围达 20 km; Fitch et al(2012)通过数值模拟发现从海上风电场延伸至其 60 km 下游区域均有风速衰减现象,风电场区域内风速衰减最多可达 16%; Smith et al(2013)对美国中西部大型陆上风电场观测研究显示发现在叶片扫过区域及风机轮轴高度处风速明显降低、湍流强度显著增强,且夜间更为明显。胡菊(2012)模拟发现我国河西走廊地区的大型风电场建成后平均风速减小了  $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 徐荣会(2014)根据观测发现内蒙古地区风电场局地风速在风机的扰动下有减小趋势;张雪婷等(2019)发现我国大别山区风电场群建设和运行使大悟县局地风速略有减小。但国内研究主要集中在陆上风电场,对海上风电场研究较少,且关于风电场建设对一些重要指标如湍流强度和风切变指数的影响研究也很少。

湍流强度(TI)和风切变指数(WSE)是评价气流稳定程度的指标,对于风电场的风能评估及风电场稳定运行具有重要意义(李鸿秀等, 2014; 黄林宏等, 2016; 龚玺等, 2018; 陈燕等, 2019; 靳双龙等, 2019)。TI 不但与地表摩擦和风速切变引起的动力因子以及温度层结引起的热力因子密切相关,还与地理位置、地形和地表粗糙度等因素有关(贺德馨, 2006; 李鸿秀等, 2014; 刘敬乐等, 2020); WSE 表征风速随高度的变化程度,主要受地表粗糙度、大气稳定度等因素影响(徐宝清等, 2014; 龚强等, 2015; 马晓梅等, 2020; 常蕊等, 2022; 程雪玲等, 2023)。目前利用测风塔资料开展了风电场建设前风环境特征如风速、TI 或 WSE 等分析(李鹏和田景奎, 2011; 班欣

等,2012),或者是利用数值模拟技术开展风电场对大气边界层特征影响研究(刘维维,2015;路婷婷,2017;张颖超等,2016;常蕊等,2013),但对风电场群建设后局地风速以及 TI 和 WSE 变化的观测研究较少。由于风电场建设后,局地风速和下垫面粗糙度发生变化,且风机的扰动改变了局地大气的稳定性,相应改变 TI 和 WSE(吴正人等,2014;靳双龙等,2019;夏馨等,2022),从而改变了风电场建设前的风能评估结果以及风电场安全运行所需的风速条件(刘磊等,2012);同时由于陆/海风电场存在着下垫面及周围环境的巨大差异,因此有必要开展二者在风电场建设后对局地风环境关键参数影响及对比研究,为进一步阐明陆/海风电场对局地风环境的不同影响机理提供参考。

由此,本文分别选择河北尚义陆地风电场和江苏如东海上风电场,利用风电场群周边国家气象站风速观测资料以及质量控制后的测风塔测风资料,选定风电场建设前后典型时段,通过分析局地风速、TI 和 WSE 的变化,开展陆/海风电场群建设对局地风场影响差异初步研究。一方面阐明典型陆/海下垫面风电场群建设后局地风环境关键参数的变化规律,另一方面揭示这两种不同下垫面风电场群对风环境关键参数的影响差异机制,从而为今后陆/海风

能资源评估、有效规避相关风险等提供科学依据。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

本文研究选取的陆地风电场位于中国河北张家口尚义县(如图 1a 所示),尚义风电场群从 2008—2015 年底陆续建成 224 台风机(表 1),风机轮毂高度为 65~90 m,总装机容量为 450 MW;风电场所处区域属于半干旱大陆性季风气候区,海拔高度为 1375~1573 m,自然植被以草本植物为主,山谷及缓坡地带带有零星小面积成块林地、耕地及灌木;气候特点表现为气温低温差大、雨量少而集中、光照充足,年均降水量为 414 mm,年均风速为  $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,全年主导风为西北向(NW),次主导风为西西南(WWS)。

海上风电场研究区位于中国江苏南通如东县(如图 1b 所示),如东风电场群从 2009—2015 年陆续建成 155 台风机,风机轮毂高度为 65~90 m,总装机容量为 482 MW;风电场所处区域属于亚热带海洋性季风气候区,境内地势平坦,海拔高度为 3~5 m,陆地地貌是典型的滨海平原,沿海属黄海南部海域,沿海潮汐 24 小时涨落两次;受海洋调节和季

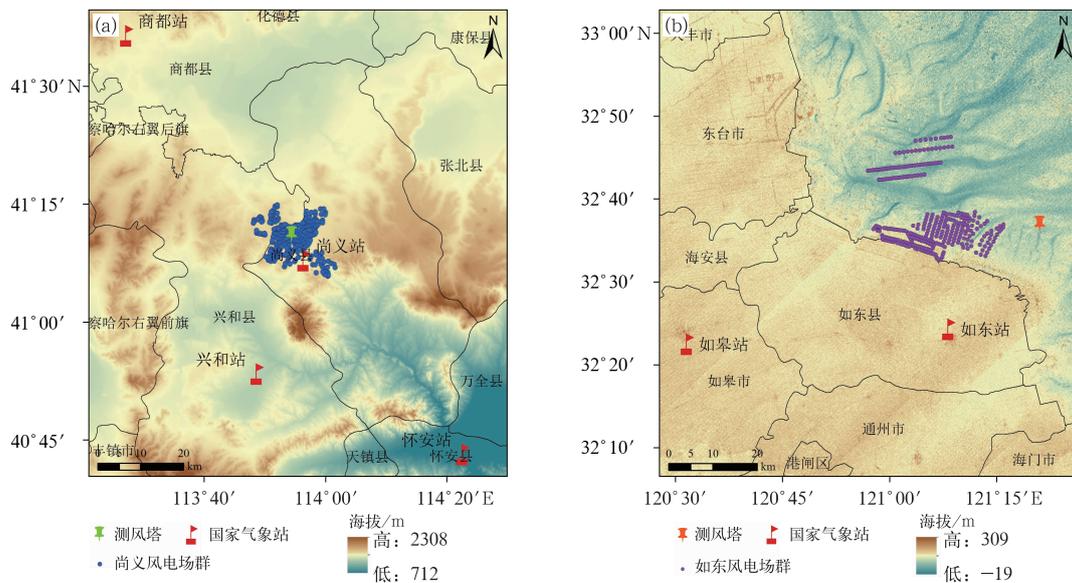


图 1 (a)尚义风电场群和(b)如东风电场群的位置、地形及周边气象站点分布

Fig. 1 The geographical location of inland/offshore wind farms and meteorological observation stations

(a) Shangyi Wind Farms, (b) Rudong Wind Farms

风环流影响,四季分明、气候温和、光照充足、雨水充沛,年降水量为 1100 mm,年均风速为  $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,夏季盛行东南风,冬季盛行偏北风。

## 1.2 数据资料及分析时段

河北尚义陆地风电场群气象资料包括:(1)国家基本气象站(尚义、商都、怀安和兴和站)1981—2018年风速、气温、相对湿度逐日观测数据;(2)尚义0704#测风塔2006—2017年30、50、70 m高度逐时风速观测数据。

江苏如东海上风电场群气象资料包括:(1)国家基本气象站(如东、如皋站)1981—2018年逐日风速观测数据;(2)如东0865#测风塔2009—2018年

15、50、80 m高度逐时风速观测数据。

根据风电场群建设和投产时间(表1)以及气象行业标准《风电场气象观测及资料审核、订正技术规范(QX/T 74—2007)》(中国气象局,2007)进行质量控制后的气象观测资料,选择合适的陆/海风电场建设前后分析时段(表2)。尚义风电场选用建设前后各3年(2005—2007年和2016—2018年)的国家气象站资料进行局地风速变化分析,而0704#测风塔资料由于存在不连续和缺测情况,选择数据较为完整的2006年和2017年进行TI和WSE变化分析。如东风电场选用0865#测风塔2009年和2018年数据进行TI和WSE变化分析。

