

沙漠区光伏阵列布局对近地表风沙流场的影响

田小武¹, 唐希明¹, 陈淑瑾¹, 雷永华², 张凯³, 屈建军⁴

[1. 中卫市自然资源局 国有林业总场, 宁夏 中卫 751700;

2. 海原县农业农村局, 宁夏 中卫 751700; 3. 兰州交通大学 土木工程学院,

甘肃 兰州 730070; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458]

摘要: [目的] 探究通过提升光伏板安装高度以抑制其下部狭管效应, 从而减轻板下风蚀与风积, 为保护荒漠地区原生植被和干旱沙漠区可再生能源开发提供科学依据。[方法] 采用数值模拟与现场实证观测相结合的研究方法, 重点考察了入口风速、光伏板安装高度及阵列排布方式等关键参数对阵列周围风场特性的影响规律。[结果] 数据验证结果表明, 数值模拟结果与风速观测值的最大相对误差仅为 7%, 验证了研究方法的可靠性与准确性。①气流经过光伏阵列时, 首排光伏板迎风侧形成减速区, 背风侧及板顶风速显著增大, 近地面出现局部高速区; 在多排阵列中, 受前排阻滞作用, 下游风速逐渐衰减, 板间交替形成低速区与涡流区, 整体风速降低。②背风侧涡流强度表现为首排最强、次排减弱, 且随入口风速与安装高度增加, 涡流强度先增强后趋于稳定。③3排光伏板之间及第3排背风侧均形成双旋涡结构, 板间旋涡强度明显高于背风侧, 且分别呈现逆时针与顺时针旋转特征; 随风速和安装高度增加, 旋涡区域扩大, 强度先增后稳。④风速增大显著提高了沙粒体积分数及其影响范围; 增加光伏板安装高度可改善板下气流流通, 减少近板堆积; 而增加阵列排数会扩大沙粒影响范围, 多排结构引起的涡流交互作用加剧了沙粒的扩散与不均匀分布。[结论] 增大风速是提升沙粒体积分数与扩散范围的首要驱动, 增加安装高度为板下气流流通提供了关键途径, 从而促进输运, 减少堆积, 而增加阵列排数则通过涡流交互这一核心机制, 显著扩大影响范围并导致沙粒分布更趋不均。

关键词: 沙漠地区; 光伏阵列; 流场演化; 数值模拟

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)01-0236-14

中图分类号: TM615, P463.22

文献参数: 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): 236-249. Tian Xiaowu, Tang Ximing, Chen Shujin, et al. Influence of photovoltaic array configuration on near-surface aeolian sand flow in desert areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 236-249.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.014

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.014

Influence of photovoltaic array configuration on near-surface aeolian sand flow in desert areas

Tian Xiaowu¹, Tang Ximing¹, Chen Shujin¹, Lei Yonghua², Zhang Kai³, Qu Jianjun⁴

[1. Zhongwei Natural Resources Bureau, State-owned Forestry Farm, Zhongwei,

Ningxia 751700, China; 2. Haiyuan County Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Zhongwei,

Ningxia 751700, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, Guangdong 511458, China]

Abstract: [Objective] The effectiveness of elevating photovoltaic panel installation height in mitigating wind erosion and deposition by suppressing the Venturi effect was investigated, in order to provide a scientific basis for protecting native vegetation in desert regions and for renewable energy development in arid desert areas. [Methods] A combined approach of numerical simulation and field observations was employed to examine the influence of key parameters-including inflow wind speed, photovoltaic panel installation height, and array layout

收稿日期: 2025-07-13

修回日期: 2025-10-13

采用日期: 2025-10-14

资助项目: 企业横向课题“2024年中卫市腾格里锁边固沙技术推广项目”(2024ZY07); 兰州市青年科技人才创新项目“‘双碳背景’下沙区大型集中式光伏电站风沙尘与光伏板互馈机理研究”(2023-QN-28)

第一作者: 田小武(1979—), 男(汉族), 宁夏回族自治区海原县人, 本科, 高级工程师, 主要从事光伏治沙方面的研究。Email: 84212939@qq.com。

通信作者: 张凯(1988—), 男(汉族), 山东省潍坊市人, 博士, 副教授, 主要从事光伏治沙方面的研究。Email: 18293191331@163.com。

configuration-on wind field characteristics around the array. [Results] Data validation results showed that the maximum relative error between numerical simulation results and measured wind speeds was only 7%, demonstrating the reliability and accuracy of the research methodology. ① When airflow passed through the photovoltaic array, a deceleration zone formed on the windward side of the front row panels, while wind speeds on the leeward side and panel tops increased significantly, creating localized high-speed zones near the ground. In multi-row arrays, downstream wind speeds gradually decreased due to blocking by upstream rows, with alternating low-speed zones and vortex regions forming between panels, resulting in overall wind speed reduction. ② Leeward vortex intensity was the strongest behind the first row and decreased behind the second row. As incoming wind speed and installation height increased, vortex intensity initially intensified before stabilizing. ③ Double vortex structures formed both between the third-row panels and on their leeward side. Vortex intensity between panels was significantly higher than on the leeward side, exhibiting counterclockwise and clockwise rotation patterns, respectively. As wind speed and installation height increased, the vortex area expanded, with intensity first increasing and then stabilizing. ④ Increased wind speed significantly elevated sand particle volume fraction and expanded its influence zone. Increasing installation height improved airflow circulation beneath panels, reducing accumulation near panels, while adding array rows broadened the sand particle influence zone. Vortex interactions in multi-row structures further exacerbated particle dispersion and uneven distribution. [Conclusion] Increasing wind speed is the primary driver for enhancing sand particle volume fraction and diffusion range. Elevating installation height provides a critical pathway for airflow circulation beneath panels, thereby promoting transport and reducing accumulation. Meanwhile, increasing the number of array rows significantly expands the influence range through vortex interaction as the core mechanism, resulting in more uneven sand particle distribution.

Keywords: desert regions; photovoltaic array; flow field evolution; numerical simulation

近年来,为践行“碳达峰碳中和”战略,中国积极推进沙漠、戈壁、荒漠地区的大型风电光伏基地建设,依托西部地区丰富的太阳能与土地资源构建新型能源体系^[1]。西北地区光照充足,土地成本低,已成为大规模地面光伏电站建设的战略区域^[2]。然而,沙漠与戈壁在下垫面性质及风沙环境方面存在显著差异。沙漠地表为松散细沙,支架基础易发生风蚀掏掘和不均匀沉降;戈壁则以坚硬砾石为主,抗侵蚀能力较强。

西北光伏矩阵面临多重风沙致灾机制^[3],风沙复合作用通过三个维度影响电站运行:①地表风蚀形成掏蚀槽,致使基础失稳,积沙诱发二次扬尘^[4];②面板积尘导致透光率下降,输出功率大幅衰减^[5-6];③极端风沙荷载引发结构共振,造成连接件疲劳断裂甚至阵列级联失效^[7]。这些灾害链严重制约沙漠光伏电站的安全运行与经济效益。

光伏电站的流场特性对于阐明光伏组件防风固沙机理具有重要作用。目前,光伏阵列风场特征研究已取得系列重要进展。例如,高一帆等^[8]通过风洞试验研究了光伏支架阵列的风致响应特性,发现阵列各排组件间存在显著的气动干扰效应,其中第2和3排组件在8~15 m/s风速范围内易发生尾流致振现象。Jubayer等^[9]基于Open Foam平台的数值模拟,发现多排光伏阵列中后续组件均处于首排尾流区,

且涡流位置具有显著的风向依赖性。王浩等^[10]结合风洞试验与数值模拟,系统分析了6~10 m/s风速范围内光伏板在正、反风向下的流场变化规律。结果表明,光伏板改变了近地表风速和流场,形成了板前气流抬升区、板下气流加速区、板后涡流减速区及板尾气流恢复区。王建勃等^[11]的数值模拟研究揭示了光伏阵列风荷载的衰减特性,首排组件承受最大风压,后续阵列风荷载呈波动衰减趋势。针对复杂地形条件,Yao Jianfeng等^[12]通过风洞试验验证山坡坡度对山地光伏阵列风荷载分布具有决定性影响。此外,Xu Ang等^[13]采用数值模拟与风洞试验相结合的方法,分析了排间距和离地间隙的影响,发现行距是影响风荷载分布的关键参数,而离地间隙的影响相对有限。这些研究成果为深入理解光伏阵列与风场的相互作用机制奠定了重要基础。

综上所述,当前国内外关于光伏电站的研究主要聚焦于光伏板尾流效应及风荷载特性分析。针对光伏板安装高度、阵列排布方式与沙漠风沙流场之间的相互作用机制尚不明确,亟待深入研究。因此,本文以光伏板为研究对象,通过数值模拟方法,并通过现场试验验证,分析沙漠地区光伏阵列的风沙流场、涡量、速度变化特征,揭示风沙流与光伏阵列之间的相互作用机制,期望通过提高光伏板的高度,削弱板下狭管效应,减少板下风蚀和风积,这不仅为干

