马高生,马世豪,柳本立,等.自然湍流下光伏阵列非均匀覆尘机制[J].中国沙漠,2026,46(5):103-112.

自然湍流下光伏阵列非均匀覆尘机制

马高生[1],马世豪[1],柳本立[2],陈敏如[1],杨程鹏[1],彭怀午[3]

(1.兰州理工大学 绿色能源与储能学院,甘肃 兰州 730050;2.中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,甘肃 兰州 730000;3.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710100)

摘要:针对中国沙漠、戈壁、荒漠地区光伏阵列频发的风沙覆尘难题,采用大涡模拟(LES)耦合离散相模型(DPM),构建了基于临界捕获速度与近壁采样空间的沙尘沉积判据模型,系统分析了正负倾角工况下光伏阵列的非均匀覆尘分布特征、流场调控机制,并量化了积尘风险与清洁周期。结果表明:所有工况下阵列第二排光伏板均为积尘峰值区,其沉积模式随倾角正负发生完全反转;涡量是全工况下抑制沉积的核心参数,风速、湍流强度与积尘的相关性随来流方向发生完全反转;30°正倾角工况下第二排光伏板为最高风险区。

关键词:光伏阵列;沙尘沉积;流场结构;倾角;大涡模拟

文章编号:1000-694X(2026)05-103-10 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00060

中图分类号:TK513.5 **文献标志码**:A

0 引言

在“双碳”目标下,中国沙漠、戈壁、荒漠地区凭借优越的光照条件和广阔的土地资源,已成为大规模风光基地建设的核心载体。截至2025年,中国沙戈荒地区光伏新增装机占比超60%,“光伏+治沙”的协同模式已成为荒漠化防治与新能源开发融合发展的重要方向。然而,沙戈荒地区频发的风沙活动导致光伏板表面覆尘问题突出,非均匀积尘不仅造成发电效率大幅衰减,还易引发热斑效应,严重威胁光伏电站安全稳定运行[1]。

围绕光伏电站风沙积尘问题,国内外学者从沉积机制与沉积影响因素等方面开展了研究。沙尘颗粒在光伏板面的沉积由气动力、重力、静电力等共同作用[2-3],根据主导力的不同沉积机制分为干燥沉积、水汽凝结、静电吸附和生物沉积等多种[4]。在沉积影响因素方面,普遍发现风速和倾角是影响沙尘沉积的主要因素,且都表现出一定的阈值效应。部分研究认为风速是控制沉积、反弹、再悬浮的关键参数,当风速超过某一临界值后,流体施加在已沉积颗粒上的剪切力与升力可能超过颗粒的黏附力,从而导致部分已附着,特别是小粒径的颗粒被“剥离”板面,表现出一定的“自清洁”效应[5-7]。学者认为增大倾角导致颗粒在重力方向的分量增大,导致黏附力减小,尤其是大粒径颗粒,从而减少沉积。但对于极小粒径颗粒(<10 μm),有研究指出,增大倾角会影响以扩散机制为主的细颗粒在板面附近的输运与沉积分布,反而会增加其沉积率[8-9]。沉积速率直接影响单位时间内光伏板面的覆尘浓度大小,进而影响光伏发电效率[10]。

在数值模拟方法方面,大涡模拟(LES)技术已被广泛应用于太阳能板风荷载与流场特性研究。光伏阵列的排布方式、倾角、间距等因素对周围流场结构具有显著影响[11],进而决定了颗粒物的输运与沉积行为。然而,现有研究仍存在明显不足:一是多聚焦正倾角迎风工况,对沙戈荒地区跟踪式光伏常见的负倾角背风工况沉积行为研究极为匮乏;二是多关注单块光伏板或阵列整体积尘总量,对多排阵列排间流场干扰与积尘非均匀分布的机制揭示不足;三是针对积尘非均匀分布与流场参数之间

收稿日期:2026-03-31;**改回日期**:2026-04-29

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4202104);陕西省创新能力支撑计划项目(2023-CX-TD-30)

作者简介:马高生(1979—),男,河南商丘人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事风沙环境力学、风力机空气动力学与风光资源开发方面的研究。E-mail:magsh@lut.edu.cn

通信作者:柳本立(E-mail:liubenli@lzb.ac.cn)

的关系尚缺乏系统阐明。

为此，本文以青海柴达木盆地典型沙戈荒光伏阵列为研究对象，采用大涡模拟（LES）耦合离散相模型（DPM），建立经风洞实验标定的沙尘沉积判据模型，系统开展正负倾角数值模拟，揭示光伏阵列非均匀覆尘的流场调控机制，以期为沙戈荒光伏电站的防沙设计提供科学依据。

