

杨焱秋,刘静,蒙仲举,等.沙区柔性支架光伏阵列对风沙运动的影响[J].中国沙漠,2026,46(4):321-332.

沙区柔性支架光伏阵列对风沙运动的影响

杨焱秋^{1a},刘静²,蒙仲举^{1ab},孟芮冰^{1a},蔡佳乐^{1a},高岳^{1a}

(1.内蒙古农业大学 a.沙漠治理学院, b.旱区水工程生态环境全国重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 随着新能源+治沙模式的大力推广,光伏治沙因显著的防风固沙效应与改良土壤能力而被广泛应用。现对光伏治沙研究多关于传统刚性光伏支架,其生态效应与风沙调控机制已较为明确,而关于柔性支架的风沙输移特征尚不明晰。基于此,本文选取风沙活动强烈的柔性支架光伏电站为研究对象,在光伏阵列上风向、内部及下风向等典型部位设置观测点,通过HOBO小型气象站和阶梯式集沙仪测定风速变化和输沙情况。结果表明:柔性支架光伏阵列明显削弱了近地表气流,阵列各位置风速整体低于对照组22%~49%,且风速衰减程度随着深入阵列逐渐增强。阵列的布设提高了下垫面粗糙度,并改变了风速垂直分布结构,阵列内部10~300 cm随高度增加防风效能逐渐减小,但在300~400 cm高度层防风效能出现明显回升。光伏阵列内部风沙流状态发生明显转变,对照组($\lambda=2.128$)、阵列上风向($\lambda=1.901$)和阵列内部($\lambda=1.648$)以风蚀为主,阵列下风向($\lambda=0.873$)风沙流结构表现为堆积特征。阵列下风向较其他位置输沙率更低。因此,柔性支架光伏阵列的架设能够改变气流场分布,有效减缓风蚀过程速率。

关键词: 太阳能; 柔性光伏支架; 气流场; 风沙流结构; 库布齐沙漠

文章编号: 1000-694X(2026)04-321-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00051

中图分类号: TM615

文献标志码: A

0 引言

随着全球能源结构向低碳化、清洁化方向转型,光伏发电在中国能源体系中的战略地位日益凸显^[1-2]。近年来,库布齐沙漠凭借光照资源丰富且土地成本相对低廉的天然优势,成为中国建设大型集中式光伏电站的重要区域^[3-4]。光伏电站的建设不仅推动了新能源产业的发展,也为荒漠地区的生态修复与土地再利用提供了新的契机^[5]。然而,大规模光伏阵列的布设不可避免地改变原有地貌,从而扰动沙漠地区原有的风沙运动规律^[6]。刘雅靖等^[7]认为,传统刚性光伏支架在安装过程中需进行深度地基开挖与混凝土浇筑,会对沙区生态系统造成一定程度的破坏。周茂荣等^[8]通过对光伏电站环境的监测与调查,发现光伏电站的建设导致植被覆盖率由10%~15%降低到8%左右。王喜君^[9]指出,光伏

电站施工中土壤侵蚀模数是原地貌土壤侵蚀的3.73倍。传统刚性支架光伏普遍采用倾角30°~40°、板下沿离地高度0.35~0.5 m的布设形式^[10-11],是引发局地风沙状态变化的物理基础^[12]。田小武等^[13]采用数值模拟与现场观测相结合的方法,分析了沙漠地区光伏阵列的风沙流场的变化特征,发现增加光伏板高度可改善板下气流流通,减少近板堆积,促进沙粒向下风向输运。杨世荣等^[14]基于野外实测,系统分析了沙区光伏阵列不同位置下风速脉动与光伏电板间的作用机制,结果表明由于光伏电板有汇聚集流效应,支架下方与光伏板间隙区域20 cm高度处风速脉动相比裸沙地可增加59.7%。Shi等^[15]基于实测结果,模拟脉动风下沙粒的跃移运动,发现近地风的湍流特性对输沙率影响显著。这种对输沙过程的动力调控会导致光伏电站内地形出现明显变化^[16]。阵列迎风侧气流受压缩加速,易

收稿日期:2026-01-08; 改回日期:2026-04-10

资助项目:内蒙古重点研发项目(2025YFHH0151);内蒙古自治区林业科学研究院开放课题(KF2024ZD02);内蒙古自治区水利科研专项(NSK2025-03)

作者简介:杨焱秋(2002—),女,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要研究方向为荒漠化防治。E-mail: yangyanqiu0221@163.com

通信作者:蒙仲举(E-mail: mengzhongju@126.com)

引发强烈的风蚀;而在背风侧,气流减速形成回流区,导致细颗粒物沉积并逐渐堆积,形成明显的积沙区^[17]。这种蚀积共存的现象不仅导致地表起伏加剧与设备基础裸露,还会阻碍植被恢复^[18]。同时风沙活动引起的灰尘沉积还会降低光伏板表面透光率,从而影响光伏系统的运行效率与生态安全^[19]。

针对刚性支架存在的诸多局限性,研究者开始提出柔性光伏支架的概念。柔性光伏支架采用预应力索和支撑梁作为主要支撑结构,具有轻质化、承载能力强、建设周期短和适用性广等优点^[20](图1)。该体系采用大跨架空结构设计,跨距可大

于 20 m^[21],光伏组件下部安装四角锥、抗风索、地锚等结构能够减弱局部风压集中效应并适应不同地形的需求(表1)。目前对柔性光伏支架的研究主要在结构力学与安全性能领域,涉及风压分布特征、气动稳定性及风振响应等方面^[24-26],关于其在沙漠风沙环境中的气流扰动效应与生态响应机制的系统研究仍然十分有限。尤其是在风沙动力学与生态学交叉视角下,柔性支架结构对气流场分布、风沙输运过程及地表稳定性的协同影响机理尚未得到充分揭示,这在一定程度上制约了柔性光伏技术在沙漠地区的生态化应用与优化设计,亟须通过实地观测与定量分析予以完善。

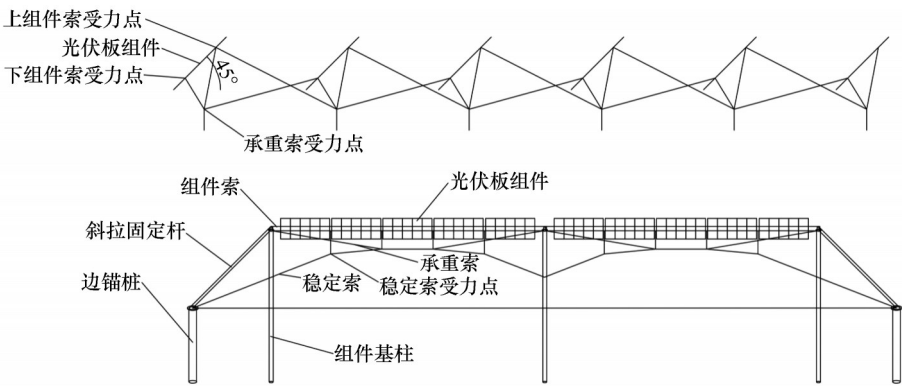


图1 柔性光伏支架结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of flexible photovoltaic mounting structure

