

杨若婷,牛清河,屈建军,等.青海共和盆地固定支架式光伏阵列对场内风场的影响[J].中国沙漠,2022,42(5):114-121.

# 青海共和盆地固定支架式光伏阵列 对场内风场的影响

杨若婷<sup>1,2</sup>,牛清河<sup>3</sup>,屈建军<sup>3</sup>,谢胜波<sup>3</sup>,王彦奎<sup>3</sup>,马超<sup>1</sup>

(1.天津大学 建筑工程学院,天津 300072; 2.国家电投集团青海光伏产业创新中心有限公司,青海 西宁 810000;  
3.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室/敦煌戈壁荒漠研究站,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**青海省共和盆地是中国最大的新能源基地之一,大规模光伏设施的建设对区域生态环境必然产生较大的影响。通过在光伏阵列内外建立风况观测断面,架设5套5梯度的自动气象站,实施同步监测,对不同风向条件下光伏阵列对场内风场的影响进行观测研究。结果表明:(1)光伏阵列具有导向作用,使风向以顺光伏组串长轴方向的偏西风 and 偏东风为主。当旷野风向与光伏组串长轴方向夹角 $\beta \geq 45^\circ$ 时,光伏阵列内出现围绕光伏串的横向绕流,阵列内存在明显的双风向,且 $\beta$ 越大,双风向特征越明显。(2)光伏阵列整体具有减速作用,且减速率随高度呈指数递增关系,但20 cm高度风速减弱作用具有很大的不确定性,甚至出现增强风速的作用。减速率随风向的变化呈三峰三谷的区间分布特征,三峰三谷区间的极大值出现在 $\beta = 45^\circ$ 或 $\beta = 67.5^\circ$ 处,极小值多出现在 $\beta = 22.5^\circ$ 处。(3)受光伏组串北高南低的结构和光伏阵列内风程长度的影响,光伏阵列内风向和风速变化存在非对称性特征。光伏阵列对场内风场的影响,一方面有利于光伏面板除尘,另一方面会增加阵内地表就地起尘的潜在风险。光伏场建设应更加注重光伏阵列内生态保护和修复,提高地表植被覆盖度,减少起尘量,提高发电效率。

**关键词:**光伏阵列;风向条件;导向作用;减速作用;非对称性;共和盆地

**文章编号:** 1000-694X(2022)05-114-08

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00024

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着全球能源危机和化石能源快速消耗引起的环境恶化和全球变暖等问题凸现,对核能、风能和太阳能等清洁能源的开发已成为热点<sup>[1-5]</sup>。根据《2021年全球可再生能源现状报告》,在全球受到新冠肺炎疫情的影响下,2021年可再生能源仍创历史新高,其中光伏新增139 GW,增幅达22.38%,在所有可再生能源中增长最快<sup>[6]</sup>。2021年底,中国光伏发电并网装机容量达到306 GW,已连续7年稳居全球第一<sup>[7]</sup>。随着国家“双碳”目标的提出和推进,包括光伏在内的清洁能源将再次迎来发展的重大机遇。

中国西北荒漠地区日照时间长,光热资源丰富,土地面积广阔,在发展光伏能源上具有天然的

优势<sup>[8]</sup>,但仍面临着亟待解决的关键科学和技术问题,如风蚀沙埋对光伏桩基稳定性的影响和防治问题,光伏板上积尘对发电效率影响机制和除尘技术问题,光伏板遮蔽和吸收太阳辐射造成的不同尺度区域环境反馈效应尚不明确等问题<sup>[9-22]</sup>。风作为能量、水分、沙尘和雪粒流动、循环和再分配的重要动力因子,对生态环境的影响深远<sup>[23-25]</sup>,也对光伏阵列内的环境产生重要影响。目前对光伏风场研究集中在风速和湍流的影响范围和程度,混合风向或者单一风向下的风速廓线、风速脉动、流场分异等垂向结构变化等方面<sup>[26-29]</sup>,而对不同风向条件下光伏阵列内风速和风向变化及其引起的复杂环境效应,特别是对局地起尘和板上降尘的潜在影响涉及较少。

收稿日期:2022-03-03; 改回日期:2022-03-21

资助项目:国家电投集团统筹研发经费支持项目(KYTC2020GF10);中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060201)

作者简介:杨若婷(1991—),女,陕西西安人,工程师,研究生,主要从事光伏发电、光伏生态协同、多能互补以及综合能源等研究。

E-mail: yang18629410435@163.com

通信作者:牛清河(E-mail: niuqh@lzb.ac.cn)