1 研究方法与数值模型

1.1 几何模型与计算域设置

研究区位于青海省柴达木盆地某大型光伏电站，地处中国沙戈荒核心区，气候干旱多风，主导风向为东风、西风，年沙尘暴日数15~20 d，是中国光伏风沙灾害防控的典型区域[9]。电站采用平单轴跟踪式光伏阵列，组件东西向排布，旋转轴中心距地高度2.2 m，单块光伏板尺寸4 m（宽）×18 m（长）×0.035 m（厚），排间距10 m。计算域尺寸为180 m（长）×72 m（宽）×20 m（高），定义来流上游为第一排光伏板（距入口70 m，保证湍流充分发展），下游为第五排光伏板；倾角θ为光伏板表面与计算域X轴正方向的夹角。边界条件设置：入口为速度入口，出口为压力出口，地面与光伏板面为无滑移壁面，计算域顶部与两侧为对称边界（图1）。

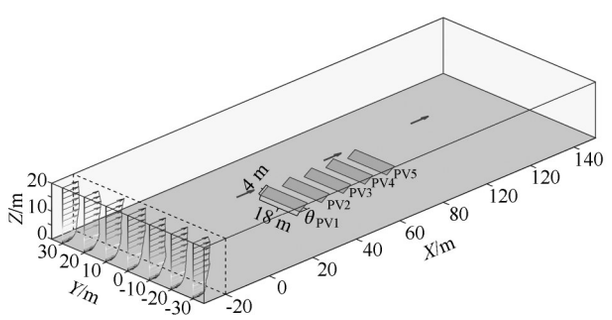


图1 计算域及建模示意

Fig.1 Computational Domain and Modeling Schematic

1.2 控制方程与数值方法

本研究使用ANSYS Fluent软件，在一台配备128个CPU核心、256 GB内存的服务器上完成计算。采用大涡模拟（LES）方法求解非定常湍流流场，通过空间滤波直接求解大尺度涡运动，采用WALE模型封闭亚格子应力，滤波后的连续性方程与动量方程为：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\frac{\partial\left(\bar{u}_i\bar{u}_j\right)}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+v\frac{\partial^2\bar{u}_j}{\partial x_j\partial x_j}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+f_i \tag{2}$$

式中：$\bar{u}_i$为滤波后的速度分量；$\bar{p}$为滤波后的压力；ρ为空气密度；v为运动黏性系数；τ_{ij}为亚格子应力张量；f_i为体积力源项，用于生成湍流。

为准确生成符合大气边界层特性的各向异性湍流，引入SVF方法，将CDRFG方法生成的脉动风速时序转化为体积力源项添加到动量方程中，有效抑制了传统速度入口方法的非物理压力脉动与湍能快速衰减问题。

采用DPM模型跟踪沙尘颗粒运动轨迹，基于欧拉—拉格朗日框架，积分拉格朗日坐标系下的颗粒运动方程获得颗粒轨迹，考虑了拖曳力、重力、压力梯度力、虚拟质量力与Saffman升力。

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t}=F_D(u-u_p)+\frac{g(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+F_{\text{other}} \tag{3}$$

式中：u_p为颗粒速度；u为流体速度；ρ_p为颗粒密度；$F_D(u-u_p)$为单位质量颗粒所受的拖曳力；F_{other}为其他作用力项。

针对沙戈荒地区悬移运动主导的10 μm粒径沙尘颗粒开展模拟，颗粒密度取2 650 kg·m^{-3}。采用硬球碰撞模型描述颗粒与壁面的相互作用，通过风洞实验数据拟合得到10 μm颗粒的法向恢复系数表达式，刻画颗粒碰撞后的动能耗散过程。

1.3 积尘判据模型与模型验证

针对传统壁面捕获准则的不足，建立了基于临界捕获速度与近壁采样空间的沉积判据模型。定义临界捕获速度为颗粒刚好能够沉积的最大法向碰撞速度，基于能量守恒与耗散原理估算其理论值；引入近壁采样空间，将采样厚度与局部网格尺度、流动特征关联，保证取样一致性。当颗粒同时满足法向碰撞速度小于临界捕获速度、位移偏移在板面边界内、碰撞后剩余动能小于吸附能3个条件时，判定为沉积。

通过风洞实验数据[12]使用相同的模拟条件对模型关键参数进行标定，结果表明：当临界捕获速度取0.3 m·s^{-1}时，模拟结果与实验值相对误差小于5%，模型具有良好的计算精度（图2）。