表 1 刚性光伏支架与柔性光伏支架对比^[21-23]
Table 1 Comparison of rigid and flexible photovoltaic mounting systems^[21-23]

	刚性光伏支架	柔性光伏支架
结构形式	钢结构支架+桩基础	索系结构+钢构件+桩基础+边锚
支架净空高度	常见≤2.0 m	≥4.0 m
单跨跨距(东西向)	3.0~4.0 m	10~60 m
组件倾角	沙区常见36°(固定倾角)	45°(可优化设计)
生态利用条件	农业机械通行受限,以人工维护为主	可满足大型农业机械通行与植被恢复
适用场地特点	地势平坦地段、地基条件良好	适应复杂地形条件,场地适应性强

基于此,本研究以内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇柔性支架光伏阵列为研究对象,依托现场多点同步观测数据,对不同风速条件下柔性光伏阵列周围气流场特征与风沙流运动规律进行定量分析。在保证光伏发电效率的前提下,探究柔性光伏结构对地表气动环境的调节机制,明确其在削弱风蚀、减少堆沙、改善沙面稳定性方面的潜在作用。研究结果有助于揭示风沙互馈作用对柔性光伏支架体系的响应规律,也为后续沙漠地区光伏工程的

风致灾害防治与生态修复设计提供理论依据和技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇东南方向6 km处的柔性支架光伏电站,属于库布齐沙漠中段(图2)。该区属于温带大陆性季风气候,春秋季节气温起伏剧烈,多年平均气温5~8℃。年降水量145.1~214.9 mm,主要发生在7—9

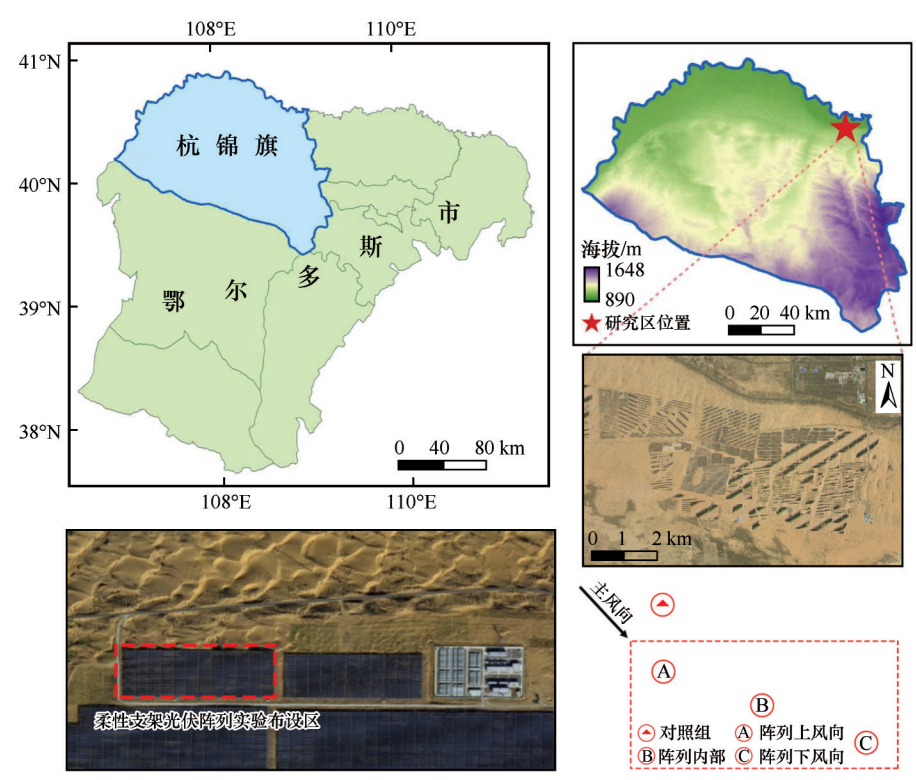


图2 研究区位置与实验布设

Fig.2 Location of study area and experimental layout diagram

月,年蒸发量 2 100~2 700 mm。风沙活动集中在 3—6 月,盛行 NW 风(图 3),年均风速 $3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大瞬时风速达 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,年大风日数 25~30 d。沙丘以新月形沙丘、格状沙丘与沙丘链为主,植被覆盖度低,沙尘天气频发。

柔性支架光伏电站占地面积 4.78 km^2 ,于 2023 年 11 月建成并网运行。在光伏组件布设前,该地区地表以流动沙丘与裸沙地为主,施工期间对地面进

行了整平处理以满足光伏阵列安装要求。柔性支架系统采用双层预应力缆索结构^[27],东西向单跨跨度约 30 m,南北向相邻跨距 5 m,每一跨由 30 块光伏电板组成。光伏电板采用双玻单晶硅材质,单块电板尺寸为 $100\text{ cm}\times 200\text{ cm}$,倾角 45° ,整体朝向正南,呈规则矩形阵列布设。光伏板南侧前沿垂直距地表高度 400 cm,北侧后沿垂直距地表高度 540 cm。电站北侧为无防护措施的裸沙地,地表粗糙度低,

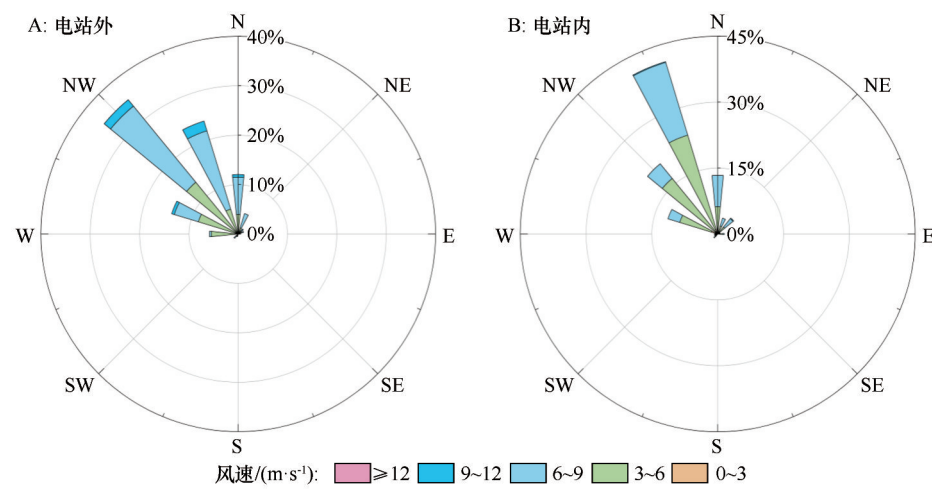


图3 电站内外观测时间内风玫瑰图

Fig.3 Wind rose diagram for the observation period at the power station's interior and exterior