青海省共和盆地是青海省重点打造的五大百万级并网光伏发电园区<sup>[30]</sup>。近年来,围绕光伏场地植被恢复、风沙灾害防治、生态环境影响、效益评估和光伏生态产业开展了大量理论研究和试验示范<sup>[13,31-35]</sup>,这对认识光伏阵列和环境的相互作用关系,推进光伏基地安全运营和区域生态环境治理具有重要意义。本文在前人研究的基础上,以青海省共和盆地龙羊峡水光互补光伏园区为研究区,采用现场风况同步站点观测的手段,分析不同风向条件下光伏阵列内外的风向和风速变化特征,并讨论其对阵列内粉尘释放和沉降的潜在影响,这对深入认识光伏阵列与近地表风场相互作用、光伏基地生态环境效应及其调控具有重要的理论和现实意义。

## 1 区域概况

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省海南州共和县共和盆地塔拉滩,东距龙羊峡水库约10 km,北距共和县城(恰卜恰镇)约18 km(图1)。共和盆地处于亚洲季风区的西北缘,是亚洲冬、夏季风和西风环流的交汇地带,属高寒干旱、半干旱大陆性气候,干旱少雨、气候温凉、日照充足、昼夜温差大,多年平均气温4.1℃,年极端最高气温33.7℃,年极端最低气温-33.5℃。年降水量为246.3 mm,降雨集中在7—9月,年蒸发量1 716.7 mm,多年平均太阳辐射量为

6 564.26 MJ·m<sup>-2</sup>,多年平均日照时数2 907.8 h。盛行风向为西和西北风,年平均风速2.7 m·s<sup>-1</sup>,最大风速大于40 m·s<sup>-1</sup>,多年均大风日数50.6 d,最多年份达97 d,多年平均沙尘暴日数为20.7 d<sup>[36-37]</sup>。观测区域地表自然景观为荒漠化草原,植被盖度30%左右,主要植物有赖草、克氏针茅、狼毒和川青锦鸡儿等,土壤类型为风沙土。

### 1.2 观测区光伏阵列结构

观测区位于龙羊峡水光互补光伏场区,为2013年建造的固定支架式光伏阵列。每个支架为一组串,面积约67.40 m<sup>2</sup>(由4行×10列1.65 m×0.991 m的光伏板组成,光伏板间距约为2 cm),地面投影面积约为52.38 m<sup>2</sup>,串下侧光伏板下檐距地面0.5 m,上侧光伏板上檐距地面3.03 m,光伏板倾角为39°,长轴方向为90°,串南北间距6.87 m,东西间距1.55 m。100组串构成一个光伏子阵,阵阵相连,形成规模宏大的光伏阵列。

## 2 观测布设和数据处理

### 2.1 观测仪器和设置

本次所采用的观测仪器为长春气象仪器厂生产的多梯度移动式自动测风系统,由5套梯度测风站组合而成,可进行同步观测。每套测风站可测5层风速和1层风向,测风高度0—200 cm可调,本次观测所采用的高度分别为20、50、100、150、