通过4套不同密度的网格方案完成网格无关性验证（图3），最终确定总网格数约1640万、时间步长0.025 s的计算方案，保证了数值模拟结果的可靠性。

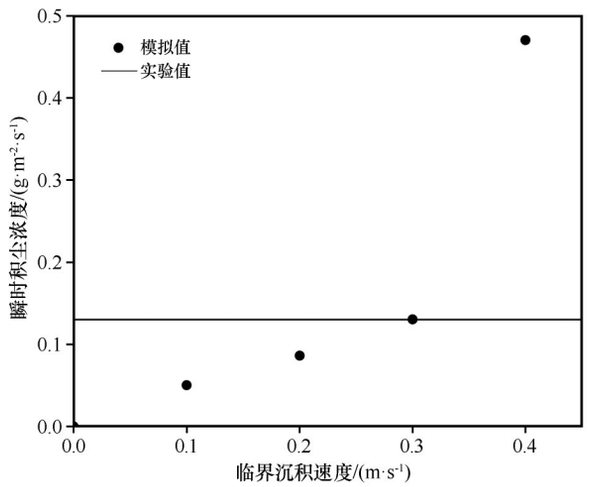


图2　临界沉积速度标定

Fig.2　Calibration of critical deposition rate

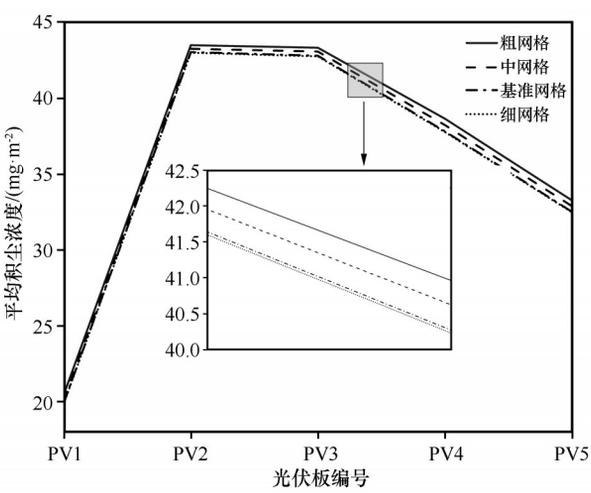


图3　网格无关性验证

Fig.3　Verification of grid independence

采用面积加权平均计算光伏板表面颗粒积尘浓度，通过变异系数(CV)表征积尘空间非均匀性，其中CV<0.1为均匀分布，0.1<CV<0.3为轻度不均匀，0.3<CV<0.6为中度不均匀，CV>0.6为高度不均匀。

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{4}$$

式中：σ为积尘浓度的标准差；μ为积尘浓度的均值。

将光伏板沿长度方向划分为左、中、右三区，沿宽度方向划分为前缘、中部、后缘三区，分区统计积尘浓度的空间分布特征(图4)。

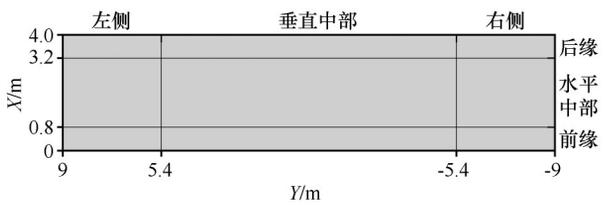


图4　区域划分示意

Fig.4　Schematic of the Zoning

2　结果与分析

2.1　不同倾角下光伏阵列覆尘的空间分布特征

光伏阵列的排间流场干扰与倾角变化，是导致积尘空间异质性的核心诱因，明确不同倾角下积尘的空间分布规律，是揭示非均匀覆尘机理的前提。

由图5可知，增大倾角绝对值可显著降低阵列积尘浓度，正倾角从30°增至37°时，各排积尘浓度降低51.2%~66.2%；负倾角从150°增至143°时，降低51.4%~66.3%。相同绝对倾角下，负倾角工况首排光伏板积尘浓度较正倾角提升60%以上，后续排数积尘浓度则普遍低于正倾角工况。原因在于，倾角绝对值增大使颗粒碰撞板面时的法向速度分量提