易受主导风向控制而产生风沙活动。

2 方法

2.1 样点选取

样点选取在柔性支架光伏电站的西北边缘光伏阵列,光伏阵列风速测定在选定的柔支电板阵列内一个断面进行(图4)。观测时间为2025年3—7月。

地表输沙与风速观测同步进行,采用HOBO小型气象站配套风杯及风向标对光伏阵列3个位置(阵列上风向、阵列内部、阵列下风向)7个高度(10、

20、50、100、200、300、400 cm)的风速进行监测,对照点位于试验光伏阵列正北处1 km外流动沙地,四周无任何防护措施且土壤类型与光伏阵列内相同。风沙流共观测3次,每组测点观测时间为30 min,测量间隔时间5 s。两种指示风速2 m高度处风速分别为 $4.93\sim 6.97\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5.62\sim 8.71\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图5)。设置集沙仪连续观测上述各地表输沙情况。集沙仪布置总高度为50 cm,共25层,集沙口大小 4 cm^2 。试验时记录好观测的起止时间,在裸沙地的集沙袋装满2/3时停止集沙。收沙完毕后使用精度为0.01 g的天平进行称重,共设置3次重复实验。



图4 柔性支架光伏电站实景

Fig.4 Flexible mounting system photovoltaic power plant in action

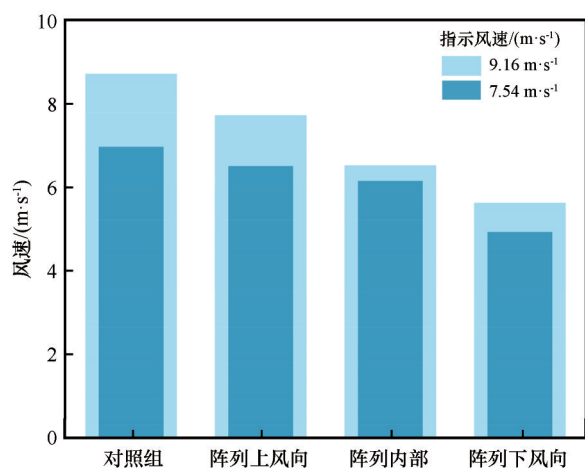


图5 对照组和光伏电站内2 m高处风速对比

Fig.5 Comparison of wind speeds at 2 m height between the control group and the photovoltaic power station

2.2 数据计算和处理

2.2.1 地表粗糙度与摩阻流速的计算

本研究采用普朗特-冯卡门的风速对数分布规律描述风速廓线方程为:

$$U_z = \frac{U_*}{K} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (1)$$

式中: U_z 代表Z高度的平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); U_* 代表摩阻流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); Z 为风速廓线上某点距地面的垂直高度(cm); Z_0 为空气动力学粗糙度(cm); K 为卡门常数,取值 $0.4^{[28]}$ 。

本研究采用对数廓线拟合法计算地表粗糙度和摩阻流速,测得5个高度 U_z (10、20、50、100、200 cm)的风速,通过最小二乘回归来获得风速廓线式 $^{[29-30]}$ 。计算公式为:

$$U_z = a + b \ln Z \quad (2)$$

式中: a, b 为回归系数。令 $U_z=0$ 可求出地表粗糙度:

$$Z_0 = \exp(-a/b) \quad (3)$$

由公式(2)和(3)计算可得摩阻流速:

$$U_* = Kb \quad (4)$$

2.2.2 防风效能的计算

防风效能计算公式为 $^{[31]}$:

$$F = \frac{V_0 - V_p}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: F 为柔支光伏电板的防风效能(%); V_0, V_p 分别代表同一高度下的裸沙风速和光伏电板不同位置的风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

2.2.3 风沙流结构特征的计算

在光伏阵列不同位置,风沙流在垂直方向上的分布会有所变化,采用特征值 λ 作为风沙流结构指标,当 $\lambda>1$ 时,上层输沙通量占优,指示气流输沙未饱和并持续侵蚀过程; $\lambda=1$ 时反映蚀积平衡,对应非蚀积搬运状态; $\lambda<1$ 则表征下层输沙量大,气流过饱和导致近地表堆积。公式为^[32]:

$$\lambda = \frac{Q_{1-10}}{Q_{0-1}} \quad (6)$$

式中: λ 为特征值; Q_{0-1} 为0~1 cm高度内输沙量; Q_{1-10} 为1~10 cm高度内输沙量。

2.3 数据处理

本次实验数据采用 excel 2019 进行初步处理,使用 origin 2024 和 surfer 15 进行进一步数据处理和可视化。

3 结果与分析

3.1 柔性支架光伏阵列对近地表层风的影响

3.1.1 柔性支架光伏阵列的风速廓线和粗糙度

在 $7.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $9.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下,对照组风速廓线随高度增加呈“J”型递增趋势,符合指数分布规律(图6)。柔性光伏阵列内部测点(阵列上风向、阵列内部、阵列下风向)的风速廓线均表现出显著削弱特征,其削弱程度随高度上升呈先减后增趋势。

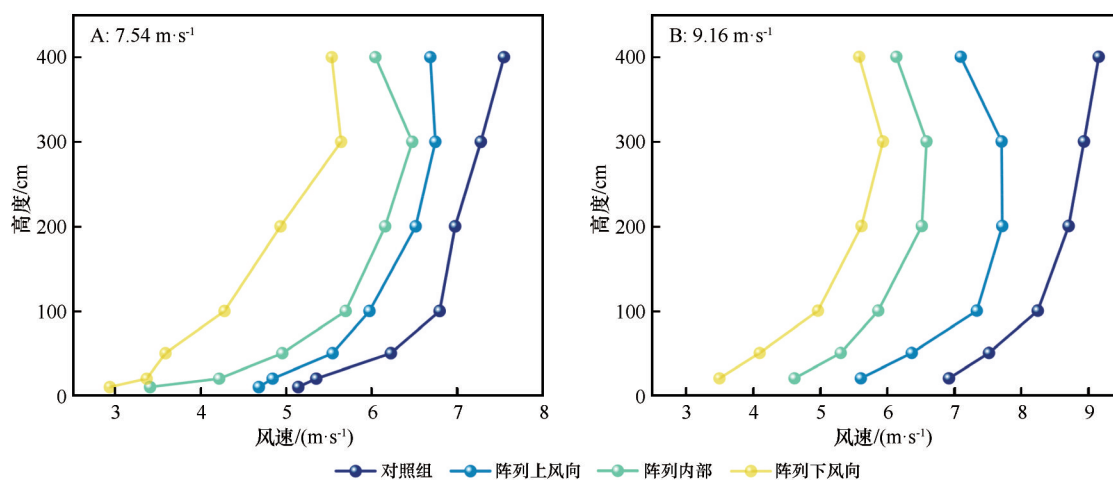


图6 不同测点风速廓线变化趋势

Fig.6 Variations in wind speed profiles across monitoring points

3.1.2 柔性支架光伏阵列的风速流场

两种风速下柔性支架光伏阵列外围与阵列内部的风速流场分布存在显著差异(图7),表明气流

在 10 cm 高度处,各测点风速均明显低于对照组,表明柔性支架阵列对近地层风速具有显著抑制作用。随高度增加,10~200 cm 高度风速削弱程度不断减弱,但在 300~400 cm 高度,风速削弱程度出现小幅度增加。随着气流进入阵列内部,其速度逐渐减弱,至阵列下风向处风速衰减最为显著。在 $7.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下,阵列下风向各高度层风速相较于对照组降低 22%~43%;在 $9.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下,削弱幅度进一步增至 33%~49%。这一结果表明柔性光伏阵列对近地气流具有显著阻滞效应,且风速越大而阻滞效应越明显。