表 1 陆/海风电场群建设概况一览表

Table 1 The general construction situation of inland/offshore wind farms

风电场	项目名称	建设时间/年.月	投产日期/年.月	风机个数/个	轮毂高度/m	叶轮直径/m
河北尚义风电场	麒麟山一期	2008.6—2009.12	2009.12	100	65	77.0
	麒麟山二期	2010.4—2010.12	2010.12	67	70	82.9
	麒麟山三期	2015.4—2015.12	2015.12	57	90	120.4
江苏如东风电场	潮间带试验风电场	2009.6—2010.10	2010.5—2011.10	16	73	77
	潮间带示范项目	2011.6—2012.9	2012.5	58	65	77
	潮间带增容项目	2012.9—2013.1	2013.1	20	90	120
	试验扩建项目	2012.7—2014.11	2015.3	11	90	120
	如东海上示范项目	2014.6—2015.7	2015.9	50	90	130

表 2 陆/海风电场群建设前后选择的分析时段表

Table 2 The analysis period of inland/offshore wind farms before and after construction

河北尚义风电场群				江苏如东风电场群	
建设前		建设后		建设前	建设后
气象站	测风塔	气象站	测风塔	测风塔	测风塔
2005—2007年	2006年	2016—2018年	2017年	2009年	2018年

## 2 研究方法

### 2.1 评估站选择

#### 2.1.1 陆上风电场影响站与背景站选择

河北尚义陆地风电场群周围 60 km 内包含 4 个国家气象站:尚义、商都、怀安和兴和站(图 1a),其中尚义站紧邻风电场群,可作为风电场影响站进行评估;此外,尚义 0704#测风塔位于风电场群内,也可作为风电场影响站进行评估。

利用尚义站评估尚义陆地风电场局地风速变化时,除了风电场群的可能影响,气象站气象要素变化还受年际气象条件波动和气候变化影响,仅靠单一

气象站是不能识别出风电场对其单独影响,需要借助研究站与背景站(风电场非影响区)之间的对比分析来消除年际波动与气候变化影响。由此,选择合适的背景站是尚义陆地风电场局地风速变化评估的一个关键步骤。

背景站一般要求与研究站的气候类型和地理条件相似,但又不能受风电场影响;数值模拟研究表明风电场影响风速衰减的距离在风电场下游方向可以达到 30~60 km(Frandsen et al, 2009),要求背景站距风电场至少 30 km。这里分别对风电场建设前(1981—2007年)的尚义站与怀安、兴和、商都站的主要气候要素和地理条件进行相似性分析,如表 3 所示。

由表 3 分析可知,尚义站年均气温、风速和相对

表 3 国家气象站(尚义、怀安、商都、兴和)气候和地理条件相似性分析

Table 3 The similarity analysis of climate and geographical conditions among four national meteorological stations

要素	尚义与怀安	尚义与兴和	尚义与商都	兴和与商都	怀安与商都
年均气温相关系数	0.95	0.99	0.99	0.99	0.95
年均风速相关系数	0.68	0.74	0.75	0.86	0.65
年均相对湿度相关系数	0.47	0.57	0.58	0.54	0.51
海拔差/m	539	108	-44	-152	-583
空间距离/km	60.7	29.1	68.1	87	129

湿度均与商都站最高,且两者海拔差最小(仅 44 m),空间距离在 30 km 以上,且商都站在风电场主导风向(NW)上游区域,因此可选择商都站作为背景站进行尚义陆地风电场的局地风速变化分析。

为进一步分析尚义陆上风电场的影响范围,还需对可能受到风电场影响的其他两个站(怀安与兴和站)进行分析。由于怀安站和背景站海拔相差很大(583 m),空间距离也最远(129 km),且怀安站与背景站风速相关系数仅为 0.65(表 3),以商都站作为背景站并不能很好分析怀安站风速变化;而且怀安站与尚义风电场群相距约 60.7 km,已超出风电场最大可能影响范围(60 km)(Fitch et al, 2012),因此,本文不考虑怀安站作为影响站进行分析。除了选择尚义站作为影响站外,还选择了距离风电场群约 29 km、年均风速与背景站相关系数为 0.86 的兴和站作为可能影响站进行分析。

### 2.1.2 海上风电场影响站选择

距离如东海上风电场群最近的国家气象站为如东和如皋站,分别距风电场约 21 km 和 50 km(图 1b)。虽然如东站可能在海上风电场影响范围内,但是对如东站 1981—2018 年年均风速资料分析发现其在 2014 年风速明显下降且低于如皋站,而在 1981—2013 年期间如东站风速均明显高于如皋站;根据文中表 1 可知,2014 年前如东海上风电场已投产 94 个风机,2014 年以后投产 61 个,因此如东站的风速突然降低很可能是其他外部原因造成,经调查得知 2014—2015 年如东气象站周围建立了大量高楼,致使 2014 年后风速下降明显,并非风电场影响造成;而如皋站距离风电场较远(50 km),且在海上风电场群的西南方向,与风电场群主导风向(东南—偏北风)相差甚大,几乎不受风电场影响,因此如东站和如皋站均不适宜作为风电场影响站进行评估,即如东海上风电场没有合适的国家气象站进行局地风速变化评估。

如东 0865# 测风塔位于风电场群偏东方向约 7 km 处,处于风电场海上影响范围之内,可作为影响站进行评估。

## 2.2 局地风速影响评估

定义尚义陆上风电场群对局地风速的影响值为:

$$dV = V_1 - V_B \quad (1)$$

$$\Delta V = dV_{AF} - dV_{BF} \quad (2)$$

式中: $dV$  为国家气象站影响站(或可能影响站)10 m 高度风速( $V_1$ )与背景站 10 m 高度风速( $V_B$ )之差(单位: $m \cdot s^{-1}$ ); $\Delta V$  为风电场建设后( $dV_{AF}$ )相对于风电场建设前( $dV_{BF}$ )的风速变化(单位: $m \cdot s^{-1}$ ),即风电场对风速的局地影响。

为评估风电场群建设前后局地风速是否发生显著变化,这里以风电场建设前影响站(或可能影响站)与背景站风速差  $dV$  的年际标准差( $Std_{dV}$ )作为年际波动,如果风速差变化值( $\Delta V$ )的绝对值大于  $Std_{dV}$ ,则表明该地风速受到风电场群影响,如果  $\Delta V$  绝对值小于或等于  $Std_{dV}$ ,则表明该地风速没有受到风电场群影响。

由于如东海上风电场没有合适的国家气象站进行局地风速研究,虽然 0865# 测风塔可作为影响站进行评估,但由于该塔建设前仅有 1 年资料,且没有 10 m 高度的测风数据,因此本文不开展如东海上风电场的局地风速影响研究。

## 2.3 局地湍流强度(TI)影响评估

根据国家标准《风电场风能资源评估方法(GBT 18710—2002)》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2004),湍流强度的计算公式为:

$$TI = \sigma/V \quad (3)$$

式中:TI 为湍流强度, $\sigma$  为平均风速标准差, $V$  为平均风速。

本文定义风电场对 TI 的局地影响为风电场建设后 TI 与建设前 TI 的距平百分率。该值为正值时,表明风电场建设运行使得 TI 增加;该值为负值时,表明风电场建设运行使得 TI 降低。