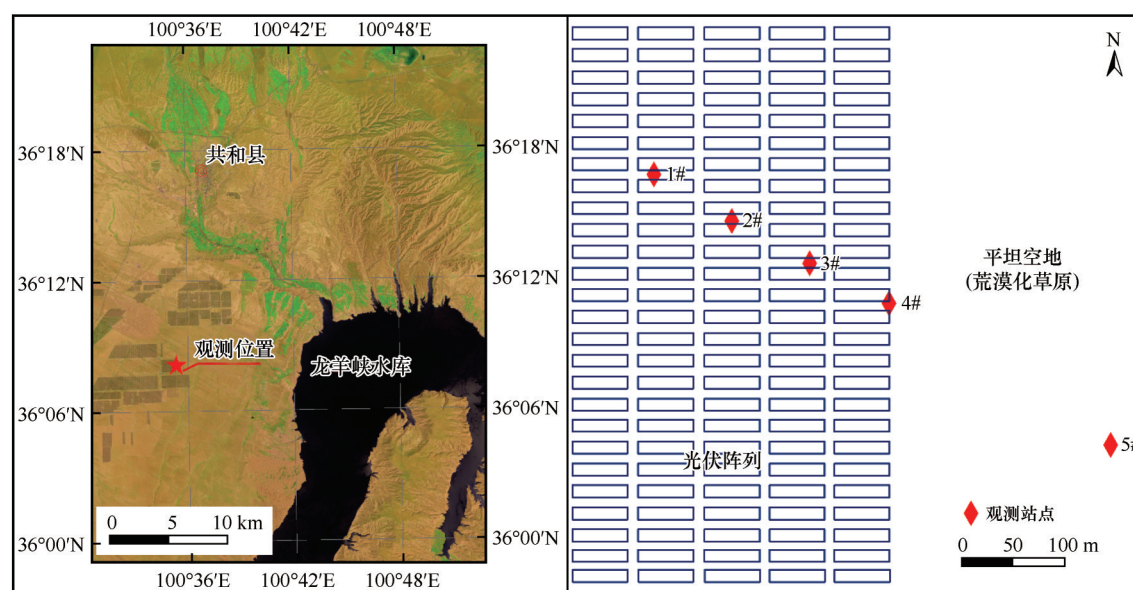


图1 研究区位置图和观测站点布设图

Fig.1 Location map of study area and observation section layout

200 cm, 风向高度为210 cm。数据采集频率为1/2 Hz, 记录频率为1/120 Hz, 总观测时长为72 h。

## 2.2 观测站点布设

观测区域主要盛行西风和西北风, 因此观测站点布设的走向为300°, 其中1#、2#和3#观测站点位

于光伏阵列内, 4#点位于光伏阵列的东边界处, 5#观测站点位于光伏阵列外开阔空地, 光伏阵列内及边界处的站点均位于光伏组串间空地的中心线上。各观测站点周边的地表类型为荒漠化草地, 观测时间为4月, 地表植被未返青, 枯草盖度为30%左右, 高度5—10 cm。

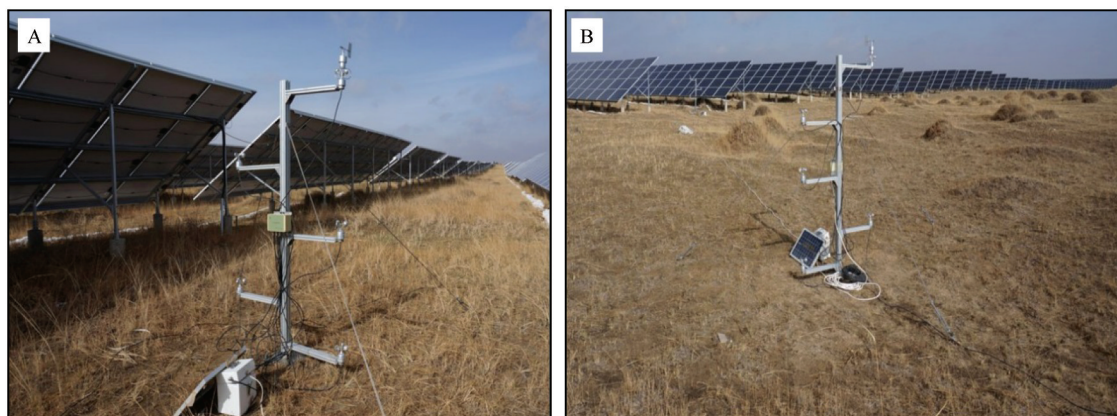


图2 移动式自动测风站点布设现场照片(A. 光伏阵列内; B. 光伏阵列外)

Fig.2 Field photographs of mobile automatic anemometer stations (A. in PVA; B. outside PVA)

## 2.3 数据处理

首先, 以5#站点数据代表旷野风况, 其距离光伏阵列东边界的距离在200 m以上。按照5#站点记录的风向数据进行16方位分组, 并将其他4个站点的对应数据进行分组。其次, 统计各站点各方位组的风向频率, 制作风玫瑰图, 分析不同风向条件下阵内测站的风向峰型变化特征。最后, 以不同方位组下5#站点200 cm高度的平均风速为参照风速, 与其他高度和站点对应的风速相比, 进行无量纲化处理, 对比分析阵列内各高度的风速变化特征。

光伏阵列对风速的减弱程度采用以下公式计算。

$$W_{ij} = \frac{S_{\text{ref}} - 1/3 \sum_{k=1}^3 S_{ijk}}{S_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $W_{ij}$  为  $i$  方向  $j$  高度的减速率;  $S_{\text{ref}}$  为对照点(5#站点)200 cm高度无量纲风速比;  $S_{ijk}$  为光伏阵列内  $i$  方向  $j$  高度  $k$  号站点的无量纲风速比。

## 3 结果

### 3.1 光伏阵列对风向的影响特征

不同风向条件下光伏阵列内3个测站的平均风

向变化如图3(由于篇幅关系, 图3仅列出6个典型风向下的风玫瑰图)和表1。总体而言, 光伏阵列内风向多以顺组串长轴走向 $\alpha$ 的偏西风 and 偏东风为主。在不同风向条件下, 光伏阵列对近地表风向的影响存在较大差异, 存在三峰型、双峰型和单峰型多种风向峰型。当旷野风向与光伏串长轴走向夹角 $\beta \geq 67.5^\circ$ 时呈三峰型风向特征, 如N、NNE和S等,  $45^\circ \leq \beta < 67.5^\circ$ 时呈钝双峰型风向特征, 如SE、SSE和SW等, 而当夹角 $\beta \leq 45^\circ$ 时呈单峰型风向特征, 如NE、ENE和E。