在两种风速 ($7.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $9.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 条件下,柔性支架光伏阵列内部测点的地表粗糙度均显著高于对照组,其中以阵列下风向的粗糙度增幅最大,粗糙度分别为对照组的 64 倍和 26.63 倍(表 2)。表明柔性光伏阵列的架设有效提高了下垫面的表面粗糙度,强化了近地层气流的紊动特征。两种风速条件下阵列内部与阵列下风向的粗糙度随风速增加呈下降趋势,而对照组与阵列上风向则表现为正相关。在 $7.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下,阵列内部摩阻速度最大,为对照组的 1.19 倍。而在 $9.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下,最大摩阻速度出现在对照组。该现象反映了柔性支架光伏阵列高净空特点所带来的双重效应:一方面,阵列的高架设计有效调控了中上层气流,形成明显的防风带;另一方面,其对近地表(0~20 cm)核心风沙活动区的直接影响相对有限。

受光伏阵列结构布局的影响,形成了明显的分层与分区特征。在 $7.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下,阵列外围区域(0~3P)的风速随高度的增加逐渐增大。气流在流

表 2 柔性支架光伏阵列在不同指示风速和不同位置下的粗糙度与摩阻速度

Table 2 Surface roughness and friction velocity of the flexible photovoltaic mounts array under varying indicated wind speeds and positions

指示风速	位置	风速廓线回归方程	粗糙度/m	摩阻速度/(m·s ⁻¹)
7.54 m·s ⁻¹	对照组	$u=0.66\ln(z)+3.55$ $R^2=0.98$	0.004	0.264
	阵列上风向	$u=0.61\ln(z)+3.17$ $R^2=0.98$	0.005	0.243
	阵列内部	$u=0.78\ln(z)+1.81$ $R^2=0.94$	0.100	0.314
	阵列下风向	$u=0.75\ln(z)+1.02$ $R^2=0.95$	0.256	0.300
9.16 m·s ⁻¹	对照组	$u=0.86\ln(z)+4.13$ $R^2=0.98$	0.008	0.343
	阵列上风向	$u=0.75\ln(z)+3.34$ $R^2=0.85$	0.011	0.301
	阵列内部	$u=0.76\ln(z)+2.16$ $R^2=0.91$	0.058	0.304
	阵列下风向	$u=0.79\ln(z)+1.22$ $R^2=0.96$	0.213	0.315

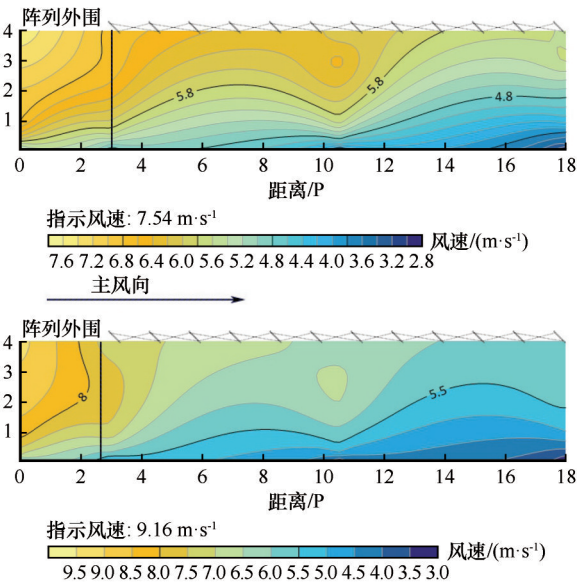


图 7 不同风速下柔性支架光伏阵列的风速流场

Fig.7 Airflow fields of the flexible photovoltaic array under varying wind speeds

经阵列的上风向(3P)时受到光伏组件的直接阻挡,部分动能在通过阵列间隙时转化为湍流动能,导致阵列内部(3P~18P)风速整体减弱,直到达到阵列的下风向(18P)时,风速降至全域的最低值。这表明柔性支架光伏阵列结构对下部气流具有持久的减速效应。上部气流受光伏板倾斜角度影响,在板背面形成局部旋涡区,并逐渐扩展至近地层,该区域的流场扰动向下传递,造成底层风速削减。在9.16 m·s⁻¹条件风速下,流场整体分布趋势与低风速组相似,但其在阵列下风向的气流受阻更强,导致风速衰减幅度更大。

