

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¹, 刘勇洪^{2,3}, 杜吴鹏¹, 陈可仁⁴

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? 本文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

Preliminary analysis on the influence difference of the inland/offshore wind farms group on local turbulence intensity and wind shear exponent

DANG Bing¹, LIU Yonghong², DU Wupeng¹, CHEN Keren³

1 Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089, China;

2 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081, China;

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081, China;

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

Abstract: Wind farms have obvious impact on the local climate. However, whether obvious differences on environmental effects of

资助项目: 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); 北京市气象局“新时代高层次科技创新人才计划”

第一作者: 党冰, 高级工程师, 主要从事气候评估及应用方面研究. E-mail: dangb07@163.com

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

24 local wind between the inland and offshore wind farms still need to be explored. This article used the inland wind farms data from
25 Shangyi, Hebei province and offshore wind farms in Rudong, Jiangsu province. Based on the data of meteorological observation and
26 wind gradient tower around wind farm, the influence and comparative analysis on the inland and offshore wind farms on local wind
27 environment, Turbulence Intensity (TI) and Wind Shear Exponent(WSE) were preliminarily analyzed. The results showed that **the**
28 **inland and offshore wind farms have significant effects on TI and WSE.** The construction of inland and offshore wind farms has an
29 enhancement effect on TI. The average annual TI increased by 31% and 37%, and the largest rise occurred in spring (47%) and winter
30 (49%) in inland and offshore wind farms respectively. Moreover, the TI increasing range of high-level was greater than that in
31 low-level, and greater at night than in day in inland wind. The TI increasing range was relatively smooth of different heights and
32 diurnal variation in offshore wind farms. The construction of inland and offshore wind farms has significant differences effect on WSE.
33 The WSE increased during the day and decreased at night, and the daily variation was significantly reduced and the average annual
34 WSE decreased by 8%, the largest decline of WSE occurred in autumn (12%) at inland wind farms. The WSE increased obviously
35 during the day and night with average annual WSE increased by 24%, and the largest rise occurred in spring (37%) at offshore wind
36 farms .

37 **Key words:** Inland/offshore wind farms; Wind gradient tower; wind speed; Turbulence Intensity; Wind Shear Exponent

38 引言

39 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
40 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,
41 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
42 and Leahy, 2015; Phillips, 2015; 叶小岭等, 2019)。我国风能资源储量丰富, 总储量为 322,600GW, 实
43 际可开发量为 25,300GW (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
44 布的数据显示, 2021 年中国风力发电装机总量达 338.31GW, 占世界总装机容量的 40.4%; 其中海上风电发
45 展迅猛, 2021 年新增装机量 16.9GW, 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
46 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热交换过程, 同
47 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
48 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
49 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)。

50 **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
51 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 20km; Fitch et al (2012)

52 通过数值模拟发现从海上风电场延伸至其 60km 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
53 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
54 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
55 风电场建成后平均风速减小了 0.3m/s;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
56 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。
57 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
58 度和风切变指数的影响研究也很少。

59 湍流强度 (Turbulence Intensity, TI) 和风切变指数 (Wind Shear Exponent, WSE) 是评价气流稳定程度的
60 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
61 等, 2018; 陈燕等, 2019; 靳双龙等, 2019)。TI 不但与由地表摩擦和风速切变引起的动力因子以及温度层
62 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,
63 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
64 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
65 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
66 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),但对风电场
67 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
68 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;
69 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,
70 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
71 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
72 考。

73 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
74 观测资料以及质控后的测风塔测风资料,选定风电场建设前后典型时段,通过估算建设前后局地风速、TI
75 和 WSE 的变化,开展陆、海风电场群建设对局地风场影响差异分析初步研究,一方面阐明典型陆/海下垫面
76 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
77 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。

78 **1. 研究区与数据**

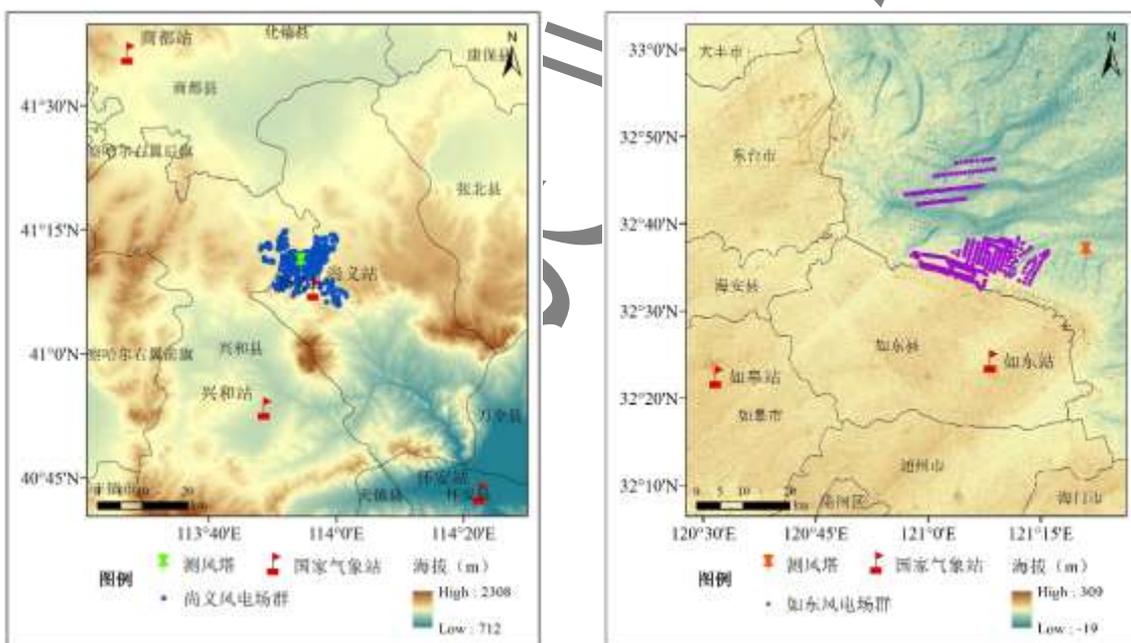
79 **1.1 研究区概况**

80 本文研究选取的陆地风电场位于中国河北张家口地区尚义县（如图 1a 所示），尚义风电场群从 2008 年
81 至 2015 年底陆续建成 224 台风机（表 1），风机轮毂高度为 65-90m，总装机容量为 450MW；风电场所在区
82 域属于半干旱大陆性季风气候区，海拔高度为 1375~1573m，自然植被以草本植物为主，山谷及缓坡地带
83 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，年均降雨
84 量 414mm，年均风速 3.4m/s，全年主导风为西北向（NW），次主导风为西西南（WWS）。