夹角 $\beta$ 与风向特征峰型并非呈一一对应关系, 即按夹角大小, 对应的风向特征峰型呈非对称分布。如夹角 $\beta = 45^\circ$ 时, NE为单峰型风向, 而SE、SW和NW为一主一副钝双峰型风向; 再如夹角 $\beta = 67.5^\circ$ 时, NNE和NNW均为两主一副三峰型风向, SSE为两主钝双峰型风向, SSW为一主一副钝双峰型风向。

### 3.2 光伏阵列对风速的影响特征

对比旷野风速, 光伏阵列整体上具有明显的减速作用, 减速率为 $33.24\% \pm 22.69\%$ , 减速率随高度增加呈指数递增关系, 其中20 cm高度减速率仅为 $11.73\% \pm 39.83\%$ , 50 cm高度为 $34.36\% \pm 13.64\%$ , 100 cm以上减速率均在40%以上, 200 cm高度最



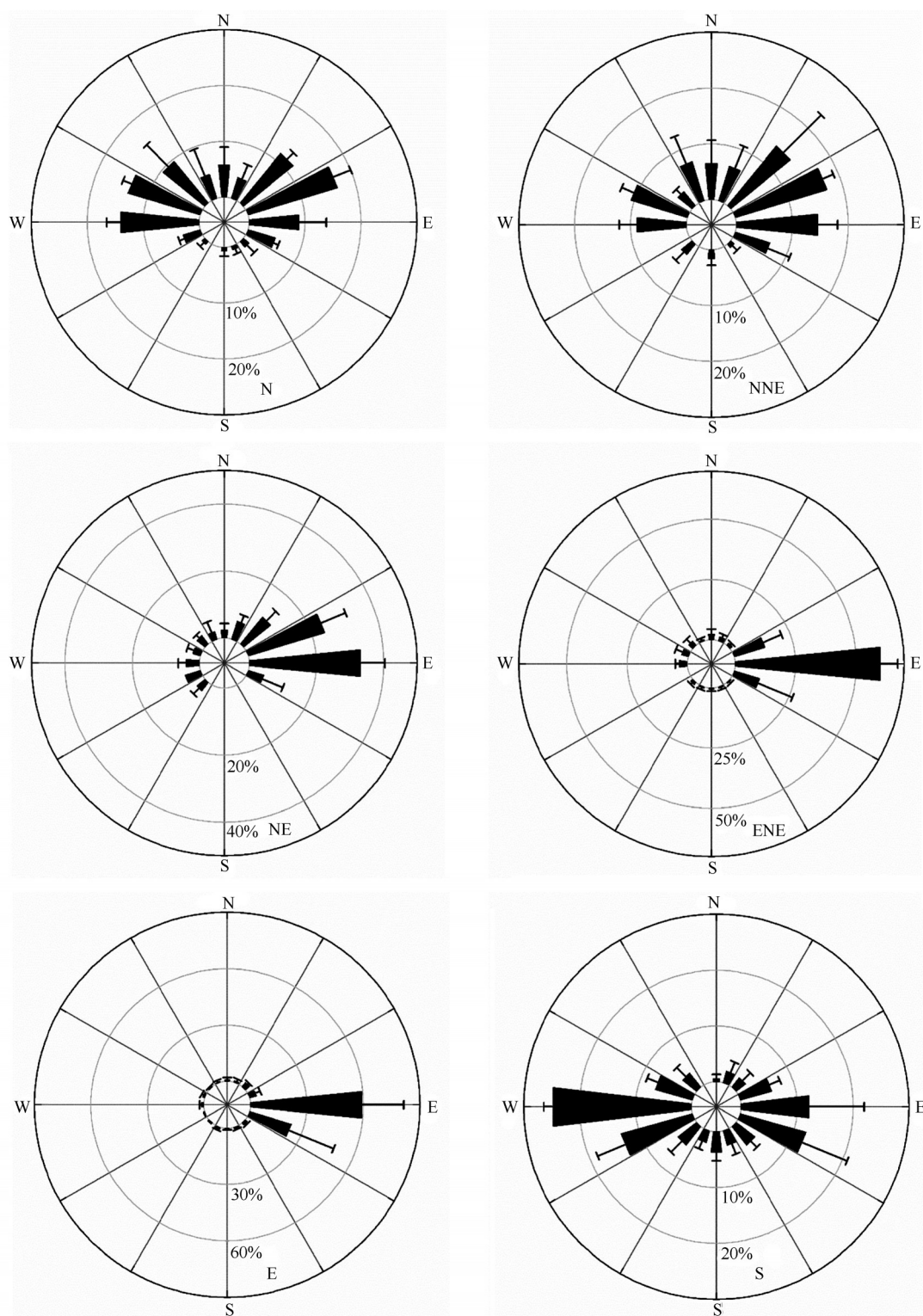


图3 不同风向条件下光伏阵列内风玫瑰图

Fig.3 Wind rose in PVA under different wind direction conditions

大,为 $41.40\%\pm 11.11\%$ (图4)。由于本次观测期间的旷野2 m高度的风速为 $0.5\text{—}11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,平均风速为 $2.37\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,不同风速条件下的减速率是否会随风速变化,有待开展控制性实验和长期观测数据验证。虽然各高度减速率峰-谷风向区间略有不同,但整