旱沙漠区可再生能源开发提供科学依据和设计优化方向,而且有利于保护原生植被。

1 研究方法及其验证

1.1 计算模型及控制方程

在充分考虑计算机实际性能和沙相数量的基础上,采用欧拉-欧拉法进行数值模拟。流体速度为6~14 m/s,温度为20℃,与静止流体相比,数值模拟中流体密度变化范围为0.06%~0.24%。因此,数值模拟中的流体可近似视为不可压缩流体。风沙运动是一种典型的气固两相流运动,在欧拉-欧拉法中,气相和沙粒相均采用欧拉法进行处理,将气相和沙粒相均视为连续性介质。标准 $k-\epsilon$ 模型是对湍动能输运方程和耗散率方程进行推导计算,以此完成对流体运动特征的模拟,其适用范围广泛,计算精度较高,已经成为当下数值模拟中最常用的一种湍流输运模型^[14]。其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 v_1) + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 v_1 v_1) = -\alpha_1 \nabla p + \nabla \cdot \tau_1 + \alpha_1 \rho_1 g + k_{12}(v_1 - v_2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2 v_2) + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 v_2 v_2) = -\alpha_2 \nabla p - \nabla p_2 + \nabla \cdot \tau_2 + \alpha_2 \rho_2 g + k_{21}(v_2 - v_1) \quad (2)$$

式中: u_i 为速度沿*i*方向的分量(m/s); t 代表时间(s); ρ 代表空气密度(kg/m³); k 为湍动能(m²/s²); ϵ 为湍动耗散率(m²/s³); μ 为动力黏度(Pa·s); μ_t 为湍动黏度(Pa·s); G_k 为空气相平均速度梯度产生的湍动能(m²/s²); $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为与湍动能及其耗散率对应的特朗普常数, $\sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3$; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 为经验常数, $C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92$ 。

风沙两相流,从本质上来说就是气固两相流,即把流场中的气相和固相均视为连续性介质,气相和固相同时充斥在整个计算域,建立起一套包含多个连续性方程和动量方程的方程组,以此来求解气相和固相。在数值模拟的求解过程中,风沙流运动主要满足以下方程。

(1) 质量守恒方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i v_i) = 0 \quad (3)$$

式中: α_i 为*i*相的体积分数,此外 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; ρ_i 为*i*相的密度(kg/m³); v_i 为*i*相的速度(m/s)。

(2) 动量守恒方程。

①气相流:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 v_1) + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 v_1 v_1) = -\alpha_1 \nabla p + \nabla \cdot \tau_1 + \alpha_1 \rho_1 g + k_{12}(v_1 - v_2) \quad (4)$$

②固相流:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2 v_2) + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 v_2 v_2) = -\alpha_2 \nabla p - \nabla p_2 + \nabla \cdot \tau_2 + \alpha_2 \rho_2 g + k_{21}(v_2 - v_1) \quad (5)$$

式中: ρ 为气相、固相的共享压力(N/m²); τ_1, τ_2 分别为气相、固相的应力应变张量(N/m²); g 为重力加速度(m/s²); k_{12}, k_{21} 分别为气相、固相的动量交换系数[kg/(m³·s)]。

1.2 几何建模与网格划分

本研究针对单排、双排及三排光伏阵列开展数值模拟分析,在中国北方地区,光伏板一般朝南方向,风向一般为北风。图1为双排光伏阵列示意图。为确保建模精度并避免几何信息缺失,本研究采用与Fluent具有良好兼容性的Ansys SCDM 2019R3软件进行前处理建模。计算域设置为长150 m×高30 m的矩形区域,光伏板安装倾角为39°,其实际长度为4.05 m,地面投影长度为3.15 m。重点考察4种不同安装高度工况:板底距地面高度*H*分别为0.5, 1.0, 1.45和2 m,对应板顶高度分别为3.05, 3.55, 4.00和4.55 m。所有排布方案单排、双排及3排光伏板均采用统一几何参数,且多排布置时阵列间距固定为6.0 m。

图2展示了单排、双排及三排光伏阵列的网格划分结果。研究采用Workbench Mesh中的四面体非结构网格划分方法,通过在光伏板附近设置0.1 m的最小网格尺寸和对计算域采用0.5 m的最大网格尺寸,实现了对光伏板周围流场特征的精确捕捉。为确保近壁区流动模拟的准确性,在底部壁面设置了10层边界层网格,其中第1层边界层高度为 y^+ ,使第1层网格位于对数律分布的范围内,增长率为1.2。最终生成的网格中,单排、双排和三排光伏阵列的网格数量分别控制在70, 140和200万左右,且最大倾斜率均低于0.7,表明网格质量满足计算要求。这种网格划分方案在保证计算精度的同时,有效平衡了计算资源的消耗。

1.3 材料及边界条件

经现场实际调查,积沙主要以细沙为主,因此沙粒粒径设置为 10^{-4} m,沙粒密度为2 650 kg/m³,又因为在风沙两相流中,沙相为稀相,因此沙粒的体积分数设置为2%^[15],介质类型均为流体。在模型中,入口面设置为速度入口(velocity-inlet),假设流动发展完全,出口面设置为自由出流(out-flow),计算流域的上表面和左右两个侧面均设置为对称(symmetry),计算流域的下表面和光伏板均设置为壁面(wall)(详见表1)。模型设置的边界条件如图3所示。

在壁面处理方面,采用 standard wall functions 方法来准确模拟近壁面流动特性。空间离散方面,对流项采用二阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式。计算过程中设置收敛残差为 10^{-5} ,时间步长取 0.1 s。

1.5 试验方法验证

研究区位于“世行贷款宁夏黄河东岸防沙治沙项目”实施区内,地理坐标为 37.32—37.26 N, 105.03—104.4 E。该实施区东至迎水桥,西至甘塘,于 2013 年建立,位置属腾格里沙漠东南缘,隶属宁夏回族自治区中卫市沙坡头区。为实测光伏阵列流场特征,国家能源集团在项目区内拟建光伏项目段布设 HOBO 梯度风速仪,对现场风速进行观测(如图 4 所示)。并搭建了一组单排螺旋桩光伏阵列。该阵列长度为 14.48 m,投影宽度为 4.02 m,阵列前缘距地面高度为 1.45 m,后缘距地面高度为 4.0 m。其中,2022 年 8 月 25—30 日,在阵列前后选择空旷、光伏板后沿、光伏板中间、光伏板前沿 5 个位置,开展不同高度风速风向梯度观测。其中入口边界至光伏板后沿水平距离设置为 30 m。以光伏板后沿为坐标原点,沿风向布置监测点(如图 5 所示)。具体位置包括 P_2 板后沿($x=0$ m)、 P_3 板中心($x=2$ m)、 P_4 板前沿($x=4$ m)及 P_5 在板前 10 m($x=10$ m)和 P_1 板后 8 m($x=-8$ m)处。观测期内 8 月 27 日 22:00 至 8 月 28 日 20:00,当地风向为西北风(NW,平均风向 617°),与光伏阵列垂直,符合观测要求。因此,选择该时间段内风速风向数据对阵列周围流场特征进行分析。

图 6 为现场观测布置以及在 1 m 高度处风速观测与模拟对比结果。其中图 6a 为现场观测布点示意图。选取现场观测数据中 1 m 高度处 6 m/s 和 10 m/s 入口风速,与数值模拟得到的光伏阵列后沿、中间及前沿等关键位置的风速进行对比分析。结果如图 6b 所

示。对比结果表明,数值模拟结果与现场观测数据的最大相对误差仅为 7%,误差控制在 10% 以内,二者变化趋势基本一致,表明数值模拟结果与现场观测具有较好吻合度,验证了数值模拟方法的准确性。

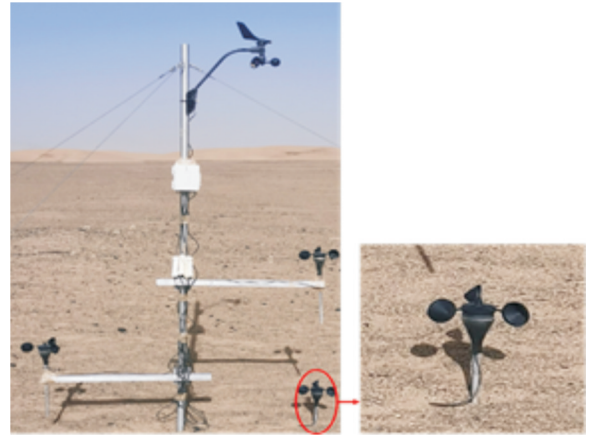
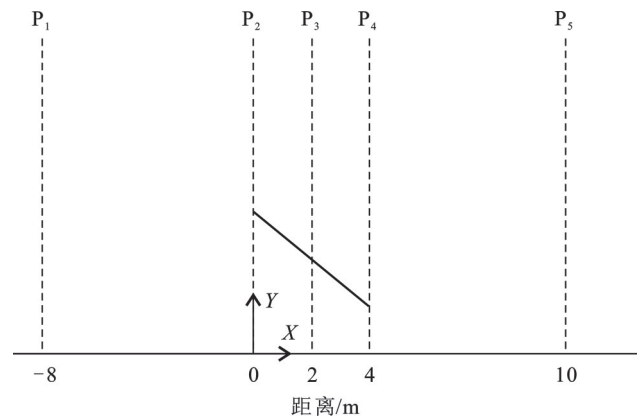


