
试验研究

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

唐国栋^{1,2}, 蒙仲举³, 高永³, 党晓宏³, 郭建英^{1,2}, 邢恩德^{1,2}

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3.内蒙古农业大学 沙漠治理学院/内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要: [目的] 研究库布齐沙漠中段沙区光伏阵列扰动下地表形态变化规律及其与风环境的关系, 为科学制定沙区光伏电站次生风沙危害防治技术方案提供理论依据。[方法] 运用风洞试验方法, 分析光伏阵列与风向之间夹角为 0°, 45°, 90°, 135° 和 180° 时光伏阵列地表蚀积空间分布规律和地表形态剖面特征。[结果] 夹角为 ±90° 时, 迎风侧前两排电板区域地表蚀积变化表现为风蚀以中度和重度为主, 堆积以轻度为主。第 3—5 排电板区域在前两排电板的遮蔽作用下风沙活动强度大幅降低。夹角为 ±45° 时所有电板区域蚀积变化规律较为相似; 45° 时蚀积变化表现为风蚀以中度和重度为主, 堆积以中度和轻度为主, 小范围出现重度堆积现象; -45° 时风蚀和堆积均表现为以轻度和中度为主。以 8 m/s 风速条件为例, 不同夹角条件光伏阵列地表蚀积强度表现为: 45° > 90° > -45° > -90° > 0°。夹角为 0° 时最小, 蚀积变化极差仅为 1.265 cm。夹角为 45° 时最大, 蚀积变化极差可达 5.429 cm。夹角绝对值相等符号相反风况条件下, 夹角为正值相较负值时光伏阵列地表风沙活动更为强烈。夹角为 45° 时蚀积强度是夹角为 -45° 时的 1.566 倍, 夹角为 90° 时则是夹角为 -90° 时的 1.269 倍。[结论] 沙区光伏阵列次生风沙危害的防治技术方案设计应充分考虑区域主害风向条件。

关键词: 光伏阵列; 风洞试验; 风向; 地表形态; 库布齐沙漠

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0001-08

中图分类号: TM615

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.001; Tang Guodong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. A study on solar photovoltaic array surface morphology variation in sandy area based on wind tunnel test [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 1-8.

A Study on Solar Photovoltaic Array Surface Morphology Variation in Sandy Area Based on Wind Tunnel Test

Tang Guodong^{1,2}, Meng Zhongju³, Gao Yong³, Dang Xiaohong³, Guo Jianying^{1,2}, Xing Ende^{1,2}

(1. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe Eco-hydrological System, China

Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Institute of

Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020,

China; 3. Desert Science and Engineering College/Key Laboratory of Aeolian Sand Physics and Sand Control

Engineering in Inner Mongolia, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: [Objective] The surface morphology changes and its relation with wind environment under wind regime disturbance by a solar photovoltaic array in a sandy area of the middle part of Kubuqi Desert, in order to provide a theoretical basis for determining a technical scheme to minimize wind and sand hazards at solar photovoltaic (PV) power stations. [Methods] Spatial distribution of surface erosion and deposition and characteristics of the surface morphology profile at five angles (0°, 45°, 90°, 135°, and 180°) between the

收稿日期: 2022-01-05

修回日期: 2022-02-27

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“库布齐沙漠沿黄段流动沙丘综合治理技术与示范”(2021GG0073); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS03026); 内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2020CG0066)

第一作者: 唐国栋(1991—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士, 工程师, 主要从事荒漠化防治、干旱半干旱区生态水文方面的研究。Email: 18247158690@163.com。

通讯作者: 蒙仲举(1980—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治教学与研究。Email: mengzhongju@126.com。

solar PV array and the wind direction were analyzed by wind tunnel experiments. [Results] When the included angle between the solar PV array and the wind direction was $\pm 90^\circ$, the surface erosion intensity was mainly moderate and severe, and deposition intensity was mainly mild. Surface erosion intensity was greatly reduced in the 3rd to 5th rows of panels because of sheltering effects. The erosion and deposition change law for all panel areas was similar at the $\pm 45^\circ$ angles. When the included angle was -45° , the surface erosion and deposition intensity were mainly mild and moderate. but severe deposition intensity occurred in a small area. When the included angle was -45° , the surface erosion intensity was mainly moderate and mild, and deposition intensity was mainly mild and moderate. The surface erosion and deposition intensity at the different included angles followed the order of $45^\circ > 90^\circ > -45^\circ > -90^\circ > 0^\circ$. As an example, when wind speed was 8 m/s, the surface erosion and deposition intensity were the smallest with the 0° angle, and the range of surface erosion and deposition was only 1.265 cm. The surface erosion and deposition intensity were the largest with the 45° angle, and the range of erosion and deposition reached 5.429 cm. In addition, when the absolute value of the included angle was equal and the sign was opposite, the wind and sand activity on the surface of the photovoltaic array was stronger when the included angle was positive than when it was negative. When the included angle was 45° , the surface erosion and deposition intensity was 1.566 times higher than that was -45° . When the included angle was 90° , the surface erosion and deposition intensity was 1.269 times higher than that was -90° . [Conclusion] The design of technical schemes to minimize wind and sand hazards at solar PV power stations in sandy areas should fully consider the prevailing wind direction conditions.