体具有三峰三谷的风向区间分布特征,其中SE-SW、NNE和NW为峰值区间,而NE-ESE、WSW-WNW、NNW-N为谷值区间(图5);最大峰值风向区间为SE-SW,50—200 cm高度的减速率为 $47.94\%\pm 4.65\%$ ;最大谷值风向区间NE-ESE,50—

表 1 不同旷野风向条件下的阵内风向参数统计  
Table 1 Wind direction parameters in PVA under different wind direction of open field

旷野 风向	阵内主 风向组	阵内次 风向组	阵内 风向 峰型	旷野风向与 光伏组串长 轴夹角 $\beta/(^{\circ})$
N	NE-E、W-NW	NNW-NNE	2-1-3	90
NNE	NE-E	W-WNW、 NNW-NNE	1-2-3	67.5
NE	NE-E	—	1-0-1	45
ENE	ENE-ESE	—	1-0-1	22.5
E	E-ESE	—	1-0-1	0
ESE	E-ESE	—	1-0-1	22.5
SE	E-ESE	W	1-1-2	45
SSE	E-ESE、WSW-W	—	2-0-2	67.5
S	ENE-ESE、SSE- SSW	S	2-1-3	90
SSW	E-ESE	SW-W	1-1-2	67.5
SW	WSW-WNW	E-ESE	1-1-2	45
WSW	WSW-WNW	—	1-0-1	22.5
W	W	—	1-0-1	0
WNW	W-WNW	—	1-0-1	22.5
NW	W-WNW	E-ESE	1-1-2	45
NNW	W-WNW	E-ESE、NW- NNW	1-2-3	67.5

风向峰型编号中第一个数为主风向峰数,第二个次(副)风向峰数,第三个为总峰数,如2-1-3为两主一副三峰型风向。

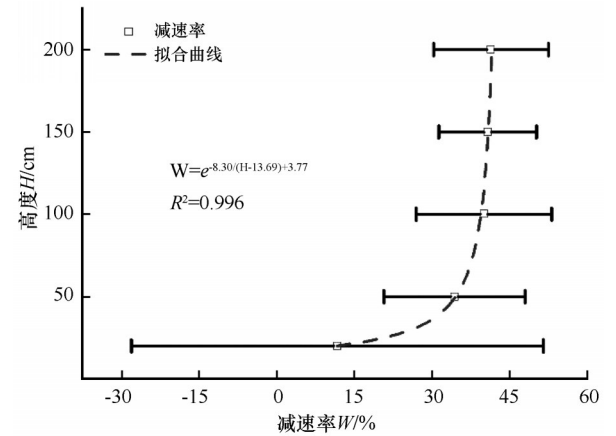


图 4 光伏阵列内高度和减速率变化关系  
Fig.4 Relationship between height and wind  
weakening rate in PVA

200 cm 高度间的减速率为 32.10%±9.11%。值得注意的是,三峰三谷区间的极值风向并非与光伏组串

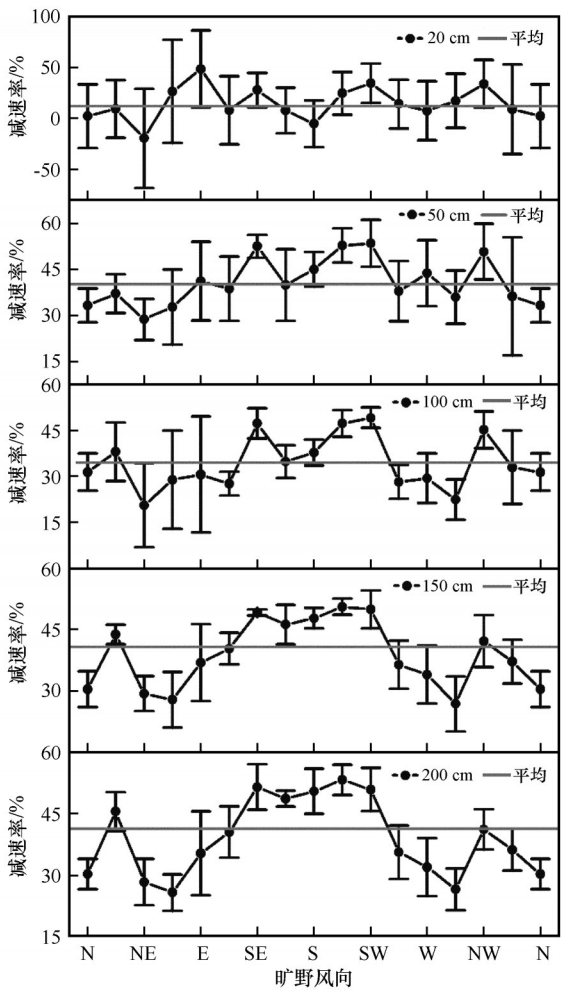


图 5 不同风向条件下光伏阵列对近地表风速的影响  
Fig.5 Effect of PVA on near-surface wind velocity under different wind directions of open field