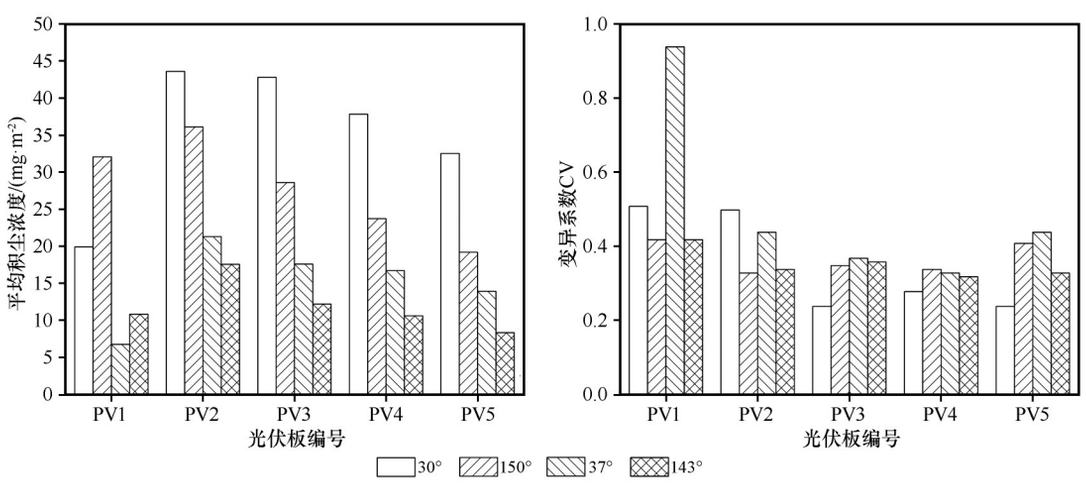


图5　不同倾角下各排光伏板积尘浓度与变异系数

Fig.5　Dust concentration and coefficient of variation for each row of photovoltaic panels at different tilt angles

升，更易超过临界捕获速度而发生反弹，从而降低沉积概率。

所有工况均呈现出第二排光伏板为阵列积尘峰值区的规律，第三至第五排积尘浓度沿流向逐级递减，该非线性分布趋势与风洞实验[13]中观测到的阵列后排积尘量在倾角增大时的非线性增长具有一致性。从积尘非均匀性来看，各排光伏板CV值多分布于0.24~0.60，属于中度不均匀分布，阵列前两排积尘非均匀性显著高于后排，与前排流场强扰动特征直接相关。

2.2 积尘的纵向与横向分布特征

光伏板前后缘（宽度方向）的纵向分布、左右侧（长度方向）的横向分布，直接反映了局部流场对颗粒沉积的精细调控作用，明确其分布特征是后续揭示流场沉积机制的基础（图6）。

在纵向沉积方向上除第二排光伏板外，其余各排均呈现后缘积尘浓度显著高于前缘的共性分布规律。而第二排光伏板的沉积模式随倾角变化发生完全反转：正倾角下呈现两侧主导、中部富集的异常特征，负倾角下逆转为中心主导的常规分布；正倾角绝对值从30°增至37°时，第二排从中部富集转为后缘富集，负倾角同步增大时，中心富集趋势进一步增强。

积尘横向分布整体呈现良好的对称性，多数工况下左右两侧浓度相对偏差<5%，中部浓度显著高于两侧。

2.3 光伏阵列覆尘分布的流场调控机制

积尘的空间分布本质上是流场结构对颗粒输运过程的调控结果，明确阵列内部涡结构的类型、演化规律及其对颗粒运动的影响机制，是揭示非均匀覆尘机理的核心（图7）。

从流场宏观结构来看，来流方向与倾角变化从根本上重塑了阵列的空气动力学特征。正向来流工况下，气流冲击首排光伏板迎风面，在板面中下部形成高压驻点，气流加速向上爬升并在光伏板前缘发生强烈流动分离，在板后形成大规模回流区与分离泡。

背向来流工况下，主流被大幅抬升，阵列上方形成高速气流通道，强烈的回流区则被压缩在光伏板下方与地面之间的受限空间内，阵列整体流场沿中截面呈镜像对称分布，边缘区域因侧向绕流导致涡结构强度显著减弱。

上述流场结构沿流向的演化规律，可解释第二排为积尘峰值、后排逐级递减的现象：首排光伏板诱发强回流区与涡结构，第二排恰好处于该低速高湍流扰动核心区，颗粒动能快速耗散、沉积概率最大；随气流深入，后排涡结构逐排衰减，携尘能力下降，积尘浓度递减。无论正负倾角，该物理机制均成立。

2.4 流场参数与积尘浓度的相关性

Pearson相关性分析结果显示（图8）：

风速与积尘浓度的相关性随来流方向完全反转：正倾角下呈显著正相关，高流速区颗粒供给充足促进沉积；负倾角下呈强负相关，低流速回流区对应积尘富集区。

涡量与积尘浓度在所有工况下均呈稳定负相关，是全工况下抑制沉积的普适性核心参数，高涡量区通过离心力与强剪切作用阻碍颗粒附着，低积尘区涡量值普遍较高积尘区高出1个数量级。