Keywords: solar photovoltaic array; wind tunnel test; wind direction; surface morphology Kubqi Desert

太阳能光伏发电是解决传统化石能源日益减少与经济高速发展对能源需求日益增长之间矛盾的可靠途径之一^[1-3]。据国家能源局发布数据显示,截止到2021年6月底,中国可再生能源发电装机容量达到 9.71×10^8 kW,其中光伏发电装机容量 2.68×10^8 kW,所占比例为 27.6%。其中主要以地面式光伏为主,占到总装机量的 70%^[4]。建设地面式光伏电站不仅需要丰富的光热资源,同时需要占用大规模的土地资源。中国西北干旱半干旱荒漠地区恰好是太阳能资源丰富区,而且这些地区土地占用成本低,不占用宝贵的耕地资源,成为建设地面式太阳能光伏电站的理想场所^[5-6]。然而沙漠地区气候干旱、降水稀少、风沙活动频繁^[7],给光伏电站安全稳定运营带来了巨大挑战,随着大规模光伏电站的兴建,施工扰动地表,土壤活化为风沙活动提供了丰富的沙源^[8],而光伏设施扰动下流场格局发生变异,打破了原有维持地表平衡状态的动力分布,地表风沙运动规律随之改变^[9]。研究表明风沙活动导致光伏电板下出现掏蚀现象形成以光伏电板下沿为轴线的风蚀坑(沟),基柱出露^[10],在光伏电板背风侧沙粒堆积在板间形成堆积沙垄地貌。地貌的变化一方面会导致原本按照平坦沙表面设计的风荷载参数的强度不足,严重风蚀区将威胁到光伏组件固定结构稳定性;另一方面地貌变化势必会加剧地表粉尘的释放速率,增加沙尘在光伏面板上的沉积,从而加速降低了光伏电站的发电效率^[11]。

目前,在光伏产业领域,学者们主要对光伏发电组件材料及安装方式^[12-13]、光伏组件电学模型与仿真^[14-15]、降尘对发电效率影响^[16]、光伏面板积尘清洁等^[11]研究较多,关于沙区光伏设施干扰下地表侵蚀动力过程、风蚀地貌形成演变规律等方面研究相对薄弱。Jubayer 等^[17]和 Etyemezian 等^[18]运用数值模拟和野外观测方法已经证明,环境风向条件对光伏阵列近地表风速流场分布规律有重要影响,风是沙物质输移的动力因素,因此环境风向将成为影响地表形态变化的重要因素。光伏设施安装时考虑到发电效率最大化,中国西北地区光伏电板一般朝向正南,东西方向排布,因此,风向改变的实质是光伏阵列与风向之家夹角的改变。但是野外试验环境下风向条件不可控,难以准确获取不同夹角条件下光伏阵列地表蚀积空间分布规律。本研究以库布齐沙漠 200 MWP 光伏电站为原型,等比例缩放制作模型,通过风洞试验方法研究光伏阵列与风向不同夹角条件下地表风蚀和堆积强度及其空间分布特征,旨在揭示沙区光伏阵列扰动下地表形态演变发展规律及其与环境风向的关系,为科学制定沙区光伏电站次生风沙危害防治技术方案提供理论依据。

1 试验设计与数据处理

1.1 野外试验光伏电站概况

野外试验光伏电站位于库布齐沙漠中段,于 2018 年底建成,占地面积约为 5.20 km^2 ,装机容量为

200 MW_p。区域风沙活动主要集中在3—5月,全年大风日数为25~35 d,全年盛行西北风和西风,夏季盛行南风 and 东南风(图1)。平均风速 ≥ 5 m/s的次数为323.40次,最多年份达418次。该地区的沙丘主要呈NW—ES走向的新月形沙丘、新月形沙丘链和格状沙丘链等,半固定沙地占30%,60%为流动性沙地,研究区基本无植被覆盖。光伏电站建设前进

行土地整平,光伏电板设置方式为面向正南,东西方向排布,南北相邻两排光伏电板间距800 cm,光伏电板倾角为 36° ,面板上沿距地面垂直高度270 cm,下沿距地面垂直高度35 cm。单组光伏电板由2排18列 $99\text{ cm}\times 195\text{ cm}$ 基本光伏电板单元组成,单组光伏电板整体规格为 $400\text{ cm}\times 1\ 800\text{ cm}$,地面投影宽度约为320 cm。