图 4 HOBO 梯度风速仪
Fig.4 HOBO gradient anemometer



注: P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 为沿风向布置的监测点。

图 5 光伏阵列周边风沙流场监测点布设示意图
Fig.5 Schematic diagram of monitoring point layout for wind and sand flow fields around photovoltaic array

a 现场观测布置



b 不同入口风速下光伏阵列不同位置实测与模拟风速对比

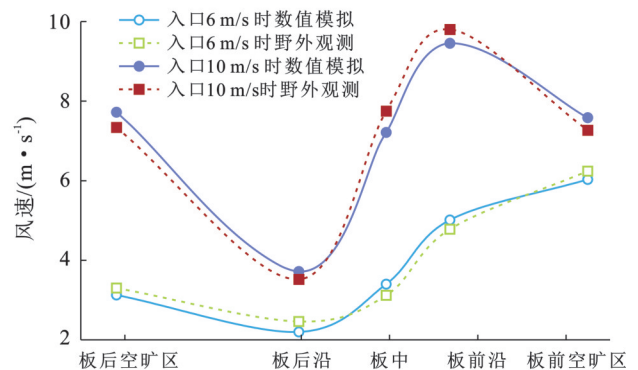


图 6 距地面 1 m 高度处风速观测与模拟结果对比

Fig.6 Comparison of observed and simulated wind speeds at 1 m above ground level

2 结果与分析

2.1 不同风速对光伏阵列周围流场与沙粒分布的影响

图 7 为光伏板下沿高度为 2 m 时,不同风速下双排光伏板的流场图。由图 7 可知,当气流接触前排光伏板时,气流受阻后在迎风侧形成明显的减速区,同时部分气流向上偏转并在光伏板上方和后方形成加速区。值得注意的是,由于光伏板倾斜安装的特殊几何构型,在板体下方近地面处产生了显著的局部高速区。在前排光伏板背风侧,气流分离形成了复杂的反向涡流结构,导致该区域出现持续逆流现象。随着入口风速的增大,光伏板后方的回流区长度从 18 m 扩展至 28 m,增幅超过 55%。同时,尾流区由 25 m 增至 35 m,显著增大了对下游阵列的遮蔽效应。随后气流在通过第 2 排光伏板后逐渐恢复至原始来流状态。

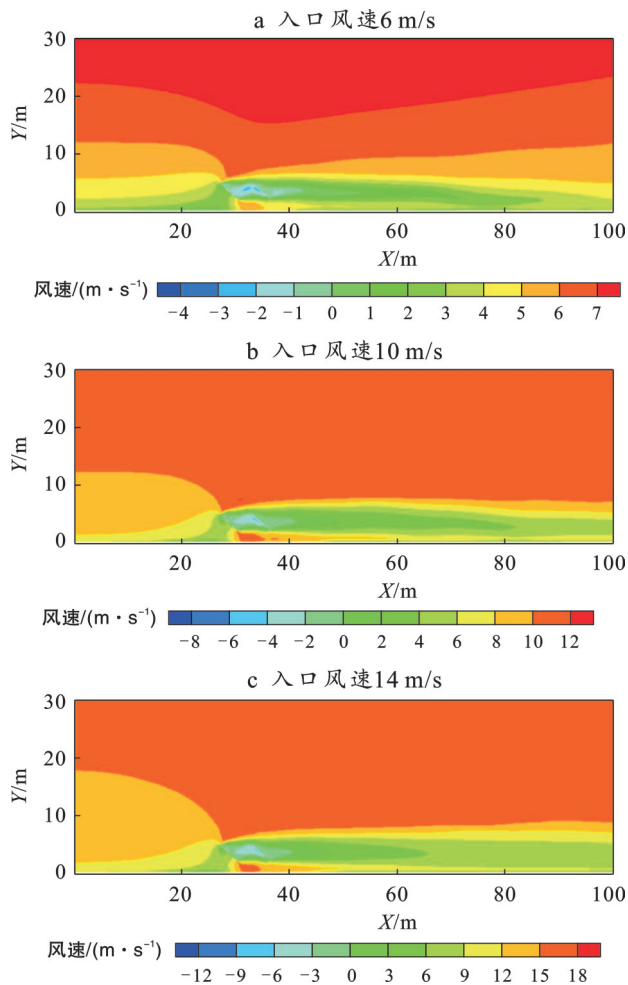


图 7 当光伏板下沿高度为 2 m 时,不同入口风速下双排光伏板的流场图

Fig.7 Flow field diagrams for double-row photovoltaic panels at different inlet wind speeds when lower edge of panels is 2 m above ground level

注: X 表示距计算域入口处的距离; Y 表示距垂直地面的高度。下同。

图 8 为当光伏板下沿高度为 2 m 时,不同风速下双排光伏板的涡量分布。由图 8 可知,由于第 1 排光伏板的存在使其背风侧周围涡流强度明显增大,产生影响范围大的高涡量,光伏板尾流区涡量值主要集中于 0~8 s⁻¹ 范围内。受第 1 排光伏板的影响,在第 2 排光伏板背风侧周围涡流强度减小。在第 1 排光伏板背风侧和第 2 排光伏板背风侧均形成顺时针涡旋。结果表明,随着入口风速增大,光伏板附近的涡量不断增加,其涡量影响范围也在不断增大。涡量值分布范围扩展至 0~14 s⁻¹,最大涡量值约 16 s⁻¹,增幅达 33%。当入口风速达到 14 m/s 时,最大涡量值达到 20 s⁻¹,较 12 m/s 风速下增大 25%,较 10 m/s 风速增幅达 67%。

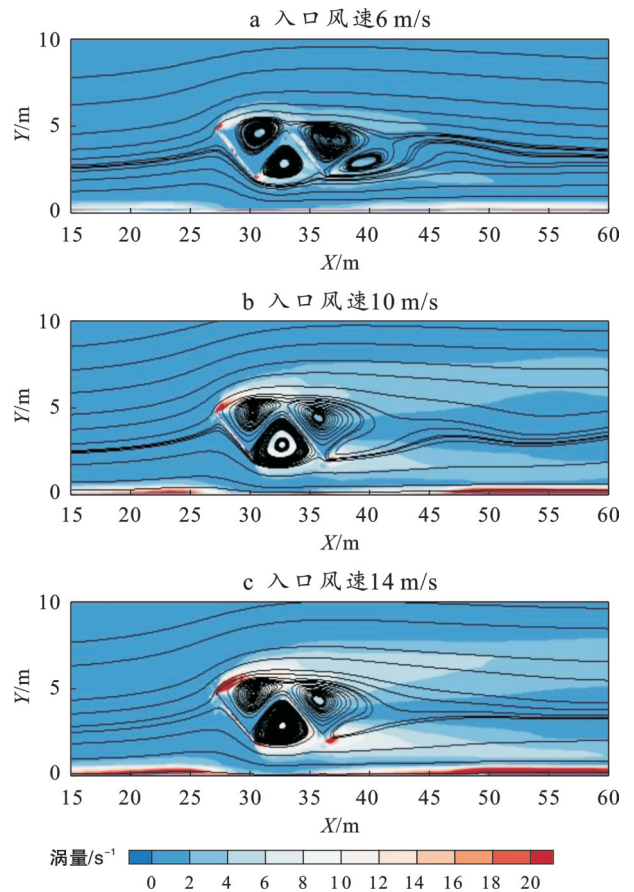


图 8 光伏板下沿高度为 2 m 时,不同入口风速下双排光伏板的涡量分布

Fig.8 Vortex distribution downstream of double-row photovoltaic panels at different inlet wind speeds when lower edge of photovoltaic panels is 2 m above ground level

图 9 为当光伏板下沿高度为 2 m 时,不同风速下双排光伏板的流线图。由图 9 可以观察到,气流在流经光伏板阵列时,受到光伏板的阻挡作用,在光伏板阵列之间以及第 2 排光伏板背风侧均形成了明显的涡流结构。在每排光伏板的下缘后方均产生了一个

显著的逆时针旋转涡流,同时在光伏板上区域均伴随产生一个顺时针旋转的涡流。第1排光伏板背风侧形成的回流区长度约为板高的1.8倍,回流区内流速显著降低至入口速度的20%~30%。值得注意的是,第1排与第2排光伏板产生的涡流强度存在显著差异,其中光伏板阵列之间形成的涡流强度明显大于第2排光伏板背风侧的涡流。通过对比不同风速条件下的流场特征发现,当入口风速为14 m/s时,所产生的涡流强度显著高于6 m/s和10 m/s时的涡流强度。两排光伏板之间的流场区域出现多个局部涡旋结构,最大流速区域出现在光伏板顶部尖缘处。

图10为光伏板下沿高度为2 m时,双排光伏阵列周围的风速分布特征。研究发现,气流在通过光伏阵列时表现出先减小后增大再减小的变化趋势。在近地面区域(距离地面高度 $y=0.1\sim 0.3$ m),气流经过第1排光伏板时出现显著加速现象。以 $y=0.1$ m为例,风速从 $X=24.4$ m处的1.6 m/s迅速增至 $X=33.3$ m处的5.86 m/s。第2排光伏板后方的加速效应明显减弱,增幅从第1排的约266%降至11%。随着高度增加至 $y=1$ m,气流加速幅度减小,但涡流现象开始显现。第1排光伏板后方的风速从2.17 m/s增至6.55 m/s,增幅202%,而第2排后方仅增加8.6%。在更高位置 $y=2$ m,虽然第1排光伏板后方仍出现192%的显著增速,但第2排后方的增幅骤降至2.3%,同时涡流强度明显增强。在 $y=4.55$ m高度处,流场变化趋势相似。对比分析不同入口风速(6 m/s,10 m/s和14 m/s)条件的流场变化规律,发现其具有相似性。但随着入口风速的增加,各高度层的速度值均呈现增大的特征。