湍流强度与积尘浓度的相关性同样发生完全反转：正倾角下呈负相关，强湍流提升壁面剪切力抑制颗粒附着；负倾角下呈显著正相关，强湍流延长颗粒悬浮时长、提升碰撞概率，促进沉积。

压力场与积尘浓度以负相关为主，负压区利于颗粒吸附沉积，但第二排光伏板因对转涡结构调制，出现高压区对应高积尘浓度的反常特征。

值得注意的是，风速与积尘浓度的相关性随来流方向发生完全反转，这为前人关于风速作用的矛盾结论[7,14-15]提供了线索。此外，本文区分了涡量与湍流强度的不同作用，这有助于修正笼统的将“湍流”视为单一抑尘因素的认识[5]。

2.5 高低积尘区流场参数对比

将各光伏板表面积尘浓度排名前10%的区域定义为高积尘区（H），后10%的区域定义为低积尘区（L），分正、负倾角两类工况，对核心流场参数进行精细化对比分析。工况编号中，H代表高积尘区，L代表低积尘区，1~5分别代表第一排至第五排光伏板。

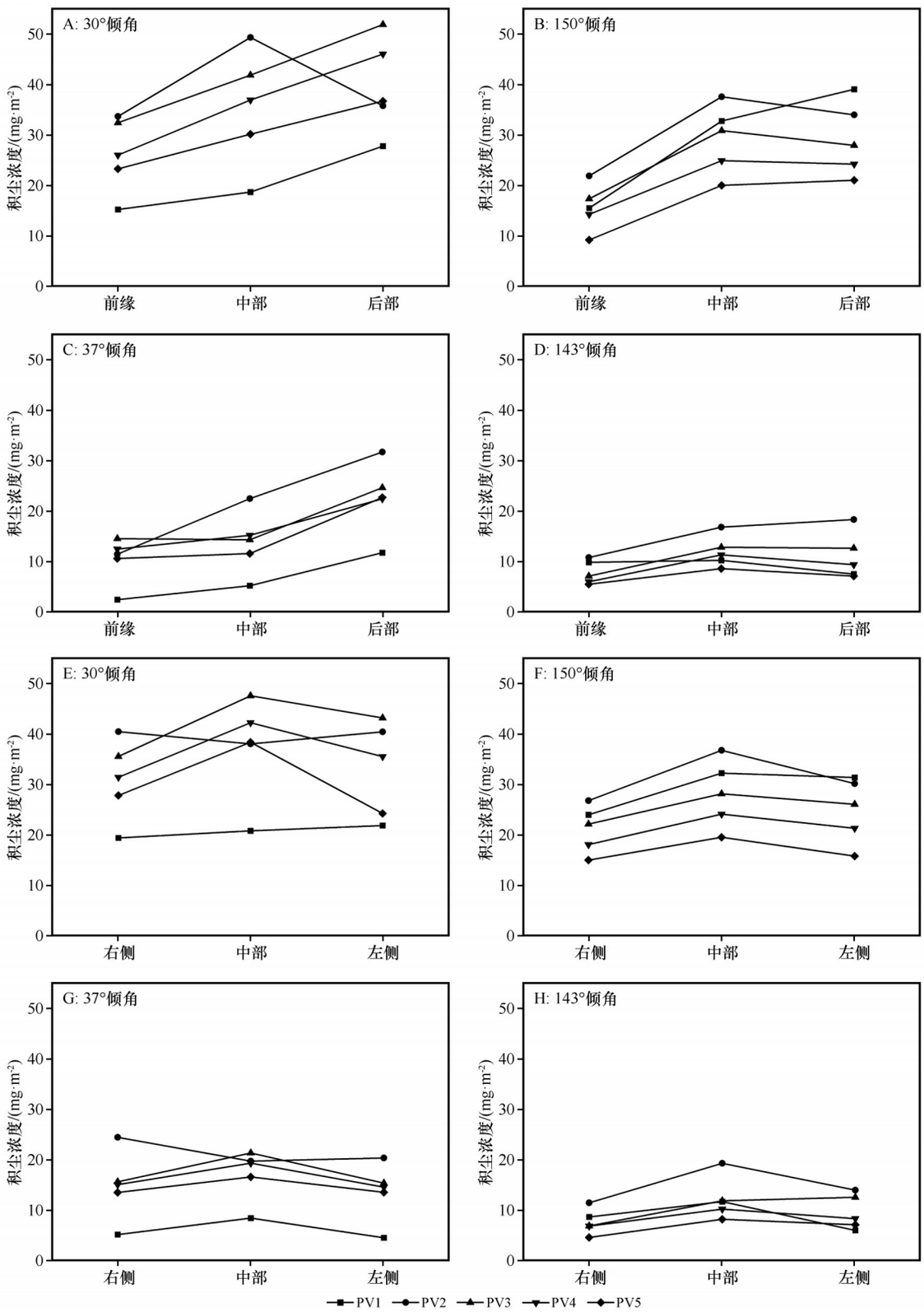


图6　不同倾角下光伏板纵向(A~D)与横向(E~H)分区积尘浓度分布

Fig.6　Dust concentration distribution in the longitudinal (A-D) and transverse (E-H) zones of photovoltaic panels at different tilt angles