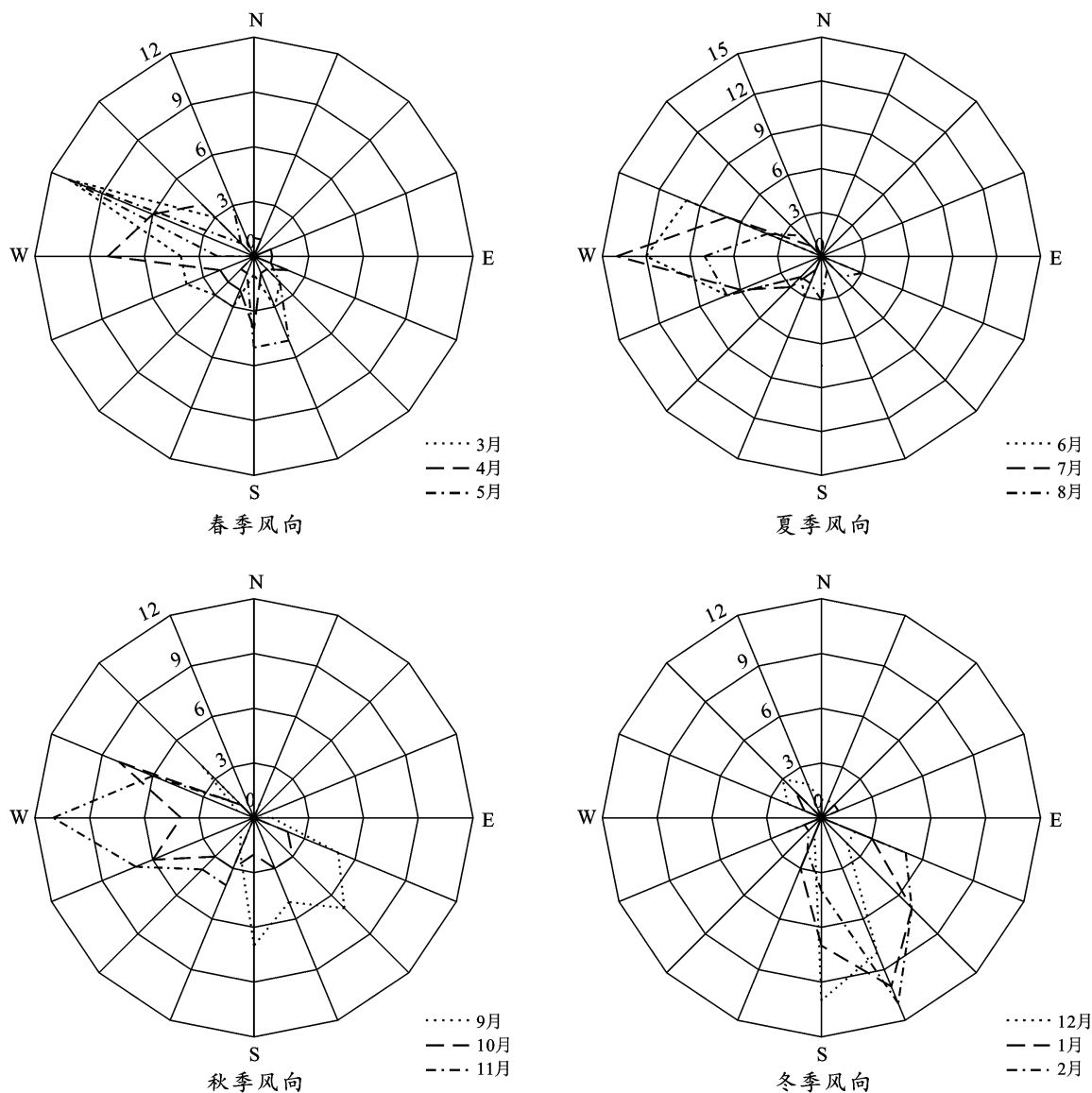


图1 库布齐沙漠中段野外试验光伏电站风向频率玫瑰图

1.2 试验设备

试验于2020年11月20日至12月2日在水利部牧区水利科学研究所包头市达尔罕茂明安联合旗希拉穆仁镇试验基地风洞试验室开展。风洞型式为吹气式直流正压风洞,总长29 m,试验段长12.6 m,横截面 $2.6\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ 。实用风速为2~30 m/s,24 m/s条件下测试,湍流度 $\leq 1.0\%$ 。光伏阵列扰动

下地表形态测量是利用Riegl VZ-400三维激光扫描仪获取沙丘形态数据,测量精度2 mm。

1.3 光伏电板试验模型设计

试验光伏电板模型是以库布齐沙漠200 MW_p光伏电站为原型设计,按照野外实际光伏阵列尺寸进行等比例(25:1)缩小,倾角同野外试验光伏电板一致为 36° ,单排光伏电板模型为 $16\text{ cm}\times 120\text{ cm}$,上沿距

离沙床 11.4 cm, 下沿距离沙床 2 cm, 两排模型间距 32 cm。试验共设置 5 排光伏模型, 整体尺寸 120 cm × 192.70 cm。试验模型使用材料为奥松板、扁铁、螺丝钉和强磁铁。将设好角度的扁铁支架用螺丝钉固定在支撑底板上, 然后在模型板对应支架的位置用螺丝钉固定强磁铁, 使得模型板和支架可以灵活连接和拆卸, 以便于使用三维激光扫描仪记录地表形态变化(见图 2)。

1.4 试验方法

如图 3 所示, 光伏阵列与风向夹角(下文简称“夹角”)是表示来流方向与光伏阵列之间的位置关系。本试验设置风向与光伏阵列模型夹角为 0° , 45° , 90° , 135° 和 180° 共 5 个处理, 测试 6 m/s, 8 m/s 和 10 m/s 3 个风速梯度作用下的地表形态变化规律。不同处理入射风速廓线基本一致。如图 4 所示, 在 0—50 cm 高