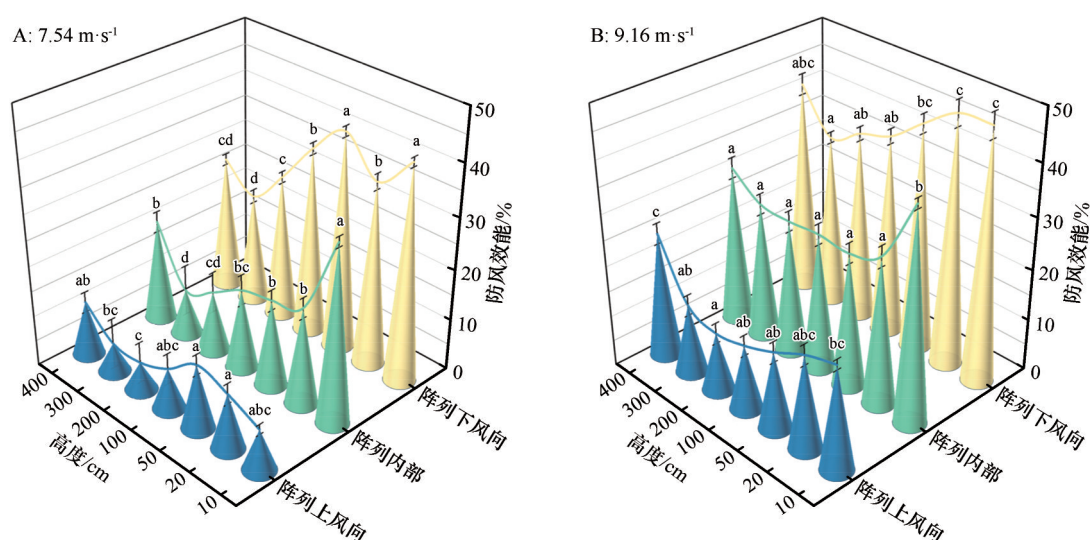
3.1.3 柔性支架光伏阵列的防风效能

在两种风速下,柔性光伏阵列内各测点的防风效能均显著高于对照组(图8)。总体上,防风效能随距地高度增加呈递减趋势,但在300~400 cm高度出现局部回升,与光伏板前沿距地高度一致。阵列下风向在各高度层的防风效能均显著高于阵列上风向和阵列内部($P<0.05$),且随着风速增强,其优势更加突出。具体而言,在7.54 m·s⁻¹风速下,阵列下风向的防风效能为21%~42%;当风速升至9.16 m·s⁻¹时,该效能进一步提升至33%~48%。尽管低风速时的防风效能略有减弱,但整体仍表现出显著的防风效果。综上,柔性光伏阵列通过支撑结构与光伏板形成的物理屏障,能有效削弱地表气流动能,减少风蚀风险,其防风能力表现为阵列下风向>阵列内部>阵列上风向。

3.2 柔性支架光伏阵列对近地表层输沙的影响

3.2.1 柔性支架光伏阵列输沙量及垂直分布特征

为分析柔性支架光伏阵列对风沙活动的影响,对9.16 m·s⁻¹风速条件下不同位置的输沙量垂直分布进行指数函数拟合($R^2\geq 0.96$,图9)。对照组、阵列上风向、阵列内部、阵列下风向单位时间输沙量分别为0.749、0.581、0.445、0.242 g·cm⁻²·min⁻¹,呈现由对照区向阵列下风向逐步降低的趋势。输沙集中在0~20 cm的近地层,峰值出现在0~2 cm高度层,且输沙量随高度增加呈指数递减。对照组、阵列上风向与阵列内部的风沙流特征值 $\lambda>1$,表现为侵蚀状态,输沙量在上层最高(表3)。这表明近地层气



注:不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$

图8 不同位置防风效能随高度变化示意图

Fig.8 Schematic of windbreak efficiency variations with height across positions

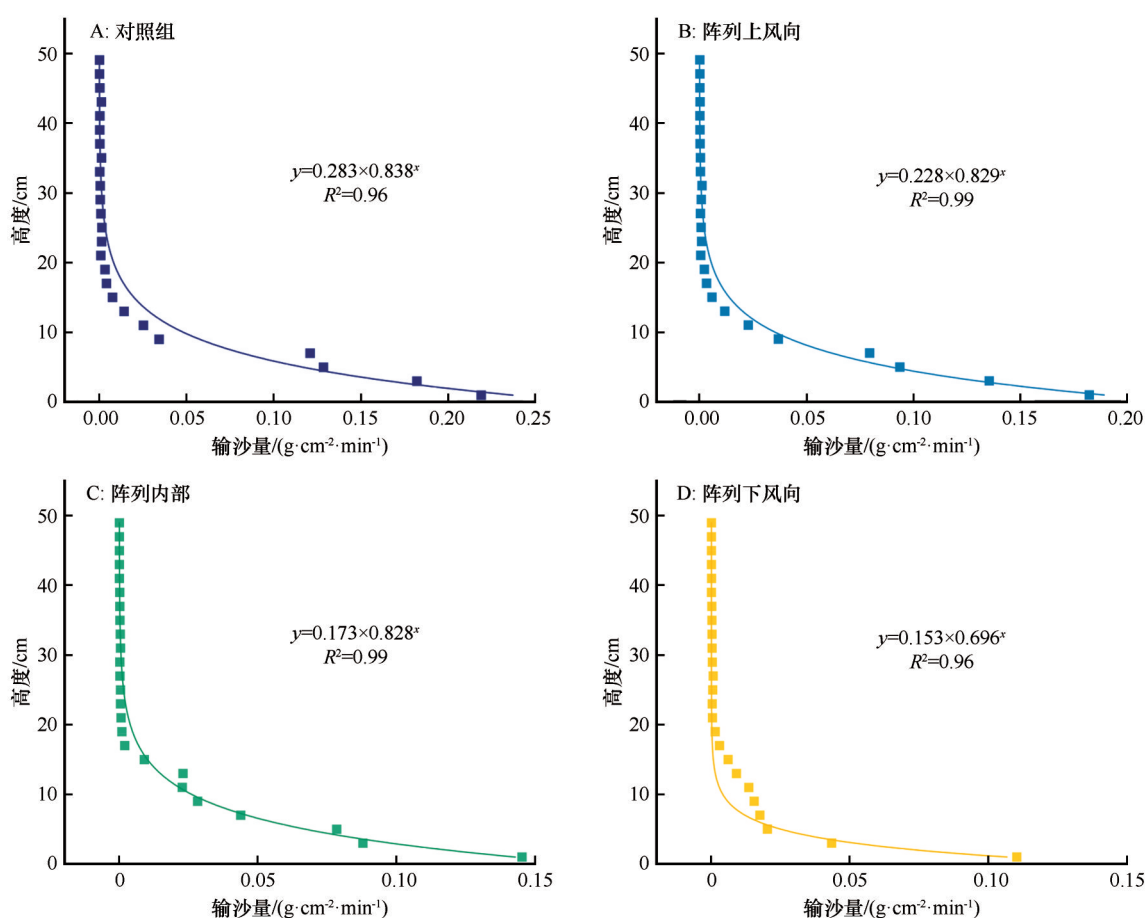


图9 柔性支架光伏阵列不同位置输沙量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)随高度的变化

Fig.9 Dynamic sand transport at different positions of flexible-supported photovoltaic arrays as a function of height

流出现扰动,使得上层气流挟沙能力增强,呈现非饱和状态。阵列下风向 $\lambda < 1$,表现为堆积状态,输沙量在下层最高。这表明沙粒在搬运过程中向近地

面沉积,下层沙量快速增加,风沙流呈现饱和状态。对照组的近地表输沙量分别为阵列上风向、阵列内部、阵列下风向的1.29、1.68、3.10倍,说明柔性光伏

表3 柔性支架光伏阵列不同位置风沙流结构特征值

Table 3 Characteristic parameters of aeolian sand flow at different positions in the flexible photovoltaic mounts array

指示风速	高度	对照组	阵列上风向	阵列内部	阵列下风向
$9.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	0~10 cm	0.685	0.528	0.384	0.207
	2~10 cm(上层)	0.284	0.210	0.151	0.053
	1~2 cm(中层)	0.182	0.136	0.088	0.043
	0~1 cm(下层)	0.219	0.182	0.145	0.110
	特征值 λ	2.128	1.901	1.648	0.873