长轴方向 $\alpha$ 平行或垂直,其中各峰区间的极大值出现在 SE、SW、NW、SSW 和 NNE 等 $\beta$ 为 45°或 67.5°处,各谷区间的极小值出现在 N、NE、ENE 和 WNW 等 $\beta$ 为 0°、45°和 22.5°处。

此外,不同风向和高度条件下的减速率差异较大。在偏北风(NNW-NE)和南风(S)两组风向下,20 cm 高度减速作用不明显,甚至出现加速作用,其中 NE 和 S 时减速率分别为 -19.55%±48.65% 和 -5.39%±22.98%,具有加速作用,且所有风向上的变异程度较大,减速作用存在很大的不确定性,这与光伏串下部空隙的导风作用有关。对比不同高度下风向减速率图谱,存在明显的分形变化特征,其中 150 cm 和 200 cm、50 cm 和 100 cm 具有相似的变化特征,而 20 cm 高度处变化特征和其他 4 个高度的变化特征不同。20 cm 高度处受地表植被、微地形和光伏组串下部空隙的导风作用影响强烈,导

致其减速率随风向的变化规律性极差, 50 cm 和 100 cm 高度处仍然受光伏串下部空隙等垂直结构差异的影响, 但影响较弱, 基本反映了光伏阵列东西向布局的水平结构是主要影响因素, 而 150 cm 和 200 cm 高度处光伏阵列东西向布局的水平结构是决定性影响因素。

## 4 讨论

### 4.1 光伏阵列对风况影响的非对称性

从光伏阵列对风向和风速的影响特征可以看出, 光伏阵列对风况的影响存在非对称性, 在风向峰型上表现为风向峰型并非随夹角 $\beta$ 大小呈简单的一一对应关系, 而是存在一对多的关系, 减速率的三峰三谷分布特征也非随夹角 $\beta$ 呈对称分布。上述非对称关系既存在南北向非对称性, 也存在东西向非对称性, 这与光伏组串结构特征及光伏阵列内风程长度有关。光伏组串北高南低的结构特征是造成南北向不对称性的主要原因, 在偏南风时北高南低的结构更有利于气流向上跃升, 而下层光伏阵列内风速减弱程度较大, 偏北风时该结构更有利于气流向下导流聚集, 形成下导风效应<sup>[38]</sup>, 光伏阵列内风速减弱程度较小, 甚至在底部出现加速作用。东西向非对称性主要原因是观测站点位于光伏阵列东侧, 导致偏西风下光伏阵列内风程较长, 而偏东风下风程较短, 偏西风下更有利风向改变和降低风速。至于减速率的极值并非出现在垂直或平行于光伏组串走向 $\alpha$ 的风向条件下, 这和闫敏等<sup>[39]</sup>对防风挡沙墙最佳防护角度的风洞模拟研究结论类似, 其作用机制有待深入研究。

### 4.2 光伏阵列复杂风况对阵内粉尘的潜在影响

湍流是影响粉尘释放和沉降的重要因素, 较强的湍流导致流场稳定性减弱, 垂向动能传输增强, 更有利于粉尘的释放, 而不利粉尘的干沉降<sup>[23,40-41]</sup>。本文研究结果表明, 光伏阵列对阵内风向影响较大, 当风向与光伏串长轴方向 $\alpha$ 呈较大夹角( $\beta \geq 45^\circ$ )时出现的横向绕流双峰型风向特征有利于光伏阵列内湍流的发展, 这一方面减少光伏面板积尘, 有助于发电效率的提高, 但另一方面将增加阵列内地表的就地起尘的概率和粉尘释放通量。因此, 光伏阵列复杂风况对阵内粉尘的作用过程较为复杂。

光伏阵列对阵内风速的影响也较大, 整体表现为 50—200 cm 无论风向和高度, 光伏阵列对阵内风速具有明显的削弱作用, 而在 20 cm 高度, 受地表植被、微地形, 特别是光伏组串下部空隙的导风作用, 该高度的风速削弱作用具有很大的不确定性, 甚至在部分风向条件下出现加速作用。这种流场结构对光伏阵列内的地气能量和物质交换将产生一定的影响, 必然导致光伏阵列内裸露地表的起尘量有所增加, 影响光伏阵列发电效率。

由此可见, 光伏阵列复杂风况和下部空隙导流加速作用一方面会导致地表侵蚀和增加粉尘释放的潜在风险, 另一方面复杂风向, 特别是当风向与光伏串呈较大夹角时产生的横向绕流等二次流减轻光伏板上积尘。因此, 光伏场建设应更加重视光伏阵列内生态保护和修复, 提高地表植被覆盖度或地表粗糙度, 减少就地起尘量。