度范围内风速随高度增大, 与野外平坦沙表面风速随高度变化规律相似, 试验模型高度仅为 11.4 cm, 因此, 风速条件可以满足试验要求。

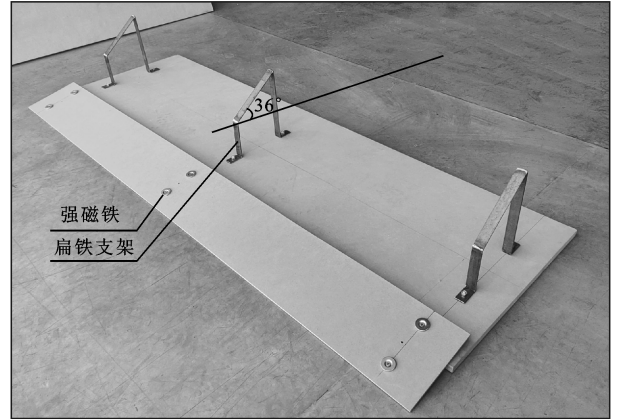


图 2 单排光伏电板风洞试验模型

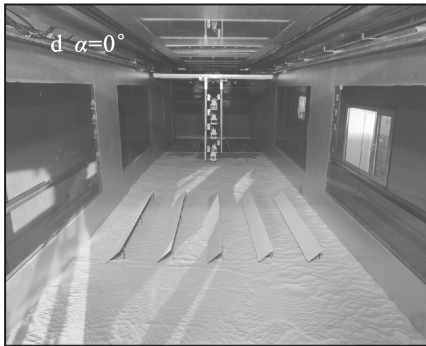
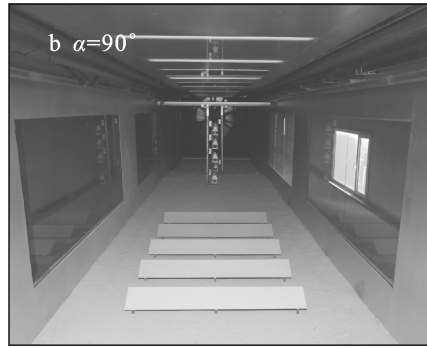
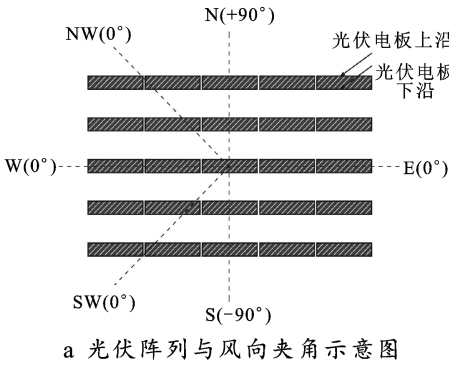


图 3 光伏阵列与风向不同夹角(α)风洞模拟试验布设示意图

试验具体步骤为: ①先将制作好的模型按照试验角度放置; ②铺设沙床, 沙床铺设宽度与风洞试验段宽度一致, 沙床铺设长度为 5 m, 沙床铺设厚度为 12 cm。为了控制光伏电板模型下沿到沙床的垂直距离对于每一排光伏电板模型相等, 在支架上标记了沙床的表面应该达到的相对位置, 在此基础上铺平沙床; ③利用三维激光扫描仪记录吹蚀前地表形态数据; ④安装光伏电板, 再次为了准确控制光伏电板模型与沙床之间的距离, 两侧放置 2 cm 厚度木条, 安装时光伏电板模型下沿紧贴木条为止; ⑤按照设定风

速启动风机, 吹蚀时间为 5 min; ⑥观测地形变化, 停止吹蚀后取下模型板。

为了便于比较吹蚀前后地表形态变化, 三维激光扫描仪一直处于固定位置, 再次扫描记录吹蚀后地表形态数据。

每个处理重复试验步骤时, 对沙床整体的地表形态进行复原处理, 保证每次试验时沙床表面条件接近一致, 消除地表形态变化对试验结果的影响。最终利用吹蚀前后地表形态扫描数据分析不同风向条件下光伏阵列地表形态变化规律。

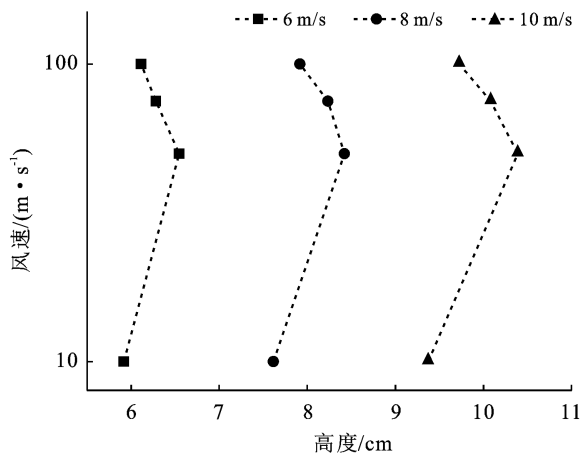


图4 风洞模拟试验入射风速廓线

1.5 数据处理

利用 RISCAN PRO 软件做前处理。首先人工目视删除冗余点云数据,进行降噪处理。接着对点云数据进行矢量化,为了保证吹蚀前后地表形变参数的可比性,对于每一次吹蚀前后所扫描得到的图像数据共用同一基准面进行处理。最终调整参数建立三角网,生成 DEM。利用 ArcGIS 软件做后处理:首先运用 Create Tin 工具生成不规则三角网,接着运用 TIN to Raster 工具生成 DEM,导出成栅格数据。对每一个处理条件下吹蚀前和吹蚀后的图像数据处理后,最终运用栅格计算器工具作差得到光伏阵列模型架设后沙床表面形态变化特征。