85 海上风电场研究区位于中国江苏南通地区如东县（如图 1b 所示），如东风电场群从 2009 年至 2015 年
86 陆续建成 155 台风机，风机轮毂高度为 65-90m，总装机容量为 482MW；风电场所在区域属于北亚热带海
87 洋性季风气候区，境内地势平坦，海拔高度为 3~5m，陆地地貌是典型的滨海平原，沿海属黄海南部海域，
88 沿海潮汐 24 小时涨落两次；受海洋调节和季风环流影响，四季分明，气候温和，光照充足，雨水充沛，年
89 降水量 1100 mm，年均风速 3.2 m/s，夏季盛行东南风，冬季盛行偏北风。

90 (a) 尚义风电场群

(b) 如东风电场群



91 图 1 陆/海风电场群位置、地形及周边气象站点分布 (a: 尚义风电场群 b: 如东风电场群)

92 Fig.1 The geographical location of inland/offshore wind farms and meteorological observation (a: Shangyi Wind Farms b: Rudong
93 Wind Farms)

94 **1.2 数据资料及分析时段**

95 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
96 速、气温、相对湿度逐日观测数据；（2）0704#测风塔 2006-2017 年 30m、50m、70m 高度逐时风速观测数
97

98 据。

99 江苏如东海上风电场群气象资料主要为：（1）国家基本气象站如东、如皋站 1981-2018 年逐日风速观测
100 数据；（2）如东 0865#测风塔 2009-2018 年 15m、50m、80m 高度逐时风速观测数据。

101 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
102 （QXT 74-2007）》（中国气象局，2007）进行质控后的气象观测资料，选择合适的陆/海风电场建设前后分析
103 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）的国家气象站尚义站进行局
104 地风速变化分析，而尚义 0704#测风塔资料由于存在不连续和缺测情况，选择资料较为完整的 2006 年和 2017
105 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。

106 表 1 陆/海风电场群建设概况一览表

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

| 风电场 | 项目名称 | 建设时间 | 投产日期 | 风机个数 | 轮毂高度 (m) | 叶轮直径 (m) |
|-------------|----------|-----------------|-----------------|------|----------|----------|
| 河北尚义 风电场 | 麒麟山一期 | 2008.06-2009.12 | 2009.12 | 100 | 65 | 77 |
| | 麒麟山二期 | 2010.04-2010.12 | 2010.12 | 67 | 70 | 82.9 |
| | 麒麟山三期 | 2015.04-2015.12 | 2015.12 | 57 | 90 | 120.4 |
| | 潮间带试验风电场 | 2009.06-2010.10 | 2010.05-2011.10 | 16 | 73 | 77 |
| 江苏如东 风电场 | 潮间带示范项目 | 2011.06-2012.09 | 2012.05 | 58 | 65 | 77 |
| | 潮间带增容项目 | 2012.09-2013.01 | 2013.01 | 20 | 90 | 120 |
| | 试验扩建项目 | 2012.07-2014.11 | 2015.03 | 11 | 90 | 120 |
| | 如东海上示范项目 | 2014.06-2015.7 | 2015.09 | 50 | 90 | 130 |

108 表 2 陆/海风电场群建设前后选择的分析时段表

109 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 |

110 **2 研究方法**

111 **2.1 评估站选择**

112 2.1.1 陆上风电场影响站与背景站选择

113 河北尚义陆地风电场群周围 60km 以内包含 4 个国家气象站：尚义、商都、怀安和兴和（如图 1a 所示）。
114 其中尚义气象站紧邻风电场群，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，
115 也可作为风电场影响站进行评估。

116 利用国家气象站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
117 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

118 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，合适
119 的背景站选择是尚义陆地风电场局地风速变化评估的一个关键步骤。

120 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
121 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
122 场至少 30 km。这里分别对风电场建设前（1981-2007 年）的尚义站与其他 3 个国家气象站怀安、兴和、商
123 都站的主要气候要素（气温和风速）和地理条件（海拔差与空间距离）进行相似性分析，如表 3 所示：

124 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

125 Table 3 The similarity analysis of climate and geographical conditions between 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 |

126 由表 3 分析可知，年均气温、风速和相对湿度的相关系数均以尚义与商都站最高，且两者海拔差最小
127 （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，可选择商都站作为背
128 景站进行尚义陆地风电场的局地风速变化分析。

129 为进一步分析尚义陆上风电场的影响范围，还需对可能受到尚义风电场影响的其他两个站——怀安与
130 兴和站进行分析。由于怀安站和背景站商都站海拔相差很大（583m），空间距离也最远（129km），且怀安
131 与背景站商都站风速相关系数仅为 0.65（表 3），以商都作为背景站并不能很好分析怀安站风速变化；而且
132 怀安站与尚义风电场群相距约 61km，已超出了 60km 的风电场最大可能影响范围 (Fitch et al, 2012)。因此，
133 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 29km、
134 年均风速与背景站商都相关系数为 0.86 的兴和站作为可能影响站进行分析。

135 2.1.2 海上风电场影响站选择

136 如东海上风电场群距离最近的国家气象站为如东站和如皋站，分别距风电场约 21km 和 50km (图 1b)。
137 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
138 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
139 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
140 外部原因造成，经调查得知 2014-2015 年如东气象站周围建立了许多高楼，致使 2014 年后风速下降明显，
141 并非风电场影响造成；而如皋站距离风电场较远（50km），且在海上风电场群的西南方向，与风电场群主导
142 风向（东南-偏北风）相差甚大，几乎不受海上风电场影响，因此如东站和如皋站均不适宜作为风电场影响
143 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。