## 5 结论

光伏阵列具有阵内导向作用, 使风向以顺光伏组串长轴方向 $\alpha$ 的偏西风 and 偏东风为主。当旷野风向和 $\alpha$ 的夹角 $\beta \geq 45^\circ$ 时, 光伏阵列内出现围绕光伏组串的横向绕流, 阵列内存在明显的钝双峰型风向特征, 且 $\beta$ 越大, 钝双峰型风向特征越显著。

光伏阵列整体具有减速作用, 平均减速率为  $33.24\% \pm 22.69\%$ , 且减速率随高度呈指数递增关系, 但 20 cm 高度处风速减弱作用具有很大的不确定性, 甚至部分风向条件下出现增加风速的作用。减速率随风向的变化呈三峰三谷的区间分布特征, 三峰三谷区间的极值风向与光伏串长轴方向 $\alpha$ 呈一定的夹角, 极大值出现在 $\beta = 45^\circ$ 或 $\beta = 67.5^\circ$ 处, 而各谷区间的极小值多出现在 $\beta = 22.5^\circ$ 处。

光伏阵列内风向和风速变化存在非对称性特征, 光伏阵列加强了气流的不稳定性和地表 20 cm 高度处减速作用的不确定性, 这一方面有利于光伏面板除尘, 但另一方面会增加阵列内地表就地起尘的潜在风险。光伏场建设应更加注重光伏阵列内生态保护和修复, 提高地表植被覆盖度, 减少起尘量, 提高发电效率。

### 参考文献:

- [1] Asumadu-Sarkodie S, Owusu P. Carbon dioxide emissions, GDP, energy use, and population growth: a multivariate and causality analysis for Ghana, 1971–2013 [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23(13): 13508–13520.



- [2] Aman M, Solangi K, Hossain M, et al. A review of safety, health and environmental (SHE) issues of solar energy system [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1190–1204.
- [3] Owusu P, Asumadu-Sarkodie S. A review of renewable energy sources sustainability issues and climate change mitigation [J]. *Cogent Engineering*, 2016, 3(1): 1167990.
- [4] Wang L, Lu Y, Zou L, et al. Prediction of diffuse solar radiation based on multiple variables in China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2019, 103: 151–216.
- [5] Mostafaeipour A, Qolipour M, Rezaei M, et al. Investigation of off-grid photovoltaic systems for a reverse osmosis desalination system: a case study [J]. *Desalination*, 2019, 454: 91–103.
- [6] Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century. *Renewables 2021 Global Status Report* [R/OL]. [2021-06-15]. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.
- [7] 国家能源局. 我国光伏发电并网装机容量突破3亿千瓦, 分布式发展成为新亮点 [EB/OL]. [2022-01-20]. [http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c\\_1310432517.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c_1310432517.htm).
- [8] Xiao J, Yao Z, Qu J, et al. Research on an optimal site selection model for desert photovoltaic power plants based on analytic hierarchy process and geographic information system [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(2): 89–104.
- [9] 婧璇, 崔成, 韩雪, 等. 生态友好型风电光伏发展建议 [J]. *中国能源*, 2021, 43(7): 46–53.
- [10] 李培都, 高晓清. 光伏电站对生态环境气候的影响综述 [J]. *高原气象*, 2021, 40(3): 702–710.
- [11] 王祯仪, 汪季, 高永, 等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 191–196.
- [12] 王涛, 王得祥, 郭廷栋, 等. 光伏电站建设对土壤和植被的影响 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 90–94.
- [13] 肖建华, 司建华, 刘淳, 等. 沙漠能源生态圈概念、内涵及发展模式 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5): 11–20.
- [14] 吴川东, 苏泽兵, 刘鹤, 等. 干旱、半干旱区光伏发电设施的生态-水文效应研究评述 [J]. *高原气象*, 2021, 40(3): 690–701.
- [15] 袁方, 张振师, 卜崇峰, 等. 毛乌素沙地光伏电站项目区风速流场及风蚀防治措施 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 287–294.
- [16] 唐国栋, 蒙仲举, 高永, 等. 沙区光伏设施干扰下近地表输沙通量分析 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3): 739–748.
- [17] 陈曦, 高永, 娜仁格日勒, 等. 风场及光伏电场配置对阵列风沙结构影响的模拟分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(8): 68–76.
- [18] 郭彩霞, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠 110 MW 光伏基地次生风沙危害的动力学机制 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 225–232.
- [19] 李煜雯, 李诗源, 徐路遥, 等. 光伏板间距对近表面流场和沙尘沉积量的影响 [J]. *应用力学学报*, 2021, 38(4): 1745–1752.
- [20] 唐国栋, 蒙仲举, 高永, 等. 沙区光伏阵列对近地层风沙输移的干扰效应 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 101–110.
- [21] 卢霞. 荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [22] 孙家欢, 王涛, 薛娴, 等. 降尘对中国北方主要城市光伏电站发电量的影响 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 932–942.
- [23] Seinfeld J, Pandis S. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* [M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2016: 829–855.
- [24] 李广, 于鸿翔, 张洁, 等. 风吹雪多相流运动及其在寒区雪水文中的应用 [J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(3): 170–181.
- [25] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [26] 杨世荣, 凌侠, 蒙仲举, 等. 库布齐沙漠生态光伏电站风速脉动特征 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(5): 1309–1317.
- [27] 赵鹏宇. 光伏电板对地表土壤颗粒及小气候的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [28] Wu Z, Hou A, Chang C, et al. Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, 16(10): 2432–2441.
- [29] Millstein D, Menon S. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(3): 34001.
- [30] 青海省发展改革委员会. 青海省“十三五”能源发展规划 [EB/OL]. [2016-01-19]. [http://fgw.qinghai.gov.cn/ztlz/n2018/ssw-gb/sswzgxh/201602/t20160219\\_51004.html](http://fgw.qinghai.gov.cn/ztlz/n2018/ssw-gb/sswzgxh/201602/t20160219_51004.html).
- [31] 崔永琴, 冯起, 孙家欢, 等. 西北地区光伏电站植被恢复模式研究综述 [J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 200–203.
- [32] 殷代英, 马鹿, 屈建军, 等. 大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响 [J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 15–21.
- [33] 谭立海, 马鹿, 安志山, 等. 青海省共和盆地光伏发电基地风沙灾害现状、成因及其防治措施 [J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 182–187.
- [34] Chang R, Shen Y, Luo Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China [J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 131–137.
- [35] 秦一凡. 大型荒漠光伏开发对局地微气候-土壤-植被的影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [36] 董光荣, 高尚玉, 金炯, 等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 10–35.
- [37] 卢琦. 中国沙情 [M]. 北京: 开明出版社, 2000.
- [38] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [39] 闫敏, 左合君, 郭跃, 等. 风沙环境下防风挡沙墙复变作用规律的风洞模拟 [J]. *北京林业大学学报*, 2011, 43(5): 108–117.
- [40] 李广, 张洁, 黄宁. 湍流对沙尘颗粒流体释放影响的风洞实验研究 [C]//2016年全国环境力学学术研讨会摘要集. 2016: 71.
- [41] 李卓群, 张洁, 黄宁, 等. 粉尘干沉降研究 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 639–648.