2 结果与分析

2.1 光伏阵列地表蚀积空间分布规律

所有风况条件下在 6, 8 和 10 m/s 风速梯度作用下地表蚀积规律基本相似,以 8 m/s 风速条件下地表蚀积规律为例进行分析。夹角为 90°时光伏阵列地表吹蚀和堆积空间分布规律如图 5a 所示。迎风侧第 1 排电板蚀积强度最大,电板下沿位置表现为重度风蚀,形成横向风蚀沟槽,风蚀深度最大可达 3.457 cm,在板间廊道区域表现为轻度堆积状态。由于第 1 排电板的遮蔽作用第 2 排电板区域蚀积强度开始大幅下降,板下区域表现为轻度堆积状态,板下沿位置表现为轻度风蚀状态。第 3—5 排电板区域蚀积活动相对较弱。夹角为 45°时光伏阵列地表吹蚀和堆积空间分布规律如图 5b 所示。可以看出,整体蚀积强度较大,风蚀沟槽和堆积沙垄方向为横向,可见夹角为 45°条件光伏阵列对过境气流存在“整流作用”。最大风蚀深度达 4.901 cm,堆积高度达 2.796 cm。迎风侧第 1 排电板在下沿位置形成横向风蚀沟槽,且以重度和中度风蚀为主。迎风侧第 2—5 排电板则表现出近风段

迎风侧风蚀高于堆积,风蚀沟槽宽深而堆积沙垄窄低。远风段背风侧堆积高于风蚀,风蚀沟槽变得窄浅而堆积沙垄变得宽高。夹角为 0°条件光伏阵列地表蚀积空间分布规律如图 5c 所示。可以看出,由于此时气流容易从光伏阵列内穿过,地表蚀积变化较小,基本以轻度风蚀和堆积为主,地表蚀积规律表现出顺光伏电板排布方向横向风蚀浅沟和堆积沙带相间分布。夹角为 -45°时光伏阵列地表风蚀和堆积空间分布规律如图 5d 所示,迎风侧第 1 排电板下沿位置表现为中度风蚀,形成横向风蚀沟。在板下和板间区域轻度和中度堆积形成沙垄,沙垄方向非横向分布,而是大致形成 2 条与来流方向接近的沙垄。第 2—5 排电板区域电板下沿位置仍表现为轻度和中度风蚀,但风蚀沟槽分布发生了顺风方向的略微倾斜,板下和板间堆积沙垄分布则与第 1 排一致,方向上接近来流方向,尤其是第 5 排电板堆积沙垄方向基本与来流方向一致,与阵列呈 45°。夹角为 -90°时光伏阵列地表风蚀和堆积空间分布规律如图 5e 所示,地表蚀积变化主要发生在迎风侧第 1 排电板区域,下沿位置表现为中度和轻度风蚀状态,形成横向风蚀沟槽,风蚀深度最大为 2.831 cm,从板下中部区域开始堆积,至电板上沿位置堆积高度达到最大,板间区域主要为轻度堆积状态。在第 1 排的遮蔽作用第 2 排电板蚀积强度开始大幅下降,第 2—5 排中部区域在电板下沿位置表现为轻度风蚀,在板间区域则表现为轻度堆积和风蚀并存状态,接近平衡态。

2.2 光伏阵列地表纵向剖面形态

风洞模拟在两侧存在边壁效应,中轴线位置的模拟效果相对最佳。为了消除风洞试验的边壁影响,需要指出本研究中 0°和 ±90°条件的剖面形态为风洞中轴线附近位置纵向剖面形态,±45°为光伏阵列中线位置剖面形态。不同夹角条件下光伏阵列纵向剖面形态特征如图 6 所示。由图 6 可以看出,夹角为 0°时地表蚀积变化最小,地表沙床蚀积高度差仅为 1.265 cm。夹角为 90°时,迎风侧第 1 排和第 2 排风蚀和堆积活动较强,迎风侧第 1 排电板下沿处风蚀深度最大,在第 1 排和第 2 排电板位置堆积高度最大,3—5 排电板位置地表蚀积活动微弱。风蚀深度最高达 3.300 cm,堆积高度达 0.875 cm,蚀积高度差为 4.175 cm。夹角为 -90°时,地表蚀积活动主要集中在迎风侧第 1 排,2—4 排电板位置地表蚀积变化较小,且最大风蚀和堆积位置与夹角为 90°时一致。风蚀深度最高达 2.490 cm,堆积高度达 0.800 cm,蚀积高度差为 3.290 cm。夹角为 ±45°时,光伏阵列不同部位蚀积规律相似,夹角为 -45°时,最大风蚀深度为 2.486 cm,最大堆积高

度 0.981 cm, 蚀积高度差为 3.467 cm。夹角为 45° 时, 相同风速条件下蚀积强度最大, 最大风蚀深度为 3.636 cm, 最大堆积高度 1.793 cm, 蚀积高度差达到 5.429 cm。此外, 夹角为 -45° 和 -90° 时地表蚀积强度低于夹角为 45° 和 90° 时, 夹角为 45° 时风蚀深度、堆

积高度和蚀积高度差为夹角为 -45° 时的 1.463, 1.828 和 1.566 倍, 夹角为 90° 时则为夹角为 -90° 时的 1.325, 1.094 和 1.269 倍。由此可见, 夹角为正值时比绝对值相等负值情况下光伏阵列地表蚀积活动更加强烈。