支架的布设具有一定的阻沙作用,且阵列下风向区域的阻沙效果最佳。

3.2.2 各种位置的累计输沙率

对照组及阵列各测点的累计输沙率均随高度呈指数增长关系($R^2=0.99$,图10)。50%累计通量出现的高度代表平均跃移高度,对各位位置累计输沙率占比沿高度的分析变化可知,对照组、阵列上风向、阵列内部、阵列下风向平均跃移高度分别为2.49、2.41、2.51、1.48 cm。阵列上风向与阵列内部的平均跃移高度和对照组差异较小,阵列下风向明显降

低,反映出阵列尾流区输沙率的分布更集中。当累计输沙量达到80%时,对照组对应的距地高度为6.19 cm,而柔性支架光伏阵列3种位置(阵列上风向、内部、下风向)对应的距地高度分别增至6.26、6.94、6.75 cm,较对照组提升1.13%~12.12%。即在光伏阵列内各区域要达到80%累计输沙率,需要更大高度的输沙率累加才能满足,这表明柔性光伏阵列对近地表风沙活动具有明显的削弱与稳定作用。尽管阵列的设置对平均跃移高度的改变能力有限,但总体上仍改善了阵列内近地表10 cm风沙活动强

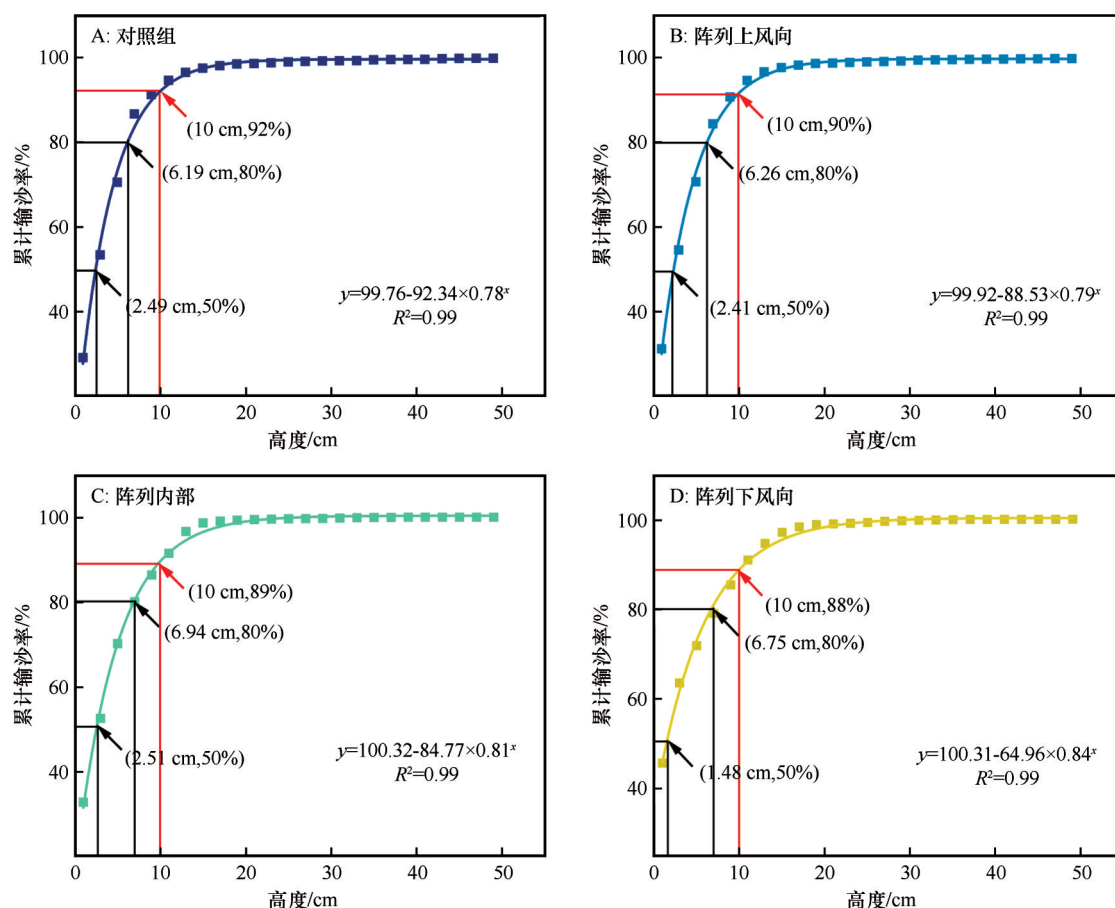


图10 各位置累计输沙率随高度变化趋势

Fig.10 Spatial variations in vertical distribution of cumulative sand transport rate

度。未来可结合植被措施,以进一步增强防风固沙效果。

4 讨论

4.1 柔支光伏阵列对近地表风的影响

光伏电站的建设会影响局地风速流场的分布,其作用机制主要源于光伏阵列独特的几何结构与大气边界层之间的相互作用。本研究结果表明,柔性支架光伏阵列能够改变近地表风速,其风速随着深入阵列内部呈明显衰减趋势。唐国栋等^[33]证实光伏阵列的布设会在沙地表面形成物理屏障,能够有效减小阵列内部的风速。杨若婷等^[34]发现固定支架阵列对过境气流的阻滞效应。但袁方等^[35]对传统刚性支架的研究表明,太阳能板降低200 cm高度风速的效果更明显。而本研究结果显示,柔性支架光伏阵列在300~400 cm高度内具有较好的风速拦截效应,其次为20~50 cm高度。这可能是因为20~50 cm高度层,气流主要受阵列铺设与下垫面粗糙度的双重影响。当大气处于中性层结构时,近地面风速随高度呈对数分布,近地层风速廓线与热力层有关^[36]。但光伏组件的布设铺设会改变地表辐射平衡。赵鹏宇^[37]对乌兰布和沙漠光伏电站的研究证实,由于光伏电站的建设以及其对地区温度的影响,相关地域内风速较旷野处有明显变化。除此之外,光伏阵列边锚、基柱等结构在近地层形成粗糙单元,近地层阻力增大,从而导致20~50 cm高度层风速减退。在300~400 cm高度,防风效能的增强主要受光伏阵列内与气流摩擦的协同效应^[38]。当气流穿越阵列时,在光伏板前后缘产生绕流和分离现象,持续消耗气流动能。传统光伏支架与柔性光伏支架相比高度相差100 cm,柔性光伏支架200 cm高度处因下垫面与光伏板间形成局部导流作用,其风速相对其他高度层有所增加,高层气流受光伏板阻挡形成涡旋减速区导致风速降低^[39]。此外,柔性支架光伏阵列对地表空气动力学参数的影响呈现出与传统刚性支架不同的特征。粗糙度和摩阻速度是能够反映地表土壤抗风蚀能力的重要指标^[40]。本研究发现,尽管柔性支架光伏的布设提升了地表粗糙度,但其提升幅度总体上低于传统刚性支架,且摩阻流速也表现出明显的波动性。这一现象与柔性支架固有的高净空与大跨度结构特性密切相关。其主体结构对气流的干扰更多地发生在中高层空