144 如东 0865#测风塔位于风电场群偏东方向约 7 km 处，处于风电场偏北风向影响范围之内，可作为风电
145 场影响站进行评估。

146 2.2 局地风速影响评估

147 定义尚义陆上风电场群对局地风速的影响值为：

$$148 \quad DV = V_I - V_B \quad (1)$$

$$149 \quad \Delta V = DV_{AF} - DV_{BF} \quad (2)$$

150 其中 DV 为国家气象站影响站（或可能影响站）10m 高度风速（ V_I ）与背景站 10m 高度风速（ V_B ）之差
151 （m/s）， ΔV 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（m/s），即风电场对风速的
152 局地影响。

153 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）
154 与背景站风速差 DV 的年际标准差（Std_DV）作为年际波动，如果建设后风速差变化值（ ΔV ）大于年际波
155 动值 Std_DV，则表明该地风速受到风电场群影响，如果 ΔV 小于或等于 Std_DV，则表明该地风速没有受到
156 风电场群影响。

157 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
158 估，但由于该塔建设前仅有 1 年资料，且没有 10 m 高度的测风资料，因此本文不开展如东海上风电场的局
159 地风速影响研究。

160 2.3 局地湍流强度（TI）影响评估

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

$$163 \quad TI = \frac{\sigma}{V} \quad (3)$$

164 式中，TI——湍流强度， σ ——平均风速标准差， V ——平均风速。

165 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
166 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。

167 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 30m、50m 和 70m 高度 TI 的变化，
168 可开展陆上风电场对局地 TI 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
169 15m、50m 和 80m 高度 TI 的变化，可开展海上风电场对局地 TI 影响评估。

170 2.4 局地风切变指数（WSE）影响评估

171 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
172 煦和张源，2003；Farrugia，2003；Rehman and Al-Abbadi，2007）进行估算，即：

173
$$\frac{V_n}{V_1} = \left(\frac{Z_n}{Z_1}\right)^\alpha \quad (4)$$

174 式中， V_n 、 V_1 分别为 Z_n 、 Z_1 高度上的风速， α 为风切变指数 WSE。

175 对公式（4）作变换，并两边取对数，即得：

176
$$\alpha = \frac{\ln\frac{V_n}{V_1}}{\ln\frac{Z_n}{Z_1}} \quad (5)$$

177 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）
 178 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 m/s 以下风速
 179 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
 180 除 3m/s 以下、且高层风速大于低层的风速数据，根据公式（5）计算每两高度层间的 WSE，再利用最小二
 181 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
 182 平均 WSE，即根据公式（5）可得到：

183
$$\ln\frac{V_n}{V_1} = \alpha * \ln\frac{Z_n}{Z_1} \quad (6)$$

184 令 $y = \ln\frac{V_n}{V_1}$ ， $x = \ln\frac{Z_n}{Z_1}$ 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
 185 平方 $RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha x_i)^2$ 最小，当 $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ 时 RSS 取得最小值，得到最小二乘法拟合直线的斜率，即风
 186 切变指数值。

187 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，
 188 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。

189 3 结果分析

190 3.1 陆地风电场群局地风速变化

191 3.1.1 年变化趋势

192 就影响站尚义站（SY）而言，2005-2011 年尚义站和商都站风速变化趋势具有良好的一致性（图 2a），
 193 2011 年后，背景站商都站风速（ V_{SD} ）总体呈上升趋势，而尚义站风速（ V_{SY} ）则呈下降趋势，意味着
 194 2011 年后尚义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
 195 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），
 196 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。

197

198

(a) 尚义站

(b) 兴和站

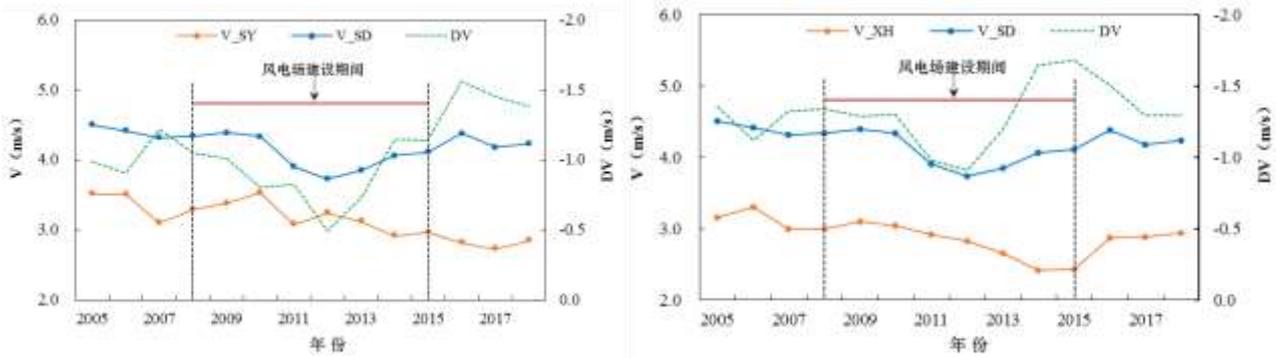


图2 2005-2018年尚义站(a)和兴和站(b)年平均风速及与商都站风速差变化趋势

Fig.2 The variation trend of average wind speed at Shangyi station (a) and Xinghe station (b) and the differences between them and Shangdu station during 2005-2018

就可能影响站兴和站(XH)而言, 2005-2018年兴和(V_XH)与商都(V_SD)风速变化趋势具有较好一致性(图2b), 其中2014-2016年两站风速差(DV)较大; 2017-2018年, 风速差(DV)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的变化并不显著, 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