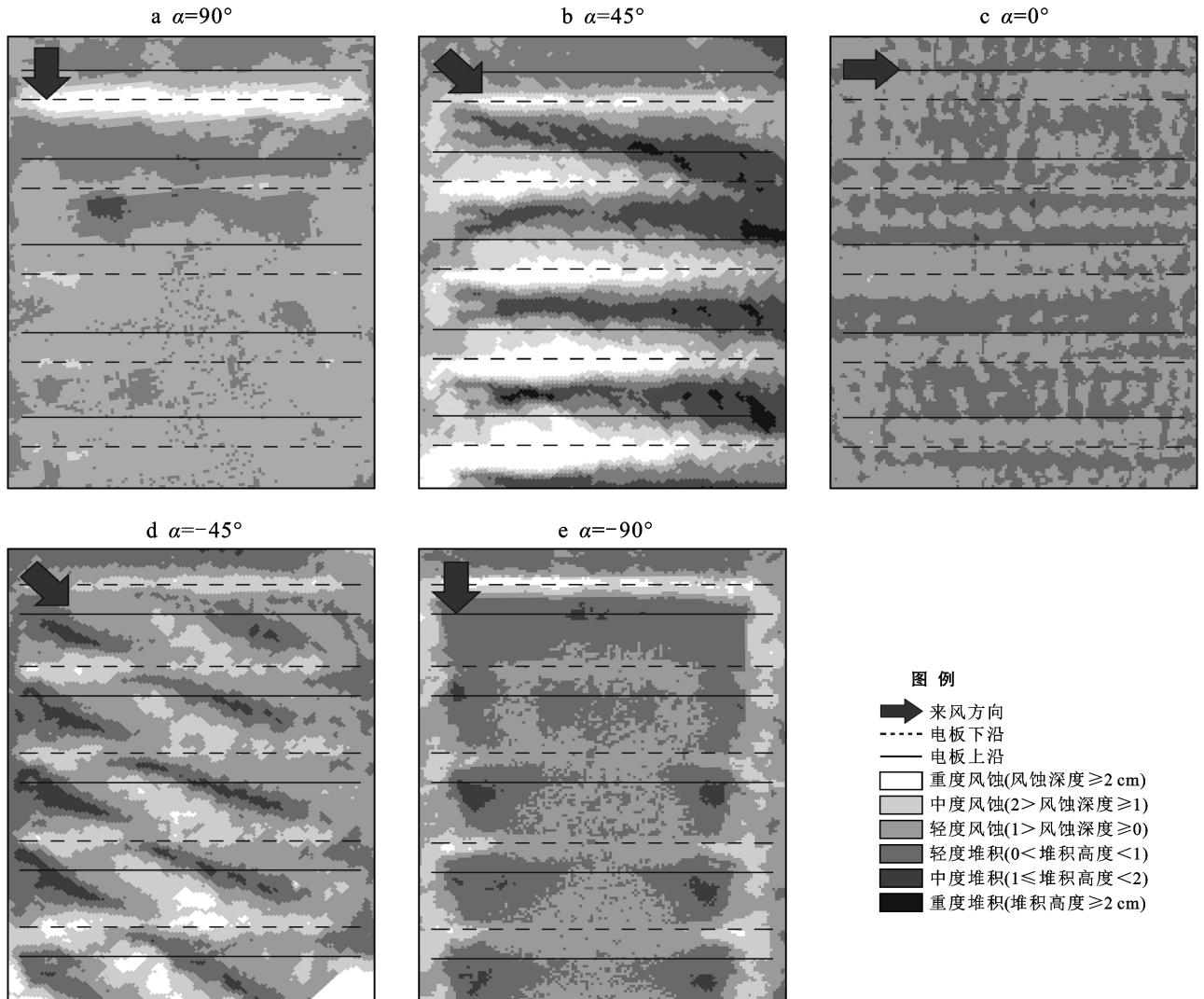


图 5 光伏阵列与风向不同夹角(α)条件下地表蚀积空间分布

3 讨论

群体光伏电板的布设对周围近地层风能环境产生影响, 光伏阵列不同部位电板表面风压特性不同, 形成干扰效应。殷代英等和袁方等通过野外试验研究发现光伏阵列使得过境气流 2 m 高度处风速下降 53.92% 和 63.68%。Jubayer 等^[17]、Bitsuamlak 等^[19]和 Warsido 等^[20]分别利用数值模拟方法研究得出, 来流方向垂直于光伏阵列时, 迎风侧第 1 排电板空气阻力系数较高, 下风向排布的电板则在第 1 排电板的遮蔽效应下风速急剧下降。Etyemezian 等^[18]研究发

现当风向在 $150^\circ \sim 180^\circ$ 范围内, 即风向为南偏东 30° 范围内, 风速平均衰减超过 55%。当风向在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内, 即风向为北偏东 30° 范围内, 风速平均衰减超过 50%。可以看出光伏阵列对过境气流主要起到了遮蔽效应, 使得阵列内近地层风速降低, 而且降低幅度与环境风向和光伏阵列间的夹角存在一定关系。笔者野外试验研究发现, 光伏阵列对近地表风沙通量有拦截效应, 而且 also 与环境风向和光伏阵列间的夹角有显著相关关系。风向在 $257.7^\circ \sim 352.2^\circ$ 范围内, 即风向与光伏阵列夹角在 $-12.30^\circ \sim 82.19^\circ$ 范围内, 光伏阵列近地层 30 cm 高度范围内水平输沙通量降低