从风速来看，正、负倾角工况呈现完全相反的特征：正倾角工况下，高积尘区平均风速高于低积尘区，30°工况下高积尘区平均风速较低积尘区高21.6%；负倾角工况下，高积尘区平均风速显著低于

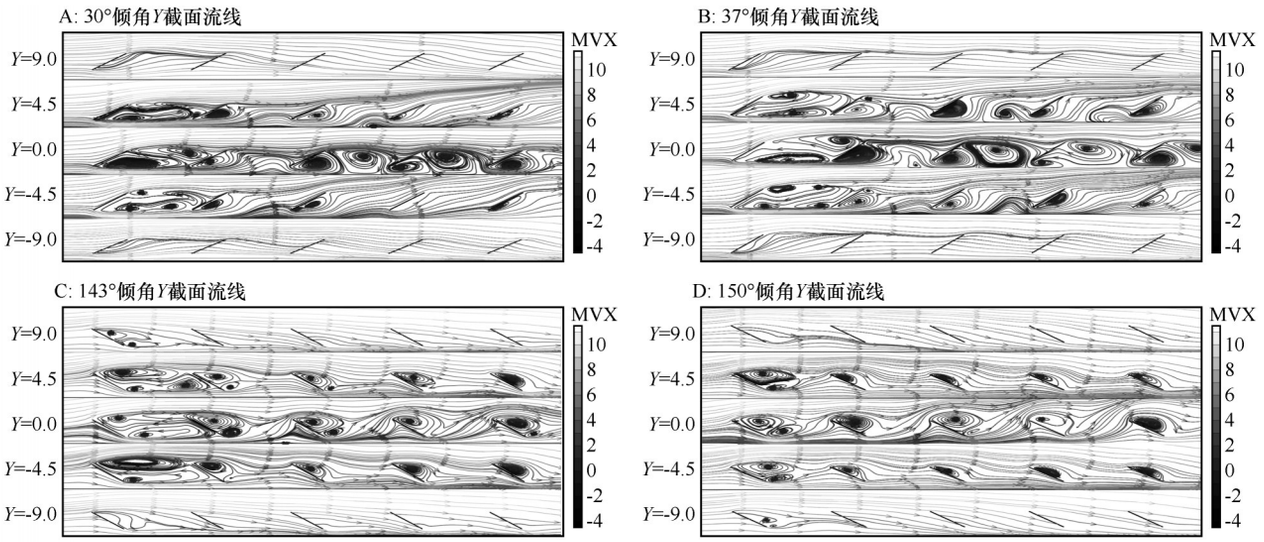


图 7 光伏阵列 Y 截面时间平均流线

Fig.7 Time-averaged streamlines in the Y-section of a photovoltaic array

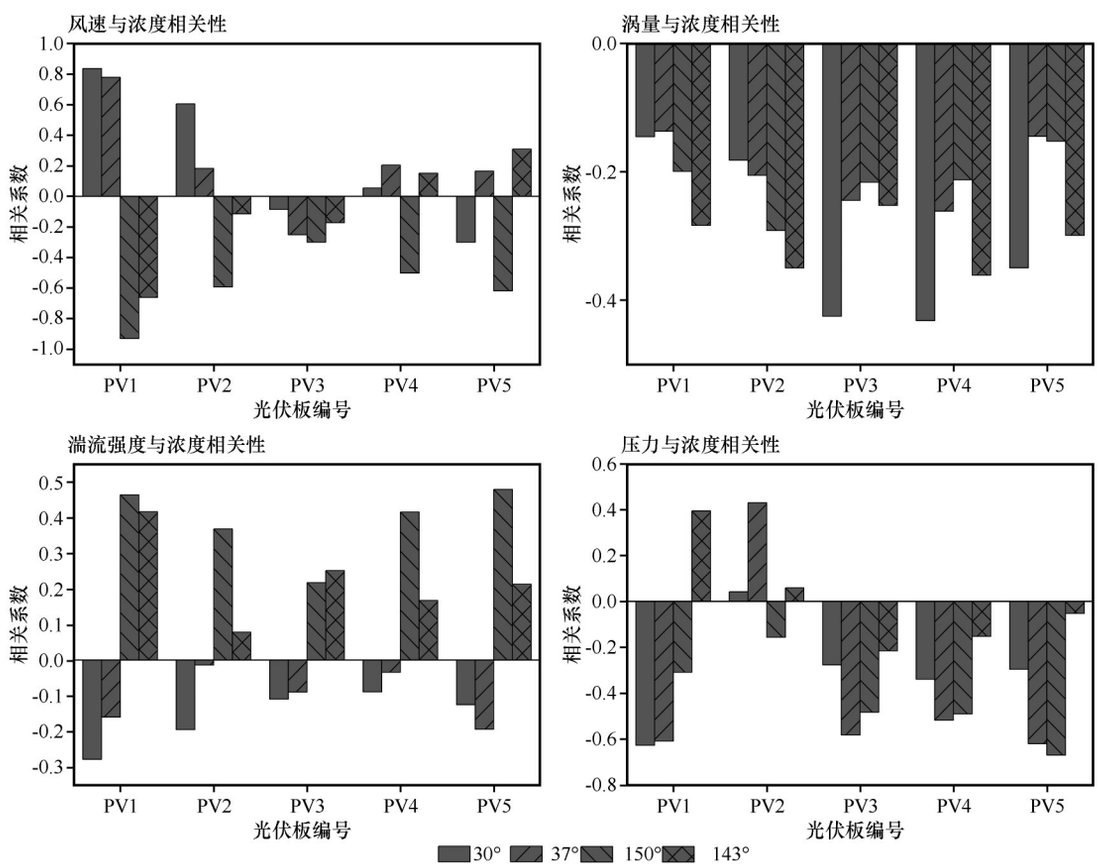


图 8 各变量与积尘浓度的相关性

Fig.8 Correlation between variables and concentration

低积尘区，150°工况下低积尘区平均风速较高积尘区高 127.3%，与相关性分析结论完全吻合（图 9）。

从涡量来看，所有工况下低积尘区的涡量均显著高于高积尘区，且差异随倾角绝对值增大而提升。30°正倾角工况下，低积尘区平均涡量为 4.82 s^{-1}，是高积尘区的 3.8 倍；143°负倾角工况下，低积尘区平均涡量达 10.74 s^{-1}，是高积尘区的 3.5 倍，进一步验证了涡量对沉积的普适性抑制作用（图 10）。