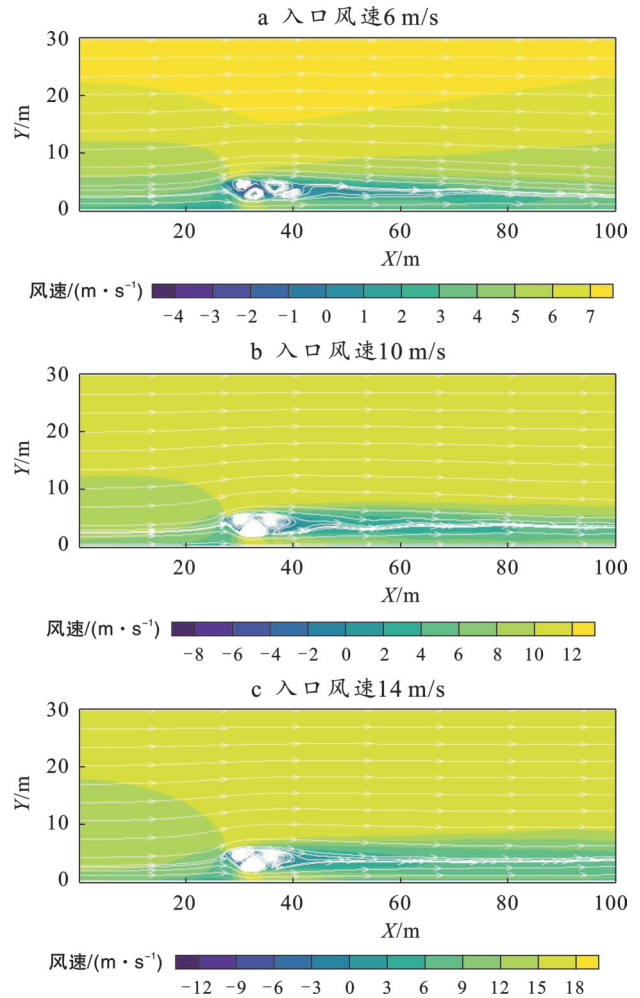


图9 光伏板下沿高度为2 m时,不同入口风速下双排光伏板的流线图

Fig.9 Streamline diagrams for double-row photovoltaic panels at different inlet wind speeds when lower edge of panels is 2 m above ground level

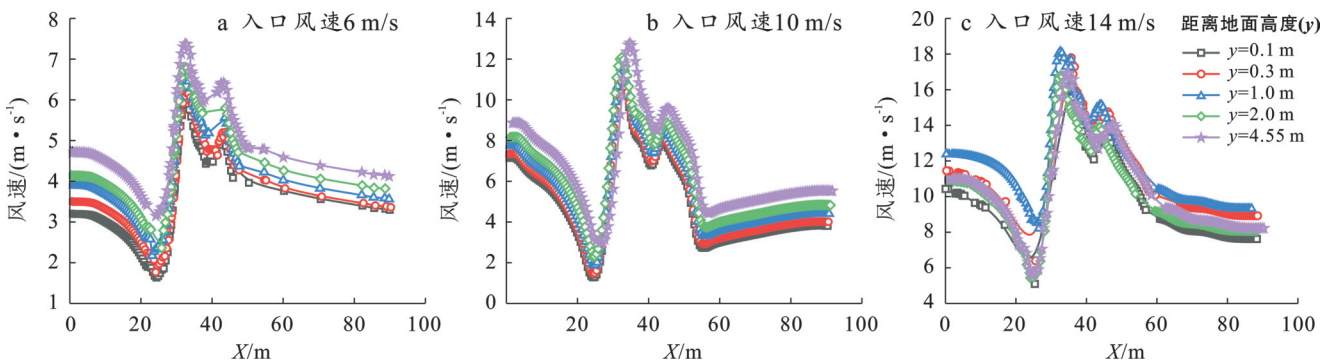


图10 光伏板下沿高度为2 m时,不同入口风速下双排光伏板的不同高度处流速对比图
Fig.10 Comparison of inlet wind speeds at different heights of double-row photovoltaic panels at a lower edge height of 2 m above ground level

图11为光伏板下沿高度为2 m时,不同风速下双排光伏板沙粒体积分数变化规律。由图11可以看出风速对沙粒输运与堆积行为的显著影响。在6 m/s风速条件下,沙粒体积分数整体较低,高浓度

区域范围较为有限,主要分布在 $X=30\sim 35$ m的近地范围内,最大体积分数约为 1.30×10^{-4} ,表明沙粒在板下及背风侧近地位置发生轻微堆积。随着风速增大至10 m/s,沙粒体积分数显著升高,高浓度区范围

明显扩大并向下风向延伸,集中于 $X=32\sim 38\text{ m}$ 的区域内。在 14 m/s 风速条件下,沙粒体积分数达到最大,高浓度区范围进一步扩展。综合来看,随风速增加,沙粒不仅运输总量增大,影响的空间范围也随风速增加而显著增强。

2.2 不同安装高度对光伏阵列周围流场与沙粒分布的影响

图 12 表示了风速为 14 m/s 时,不同下沿高度下双排光伏板的流场图。研究发现,随着光伏板下沿高度从 0.5 m 提升至 2 m ,流场结构发生显著变化,光伏板阵列间及光伏板与地面之间的气流通道面积明显增大,使流场更加顺畅。光伏板近地区的流速提升最为显著,板下间隙平均流速从不足 1 m/s 增至 $6\sim 8\text{ m/s}$,增幅达 600% 以上。回流区内的流动强度明显减弱,最大逆向流速从 -10 m/s 大幅衰减至 -2 m/s ,降幅达 80% ,同时回流区长度从板高的 1.5 倍扩展至 2.5 倍,显示涡旋范围扩大但强度显著降低。这种变化有效抑制了气流分离和涡流产生,同时扩大了回流区范围,从而减弱了对后排光伏板的干扰。值得注意的是,流场重构导致原本集中于光伏板下沿的高速气流区域向上迁移,使得近地面风速降低,整体气流趋于平稳。

图 13 为当风速为 14 m/s 时,不同下沿高度下双排光伏板的涡量图。由图 13 可知,由于第 1 排光伏板的存在使其背风侧周围涡流强度明显增大,受第 1 排光伏板的影响,在第 2 排光伏板背风侧周围涡流强度减小,随着光伏板下沿高度的增加,第 2 排光伏板前

缘和后缘产生的涡量强度可能会减弱,且涡量的影响范围会向上移动。

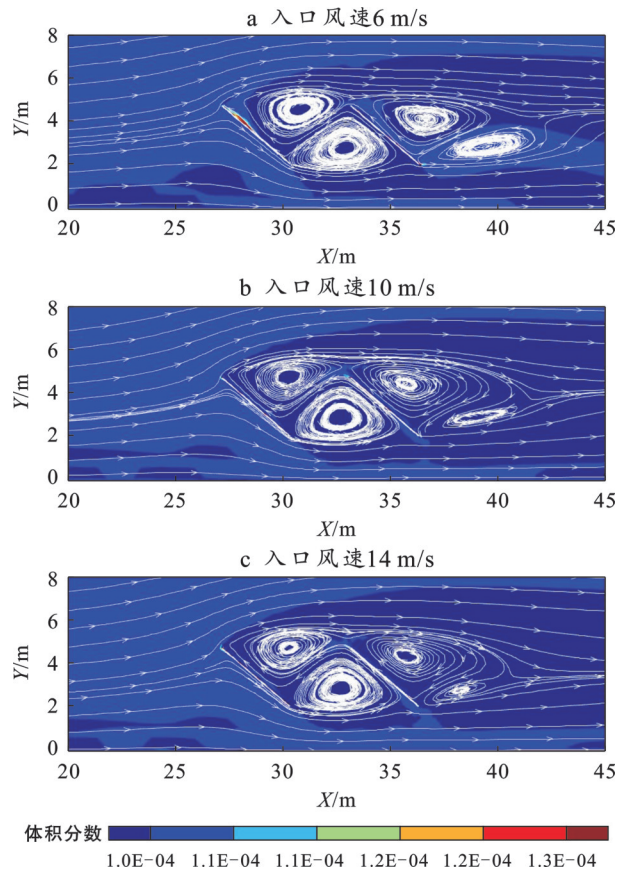


图 11 光伏板下沿高度 2 m 时,不同入口风速下双排光伏板沙粒体积分数变化规律

Fig.11 Sand particle volume fraction variation in double-row photovoltaic panels with 2 m lower edge height under different inlet wind speeds

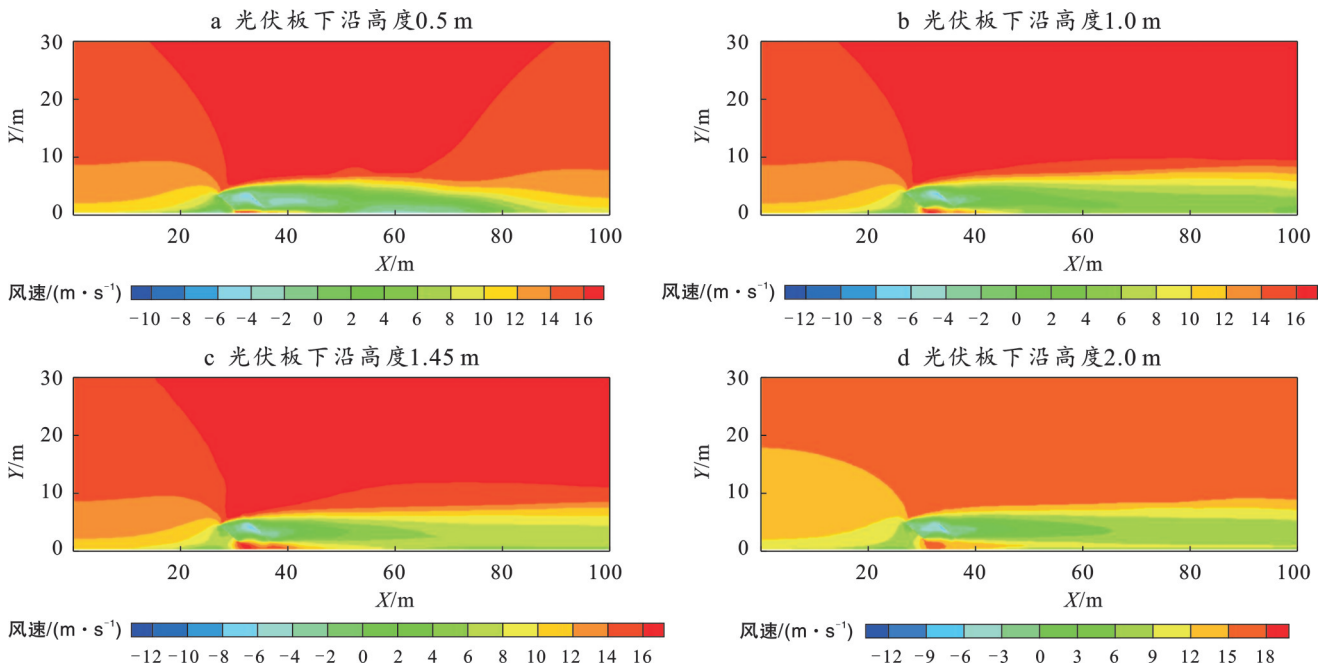


图 12 入口风速为 14 m/s 时不同光伏板下沿高度下双排光伏板的流场图

Fig.12 Flow field diagrams of double-row photovoltaic panels at different lower edge heights under 14 m/s inlet wind speed