间,对近地表的直接扰动较弱^[41~42]。李寿英等^[43]针对柔性光伏支架阵列遮挡效应的模拟研究结果显示,气流在阵列迎风侧前排内出现剧烈减速,随后随下风向距离增加逐渐趋于稳定,与本研究流场实测分布观测结果一致。本研究中不同来流风速条件下的对比结果显示,9.16 m·s⁻¹风速条件下柔性支架光伏阵列的减风能力强于7.54 m·s⁻¹。黄斌等^[44]的研究结论也对这一现象进行了验证,在光伏电站内部,风速的削减效应呈现出明显的空间分异特征,随着来流风速的增大,风速的相对削减率也随之升高。需要注意的是,柔性支架结构体系虽然在高风速条件下具备较好的减风能力,但随着风速增大其风振效应也会增强。未来在沙漠地区推广柔性光伏支架时,应在充分发挥其防风治沙效能的同时关注极端风速条件下的结构安全问题,以实现防风效益与结构稳定性的协同提升。

4.2 柔支光伏阵列对近地表输沙的影响

从风沙动力学角度分析,光伏板的架设导致周围气流场发生变化是造成光伏板不同位置输沙率产生差异的核心因素^[45]。本研究结果表明,柔性支架光伏阵列能显著抑制风沙输移,其总输沙量由阵列上风向至下风向锐减。光伏阵列不同位置的单位时间输沙量阵列上风向>阵列内部>阵列下风向,且阵列下风向输沙量较对照组减小67.69%。陈曦等^[46]的研究结论与此表现出一致性,其对沙区光伏电站内风沙进行观测显示:电站内输沙量低于裸沙对照组,且随着深入电站内部,输沙率呈降低趋势。本文对照组0~20 cm高度层输沙量占总输沙量的80%以上,张正偲等^[47]通过对腾格里沙漠东南部野外风沙流观测发现,研究区内逾80%的输沙集中在0~20 cm,为输沙的主要贡献高度。本研究中阵列上风向处风沙流呈非饱和状态且0~10 cm高度输沙量占比超过90%,阵列下风向风速衰减区形成细颗粒沉降产生堆积。此结论与郭彩赞等^[41]的研究结论不同,其研究结论表明传统刚性支架因光伏板近地布设形成汇流加速效应,改变风沙流结构,在两排光伏板间造成堆积,这一关键差异源于支架结构引发的不同流场重构^[48]。传统刚性支架倾角小、高度低,因“狭管效应”易在板下形成气流加速区;而柔支支架高倾角、高净空,在其下风向能形成尺度更大、更稳定的涡旋减速区,从而更有效地促进沙粒沉降^[11]。从光伏阵列整体来看,虽然由于光伏板

的设置,存在局部风速加速导致的风蚀,也有局地削弱风速和拦截风沙流,但过境风进入光伏阵列后,各位置与对照组风速相比不断被削弱,即柔性支架光伏阵列的布设可降低近地表风速,并导致阵列内输沙率逐渐减小。与传统刚性支架相比,柔性光伏支架凭借其高净空与大跨度的先天结构优势,在风沙调控上实现了从“近地表干预”到“中高层拦截”的跨越。Wang等^[49]的研究证实,光伏电站的建成能改善局地土壤水分和养分条件。但由于传统光伏支架高度的限制,光伏板下区域长期处于遮阴状态,难以获得降水和太阳辐射^[50]。柔性光伏支架的高净空特性可以避免传统刚性支架所带来的遮阴效应,提供更加充足的降水与光照条件,从而促进植被恢复。同时,其宽阔的板下空间既有利于植被的机械施工种植,还可以引进节水灌溉技术,提高植被的成活率和生长速度。

5 结论

在10~300 cm高度,柔性支架光伏阵列区的风速变化趋势与对照组一致;而在300~400 cm高度,因光伏板倾斜角度对周围流场的扰动,风速呈现减小趋势。

柔性支架光伏阵列内各测点风速均低于对照组,阵列内风速较对照组减弱22%~49%。增大来流风速或深入阵列内部位置,均会使光伏阵列的防风效能增强。

柔性支架光伏阵列通过降低近地表风速有效抑制风沙流强度。对照组输沙量分别为阵列内部各测点的1.29、1.68、3.10倍。从蚀积形态来看,阵列上风向与内部以风蚀为主,下风向以堆积为主。

参考文献:

- [1] 邹才能,陈艳鹏,熊波,等.碳中和目标下中国新能源使命[J].中国科学院院刊,2023,38(1):48-58.
- [2] 欧阳志政.太阳能光伏电站助力乡村振兴发展[J].太阳能学报,2024,45(11):757.
- [3] 刘永杰,杨琴,苏军虎,等.光伏发电与“三北”工程建设协同发展分析[J].中国草地学报,2024,46(12):122-129.
- [4] 乔慧.光伏电站风沙运动特征及植被恢复对土壤的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- [5] Campana P E, Macknick J, Croci M, et al. Scientific frontiers of agrivoltaic cropping systems [J]. Nature Reviews Clean Technology, 2025: 1-21.
- [6] Li M, Chen T, Ma S, et al. Wind field characteristics of photovoltaic arrays based on wind tunnel tests [J]. Solar Energy, 2025, 300: 113867.
- [7] 刘雅婧,王丹阳,常旭,等.光伏电站建设对西北荒漠区生态环境的影响研究进展[J].中国水土保持科学,2025,23(2):9-17.
- [8] 周茂荣,王喜君.光伏电站工程对土壤与植被的影响:以甘肃河西走廊荒漠戈壁区为例[J].中国水土保持科学,2019,17(2):132-138.
- [9] 王喜君.河西走廊戈壁荒漠区光伏电站占地分析及水土流失特征研究[J].中国水土保持,2019(9):11-14.
- [10] Abdeen E, Orabi M, Hasaneen E S. Optimum tilt angle for photovoltaic system in desert environment [J]. Solar energy, 2017, 155: 267-280.
- [11] 赵飞燕.库布齐沙漠集中固定式光伏阵列扰流效应及地表蚀积调控研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2025.
- [12] 牛清河,苏春丽,肖建华,等.青藏高原苏干湖盆地光伏电站对戈壁风沙环境的影响[J].中国沙漠,2025,45(6):249-257.
- [13] 田小武,唐希明,陈淑瑾,等.沙漠区光伏阵列布局对近地表风沙流场的影响[J].水土保持通报,2026,46(1):236-248.
- [14] 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.
- [15] Shi F, Huang N. Measurement and simulation of sand saltation movement under fluctuating wind in a natural field environment [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(3):474-484.
- [16] 唐国栋.沙区光伏阵列地表形变规律及其动力学机制[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [17] 贾瑞庭,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠200MWp光伏阵列的截流阻沙效应研究[J].中国农业科技导报,2021,23(4):137-144.
- [18] 王浩,李生字,王海峰,等.沙漠光伏电站地表蚀积发生机制实验研究[J].干旱区研究,2025,42(2):349-359.
- [19] 赵明智,张丹,宫博,等.沙漠环境对光伏组件的影响研究[J].太阳能学报,2020,41(5):365-370.
- [20] 李晓诚,张营营,周伟,徐俊豪.柔性光伏支架结构研究综述[J].土木工程,2023,12(3):290-297.
- [21] 罗叠峰,李文露,翟朗.柔性光伏支架结构的抗风设计及风振研究综述[J].自然灾害学报,2025,34(4):1-15.
- [22] Lou Y, Zhang J, Pan Y. Static and dynamic response analysis of flexible photovoltaic mounts [J]. Buildings, 2024, 14(7): 2037.
- [23] 郭涛,杨渊茗,孙震,等.光伏组件柔性拖曳结构与传统刚性结构风振响应对比[J].太阳能学报,2024,45(10):317-325.
- [24] 张春伟,柯世堂,余玮,等.基于风洞试验大跨柔性光伏阵列上下表面脉动风压联合概率分布模型[J].太阳能学报,2025,46(7):701-709.
- [25] Zhou R, Xu Z, Wang H. Parametric study on flutter performance of three-cable-supported flexible photovoltaic support structure [J]. Thin-Walled Structures, 2025, 210: 112975.
- [26] Cai Q, Ke S, Wang L, et al. Evolution of wind-induced vibration form of large-span flexible PV aeroelastic arrays [J]. Solar Energy, 2024, 277: 112684.