如图3所示为尚义站与兴和站在风电场群建设后年和四季风速差变化值 ΔV 与相应时段的年际标准差Std_DV。就影响站尚义站(SY)而言, 风电场建设后年均 ΔV 为-0.43 m/s, 绝对值高于气候年际波动Std_DV(0.26 m/s), 表明受风电场群影响, 年均风速明显降低; 就四季平均来看, ΔV 在春季变幅最大(-0.89 m/s), 其次是冬季(-0.71 m/s), 且绝对值均明显高于相应时段的Std_DV, 而夏季和秋季的 ΔV 在年际波动范围内, 表明风电场建设后风速降低主要发生在春季和冬季。

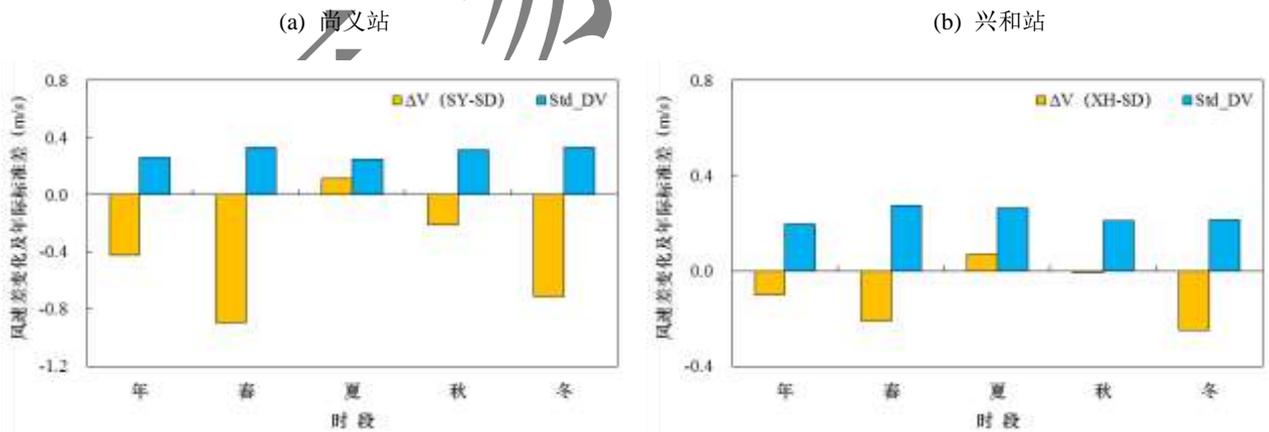


图3 尚义风电场群建设前后尚义站(a)和兴和站(b)四季风速差变化与气候年际标准差对比

Fig.3 The comparison of seasonal wind speed difference changes and climate interannual standard deviations of Shangyi station (a) and Xinghe station (b) before and after the construction of Shangyi wind farms

就可能影响站兴和站(XH)而言, 年和春、夏、秋季风速差变幅 ΔV 均在气候年际波动Std_DV范围内, 仅冬季风速差变幅 ΔV 略高于年际波动Std_DV(略偏高0.04 m/s), 表明风电场建设后兴和站风速变化基本

220 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
221 这种影响非常轻微。由于兴和站位于尚义陆上风电场偏南方向约 29km 处，因此可以推测尚义陆上风电场群
222 影响范围很可能不超过 30km。

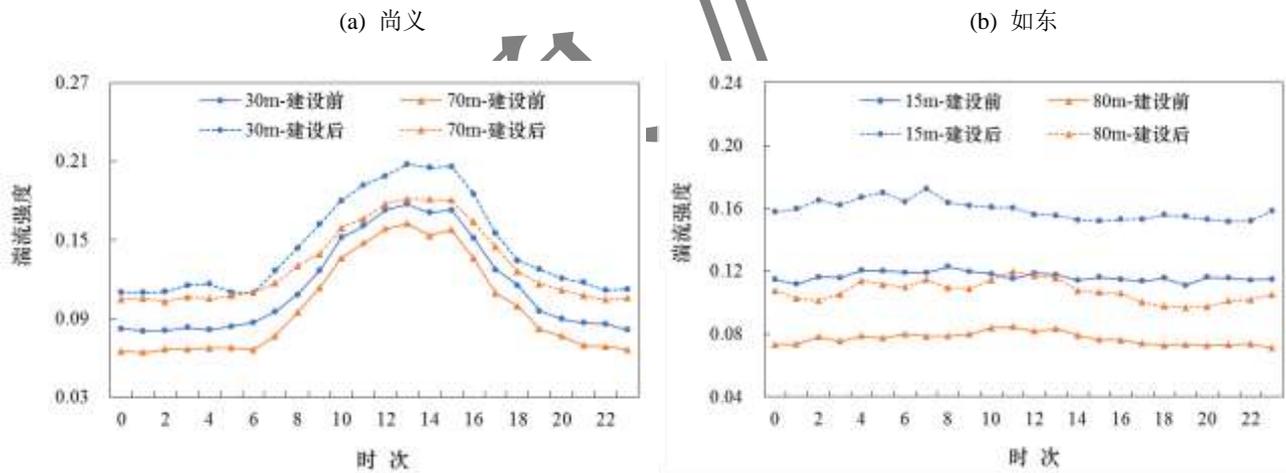
223 3.2 陆/海风电场群湍流强度变化

224 3.2.1 日变化

225 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
226 (如图 4 所示)：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段 TI 均明显
227 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
228 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
229 由于在低层大气更易受到地表粗糙度与地形影响，大气上下交换强，因此 TI 更强。

230 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
231 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
232 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
233 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
234 风电场 TI 日变化波动较小。

235



236

237 图 4 陆/海风电场群不同高度湍流强度建设前后日变化对比 (a. 尚义; b. 如东)