针对尚义陆上风电场,分别计算尚义 0704# 测风塔风电场建设前后 30、50 和 70 m 高度 TI 变化,开展陆上风电场对局地 TI 的影响评估;针对如东海上风电场,分别计算如东 0865# 测风塔风电场建设前后 15、50 和 80 m 高度 TI 变化,开展海上风电场对局地 TI 的影响评估。

## 2.4 局地风切变指数(WSE)影响评估

风切变指数(WSE)表示风速垂直切变的强度。在这里,采用风速随高度变化呈指数规律分布(王承煦和张源,2003;Farrugia,2003;Rehman and Al-Abbadi,2007)进行估算,即:

$$V_n/V_1 = (Z_n/Z_1)^\alpha \quad (4)$$

式中: $V_n$ 、 $V_1$  分别为  $Z_n$ 、 $Z_1$  高度上的风速, $\alpha$  为风切变指数 WSE。

对式(4)作变换,并两边取对数,即得:

$$\alpha = \frac{\ln(V_n/V_1)}{\ln(Z_n/Z_1)} \quad (5)$$

目前计算 WSE 时,不同风速资料的选择会造成估算结果偏差明显。彭怀午等(2010)、吴婷婷(2015)研究表明采用全部数据进行风切变计算产生的平均值代表性差、偏离系数较大,而采用去除  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下风速数据计算产生的平均值代表性要优于前者、偏离系数较小。因此,本文利用测风塔资料,选取不同高度去除  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下且高层风速大于低层风速的数据,根据式(5)计算每两个高度层间的 WSE,再利用最小二乘法(徐宝清等,2014;陈燕等,2019;孙淑芳和张广兴,2019)将各层间的 WSE 进行拟合,得到该区域平均 WSE,即根据式(5)可得到:

$$\ln(V_n/V_1) = \alpha \ln(Z_n/Z_1) \quad (6)$$

令  $y = \ln(V_n/V_1)$ ,  $x = \ln(Z_n/Z_1)$  得到线性方程  $y = \alpha x$ , 风切变指数即为此方程的斜率。最小二

乘法要求残差的平方  $\text{RSS} = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha x_i)^2$  最小,当

$\alpha = (\sum_{i=1}^n x_i y_i) / (\sum_{i=1}^n x_i^2)$  时 RSS 取得最小值,得到最小二乘法拟合直线的斜率,即风切变指数值。

本文定义风电场对 WSE 的局地影响为风电场建设后 WSE 与建设前 WSE 的距平百分率,该值为正值时,表明风电场建设运行使得风切变增加;该值为负值时,表明风电场建设运行使得风切变下降。

## 3 结果分析

### 3.1 陆地风电场群局地风速变化

#### 3.1.1 年变化趋势

就影响站尚义站而言,2005—2011 年影响站和背景站(商都站)风速变化趋势具有良好的一致性(图 2a),2011 年后,背景站风速( $V_{SD}$ )总体呈上升趋势,而影响站风速( $V_{SY}$ )则呈下降趋势,意味着 2011 年后影响站受到非气候变化因素导致其风速变化趋势与背景站差异显著。从两站风速差( $dV$ )变化来看,2012 年后两站年风速差呈增大趋势,其中 2016—2018 年风速差明显大于风电场竣工前任何一年(图 2a),该结果显示尚义站很可能受到风电场群影响,致使风速在风电场建设前后发生明显变化。

就可能影响站(兴和站)而言,2005—2018 年  $V_{XH}$  与  $V_{SD}$  变化趋势具有较好一致性(图 2b),其中 2014—2016 年两站风速差较大;2017—2018 年,风速差回归到 2012 年以前水平,这与尚义风电场建设期(2008—2015 年)时间匹配并不一致。该结果显示,风电场建设前后兴和站风速变化并不显著,兴和站受尚义风电场群影响的可能性很小。

#### 3.1.2 局地风速变化

图 3 表示尚义站(SY)与兴和站(XH)年和四季风速差变化值( $\Delta V$ )与气候年际标准差( $\text{Std}_{dV}$ )。就影响站(SY)而言,风电场年均  $\Delta V$  为  $-0.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,绝对值高于  $\text{Std}_{dV}$  ( $0.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),表明受风电场群影响,SY 年均风速明显降低;就四季平均来看, $\Delta V$  在春季变幅最大( $-0.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),其次是冬季( $-0.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),且绝对值均明显高于相应时段的  $\text{Std}_{dV}$ ,而夏季和秋季的  $\Delta V$  在  $\text{Std}_{dV}$  波动范围内,表明风电场建设后风速降低主要发生在春季和冬季。

就可能影响站(XH)而言,年和春、夏、秋季  $\Delta V$  均在  $\text{Std}_{dV}$  波动范围内,仅冬季  $\Delta V$  略高于  $\text{Std}_{dV}$  (偏高  $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),表明风电场建设后兴和站风速变化基本处于正常年际波动内。该结果显示兴和站受尚义风电场影响很小,即使受到影响也仅仅发生在冬季,而且这种影响非常轻微。由于兴和站位于风

电场偏南方向约 29 km 处,因此可以推测尚义陆上风电场群影响范围很可能不超过 30 km。

### 3.2 陆/海风电场群湍流强度变化

#### 3.2.1 日变化

分别选择尚义陆地测风塔 30 m、70 m 和如东海上测风塔 15 m、80 m 高度层,分析建设前后 TI

日变化(图 4):无论是尚义陆上风电场群,还是如东海上风电场群,建设后各高度层不同时次 TI 均明显增加;这主要是由于风电场群内大范围风机的搅动,使得空气上下交换加强,致使陆/海风电场区 TI 增加明显(Christiansen and Hasager, 2006; Smith et al, 2013)。就不同高度来看,低层 TI 明显高于高层,这是由于在低层大气更易受到地表粗糙度与地

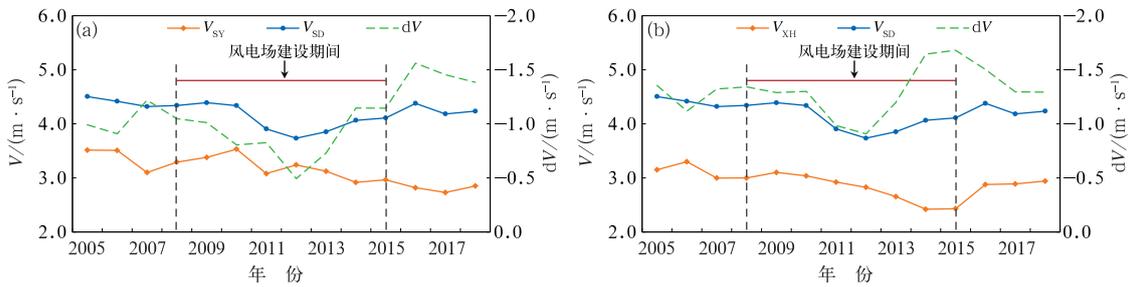


图 2 2005—2018 年(a)尚义站和(b)兴和站年平均风速及与商都站风速差变化趋势  
 Fig. 2 The variation trend of average wind speed at (a) Shangyi Station and (b) Xinghe Station and the differences between two stations and Shangdu Station respectively during 2005—2018