幅度在 35.34%~93.02% 之间,且夹角增大而增大。当夹角超过 45° 时,光伏阵列平均可降低近地层 84.63% 的水平输沙通量^[21]。

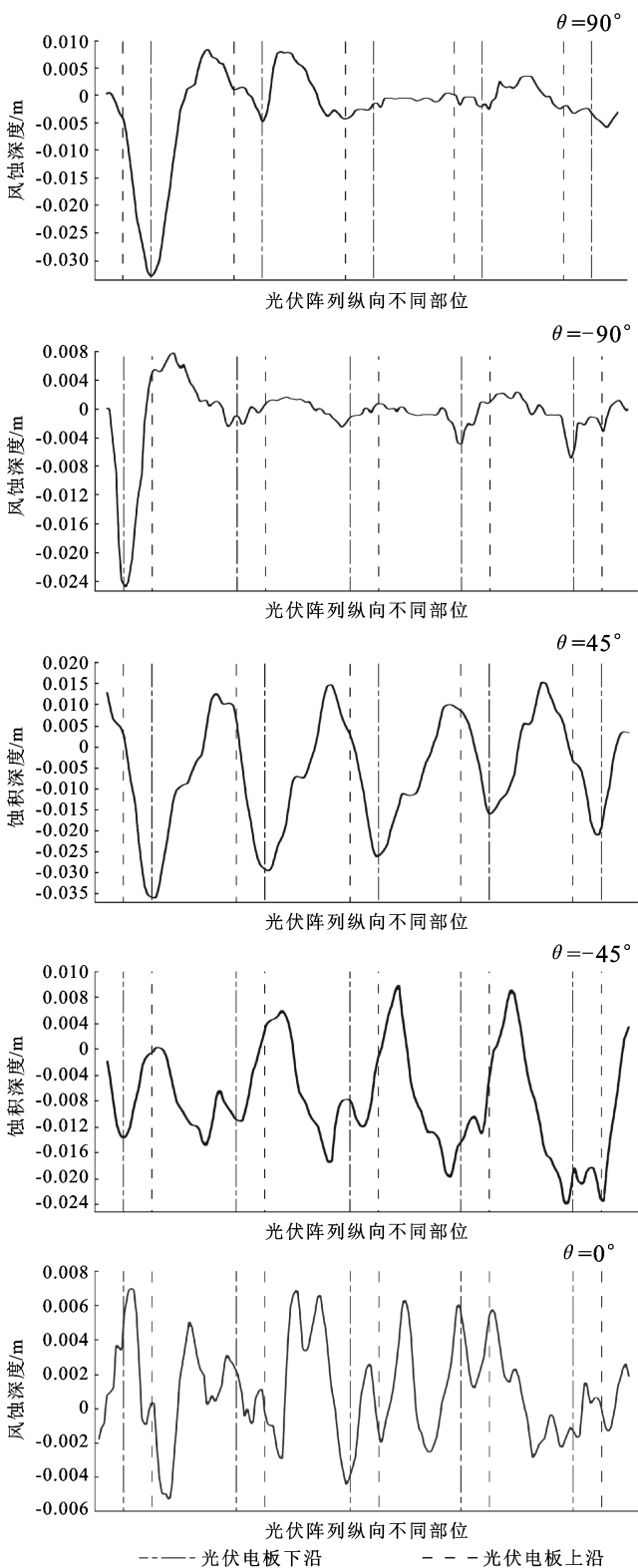


图6 光伏阵列纵向剖面形态

风是控制地表吹和堆积过程的关键因素之一,也是塑造地貌类型的主要动力^[22]。风沙运动一旦发生

即表现为风沙流,风沙地貌的形成、形态学特征、演化及其运动都是风沙流运动的产物^[23]。然而,目前关于沙漠地区建设光伏阵列后地表形貌演化过程的认识非常有限,本研究通过风洞试验分析了光伏阵列与风向不同夹角下地表蚀积变化规律,结果显示夹角为 $\pm 90^\circ$ 时,迎风侧前两排电板区域地表蚀积变化强烈,3—5排电板区域在遮蔽作用下风沙活动强度大幅降低。夹角为 $\pm 45^\circ$ 时,气流更容易进入光伏阵列内部,所有电板区域蚀积变化规律较为相似,光伏阵列内蚀积活动较为强烈。这与上述关于光伏阵列扰动下风沙运动的数值模拟和野外试验结果相一致,即夹角接近 $\pm 90^\circ$ 时风沙活动主要集中在光伏阵列边缘区,下风向腹地区域则在遮蔽作用大幅下降。夹角为 $\pm 45^\circ$ 时,光伏阵列对过境风沙流的拦截作用相对夹角为 $\pm 90^\circ$ 条件下有所下降,因此光伏阵列内地表风沙活动较强。此外,夹角绝对值相等符号相反的风况条件下,夹角为正值比负值时光伏阵列地表风沙活动更为强烈,这是由于光伏阵列本身结构特性所致,对于过境气流的作用机理与风沙危害防治中的下导风工程相似。已有下导风工程领域相关模拟研究^[24-25]表明,当夹角为 $+90^\circ$ 时,倾角为 60° 的导板迎面来向气流在距离下沿约7/10的位置产生分离点,也就是说导板层流的70%导向地面端出风口,而30%导向大气端出风口。夹角为 -90° 时则正好相反,导板层流的30%导向地面端出风口。以此类比,可以很好地解释夹角为正值时光伏阵列内地表风蚀和堆积程度强于夹角为负值时的情况。