## Influence of fixed-stand photovoltaic array on wind field in Gonghe Basin, Qinghai, China

Yang Ruoting<sup>1,2</sup>, Niu Qinghe<sup>3</sup>, Qu Jianjun<sup>3</sup>, Xie Shengbo<sup>3</sup>, Wang Yankui<sup>3</sup>, Ma Chao<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2.Qinghai Photovoltaic Industry Innovation Center Co., Ltd. of State Power Investment Group, Xining 810000, China; 3.Key Laboratory of Desert and Desertification / Dunhuang Gobi Desert Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Gonghe Basin in Qinghai is one of the largest new energy bases in China. The large-scale construction of new energy facilities will have a great impact on the regional environments. In this paper, the influence of photovoltaic arrays (PVA) on the wind field is studied by establishing the wind observation sections inside and outside the arrays, setting up 5 sets of 5-gradient mobile automatic anemometer stations, and carrying out the synchronous monitoring. The results show that: (1) The PVA can change the wind direction in the array, and the wind direction is mainly westerly and easterly. When the angle  $\beta \geq 45^\circ$  between the wind direction of the open field and the long axis of the PVA, there is a transverse flow around the PVA. (2) The whole PVA has the effect of weakening wind, and the rate of weakening wind increases exponentially with the height, but the weakening effect of wind speed at 20cm in height has uncertainty, even increasing the wind speed. The rate of weakening wind have a three-peak and three-valley pattern with the wind direction variation. The maximum rate appears at  $\beta = 45^\circ$  or  $\beta = 67.5^\circ$ , and the minima rate mostly appears at  $\beta = 22.5^\circ$ . (3) The wind direction and wind speed in the PVA are asymmetric due to the structure of the PVA with north-high and south-low and the wind path length. The dual-wind-direction characteristic of PVA and the wind-guiding effect of the lower part of the PVA are beneficial to the dust removal of PVA, but increase the potential risk of dust emission on the ground surface in the PVA. More attention should be paid to ecological protection and restoration in PVA to improve the coverage of vegetation, reduce dust emission and improve the efficiency of power generation.

**Key words:** photovoltaic array (PVA); wind conditions; wind direction guiding; wind velocity weakening; asymmetry; Gonghe Basin