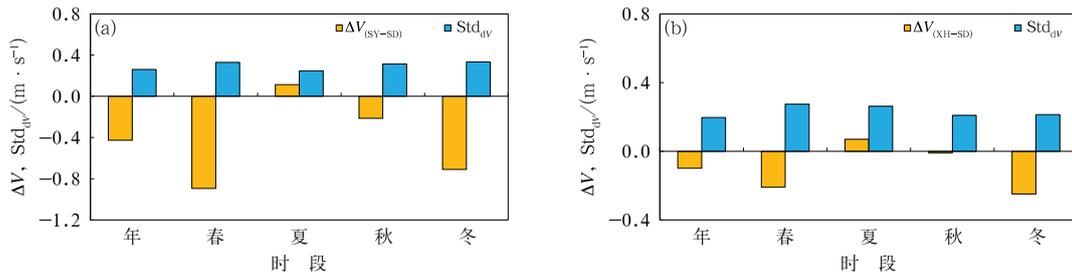


图 3 尚义风电场群建设前后(a)尚义站和(b)兴和站风速差变化与气候年际标准差对比  
 Fig. 3 The comparison of wind speed difference changes ( $\Delta V$ ) and climate interannual standard deviations ( $Std_{dV}$ ) of (a) Shangyi Station and (b) Xinghe Station before and after the construction of Shangyi wind farms

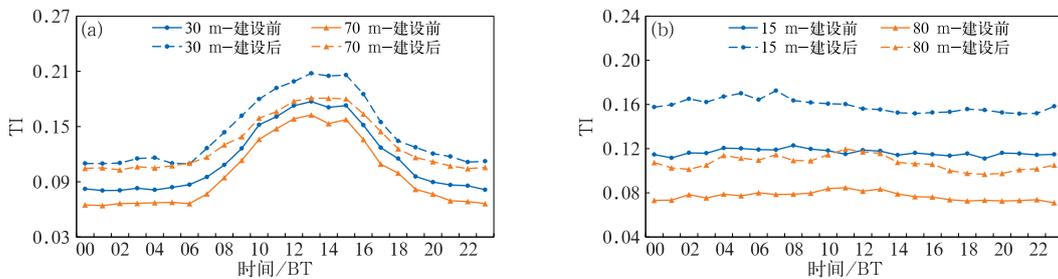


图 4 (a)尚义和(b)如东风电场群建设前后不同高度湍流强度日变化对比  
 Fig. 4 The comparison of diurnal variation of TI at different heights at (a) Shangyi Station and (b) Rudong Station before and after construction of inland/offshore wind farms

形影响,大气上下交换强,因此 TI 更强。

尚义陆上风电场 TI 日变化呈单峰曲线,白天 TI 明显大于夜间,这是由于日出后地表受热,对流逐渐加强,导致大气层结不稳定, TI 逐渐增大,至中午前后达到最大;日落后地表受热停止,对流作用减小,大气层结逐渐转为中性, TI 也随之减小。与陆上风电场并不相同,如东海上风电场 TI 日变化不明显,这主要是由于海面水体热容量大,增温和降温过程较陆地缓慢,导致海上区域热力对流变化小于陆地,因此海上风电场 TI 日变化波动较小。

对比尚义陆地和如东海上风电场群同一高度层 50 m 建设前后 TI 日变化,如图 5a 所示:无论建设前后,陆地 TI 日均值均明显高于海上,尤其在白天,这是由于海洋热容量明显高于陆地,造成海上白天近地层温度梯度小于陆地,加之下垫面平滑,从而使同一高度上海洋 TI 明显小于陆地;到了夜晚,陆地和海水大气层结都比较稳定,温度梯度接近,因此 TI 比较接近。

对比陆/海风电场群建设后各典型高度层(尚义:30 m、70 m;如东:15 m、80 m) TI 增幅日变化(图 5b),可以看出:就不同时次来看,陆地风电场群各高度层 TI 较建设前增加 11%~66%,其中夜晚增幅(平均为 45%)明显大于白天(平均为 20%)。这是因为陆地区域夜间大气稳定度高,对流本身较弱,但由于风机的搅动,使得上下空气交换加强,致使湍流强度大幅增加;而白天地面受大气加热影响,大气层结不稳定,对流本身较强,虽然风机的搅动能更进一步加强空气扰动,但相比于夜间增幅小得多。

就不同高度来看,陆地风电场建设后 70 m 高度 TI 平均增幅为 40%,明显高于 30 m TI 增幅(28%),表明 TI 在高层增幅大于低层,这种增幅在

夜间更为明显。这很可能一方面与 70 m 高度 TI 在夜间处于低值区且明显小于 30 m 高度(图 4a)有关;另一方面由于 70 m 高度层更接近风机轮毂高度(平均 75 m),受风机搅动影响更大,而尚义风轮平均直径约为 90 m,表明叶片最底端与地面距离约为 30 m,因此 30 m 高度受风机影响较小。

如东海上风电场群建设后各高度 TI 增加 29%~48%,但增幅没有明显的日变化特征。这是因为虽然海上区域风机搅动加强了空气扰动,使 TI 增加,但由于 TI 日变化较小(图 4b), TI 增幅的日变化也较小。此外,80 m 高度 TI 平均增幅为 39%,稍高于 15 m 高度平均增幅(36%),表明海上风机对低层和高层 TI 影响造成的差异远不如陆地风机的影响明显。

### 3.2.2 年和季节变化

尚义陆地和如东海上风电场群建设前后不同高度年均 TI 对比如图 6 所示,与 TI 日变化相似,陆/海风电场群年均 TI 不同高度均较建设前明显增加,其中尚义陆地各高度建设前年均 TI 为 0.099~0.114,建设后增至 0.131~0.144,平均增加了 31%;如东海上各高度建设前年均 TI 为 0.077~0.117,建设后增至 0.107~0.159,平均增加了 37%,TI 增加原因与前面日变化相同。对比陆/海风电场群同一高度 50 m 来看,无论建设前后,陆地区域 TI 均明显高于海上,偏高约 21%,这是由于海面相对于陆地下垫面平滑、地表粗糙度小,加之海水热容量高于陆地、近海面层温度梯度小于陆地近地层,导致海上风电场区域 TI 相对于陆地风电场整体较小。

以尚义陆地和如东海上风电场群测风塔 50 m 高度 TI 四季变化进行对比,如图 7a 所示:从季节变

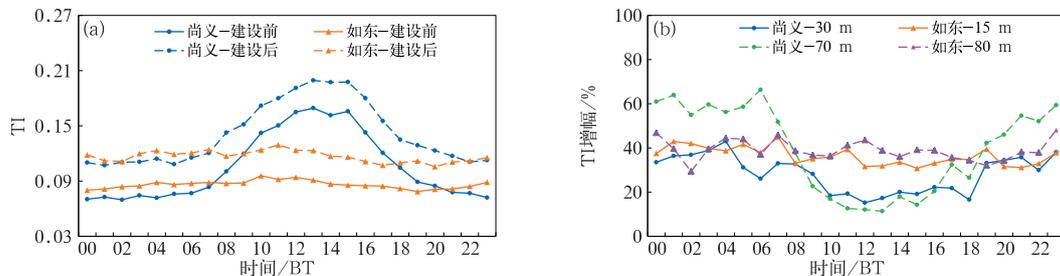


图 5 陆/海风电场群(a)建设前后 50 m 高度湍流强度及(b)建设后不同高度湍流强度增幅的日变化  
Fig. 5 The diurnal variation of (a) the TI at 50 m height before and after construction and (b) TI increasing range at different heights after construction of inland/offshore wind farms