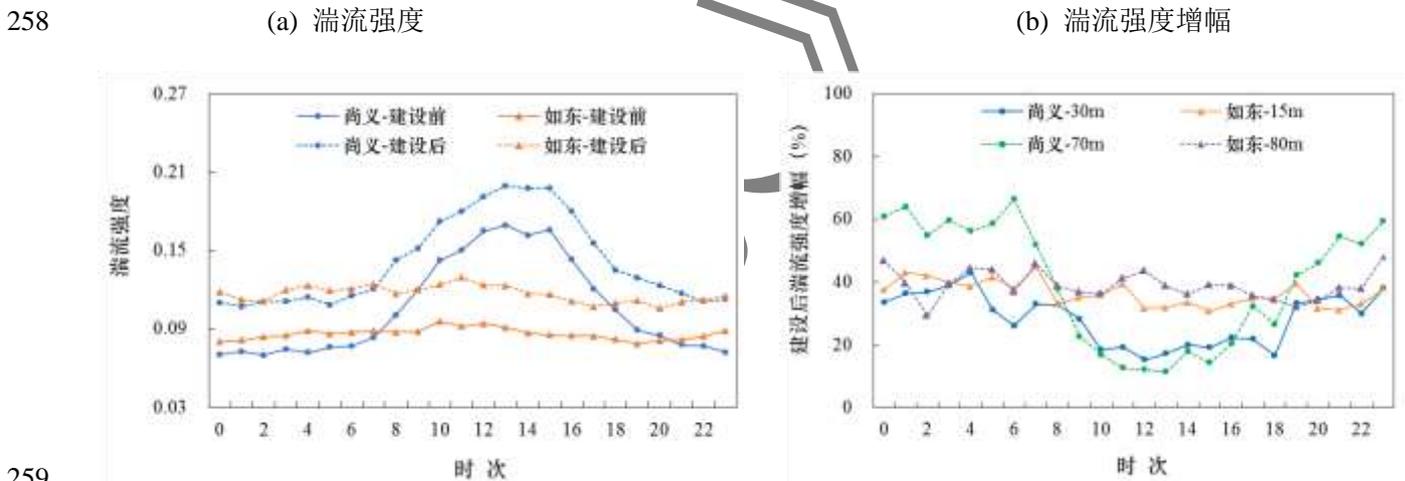
238 Fig.4 The comparison of diurnal variation of TI at different heights in inland/offshore wind farms before and after construction
239 (a. Shangyi; b. Rudong)

240 对比尚义陆地和如东海上风电场群同一高度层 50m 建设前后 TI 日变化如图 5(a)所示：无论建设前后，
241 尚义陆地 TI 日均值均明显高于如东海上，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
242 近地层温度梯度小于陆地，加之下垫面平滑，从而使得同一高度上海洋湍流强度 TI 明显小于陆地；到了夜
243 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。

244 对比陆/海风电场群建设后测风塔各典型高度层（尚义：30m、70m；如东：15m、80m）TI 增幅日变化
 245 （图 5b），可以看出：就不同时次来看，尚义陆地风电场群各高度层 TI 较建设前增加 11~66%，其中夜晚增
 246 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
 247 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
 248 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。

249 就尚义陆地不同高度来说，70 m 高度 TI 较建设前平均增幅为 40%，明显高于 30m 高度增幅（28%），
 250 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
 251 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 75m），受风
 252 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
 253 受风机影响较小。

254 如东海上风电场群建设后各高度 TI 增加 29-48%，但增幅没有明显日变化特征。这是因为虽然海上区域
 255 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
 256 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
 257 差异远不如陆地风机的影响明显。



259 图 5 陆/海风电场群建设前后 50 m 高度湍流强度 (a) 及不同高度增幅日变化 (b)

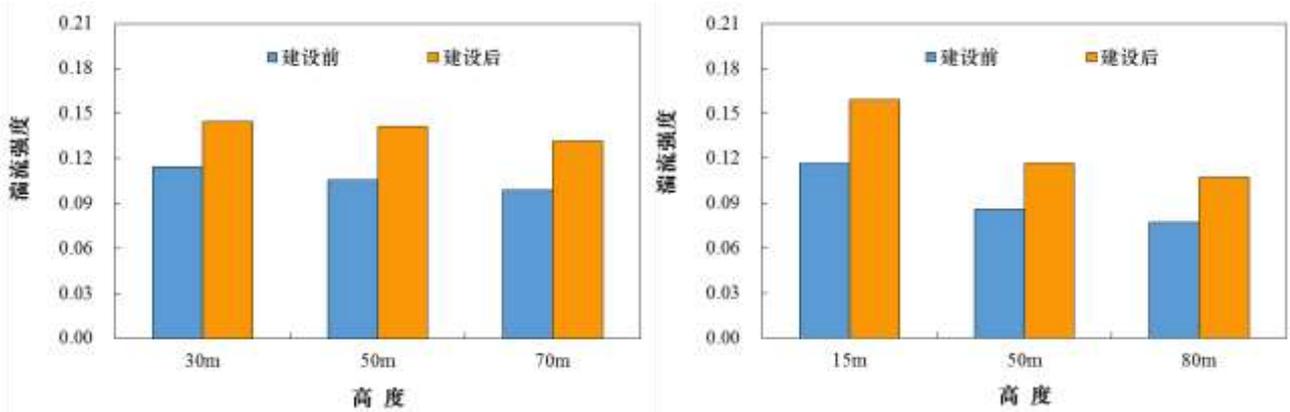
261 Fig.5 The TI at 50 m before and after construction (a) and the diurnal variation of TI increasing range at different heights (b) of
 262 inland/offshore wind farms

263 3.2.2 年和季节变化

264 尚义陆地和如东海上风电场群不同高度（尚义：30 m、50 m、70 m；如东：15 m、50 m、80 m）年均
 265 TI 建设前后比较如图 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
 266 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 31%；如东海上各高度

267 建设前年均 TI 为 0.077-0.117，建设后增至 0.107-0.159，平均增加 37%，TI 增加原因与前面日变化相同。对
 268 陆/海风电场群同一高度 50 m 来看，无论建设前后，尚义陆地区域 TI 均明显高于如东海上，偏高约 21%，
 269 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
 270 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。