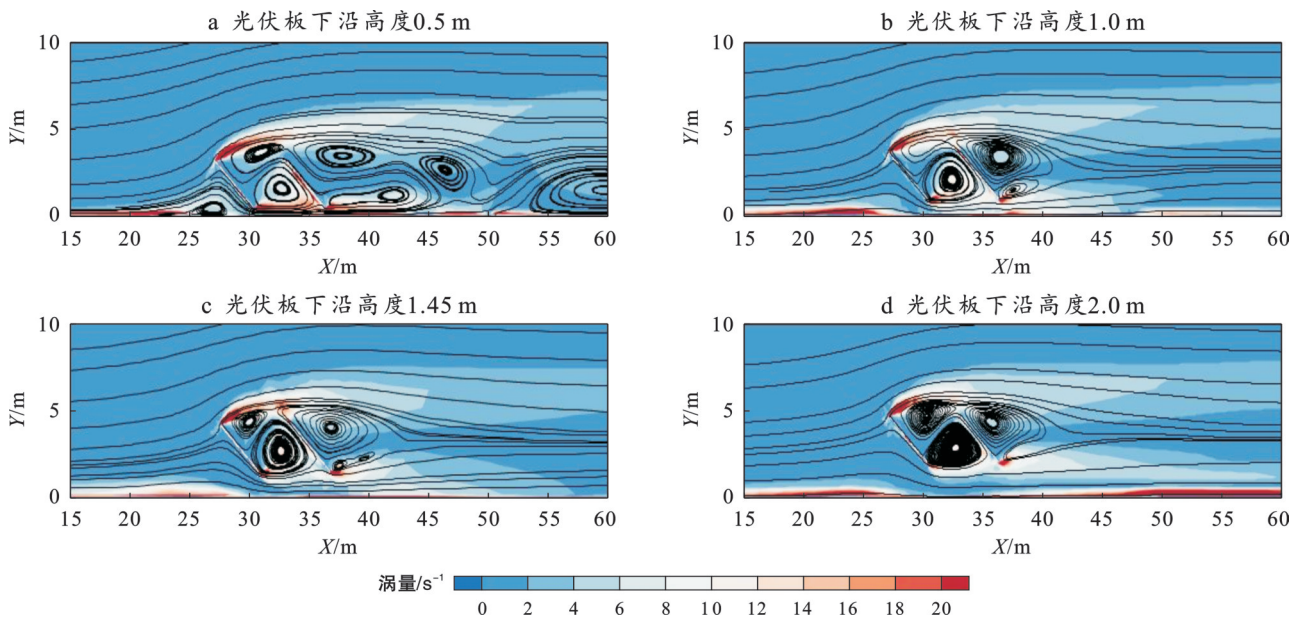


图 13 入口风速为 14 m/s 时不同下沿高度下双排光伏板的涡量图

Fig.13 Vorticity field diagrams of double-row photovoltaic panels at different lower edge heights under 14 m/s inlet wind speed

后排板受前排板涡量的影响方式改变,两板之间的涡量相互作用减弱,涡量分布的复杂性降低。光伏板边缘及尾流区内的最大涡量值从约 20 s^{-1} 显著降低至 12 s^{-1} ,降幅达 40%。特别是板下间隙区域的涡量强度下降最为显著,从 18 s^{-1} 降至 8 s^{-1} ,降幅超过 55%,这说明地面约束效应的减弱有效抑制了剪切涡层的产生。

图 14 为当风速为 14 m/s 时,不同下沿高度下双排光伏板的流线图。图 14 表明,在两排光伏板之间

及第 2 排光伏板背风侧均产生了两个旋涡,前者涡流明显强于后者。其中下方为逆时针旋涡,上方为顺时针旋涡。随着光伏板下沿高度增加,地面附近气流受阻挡程度减弱,第一排光伏板下表面气流速度增大。气流在两板之间的流动空间增大,流动更加顺畅。由于光伏板下沿高度升高,地面附近气流对后排板下表面的干扰减小,下表面气流速度相对更稳定。随着光伏板下沿高度从 0.5 m 提升至 2 m,回流区范围从 6.5 m 扩展至 11.2 m,扩大了近 2 倍。

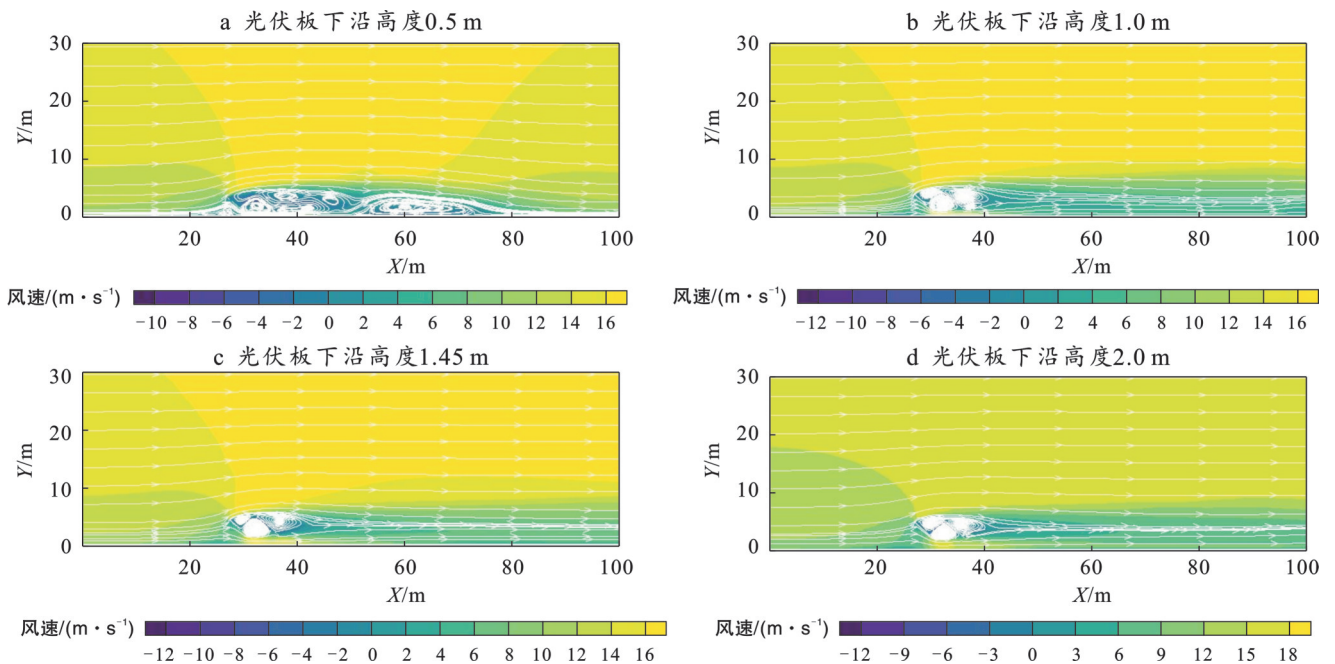


图 14 入口风速为 14 m/s 时不同下沿高度下双排光伏板的流线图

Fig.14 Streamline diagrams of double-row photovoltaic panels at different lower edge heights under 14 m/s inlet wind speed

整体尾流区域的范围会有所变化,气流在光伏板后方的扩散更加容易,尾流区域可能会在垂直方向上有所增大,但在水平方向上可能会有所收缩。尾流中的气流速度恢复相对更快,对下游区域的影响范围可能会减小。

图 15 展示了在近地面层 0.3 m 高度处,双排光伏板周围风速随光伏板下沿高度变化的分布特征。研究表明,该高度处的风速变化呈现先减小后增大再减小的变化趋势。当入口风速为 6 m/s 时,0.5 m 高光伏板周围的风速范围为 1.43~5.86 m/s,1 m 高光伏板的风速范围扩大至 1.76~6.15 m/s,1.45 m 高光伏板的风速范围扩大至 2.05~6.38 m/s,而 2 m 高

光伏板的风速范围进一步增至 2.27~6.55 m/s。在 10 m/s 来流条件下,最小风速增幅达 1.7 倍(1.49 m/s 增至 2.56 m/s),最大风速增幅为 1.04 倍(11.28 m/s 增至 11.74 m/s)。当风速升至 14 m/s 时,最小风速增长 1.3 倍(4.35 m/s 增至 5.58 m/s),而最大风速增幅扩大至 1.13 倍(14.15 m/s 增至 15.98 m/s)。