化上看,无论建设前后,陆地风电场 TI 四季变化均较为明显(建设前 0.091~0.126,建设后 0.121~0.155),其中夏季最大、冬季最小,春秋季介于之间;海上风电场 TI 季节变化建设前较为平稳(0.080~0.096),季节变化幅度明显小于陆地,这与已有的风电场建设前不同地形 TI 变化相关研究结果较为一致(李鸿秀等,2014;龙强等,2020);而风电场群建设后如东海上风电场 TI 季节变化加大(0.098~0.135),其中冬秋 TI 强于春夏,这与陆地风电场季节变化规律并不一致。

从季节 TI 增幅看(图 7b),尚义陆地风电场春季 TI 增幅(47%)最为明显,然后依次为冬季(33%)、秋季(33%)和夏季(24%),这与前面分析的春季和冬季风速受风电场影响显著具有一致性。而如东海上风电场冬季 TI 增幅最大(49%),然后依次为秋季(42%)、春季(34%)和夏季(21%)。

### 3.3 陆/海风电场群风切变指数变化

#### 3.3.1 日变化

尚义陆地和如东海上风电场群建设前后,年均

WSE 日变化如图 8a 所示:两个风电场群 WSE 均表现为夜间高、白天低等日变化特征,但陆地风电场 WSE 日变化明显大于海上风电场。这是由于白天对流作用强、大气层结不稳定,湍流活动旺盛,使不同大气垂直层间的动量交换频繁,风速垂直梯度较小,导致 WSE 较低;夜间地表温度低,大气层趋于稳定,层间很少混合或不混合,风速随高度的上升急剧增大,导致 WSE 较高,这与雷杨娜等(2015)相关研究结果较为一致。

对比陆/海风电场群建设后 WSE 变幅的日变化分布(图 8b),可以看出:风电场建设后,陆地风电场群 WSE 在白天明显增加(平均增幅为 33%),夜间则降低(平均降幅为 9%),WSE 变幅趋势与日 WSE 大小分布正相反,WSE 小的时段增幅明显,WSE 大的时段降幅较大,从而使得 WSE 的日变化值变小(从建设前的 0.199 降至建设后的 0.133)。这是由于陆地区域 WSE 日变化较为明显,白天大气不稳定、风速垂直梯度较小,但由于高层风速更接近风机轮毂高度受风机扰动影响更大,风速增大幅度大于低层,使得上下层风速梯度增大,致使白天

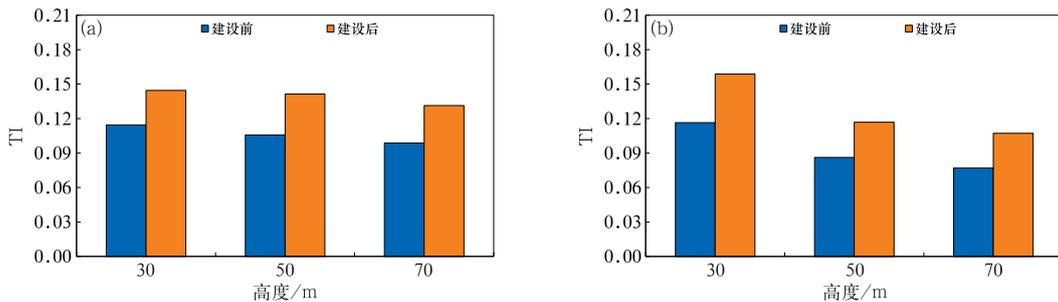


图 6 (a)尚义和(b)如东风电场群建设前后不同高度年湍流强度对比

Fig. 6 Comparison of annual TI at different heights at (a) Shangyi Station and (b) Rudong Station before and after construction of inland/offshore wind farms

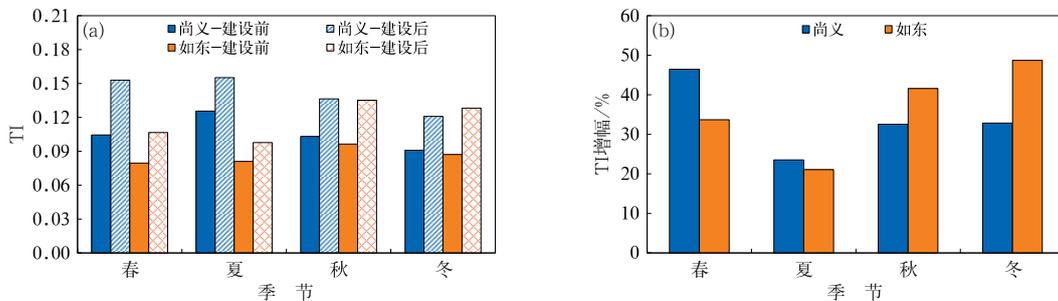


图 7 陆/海风电场群 50 m 高度湍流强度(a)建设前后四季变化及(b)建设后湍流强度增幅对比

Fig. 7 (a) The seasonal variation of TI at the 50 m height before and after construction and (b) comparison of TI increasing range after construction in different seasons

WSE 大幅增加;夜间大气稳定、风速垂直梯度较大,风机扰动使得上下空气交换加强、风速梯度变小,致使夜晚 WSE 降低。海上风电场群建设后,WSE 在白天夜晚均有所增加(平均增幅为 24%),但由于 WSE 日变化较小,WSE 增幅无明显日变化趋势,且建设前后 WSE 日变化值也没有明显变化(分别为 0.040 和 0.039)。

### 3.3.2 年和季变化

尚义陆地和如东海上风电场群建设前后,年和四季平均 WSE 及建设后变幅如图 9 所示。

风电场建设前,陆地区域年均 WSE 为 0.196 (图 9a),明显高于海上区域(年均 WSE 为 0.133)。这是由于尚义处于内陆山区,地形起伏和地表粗糙度都较大,使得风速随高度变化大,因此 WSE 也相对较大;如东沿海地形平坦,气流受地形和粗糙度影响较少,风速在不同高度的分布较稳定,故 WSE 相对较小。陆地风电场 WSE 表现为冬季和秋季较大,春季和夏季较小,这是由于冬季气温低,太阳辐射强度较低,大气层结稳定度高,动量、热量交换较少,高低层之间风速差异大,从而 WSE 大;夏季气温高,高强度的太阳辐射引起大气层的不稳定性增

强,大气层间的混合加强,高低层之间风速差异变小,导致 WSE 较小(杜燕军和冯长青,2010);海上风电场 WSE 表现为冬季和春季较大,夏季和秋季较小,这很可能与如东海上风电场夏秋温度高于冬春、大气混合较冬春更加明显有关。

尚义陆地风电场建设后,无论年和季节 WSE 均有所下降(图 9b),其中年均降低 8%,四季降低 3%~12%,这主要是由于风机的影响造成夜间 WSE 降低所致(图 8b),虽然夜间 WSE 降低幅度不如白天 WSE 增幅,但夜间 WSE 明显大于白天 WSE(图 8a),从而造成年、季 WSE 有所降低,与尚义风电场相反,如东海上风电场建设后无论年和季 WSE 均明显增加,其中年均增加了 24%,各季增加了 4%~37%。这主要是由于海表粗糙度较小且远离风机,低层风速受到影响较小,高层风速更接近风机轮毂高度,受风机扰动影响更大,风速增大幅度大于低层,风速垂直梯度增大,致使 WSE 增加。