本研究结果显示在6,8和10 m/s风速梯度作用下,夹角为 0° 条件下光伏阵列地表蚀积变化以轻度风蚀和堆积为主。这与笔者野外实测结果存在一定差异,野外研究显示平均风速为8.34 m/s条件下光伏电板下沿附近表现为强烈风蚀,风蚀深度达12.44 cm,板前向板间区域表现为堆积,堆积高度达7.38 cm,板间和板后位置蚀积活动相对较弱^[26]。这是由于尺寸较大的光伏电板的群体布置,本身就会使得板下侧气团的挤压程度高于板前侧,进而就会导致板下气流运动时的阻力系数较大,风速降低。风速实地观测结果也显示电板下沿两侧存在一定的速度差,速度差导致气压差,气压差则导致气流有从板下侧向板前侧运动的趋势,从而导致气流在电板下沿处运动方向发生倾斜。进一步在光伏电板斜向地面的导流作用下,使得光伏电板下沿地表发生风蚀^[26-27]。风洞试验由于模型尺寸较小不足以引起板下和板前侧气压差,因此模拟结果没有达到理想状态。

4 结论

本研究通过风洞模拟试验主要分析不同光伏阵列与风向夹角条件下光伏阵列地表形态变化规律,得到如下结论。夹角为 $\pm 90^\circ$ 时,迎风侧前两排电板区域地表蚀积变化强烈,第 3—5 排电板区域地表蚀积变化强度大幅降低。夹角为 $\pm 45^\circ$ 时,光伏阵列区域整体蚀积变化规律较为相似,且此时挟沙气流更加容易进入光伏阵列内部,地表蚀积活动更为强烈。此外,夹角绝对值相等符号相反的风况条件下,夹角为正值比负值时光伏阵列地表风沙活动更为强烈。依据本研究结论,沙区光伏电站次生风沙危害的防治应充分考虑区域主害风向条件,当光伏阵列与主害风向夹角较大时,需重点做好迎风侧边缘区域沙害防治工作,当夹角较小时,则需要同时做好光伏阵列腹地区域沙害防治工作。而且,边缘区域以阻沙和固沙为主,腹地区域以固沙和输沙为主。

[参 考 文 献]

- [1] Dudley B. BP Energy Outlook [M]. UK-London: Report-Bp Energy Economics, 2019.
- [2] 周凌云.世界能源危机与我国的能源安全[J].中国能源, 2001,23(1):12-13.
- [3] 薛靛杰.试论新时期发展清洁能源促进低碳经济的途径[J].中国集体经济,2020(30):13-14.
- [4] 曾泽荣,李进,罗多,等.中国建筑分布式光伏利用现状及未来趋势分析[J].建设科技,2020(20):10-14.
- [5] 文小航,尚可政,王式功,等.1961—2000 年中国太阳辐射区域特征的初步研究[J].中国沙漠,2008,28(3):554-561.
- [6] 王炳忠,张富国,李立贤.我国的太阳能资源及其计算[J].太阳能学报,1980,1(1):1-9.
- [7] 王涛,赵哈林.中国沙漠科学的五十年[J].中国沙漠, 2005,25(2):145-165.
- [8] 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.
- [9] MacPherson T, Nickling W G, Gillies J A, et al. Dust emissions from undisturbed and disturbed supply-limited desert surfaces [J]. Journal of Geophysical Research, 2008,113(F2):F02S04.
- [10] 郭彩赞,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.
- [11] 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.
- [12] 戴恩琦,王欢欢,谢汝平,等.晶体硅表面纳米孔减反光结构的制备及其性能表征[J].光电子·激光,2017,28 (12):1325-1330.
- [13] 迟福建,葛磊蛟,洪博文,等.固定式光伏发电组件最佳倾角的聚类分析方法[J].电测与仪表,2018,55(13): 89-93.
- [14] Chin V J, Salam Z, Ishaque K. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review [J]. Applied Energy, 2015,154:500-519.
- [15] Villalva M G, Gazoli J R, Filho E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009,24(5):1198-1208.
- [16] 鲍官军,张林威,蔡世波,等.光伏面板积灰及除尘清洁技术研究综述[J].机电工程,2013,30(8):909-913.
- [17] Jubayer C M, Hangan H. A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 153:60-70.
- [18] Etyemezian V, Nikolich G, Gillies J A. Mean flow through utility scale solar facilities and preliminary insights on dust impacts [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017,162:45-56.
- [19] Bitsuamlak G T, Dagnew A K, Erwin J. Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD [C]// Chapel Hill, North Carolina, USA: The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, 2010.
- [20] Warsido W P, Bitsuamlak G T, Barata J, et al. Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array [J]. Journal of Fluids and Structures, 2014,48: 295-315.
- [21] 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.
- [22] Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, Li Chunxiao. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert [J]. Aeolian Research, 2015,17:1-13.
- [23] 董治宝,郑晓静.中国风沙物理研究 50 年(II)[J].中国沙漠,2005,25(6):795-815.
- [24] 辛林桂,程建军,王连,等.基于 DesignExploration 方法对铁路下导风工程关键设计参数的优化[J].中国沙漠, 2018,38(6):1193-1199.
- [25] 陈柏羽,程建军,辛林桂,等.基于离散伴随求解器的铁路下导风工程外形优化研究[J].铁道科学与工程学报, 2019,16(8):1923-1930.
- [26] 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.
- [27] Tang Guodong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Wind-sand movement characteristics and erosion mechanism of a solar photovoltaic array in the middle of the Hobq Desert, Northwestern China [J]. Journal of Mountain Science, 2021,18(5):1340-1351.