271 (a) 尚义 (b) 如东



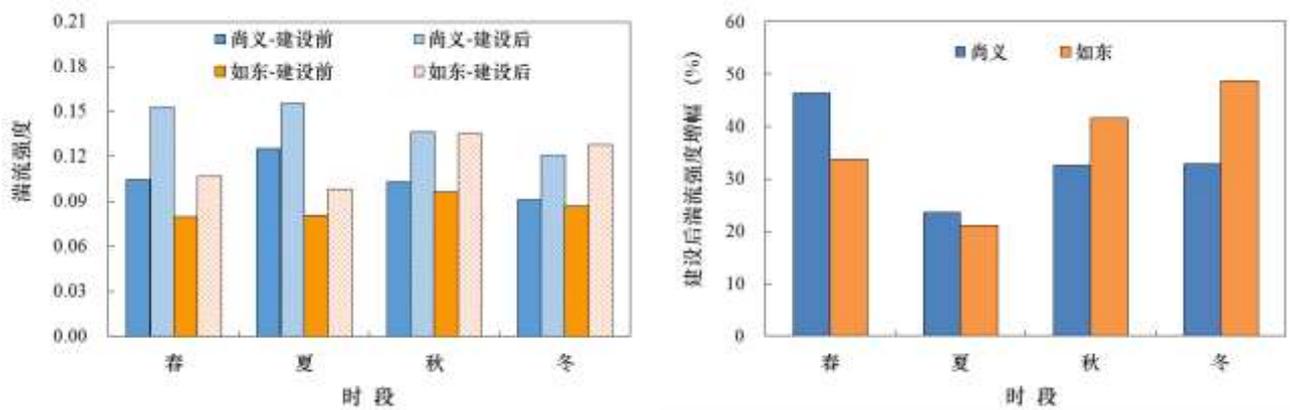
272 图 6 陆/海风电场群建设前后不同高度年湍流强度对比 (a. 尚义; b. 如东)

273 Fig.6 The comparison of annual TI at different heights in inland/offshore wind farms before and after construction

274 (a. Shangyi; b. Rudong)

275 以尚义陆地和如东海上风电场群测风塔同一高度 50 m 米对比两者 TI 四季变化，如图 6(a)所示：从季节
 276 变化上看，无论建设前后，尚义陆地风电场 TI 四季变化较为明显(建设前 0.091-0.126，建设后 0.121-0.155)，
 277 其中夏季最大、冬季最小，春秋介于之间；如东海上风电场 TI 季节变化建设前较为平稳 (0.080-0.096)，季
 278 节变化幅度明显小于陆地，这些结果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
 279 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
 280 秋 TI 强于春夏，这与陆地风电场季节变化规律并不一致。

281 (a) 湍流强度 (b) 湍流强度增幅



282 图 7 陆/海风电场群建设后 50m 高度年及四季湍流强度对比 (a) 及湍流强度增幅 (b)

283 Fig.7 The comparison of annual and seasonal of TI at 50m before and after construction (a) and TI increasing range in different

287 从季节 TI 增幅看 (图 6b), 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%)、
288 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
289 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%)。

290 3.3 陆/海风电场群风切变指数变化

291 3.3.1 日变化

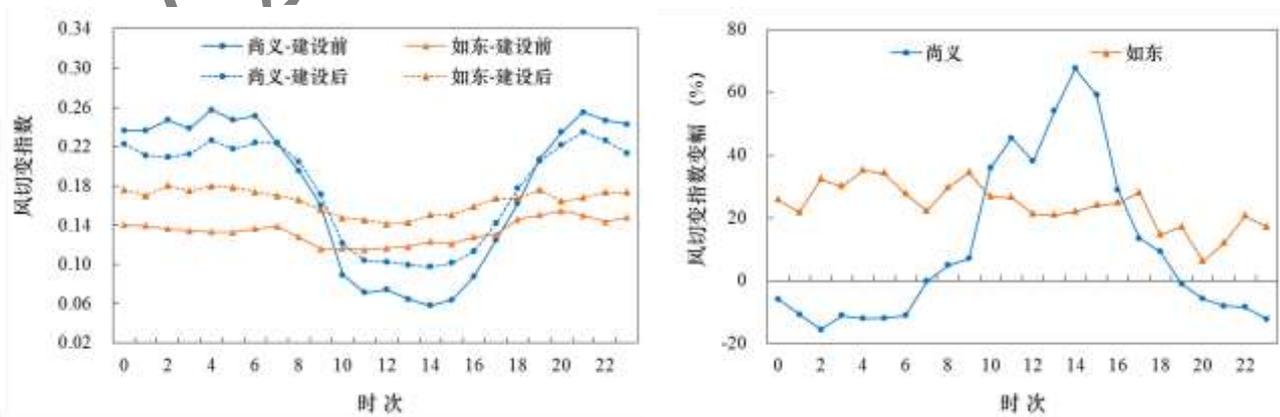
292 尚义陆地和如东海上两个风电场群建设前后年均 WSE 日变化如图 8a 所示: 两个风电场群 WSE 均表现
293 为夜间高、白天低等日变化特征, 但尚义风电场 WSE 日变化明显大于如东风电场。这是由于白天对流作用
294 强、大气层结不稳定, 湍流活动旺盛, 使不同大气垂直层间的动量交换频繁, 风速垂直梯度较小, 导致 WSE
295 较低; 夜间地表温度低, 大气层趋于稳定, 层间很少混合或不混合, 风速随高度的上升急剧增大, 导致 WSE
296 较高, 这与雷杨娜等 (2015) 对风电场建设前的 WSE 变化相关研究结果具有一致性。

297 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, 尚义陆地风
298 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
299 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 (WSE 最
300 大值与最小值之差) 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
301 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
302 速增大幅度大于低层, 使得上下层风速梯度增大, 致使白天 WSE 大幅增加; 夜间大气稳定、风速垂直梯度
303 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。如东海上风电场群建设后,
304 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,
305 且建设前后 WSE 日变化值也没有明显变化 (建设前后分别为 0.040 和 0.039)。

306

(a) 风切变指数

(b) 风切变指数变幅



307

308

图 8 陆/海风电场群建设前后风切变指数日变化 (a) 及建设后变幅 (b)

309

Fig. 8 The comparison of diurnal variation of WSE in inland/offshore wind farms before and after construction and variation