此外,陆/海风电场均对夏季 WSE 影响较小,这可能是夏季大气层间混合本身较强,而风机扰动对这种混合影响较小,使得 WSE 变化并不显著。

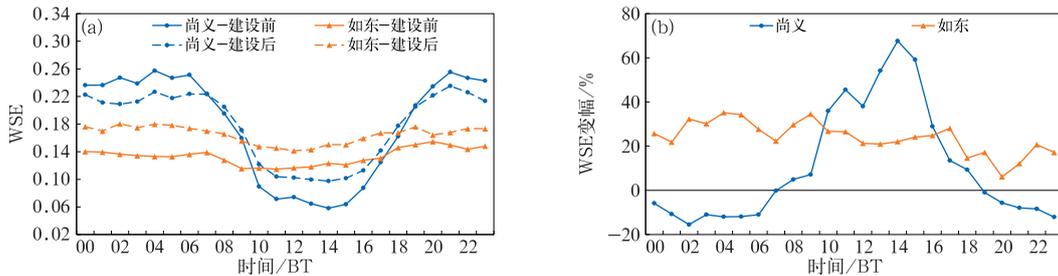


图 8 陆/海风电场群(a)建设前后风切变指数及(b)建设后风切变指数变幅日变化

Fig. 8 (a) Diurnal variation of WSE before and after construction and (b) variable amplitude of WSE after the construction of inland/offshore wind farms

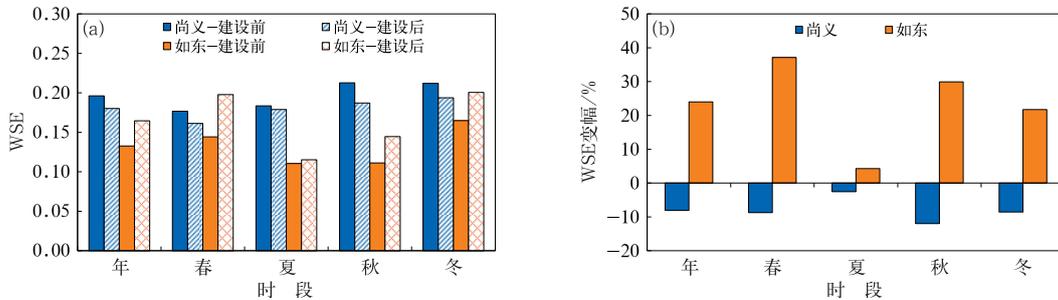


图 9 陆/海风电场群(a)建设前后风切变指数及(b)建设后风切变指数变幅对比

Fig. 9 (a) Annual and seasonal variation of WSE before and after the construction and (b) variable amplitude of WSE after the construction of inland/offshore wind farms

## 4 结论与讨论

### 4.1 结 论

本研究利用河北尚义陆地风电场群周边 4 个国家气象站 1981—2018 年逐日观测资料、区域内测风塔 2006—2017 年不同高度逐时测风资料以及江苏如东海上风电场群区域测风塔 2009—2018 年不同高度逐时测风资料,根据风电场群建设和投产时间以及质控后可用的测风塔数据,选定风电场建设前后分析时段,通过计算建设前后局地风速差值、湍流强度 TI 和风切变指数 WSE,对比研究陆/海风电场群建设对局地风环境关键参数的影响,初步得到以下主要结论。

(1)尚义陆地风电场具有明显风速减弱效应,年均风速较建设前降低  $0.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且风速降低主要发生在春季和冬季,风速分别降低了  $0.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风电场影响范围很可能不超过 30 km。

(2)陆地风电场区 TI 值高于海上风电场区, TI 日变化和季节变化也比海上区域明显。陆/海风电场群建设对 TI 均具有增强效应,建设后年均 TI 分别增加了 31% 和 37%。陆地风电场区 TI 夜间增幅 (45%) 明显大于白天增幅 (20%),且高层增幅 (40%) 大于低层 (28%),而海上风电场区 TI 不同高度增幅及其日变化较为平稳。陆地风电场区 TI 四季增幅为 24%~47%;海上风电场区 TI 四季增幅为 21%~49%。

(3)陆/海风电场区域 WSE 均呈现冬季高、夏季低、夜间大于白天等特征,但陆地 WSE 日变化明显大于海上。陆/海风电场建设后对 WSE 影响存在显著差异,陆地风电场建设后 WSE 白天增加了 33%、夜晚则降低了 9%,从而导致 WSE 日变化变小,且年和四季 WSE 均有所降低,其中年均降低了 8%,四季降低了 3%~12%;海上风电场建设后 WSE 白天、夜晚均明显增加,从而导致年和四季 WSE 均明显增加,其中年均增加了 24%,四季增加了 4%~37%。

### 4.2 讨 论

(1)风电场群对湍流强度 TI 影响的不确定性。本文所得结果显示陆/海风电场群在建设前湍流强

度 TI 年、季、日变化均存在明显差异,这也与已有风电场建设前相关研究结果(史军等,2016;郑新倩等,2019)较为一致,表明本文的研究资料具有一定代表性,方法较为合理。而风电场群建设后,陆上和海上 TI 均发生了较为明显的变化,凸显了风电场群对海/陆局地风场的影响,由于海陆两种下垫面性质的不同,这种影响存在着不同高度、白天/夜晚和季节差异,但这种差异是否受到其他条件例如年际变化或者背景气候变化的影响还并不清楚,因此未来还需更长时间的气象观测资料来开展风电场群对 TI 长期的影响研究。

(2)风电场群对风切变指数 WSE 影响的不确定性。本文结果显示风电场建设前陆/海 WSE 呈现冬季较高、夏季较低、白天较小、夜间较高等特点,与已有风电场建设前的相关研究结果较为一致(彭怀午等,2010;孙淑芳和张广兴,2019;陈燕等,2019);风电场建设后由于风机一定程度上改变了不同高度的风速使得 WSE 发生变化,但这种变化实际上是很复杂的,因为 WSE 不仅受地表粗糙度影响,还受地形、大气稳定度、海拔高度以及热力层结的影响(李鹏和田景奎,2011),而风电场不仅影响地表粗糙度,还影响风速和大气温度如局地增温降风效应(张雪婷等,2019;Liu et al,2021)。因此风电场群对 WSE 的影响机制未来还需要更多观测资料进行佐证。

(3)资料分析的不确定性。由于测风塔资料限制,本文仅选取了风电场群建设前后各 1 年资料,而且由于陆/海测风塔资料时间差异,选取的年份也不同,因此存在资料代表性不够充分造成的不确定性问题,从而造成陆/海风电场群对局地风环境影响差异分析存在一定不确定性。此外,不同测风塔资料实际上是受气候背景影响并存在年际变化的,虽然 TI 和 WSE 是关于风速的相对变化指标,很大程度上已经消除了气候背景场(含年际变化)的影响,但由于没有周围参考塔同高度风速资料,陆/海风电场对 TI 和 WSE 的分析与对比仍存在一定程度受背景场影响的不确定性。另外,如东测风塔位于海上风电场东南方向,考虑盛行风向的季节变换(冬季盛行风为偏北风,夏季盛行风为偏南风),测风塔受风电场影响在冬季较夏季更为明显,这可能也是如东海上风电场对 TI 和 WSE 的影响在冬季最大、夏季最小的另外一个原因。因此,未来还需选取更多的站点以及更有代表性的资料进行详细分析,才能消