值得注意的是,光伏板高度每增加 1 m,其背风区最小风速平均提升约 1.5 倍,最大风速增幅相对较小,约 1.1 倍。这些数据清晰地表明,在固定高度下,光伏板周围的风速极值随着光伏板高度的增加而系统性增大,且这一规律在不同入口风速条件下均保持一致。

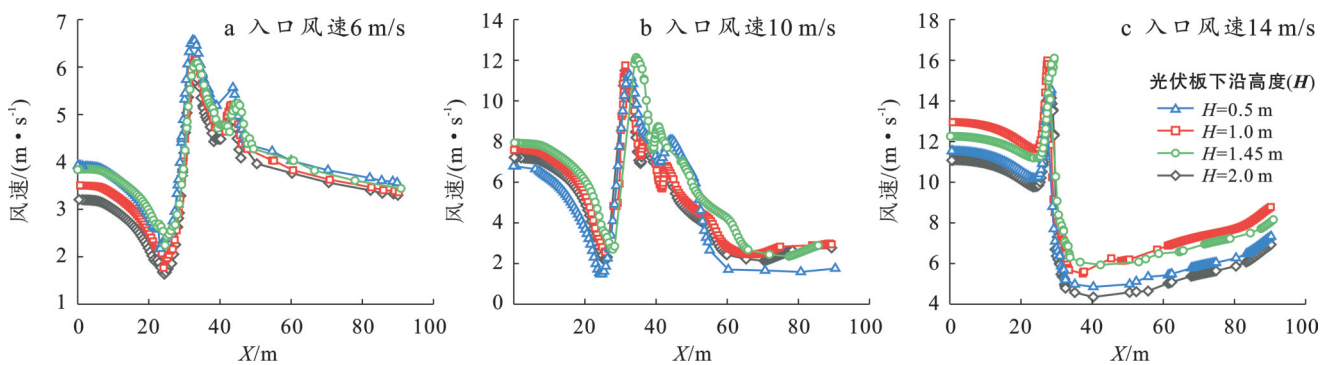


图 15 近地面层 0.3 m 高度处双排光伏板周围风速随光伏板下沿高度的分布特征
Fig.15 Distribution characteristics of wind speed around double-row photovoltaic panels at 0.3 m height above ground level along lower edge of panels

图 16 为风速为 14 m/s 时,不同下沿高度下双排光伏板体积分数变化规律。由图 16 可知,在 0.5 m 高度下,沙粒体积分数整体较高,集中分布在 $X=30\sim 38$ m 的近地范围内,最大体积分数达到 1.20×10^{-4} 。随着高度增加至 1 m,沙粒体积分数分布呈现明显变化,高浓度区范围开始向下风向扩展。当高度进一步提升至 1.45 和 2.00 m 时,高浓度区域范围进一步向下风向和垂直方向扩散, $X=35\sim 45$ m 区间形成范围更大,同时近板区的沙粒体积分数明显降低,表明增大高度有效改善了板下气流流通条件,减少了沙粒在板下的堆积,促使沙粒向更远的下风向运输。

2.3 不同阵列排数对光伏阵列周围流场与沙粒分布的影响

图 17 为当风速为 14 m/s,光伏板下沿高度为 2 m 时,不同排数光伏板的流场图。图 17 表明,气流在单排光伏板前会形成一定的阻滞,部分气流会向上加速通过光伏板,在光伏板后形成相对较小的低速区和涡流区。当增加至双排布置时,第 1 排板后回流区扩展至 13.2 m,增幅约 15%,第 2 排板前缘出现明显的流速加速区,最大流速达到 16.8 m/s,较入口风速增大 20%。在 3 排布置工况下,第 2 排板后回流区延伸至 14.6 m,第 3 排板前缘最大流速进一步提升至

17.9 m/s。随着排数增加,板间气流速度逐渐降低。在光伏板阵列内部,流场趋于稳定但速度较低。阵列边缘气流受扰动大,流场复杂。阵列后方,回流区范围大,之后气流逐渐恢复至入口风速。

图 18 为当风速为 14 m/s,光伏板下沿高度为 2 m 时,不同排数光伏板的涡量图。由图 18 可知,对于单排光伏板在光伏板的前缘和后缘会分别产生涡量区域。并且最大涡量值约为 18 s^{-1} ,延伸范围约 8.5 m。前缘涡量是由于气流在此处的急剧加速和转向形成,而后缘涡量则是气流分离导致的。涡量强度相对较弱,且主要集中在光伏板上下边缘附近,在远离光伏板的区域,涡量迅速衰减。当增加至双排布置时,第 2 排光伏板前缘涡量值急剧上升至 22 s^{-1} ,增幅达 22%,涡量区范围扩展至 11.2 m。第 1 排光伏板尾流中的涡量会与第 2 排光伏板产生的涡量相互作用,使得第二排光伏板前缘的涡量强度有所增强,后缘涡量分布范围扩大且强度也有所变化。在 3 排光伏板工况下,最大涡量达到 26 s^{-1} ,较双排工况增大 18%,前排光伏板产生的涡量会依次向后传递并影响后排光伏板。随着排数增加,在光伏板阵列的中心区域,涡量分布相对稳定但强度较大,而在阵列的边缘区域,涡量分布则更加紊乱,且涡量强度有所减弱。

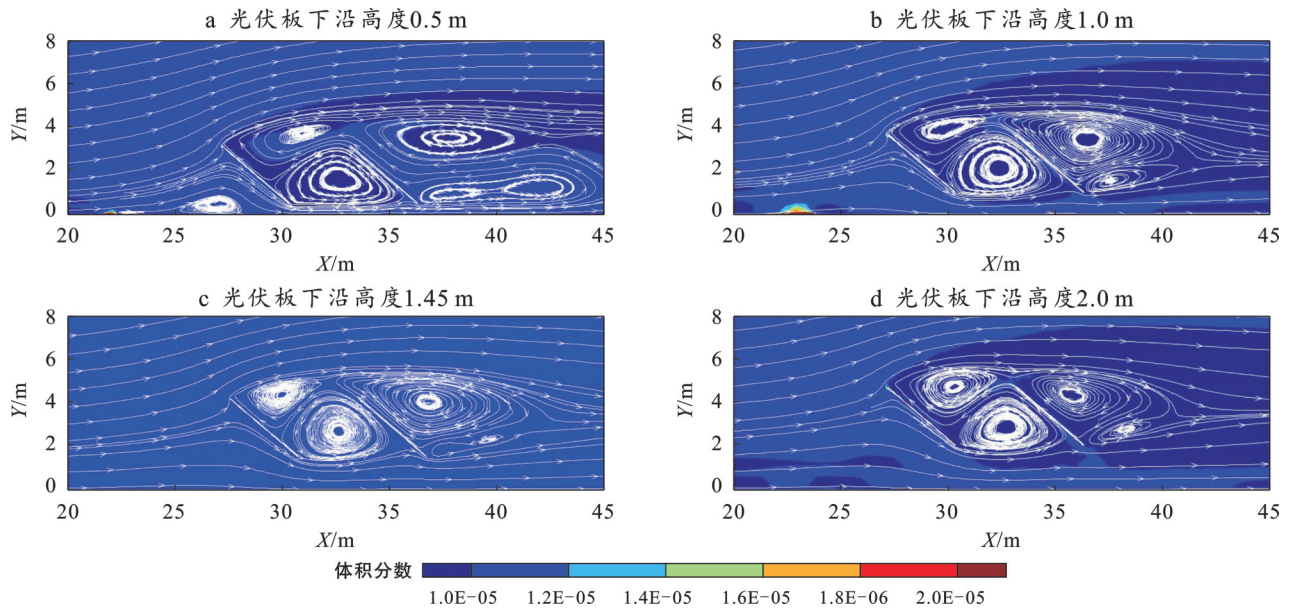


图 16 入口风速为 14 m/s 时不同下沿高度下双排光伏板体积分数变化规律
 Fig.16 Variation in volume fraction of double-row photovoltaic panels at different lower edge heights under 14 m/s inlet wind speed

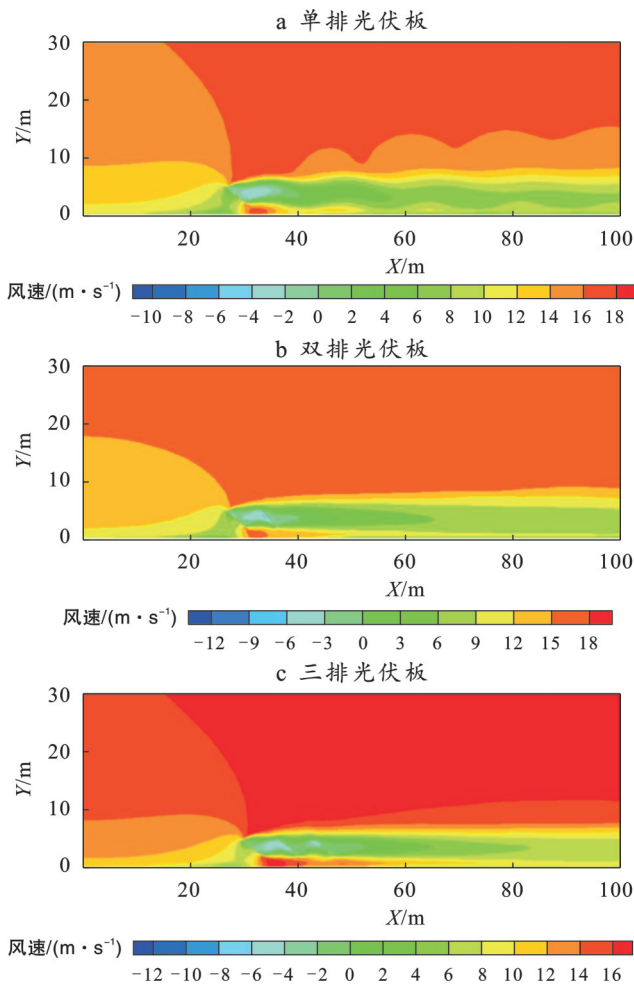


图 17 入口风速为 14 m/s, 光伏板下沿高度为 2 m 时不同排数光伏板的流场图

Fig.17 Flow field diagrams for different numbers of photovoltaic panel rows at 14 m/s inlet wind speed and 2 m lower edge height