310 amplitude of WSE fter construction (b)

311 3.3.2 年和季变化

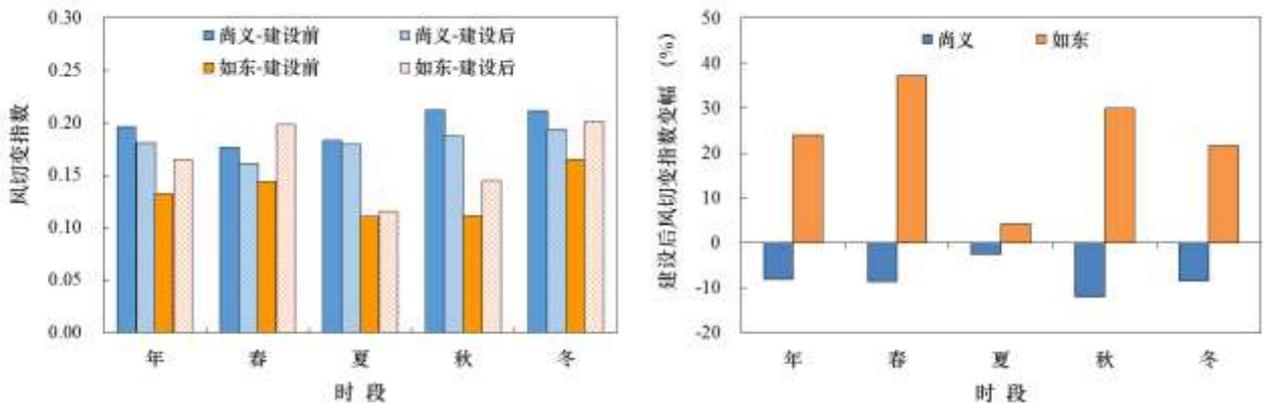
312 尚义陆地和如东海上风电场群年均和四季建设前后平均 WSE 及建设后变幅如图 9 所示：

313 风电场建设前，尚义陆地风电场区域年均 WSE 为 0.196（图 9a），明显高于如东海上风电场区域年均
314 WSE（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
315 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
316 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
317 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
318 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，
319 导致 WSE 较小（杜燕军和冯长青，2010）；如东海上风电场 WSE 表现为冬季和春季较大，夏季和秋季较小，
320 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。

321 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%，
322 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，
323 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
324 风电场建设后无论年和季 WSE 均明显增加，其中年均增加 24%，各季增加 4-37%；主要是由于海表粗糙度
325 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
326 幅度大于低层，风速垂直梯度增大，致使 WSE 增加。

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

329 (a) 风切变指数 (b) 风切变指数变幅



330
331 图 9 陆/海风电场群建设前后风切变指数年及四季变化 (a) 及建设后变幅 (b)

332 Fig. 9 The comparison of annual and seasonal of WSE before and after construction (a) and variation amplitude of WSE after the
333 construction (b)

334 4 结论与讨论

335 4.1 结论

336 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
337 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
338 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
339 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
340 环境关键参数的影响, 初步得到以下主要结论:

341 (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 m/s , 且风速降低主要发生
342 在春季和冬季, 风速分别降低 0.89 m/s 和 0.71 m/s , 风电场影响范围很可能不超过 30 km ;

343 (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
344 群建设对 TI 均具有增强效应, 建设后年均 TI 分别增加 31% 和 37% ; 陆地风电场区 TI 夜间增幅 (45%) 明
345 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
346 变化较为平稳; 陆地风电场区四季增幅 24% - 47% ; 海上风电场区四季增幅 21% - 49% 。

347 (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
348 大于海上风电场; 且陆、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 33% 、
349 夜晚则降低 9% , 从而导致 WSE 日变化变小, 且年均和四季 WSE 均有所降低, 其中年均降低 8% , 四季降
350 低 3% - 12% ; 海上风电场建设后 WSE 白天、夜晚均明显增加, 从而导致年均和四季 WSE 均明显增加, 其中
351 年均增加 24% , 四季增加 4% - 37% , 但 WSE 日变化值无明显变化。

352 4.2 讨论

353 (1) 风电场群对湍流强度 TI 影响不确定性: 本文所得结果显示陆、海风电场群在建设前湍流强度 TI
354 日变化、年季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,
355 2019) 较为一致, 表明本文的研究资料具有一定代表性, 方法存在合理与科学性; 而风电场群建设后, 由
356 于海陆两种下垫面性质的不同, 尚义陆上和如东海上风电场群 TI 的大小和时间变化均发生了较为明显的变
357 化, 凸显了风电场群对海/陆局地风场的影响, 这种影响存在着不同高度、白天/夜晚和季节差异, 但这种差
358 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并不清楚, 因此未来还需更长时间的气象观测
359 资料来开展风电场群对 TI 长期的影响研究。

360 (2) 风电场群对风切变指数 WSE 影响不确定性: 本文结果显示风电场建设前陆/海风切变指数 WSE
361 呈现冬季较高、夏季较低、白天较小、夜间较高等特点, 也与已有风电场建设前的相关研究结果较为一致

362 (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
363 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, 因为风切变指数 WSE 不仅受地表粗糙
364 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
365 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
366 场群对风切变指数 WSE 的影响机制未来还需要更多观测资料进行佐证。

367 (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
368 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,
369 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
370 气候背景影响并存在年际变化的, 虽然湍流强度与风切变指数是关于风速的相对变化指标, 很大程度上已
371 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/海风电场对湍流
372 强度与风切变指数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
373 电场风电场东南方, 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
374 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湍流强度和风切变指数的影响在冬季最大、
375 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
376 除这种由于资料不足带来的不确定性。

377 参考文献

- 378 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
379 turbulence intensity along Lianyungang coastland[J]. Meteor Sci Technol, 40(2): 285-292 (in Chinese).
- 380 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
381 characteristics of the lower boundary layer (0-300m) during the landfall of a typhoon[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1071-1086 (in Chinese).
- 382 陈燕, 张宁, 许遐祯, 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
383 shear exponent in the near-surface strong wind in the coastal areas of Jiangsu Province[J]. Plateau Meteor, 38(5): 1069-1081 (in Chinese).
- 384 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.
385 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).
- 386 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
387 profile[J]. Chin J Atmos Sci (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的卷期页码信息, 请确认)
- 388 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
389 index in the assessment of wind resources of wind farm[J]. Power Syst Clean Energy, 26(5): 62-66 (in Chinese).
- 390 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

391 near surface wind shear characteristics in Liaoning Province[J]. *J Natural Resources*, 30(9): 1560-1569 (in Chinese).