除这种由于资料不足带来的不确定性。

## 参考文献

- 班欣,冯还岭,祁欣,等,2012.连云港沿海近地层湍流强度特征[J].气象科技,40(2):285-292. Ban X, Feng H L, Qi X, et al, 2012. Analysis of surface layer turbulence intensity along Lianyungang coastland[J]. Meteor Sci Technol, 40(2):285-292 (in Chinese).
- 常蕊,朱蓉,柳艳香,等,2013.基于均生函数的风电场风速短临预报模型[J].气象,39(2):226-233. Chang R, Zhu R, Liu Y X, et al, 2013. Nowcasting model of wind speed based on mean generating function for wind farms[J]. Meteor Mon, 39(2):226-233 (in Chinese).
- 常蕊,朱蓉,赵大军,2022.登陆台风影响下离地 300 m 高度内的强风特征[J].大气科学,46(5):1071-1086. Chang R, Zhu R, Zhao D J, 2022. Strong wind characteristics of the lower boundary layer (0-300 m) during the landfall of a typhoon[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5):1071-1086 (in Chinese).
- 陈燕,张宁,许退祺,等,2019.江苏沿海近地层强风风切变指数特征研究[J].高原气象,38(5):1069-1081. Chen Y, Zhang N, Xu X Z, et al, 2019. The wind shear exponent in the near-surface strong wind in the coastal areas of Jiangsu Province[J]. Plateau Meteor, 38(5):1069-1081 (in Chinese).
- 陈正洪,何飞,崔杨,等,2018.近 20 年来风电场(群)对气候的影响研究进展[J].气候变化研究进展,14(4):381-391. Chen Z H, He F, Cui Y, et al, 2018. Advances in research of influence on climate of the group of wind farms in past 20 years[J]. Climate Change Res, 14(4):381-391 (in Chinese).
- 程雪玲,贺园园,朱蓉,2023.复杂地形对风速廓线的影响[J].大气科学. Cheng X L, He Y Y, Zhu R, 2023. Effect of complex terrain on the wind speed profile[J]. Chin J Atmos Sci (in Chinese). DOI:10.3878/j.jssn.1006-9895.2301.22181.
- 杜燕军,冯长青,2010.风切变指数在风电场风资源评估中的应用[J].电网与清洁能源,26(5):62-66. Du Y J, Feng C Q, 2010. Application of wind shear index in the assessment of wind resources of wind farm[J]. Power Syst Clean Energy, 26(5):62-66 (in Chinese).
- 龚强,汪宏宇,朱玲,等,2015.辽宁省近地层风切变特征研究[J].自然资源学报,30(9):1560-1569. Gong Q, Wang H Y, Zhu L, et al, 2015. Study on the near surface wind shear characteristics in Liaoning Province[J]. J Natural Resources, 30(9):1560-1569 (in Chinese).
- 龚玺,朱蓉,李泽椿,2018.我国不同下垫面的近地层风切变指数研究[J].气象,44(9):1160-1168. Gong X, Zhu R, Li Z C, 2018. Study of near surface wind shear exponents of different regions in China[J]. Meteor Mon, 44(9):1160-1168 (in Chinese).
- 贺德馨,2006.风工程与工业空气动力学[M].北京:国防工业出版社:29-48. He D X, 2006. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press: 29-48 (in Chinese).
- 胡菊,2012.大型风电场建设对区域气候影响的数值模拟研究[D].兰州:兰州大学. Hu J, 2012. Numerical simulation research on impact of large-scale wind farms on regional climate[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese).
- 黄林宏,宋丽莉,李刚,等,2016. IEC 的风机选型参数估算方法在中国的适用性研究[J].气象,42(12):1522-1530. Huang L H, Song L L, Li G, et al, 2016. Applicability of estimation methods of IEC WTGS selecting parameters in China[J]. Meteor Mon, 42(12):1522-1530 (in Chinese).
- 蒋俊霞,杨丽薇,李振朝,等,2019.风电场对气候环境的影响研究进展[J].地球科学进展,34(10):1038-1049. Jiang J X, Yang L W, Li Z C, et al, 2019. Progress in the research on the impact of wind farms on climate and environment[J]. Adv Earth Sci, 34(10):1038-1049 (in Chinese).
- 靳双龙,刘晓琳,李鸿秀,等,2019.不同下垫面垂直风切变特征对比[J].兰州大学学报(自然科学版),55(3):340-346. Jin S L, Liu X L, Li H X, et al, 2019. A contrast study on vertical wind shear characteristics of different underlying surfaces[J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 55(3):340-346 (in Chinese).
- 雷杨娜,孙娟,张侠,等,2015.陕北黄土高原复杂地形风速廓线特性[J].可再生能源,33(9):1345-1350. Lei Y N, Sun X, Zhang X, et al, 2015. Speed profile characteristics of wind over complex terrain in loess plateau in Northern Shaanxi[J]. Renewable Energy Resour, 33(9):1345-1350 (in Chinese).
- 李国庆,李晓兵,2016.风电场对环境的影响研究进展[J].地理科学进展,35(8):1017-1026. Li G Q, Li X B, 2016. Research progress of wind farm impact on the environment[J]. Prog Geogr, 35(8):1017-1026 (in Chinese).
- 李鸿秀,朱瑞兆,王蕊,等,2014.不同地形风电场湍流强度日变化和年变化分析[J].太阳能学报,35(11):2327-2333. Li H X, Zhu R Z, Wang R, et al, 2014. Wind turbulence intensity of daily and yearly variation analysis in different kinds of terrain[J]. Acta Energ Sol Sin, 35(11):2327-2333 (in Chinese).
- 李鹏,田景奎,2011.不同下垫面近地层风速廓线特征[J].资源科学,33(10):2005-2010. Li P, Tian J K, 2011. Characteristics of surface layer wind speed profiles over different underlying surfaces[J]. Resour Sci, 33(10):2005-2010 (in Chinese).
- 梁红,魏科,马骄,2021.我国西北大规模太阳能与风能发电场建设产生的可能气候效应[J].气候与环境研究,26(2):123-141. Liang H, Wei K, Ma J, 2021. Climate effect assessment of ideal large-scale solar and wind power farms in Northwest China[J]. Climatic Environ Res, 26(2):123-141 (in Chinese).
- 刘敬乐,姚青,蔡子颖,等,2020.基于天津 255 m 气象塔对近年天津近地面风和气温变化特征的研究[J].气象,46(9):1235-1244. Liu J L, Yao Q, Cai Z Y, et al, 2020. Analysis of temperature and wind variation characteristics based on the 255 m meteorological tower in Tianjin[J]. Meteor Mon, 46(9):1235-1244 (in Chinese).
- 刘磊,高晓清,陈伯龙,等,2012.大规模风电场建成后对风能资源影响的研究[J].高原气象,31(4):1139-1144. Liu L, Gao X Q, Chen B L, et al, 2012. Preliminary estimates of wind energy