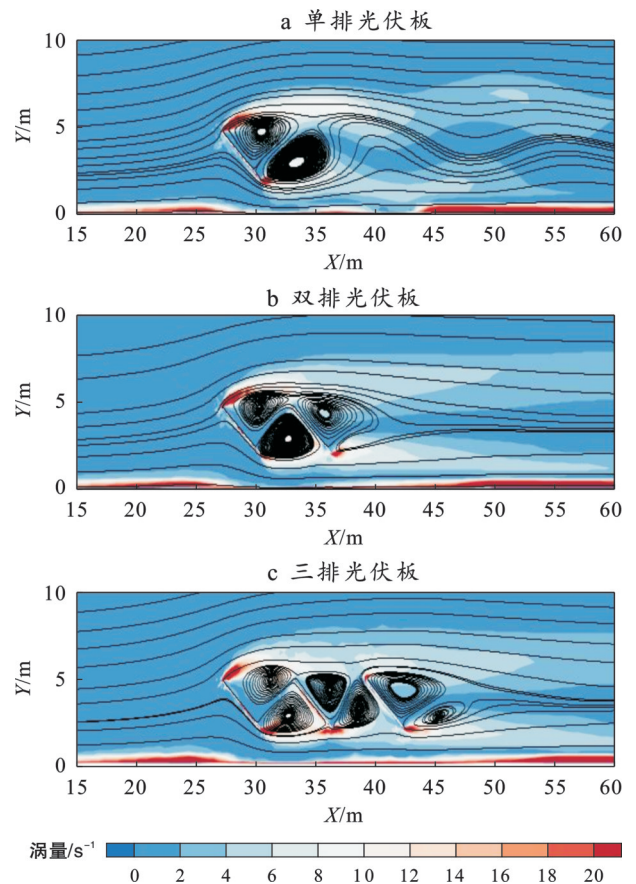


图 18 入口风速为 14 m/s, 光伏板下沿高度为 2 m 时不同排数光伏板的涡量图

Fig.18 Vortex field diagram for different numbers of photovoltaic panel rows at 14 m/s inlet wind speed and 2 m lower edge height

图 19 为当风速为 14 m/s, 光伏板下沿高度为 2 m 时, 不同排数光伏板的流线图。由图 19 可知, 单排光

伏板工况下,板后回流区长度约为 12.8 m,回流区内最小流速为 -2.3 m/s 。气流在光伏板前缘形成明显的分离,部分气流沿光伏板上沿分离,形成局部的加速区,少部分气流沿光伏板下沿分离,从而在光伏板背风侧形成回流区,并且在光伏板背风侧均形成旋涡。当气流抵达第 2 排光伏板时,第 1 排光伏板后方尾流与第 2 排光伏板前缘发生相互作用,流线在第 2 排前缘重新加速并分离,形成更复杂的流动结构。第 1 排光伏板后回流区长度延伸至 14.5 m,增幅 13%。第 1 排和第 2 排光伏板的尾流叠加,第 3 排光伏板前缘流线紊乱,后方形成较长距离的涡流区,流线呈现多涡旋结构。第 2 排板后回流区扩展至 15.8 m,最大流速达到 18.2 m/s 。

以双排光伏板为例,图 20 为在 $y=4.55 \text{ m}$ 高度处,不同安装高度下光伏板周围的风速分布情况。由图 20 知,在高度 $y=4.55 \text{ m}$ 处,光伏板周围的风速分布表现出先减小后增大再减小的变化,且受光伏板高度和入口风速的共同影响。当入口风速为 6 m/s 时, 0.5 m 高的光伏板附近风速变化范围为 $0.85\sim 6.88 \text{ m/s}$, 1 m 高的光伏板周围风速范围扩大至 $1.2\sim 6.9 \text{ m/s}$,而 1.45 m 和 2 m 高的光伏板周围风速范围分别扩大至 $1.9\sim 7.1 \text{ m/s}$ 和 $2.5\sim 7.4 \text{ m/s}$ 。随着入口风速增至 10 m/s , 0.5 m 光伏板附近的风速极值提升至 $1.87\sim 11.69 \text{ m/s}$, 1 m 光伏板的风速范围达到 $2.9\sim 12.3 \text{ m/s}$, 1.45 m 和 2 m 高的光伏板周围风速范围分别扩大至 $3.2\sim 12.6 \text{ m/s}$ 和 $3.46\sim 12.8 \text{ m/s}$ 。在更高风速 14 m/s 条件下, 0.5 m 光伏板周围风速进一步增至 $4.82\sim 14.78 \text{ m/s}$, 1 m 光伏板附近风速为 $5.0\sim 14.9 \text{ m/s}$, 1.45 m 光伏板周围的风速为 $6.7\sim 16.5 \text{ m/s}$,而 2 m 光伏板的风速变化范围最大,达到 $8.2\sim 18.14 \text{ m/s}$ 。总体而言,在相同高度下,光伏板周

围的风速极值随光伏板高度和入口风速的增加而增大,且风速变化范围亦呈现扩大趋势。

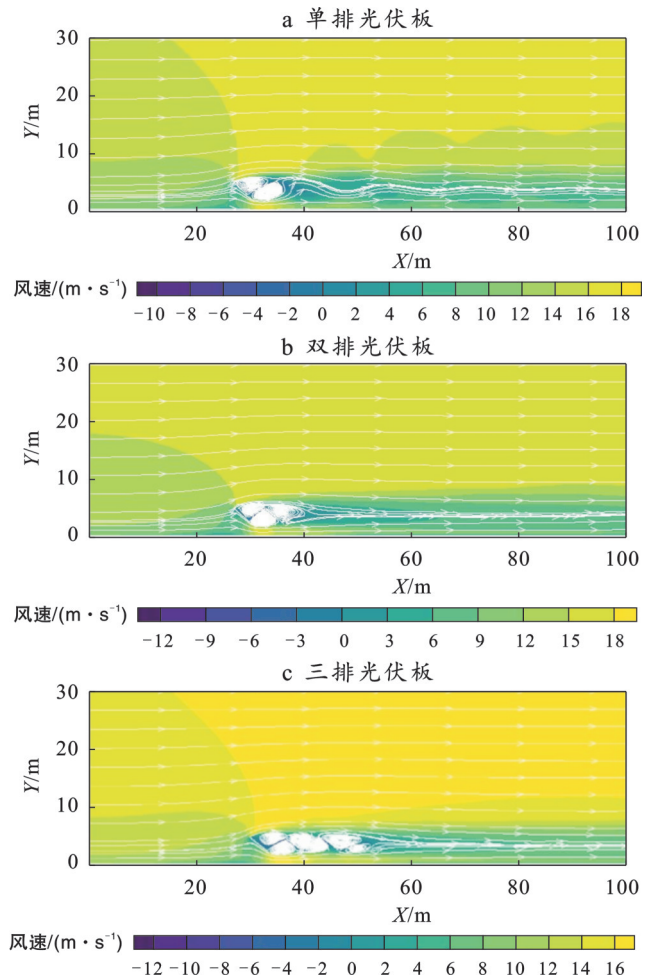


图 19 入口风速为 14 m/s ,光伏板下沿高度为 2 m 时不同排数光伏板的流线图

Fig.19 Streamline diagrams for different rows of photovoltaic panels at 14 m/s inlet wind speed and 2 m height of lower edge

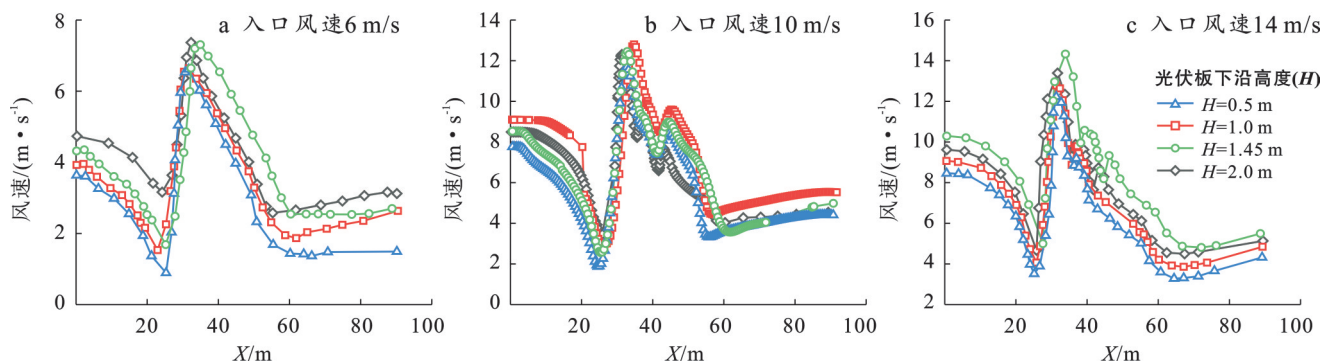


图 20 距地面 4.55 m 处双排光伏板周围风速随光伏板下沿高度变化的分布特征
Fig.20 Distribution characteristics of wind speed changing with lower edge height of panels around double-row photovoltaic panels at 4.55 m above ground level