392 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

393 shear exponents of different regions in China[J]. *Meteor Mon*, 44(9): 1160-1168 (in Chinese).

394 贺德馨, 2006. 风工程与工业空气动力学[J]. 北京: 国防工业出版社: 29-48. He D X, 2006. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*[M]. Beijing:

395 National Defense Industry Press: 29-48 (in Chinese).

396 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

397 farms on regional climate[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese).

398 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.

399 Applicability of estimation methods of IEC WTGS selecting parameters in China[J]. *Meteor Mon*, 42(12): 1522-1530 (in Chinese).

400 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.

401 Progress in the research on the impact of wind farms on climate and environment[J]. *Adv Earth Sci*, 34(10): 1038-1049 (in Chinese).

402 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.

403 A contrast study on vertical wind shear characteristics of different underlying surfaces[J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 55(3): 340-346 (in Chinese).

404 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

405 profile characteristics of wind over complex terrain in loess plateau in Northern Shaanxi[J]. *Renewable Energy Resour*, 33(9): 1345-1350 (in Chinese).

406 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

407 the environment[J]. *Prog Geogr*, 35(8): 1017-1026 (in Chinese).

408 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.

409 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).

410 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

411 profiles over different underlying surfaces[J]. *Resour Sci*, 33(10): 2005-2010 (in Chinese).

412 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.

413 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).

414 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,

415 et al, 2020. Analysis of temperature and wind variation characteristics based on the 255 m meteorological tower in Tianjin[J]. *Meteor Mon*, 46(9):

416 1235-1244 (in Chinese).

417 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.

418 Preliminary estimates of wind energy resources deficit in large wind farm[J]. *Plateau Meteor*, 31(4): 1139-1144 (in Chinese).

419 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

- 420 turbine on the atmosphere boundary layer[D]. Baoding: North China Electric Power University (in Chinese).
- 421 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.
- 422 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).
- 423 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
- 424 the characteristics of regional atmospheric boundary layer based on large eddy simulation[D]. Baoding: North China Electric Power University (in Chinese).
- 425 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
- 426 assessment method based on atmospheric stability[J]. Renew Energy Resour, 38(1): 47-52 (in Chinese).
- 427 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
- 428 shear exponent for wind resource assessment[J]. Renewable Energy Resour, 28(1): 21-23, 28 (in Chinese).
- 429 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.
- 430 Characteristics of low-level wind in Shanghai offshore[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 25(8): 1184-1190 (in Chinese).
- 431 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
- 432 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).
- 433 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
- 434 Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)
- 435 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
- 436 calculation and application of wind energy resource assessment for wind farm[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology (in Chinese).
- 437 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
- 438 potential impacts of wind power generation on local climate[J]. Electric Power, 47(6): 101-105 (in Chinese).
- 439 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.
- 440 Characteristics of near surface turbulence intensity before and after wind farm construction[J]. Plateau Meteor, 41(4): 1062-1073 (in Chinese).
- 441 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
- 442 calculation methods for wind shear exponent[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 30(16): 188-194 (in Chinese).
- 443 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
- 444 impact of wind farm on local micro meteorological environment in arid region – taking Zhurihe wind farm as an example[D]. Huhhot: Inner Mongolia
- 445 University of Technology (in Chinese).
- 446 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
- 447 energy reserves in China[J]. Acta Energiæ Sol Sin, 22(2): 167-170 (in Chinese).
- 448 叶小岭, 支兴亮, 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

449 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).

450 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

451 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

452 Dawu in Hubei province[J]. Adv Met S&T, 9(2): 56-61 (in Chinese).

453 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

454 F, Li C F, et al, 2019. The turbulence intensity of surface layer and land surface processes over Guaizi Lake shifting sandy land on the northern margin of

455 Badain Jaran Desert[J]. J Desert Res, 39(4): 103-112 (in Chinese).

456 中国气象局, 2007. QX/T 74-2007 风电场气象观测及资料审核、订正技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2007.

457 QX/T 74-2007 Regulations for data inspection and correction of wind power plant meteorological observation[S]. Beijing: Standards Press of China (in

458 Chinese).

459 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2004. GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of

460 Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2004. GB/T 18710-2002 Methodology of wind energy resource

461 assessment for wind farm[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).

462 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.

463 (查阅网上资料, 未找到对应的出版地信息, 请确认)

464 Christiansen M B, Hasager C B, 2006. Using airborne and satellite SAR for wake mapping offshore[J]. Wind Energy, 9(5): 437-455.

465 Dincer I, Acar C, 2015. A review on clean energy solutions for better sustainability[J]. Int J Energy Res, 39(5): 585-606.

466 Farrugia R N, 2003. The wind shear exponent in a Mediterranean island climate[J]. Renewable Energy, 28(4): 647-653.

467 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,

468 140(9): 3017-3038.

469 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.

470 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):

471 445-458.

472 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:

473 517-524.

474 Li Y, Kalnay E, Motesarrei S, et al, 2018. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation[J]. Science,

475 361(6406): 1019-1022.

476 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):

477 1905-1919.

- 478 Phillips J, 2015. A quantitative-based evaluation of the environmental impact and sustainability of a proposed onshore wind farm in the United Kingdom[J].
479 Renewable Sustainable Energy Rev, 49: 1261-1270.
- 480 Rehman S, Al-Abbadi N M, 2007. Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia[J]. Renewable Energy, 32(5): 738-749.
- 481 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
482 and wind speed profiles[J]. Environ Res Lett, 8(3): 034006.