- resources deficit in large wind farm[J]. Plateau Meteor, 31(4): 1139-1144(in Chinese).
- 刘维维, 2015. 风力机运行对大气边界层影响的数值模拟研究[D]. 保定: 华北电力大学. Liu W W, 2015. Numerical simulation of the influence of the wind turbine on the atmosphere boundary layer[D]. Baoding: North China Electric Power University (in Chinese).
- 龙强, 王锋, 王畅, 等, 2020. 渤海湾北岸海陆风及湍流强度特征分析[J]. 应用海洋学学报, 39(3): 303-311. Long Q, Wang F, Wang C, et al, 2020. Characteristics of sea-land breeze and turbulence intensity on the north shore of Bohai Bay[J]. J Appl Oceanogr, 39(3): 303-311(in Chinese).
- 路婷婷, 2017. 基于大涡模拟的风力机对区域大气边界层特性影响研究[D]. 保定: 华北电力大学. Lu T T, 2017. Study on the influence of wind turbine on the characteristics of regional atmospheric boundary layer based on large eddy simulation[D]. Baoding: North China Electric Power University(in Chinese).
- 马晓梅, 王博, 刘永前, 2020. 一种基于大气稳定度的风资源评估方法[J]. 可再生能源, 38(1): 47-52. Ma X M, Wang B, Liu Y Q, 2020. A wind resource assessment method based on atmospheric stability[J]. Renew Energy Resour, 38(1): 47-52(in Chinese).
- 彭怀午, 冯长青, 包紫光, 2010. 风资源评价中风切变指数的研究[J]. 可再生能源, 28(1): 21-23, 28. Peng H W, Feng C Q, Bao Z G, 2010. Study on the wind shear exponent for wind resource assessment[J]. Renewable Energy Resour, 28(1): 21-23, 28 (in Chinese).
- 史军, 穆海振, 徐家良, 等, 2016. 上海近海海域低层风特性分析[J]. 长江流域资源与环境, 25(8): 1184-1190. Shi J, Mu H Z, Xu J L, et al, 2016. Characteristics of low-level wind in Shanghai offshore[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 25(8): 1184-1190 (in Chinese).
- 孙淑芳, 张广兴, 2019. 新疆百里风区近地层垂直风切变指数特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 13(3): 99-104. Sun S F, Zhang G X, 2019. Characteristics of vertical wind shear exponent in the atmospheric surface layer in the 100-kilometer wind area of Xinjiang[J]. Desert Oasis Meteor, 13(3): 99-104(in Chinese).
- 王承煦, 张源, 2003. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社. Wang C X, Zhang Y, 2003. Wind Power Generation[M]. Beijing: China Electric Power Press(in Chinese).
- 吴婷婷, 2015. 风电场风能资源评估中重要参数的计算与应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学. Wu T T, 2015. Research on important parameters calculation and application of wind energy resource assessment for wind farm[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology(in Chinese).
- 吴正人, 刘维维, 王松岭, 2014. 风力发电对局地气候的潜在影响分析[J]. 中国电力, 47(6): 101-105. Wu Z R, Liu W W, Wang S L, 2014. Analysis of potential impacts of wind power generation on local climate[J]. Electric Power, 47(6): 101-105(in Chinese).
- 夏馨, 余晔, 董龙翔, 等, 2022. 风电场建设前后近地面湍流强度变化特征[J]. 高原气象, 41(4): 1062-1073. Xia X, Yu Y, Dong L X, et al, 2022. Characteristics of near surface turbulence intensity before and after wind farm construction[J]. Plateau Meteor, 41(4): 1062-1073(in Chinese).
- 徐宝清, 吴婷婷, 李文慧, 2014. 风能风切变指数计算方法的比选研究[J]. 农业工程学报, 30(16): 188-194. Xu B Q, Wu T T, Li W H, 2014. Screening of calculation methods for wind shear exponent[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 30(16): 188-194 (in Chinese).
- 徐荣会, 2014. 干旱区风电场对局地微气象环境的影响研究——以苏尼特右旗朱日和风电场为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学. Xu R H, 2014. The impact of wind farm on local micro meteorological environment in arid region—taking Zhurihe wind farm as an example[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology(in Chinese).
- 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等, 2001. 中国风能资源贮量估算[J]. 太阳能学报, 22(2): 167-170. Xue H, Zhu R Z, Yang Z B, et al, 2001. Assessment of wind energy reserves in China[J]. Acta Energiæ Sol Sin, 22(2): 167-170(in Chinese).
- 叶小岭, 支亮亮, 邓华, 2019. 基于 WRF 模式的风电场短期风速集成预报方法研究[J]. 气象, 45(1): 88-98. Ye X L, Zhi X L, Deng H, 2019. Integrated forecasting method research of short-term wind speed in wind power plant based on WRF model[J]. Meteor Mon, 45(1): 88-98(in Chinese).
- 张雪婷, 李金鑫, 陈正洪, 等, 2019. 我国大别山区风电场群对局地气候影响研究初探——以湖北大悟为例[J]. 气象科技进展, 9(2): 56-61. Zhang X T, Li J X, Chen Z H, et al, 2019. A preliminary exploration on the influence of wind farms on local climate in Dabie Mountainous areas in China: a case study of Dawu in Hubei Province[J]. Adv Meteor Sci Technol, 9(2): 56-61 (in Chinese).
- 张颖超, 肖寅, 邓华, 2016. 基于 ELM 的风电场短期风速订正技术研究[J]. 气象, 42(4): 466-471. Zhang Y C, Xiao Y, Deng H, 2016. Modification technology research of short term wind speed in wind farm based on ELM method[J]. Meteor Mon, 42(4): 466-471(in Chinese).
- 郑新倩, 杨帆, 李超凡, 等, 2019. 巴丹吉林沙漠北缘拐子湖流沙下垫面近地层湍流强度和陆面过程特征[J]. 中国沙漠, 39(4): 103-112. Zheng X Q, Yang F, Li C F, et al, 2019. The turbulence intensity of surface layer and land surface processes over Guazi Lake shifting sandy land on the northern margin of Badain Jaran Desert[J]. J Desert Res, 39(4): 103-112(in Chinese).
- 中国气象局, 2007. 风电场气象观测及资料审核、订正技术规范: QX/T 74—2007[S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2007. Regulations for data inspection and correction of wind power plant meteorological observation: QX/T 74—2007[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2004. 风电场风能资源评估方法: GB/T 18710—2002[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2004. Methodology of wind energy resource assessment for wind farm: GB/T 18710—2002[S]. Beijing: Standards Press of China (in

- Chinese).
- Buckley C, Scott N, Snodin S, et al, 2005. Review of Impacts of High Wind Penetration in Electricity Networks[M]. Australia: Garrad Hassan Pacific Pty Ltd.
- Christiansen M B, Hasager C B, 2006. Using airborne and satellite SAR for wake mapping offshore[J]. *Wind Energy*, 9(5): 437-455.
- Dincer I, Acar C, 2015. A review on clean energy solutions for better sustainability[J]. *Int J Energy Res*, 39(5): 585-606.
- Farrugia R N, 2003. The wind shear exponent in a Mediterranean island climate[J]. *Renewable Energy*, 28(4): 647-653.
- Fitch A C, 2015. Climate impacts of large-scale wind farms as Parameterized in a global climate model[J]. *J Climate*, 28(15): 6160-6180.
- Fitch A C, Olson J B, Lundquist J K, et al, 2012. Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP model[J]. *Mon Wea Rev*, 140(9): 3017-3038.
- Frandsen S T, Jørgensen H E, Barthelmie R, et al, 2009. The making of a second-generation wind farm efficiency model complex[J]. *Wind Energy*, 12(5): 445-458.
- Garrigle E V M, Leahy P G, 2015. Quantifying the value of improved wind energy forecasts in a pool-based electricity market[J]. *Renewable Energy*, 80: 517-524.
- Li Y, Kalnay E, Motesharrei S, et al, 2018. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation[J]. *Science*, 361(6406): 1019-1022.
- Liu Y H, Dang B, Xu Y M, et al, 2021. An observational study on the local climate effect of the Shangyi wind farm in Hebei Province [J]. *Adv Atmos Sci*, 38(11): 1905-1919.
- Phillips J, 2015. A quantitative-based evaluation of the environmental impact and sustainability of a proposed onshore wind farm in the United Kingdom [J]. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 49: 1261-1270.
- Rehman S, Al-Abbadi N M, 2007. Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia[J]. *Renewable Energy*, 32(5): 738-749.
- Smith C M, Barthelmie R J, Pryor S C, 2013. In situ observations of the influence of a large onshore wind farm on near-surface temperature, turbulence intensity and wind speed profiles[J]. *Environ Res Lett*, 8(3): 034006.

(本文责编:俞卫平)