图 21 展示了风速为 14 m/s ,光伏板下沿高度为 2 m 时,不同排数光伏板沙粒体积分数变化规律。在单排光伏板条件下,沙粒体积分数分布相对简单,高

浓度区域主要分布在 $X=30\sim 38 \text{ m}$ 范围内,最大体积分数约为 1.10×10^{-4} 。随着光伏板排数的增加,沙粒影响范围逐步扩大,沙粒堆积区域不断向下风向扩

展,高浓度区范围显著增大。在3排光伏板条件下,多排阵列的叠加效应显著改变了流场结构,涡流相互作用加剧了沙粒的混合与扩散,使得沙粒在阵列内部和下游更大范围内形成广泛而不均匀的分布。

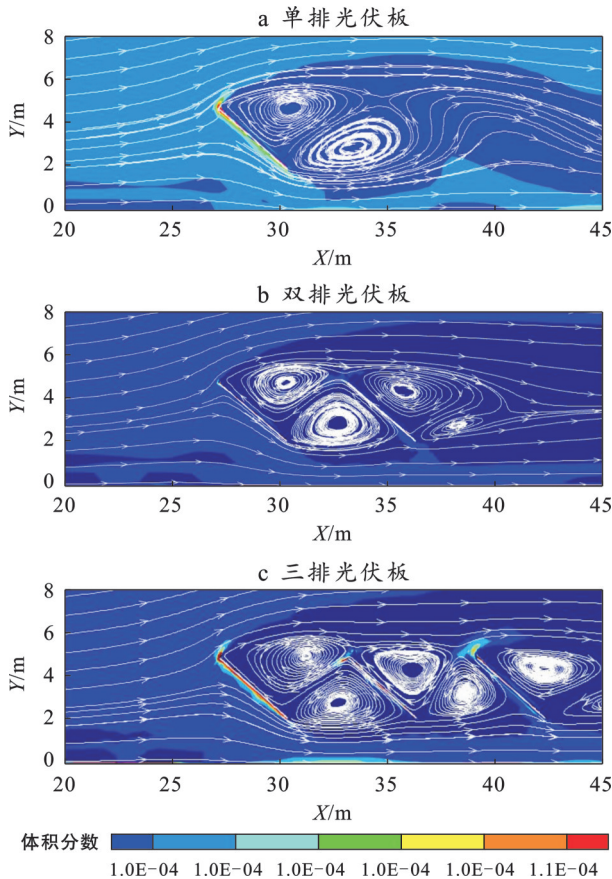


图21 入口风速为14 m/s,光伏板下沿高度为2 m时不同排数光伏板沙粒体积分数变化规律

Fig.21 Variation in sand particle volume fraction of different rows of photovoltaic panels with 2 m height of lower edge at 14 m/s inlet wind speed

3 结论

(1) 气流流经光伏阵列时,第1排光伏板迎风侧形成显著的气流减速区,上方及背风侧产生明显的加速,近地表形成局部高速区。随着气流向下游多排光伏板运动时,前排阻滞作用使后续风速逐渐衰减,多排光伏板间交替形成低速区和涡流,导致整体平均风速降低。此外,入口风速和安装高度增加时,各速度分区范围扩大,而涡流区面积呈先增后减的非线性变化。

(2) 在光伏板背风侧均产生涡流,第1排光伏板背风侧涡流强度高,第2排光伏板背风侧涡流强度小,随着入口风速和光伏板距地面高度的增大,两排光伏板背风侧涡流强度先增大后基本不变。对于第2排光伏板,前排光伏板产生的涡流会依次向后传递

并影响后排光伏板。随着排数增加,板间的涡流相互干扰更加复杂。

(3) 气流经过光伏板时,受到光伏板的阻碍作用,在3排光伏板之间及第3排光伏板背风侧产生两个旋涡,前者涡流明显强于后者,其中下方为逆时针旋涡,上方为顺时针旋涡,且随着入口风速和光伏板距地面高度的增大,旋涡区域有扩大趋势,涡流强度先增强后基本保持不变。

(4) 通过对不同风速、安装高度及阵列排数的模拟结果分析可知,风速增大显著提高了沙粒体积分数及其影响范围;增加光伏板安装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;而增加阵列排数会扩大沙粒影响范围,多排结构引起的涡流交互作用加剧了沙粒的扩散与不均匀分布。当光伏板前沿距地表高度达到2 m时,既不影响现有植被的生长,又能减缓板下的气流加速作用,有助于减少对项目区内风沙地貌的扰动,并有利于生态环境保护。

参考文献 (References)

- [1] 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(4):64-79.
Huang Bin, Zhou Zhijie, Li Zhengnong, et al. Research progress on the impact of wind-sand flow on desert photovoltaic modules and their power generation efficiency [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2025,43(4):64-79.
- [2] 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.
Tang Gudong, 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.
- [3] 黄斌,李正农,丛顺,等.风沙流及建筑物风沙荷载的研究进展与展望[J].自然灾害学报,2016,25(5):9-19.
Huang Bin, Li Zhengnong, Cong Shun, et al. State of the progress and prospect of research on wind-sand flow and wind-sand load of buildings [J]. Journal of Natural Disasters, 2016,25(5):9-19.
- [4] 李振洋,张宏伟,尚思汝,等.戈壁光热电站内风沙环境特征及运动规律[J].中国沙漠,2025,45(2):17-28.
Li Zhenyang, Zhang Hongwei, Shang Siru, et al. Environmental characteristics and movement rules of wind-blown sand in Gobi concentrated solar power plant [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(2):17-28.
- [5] 赵明智,王帅,孙浩,等.沙尘对光伏组件表面冲刷行为影响实验研究[J].可再生能源,2020,38(1):19-23.
Zhao Mingzhi, Wang Shuai, Sun Hao, et al. Experiment

- tal study on erosion behavior of sand dust on photovoltaic modules [J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(1):19-23.
- [6] 赵明智,张旭,苗一鸣,等.沙漠环境沙尘覆盖下的光伏组件输出特性研究[J].*太阳能学报*,2018,39(3):744-748.
Zhao Mingzhi, Zhang Xu, Miao Yiming, et al. Study on output characteristics of PV module under cover of dust in desert environment [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018,39(3):744-748.
- [7] 蒲鸥,吴红华,李正农,等.风沙对结构冲击作用的研究进展与展望[J].*地震工程与工程振动*,2021,41(2):146-161.
Pu Ou, Wu Honghua, Li Zhengnong, et al. State of the progress and prospect of research on the impact behavior and affection of wind-driven sand flow on structure [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021,41(2):146-161.
- [8] 高一帆,李寿英,刘佳琪,等.基于气弹模型风洞试验的柔性光伏支架阵列风致响应及抑振措施研究[J].*太阳能学报*,2025,46(3):394-403.
Gao Yifan, Li Shouying, Liu Jiaqi, et al. Wind-induced response and vibration suppression measures of flexible photovoltaic support array based on aeroelastic model wind tunnel test [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025, 46(3):394-403.
- [9] 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.
- [10] 王浩,李生宇,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.
Wang Hao, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Wind tunnel experiment and numerical simulation of surface erosion and accumulation in desert photovoltaic power stations [J]. *Arid Zone Research*, 2025, 42(2):349-359.
- [11] 王建勃,朱锐,何惧.光伏电站阵列风荷载衰减特性数值模拟[J].*太阳能*,2013(15):20-22.
Wang Jianbo, Zhu Rui, He Ju. Numerical simulation of wind load attenuation characteristics in photovoltaic power station arrays [J]. *Solar Energy*, 2013(15):20-22.
- [12] Yao Jianfeng, Tu Zhibin, Xu Haiwei. Experimental investigation of wind pressures on photovoltaic (PV) array mounted on a hilly terrain [J]. *Solar Energy*, 2025,291:113256.
- [13] Xu Ang, Ma Wenyong, Yuan Huanxin, et al. The effects of row spacing and ground clearance on the wind load of photovoltaic (PV) arrays [J]. *Renewable Energy*, 2024,220:119627.
- [14] Zhang Kai, Wang Zhenghui, Wang Tao, et al. Numerical simulation of flow field deposition and erosion characteristics around bridge-road transition section [J]. *Journal of Mountain Science*, 2024,21(5):1491-1508.
- [15] 廖承贤,王海兵,刘茜雅,等.以计算流体动力学模型(CFD)模拟的戈壁地表风沙两相流运动特征[J].*中国沙漠*,2023,43(6):71-78.
Liao Chengxian, Wang Haibing, Liu Xiya, et al. Simulation of movement characteristics of wind and sand two-phase flow on the Gobi surface based on CFD technology [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(6):71-78.
- [16] Zhang Kai, Zhang Hailong, Tian Jianjin, et al. Flow field, sedimentation, and erosion characteristics around folded linear HDPE sheet sand fence: Numerical simulation study [J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, 21(1):113-130.
- ~~~~~
- (上接第213页)
- [27] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].*地理学报*,2012,67(3):388-397.
Wang Suiji, Yan Yunxia, Yan Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(3):388-397.
- [28] 杨毅梦.气候变化和人类活动对疏勒河流域水资源影响研究[D].河北 石家庄:河北地质大学,2024.
Yang Yimeng. The Impact of climate change and human activities on water resources in the Shule River basin [D]. Shijiazhuang, Hebei: Hebei GEO University, 2024.
- [29] 方春爽.冰川补给型流域径流变化及其对环境的响应[D].甘肃 兰州:兰州交通大学,2024.
Fang Chunshuang. Glacier-fed basin runoff changes and their response to environmental factors [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiatong University, 2024.