- [27] 亿恒智慧(北京)能源技术有限公司, 亿利资源集团有限公司. 一种光伏发电支架系统及其安装方法: 202311266679.4 [P]. 2023-12-22.
- [28] Wiggs G F S. Desert dune dynamics and the evaluation of shear velocity: an integrated approach [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1993, 72(1): 37-46.
- [29] Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Kalahari Desert [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(1): 19-34.
- [30] Sharratt B, Feng Guanglong. Friction velocity and aerodynamic roughness of conventional and undercutter tillage within the Columbia Plateau, USA [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 236-241.
- [31] 张呈春, 张维福, 展秀丽, 等. 腾格里沙漠光伏阵列对气流场和风沙流的扰动作用[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 55-65+76.
- [32] 郭树江, 杨自辉, 王强强, 等. 青土湖干涸湖底风沙流结构及输沙粒径特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1166-1176.
- [33] 唐国栋, 蒙仲举, 高永, 等. 基于风洞试验的风沙区光伏阵列近地表形态变化规律研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 1-8.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 梁志, 师宇, 张哲, 等. 大气稳定度对边界层垂直风切变的影响[J]. 中国科学院大学学报(中英文), 2024, 41(3): 365-374.
- [37] 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.
- [38] Zhang F, Wen Y, Jiang M, et al. Wind speed profile model of the desert photovoltaic arrays [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2025, 267: 106239.
- [39] 谢贇. 榆林毛乌素沙地光伏+治沙生态恢复效应与功能评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- [40] 李锦荣, 韩兆恩, 唐国栋, 等. 冻结对沙丘土壤抗风蚀能力的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 38-45.
- [41] 郭彩霞, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠 110MW 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.
- [42] Zhang J, Lou Y. Study of wind load influencing factors of flexibly supported photovoltaic panels [J]. Buildings, 2024, 14(6): 1677.
- [43] 李寿英, 杨丹, 刘佳琪, 等. 复杂工况下柔性光伏支架阵列风荷载特性及其遮挡效应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(5): 1228-1235.
- [44] 黄斌, 周之杰, 李正农, 等. 风沙流对沙漠光伏组件及其发电效率的影响研究进展[J]. 空气动力学学报, 2025, 43(04): 64-79.
- [45] Wang X, Zhang C, Huang X, et al. Wind tunnel tests of the dynamic processes that control wind erosion of a sand bed [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(2): 614-623.
- [46] 陈曦, 高永, 翟波, 等. 沙区光伏电场的风沙流输移特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 684-690.
- [47] 张正德, 董治宝. 腾格里沙漠东南部野外风沙流观测[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 973-980.
- [48] 张春伟, 柯世堂, 王伯洋, 等. 基于物理约束深度学习的大跨柔性光伏阵列绕流场重构[J]. 空气动力学学报, 2025, 43(4): 91-102.
- [49] Wang Z, Chen H, Li Q, et al. Photovoltaic alters microhabitats and soil-vegetation feedbacks in a fragile semi-arid ecosystem [J]. Land Degradation & Development, 2025.
- [50] 左强, 杨昊天, 杨奕颖, 等. 沙漠光伏建设模式通过土壤水分影响固沙草本植物生长特征[J]. 中国沙漠, 2025, 45(3): 291-301.

Impact of flexible-support photovoltaic arrays on wind-sand movement in desert regions

Yang Yanqiu^{1a}, Liu Jing², Meng Zhongju^{1ab}, Meng Ruibing^{1a}, Cai Jiale^{1a}, Gao Yue^{1a}

(1.a. College of Desert Control Science and Engineering / b. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: With the vigorous promotion of the “new energy + desertification control” model, photovoltaic (PV) desertification control has been widely applied owing to its strong windbreak and sand-fixation effects and its capacity to improve soil conditions. At present, research on PV-based desertification control has mainly focused on traditional rigid mounting systems, for which ecological effects and aeolian sand regulation mechanisms have been relatively well established, whereas the aeolian sand transport characteristics associated with flexible mounting systems remain unclear. In this study, a flexible-mount PV power plant located in an area of intense aeolian activity was selected as the research object. Monitoring points were arranged at typical positions of the PV array, including the upwind side, the interior, and the downwind side. Wind speed variations and sand transport were measured using HOBO compact meteorological stations and stepwise sand traps. The results indicate that the flexible-mount PV array markedly weakens near-surface airflow. Wind speeds at all positions within the array were generally lower than those at the control site, with reductions ranging from 22% to 49%, and the degree of wind speed attenuation increased progressively from the upwind side toward the interior of the array. The installation of the array increased surface roughness and modified the vertical structure of the wind speed profile. Within the array, windbreak efficiency gradually decreased with height from 10 cm to 300 cm, but exhibited a distinct increase in the 300-400 cm layer. The aeolian sand flow regime within the PV array underwent a clear transition. Wind erosion dominated at the control site ($\lambda = 2.128$), the upwind side of the array ($\lambda = 1.901$), and the array interior ($\lambda = 1.648$), whereas the aeolian sand flow structure at the downwind side of the array showed depositional characteristics ($\lambda = 0.873$). The sand transport rate at the downwind side of the array was lower than that at other positions. Therefore, the deployment of flexible-mount PV arrays can modify airflow field distributions and effectively reduce the rate of wind erosion processes.

Key words: solar energy; flexible photovoltaic support; airflow field; wind-sand flow structure; Kubuqi Desert