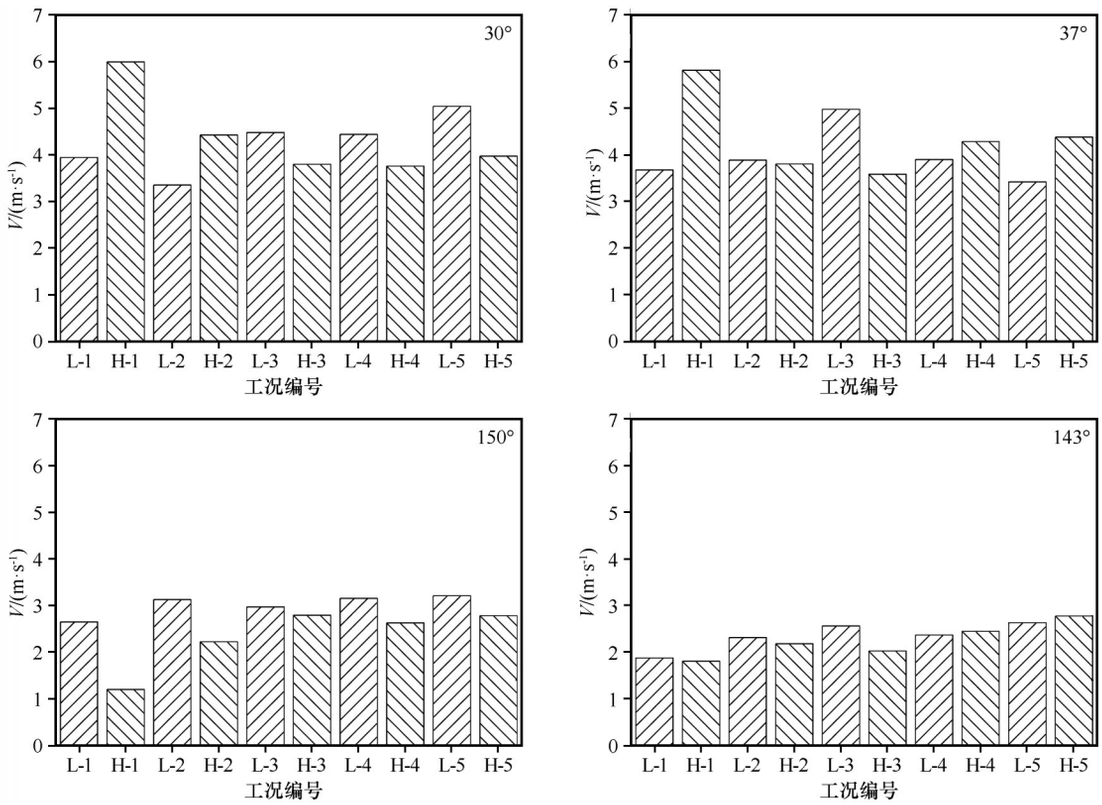


图 9　不同工况高低积尘浓度区风速对比

Fig.9　Comparison of wind speeds in areas with high and low sediment concentrations under different operating conditions

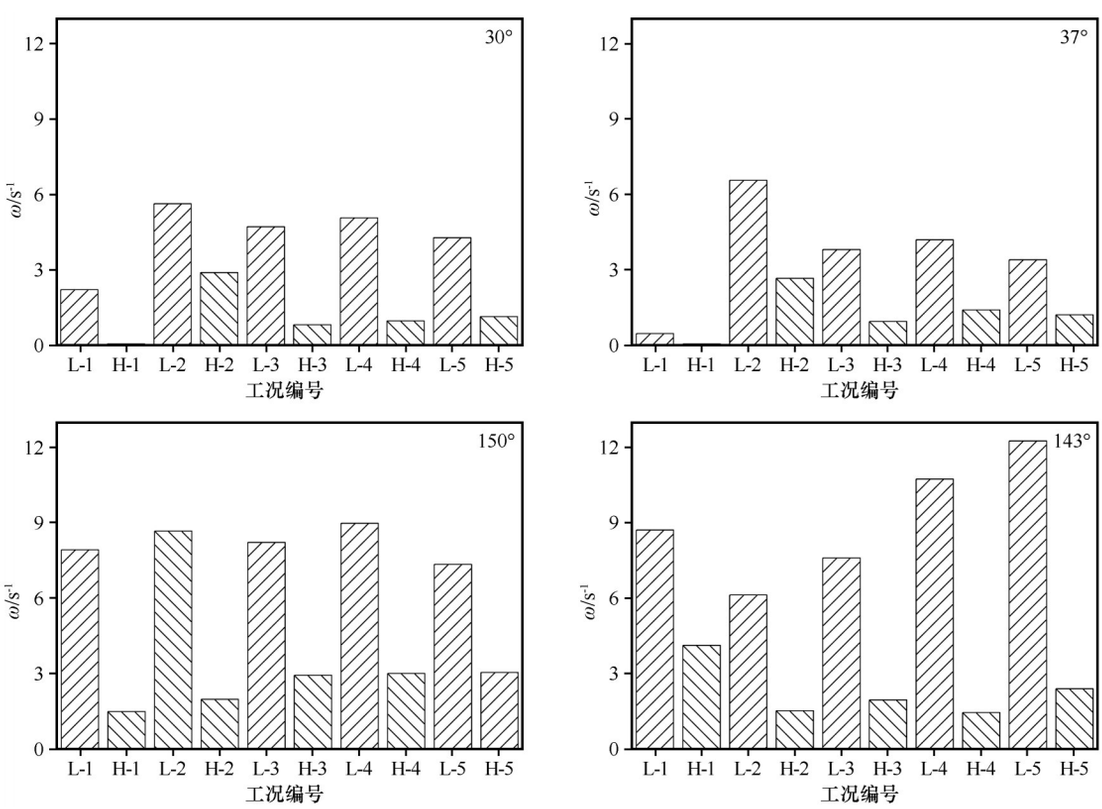


图 10　不同工况高低积尘浓度区涡量对比

Fig.10　Comparison of vorticity in zones with high and low sediment concentrations under different operating conditions

从湍流强度来看，同样呈现随来流方向反转的特征：正倾角工况下，低积尘区湍流强度高于高积尘区，37°工况下低积尘区平均湍流强度较高积尘区高 68.4%；负倾角工况下，高积尘区平均湍流强度显著高于低积尘区，143°工况下高积尘区平均湍流强度较低积尘区高 175.6%，直观反映了不同来流方向下湍流对沉积的影响规律（图 11）。

从压力来看，低倾角工况下高积尘区以负压为主，负压程度显著高于低积尘区；高倾角工况下，高低积尘区均以负压为主，但低积尘区负压程度更轻，整体呈现负压越强积尘浓度越高的规律，仅 PV2 受对转涡影响出现反常特征（图 12）。

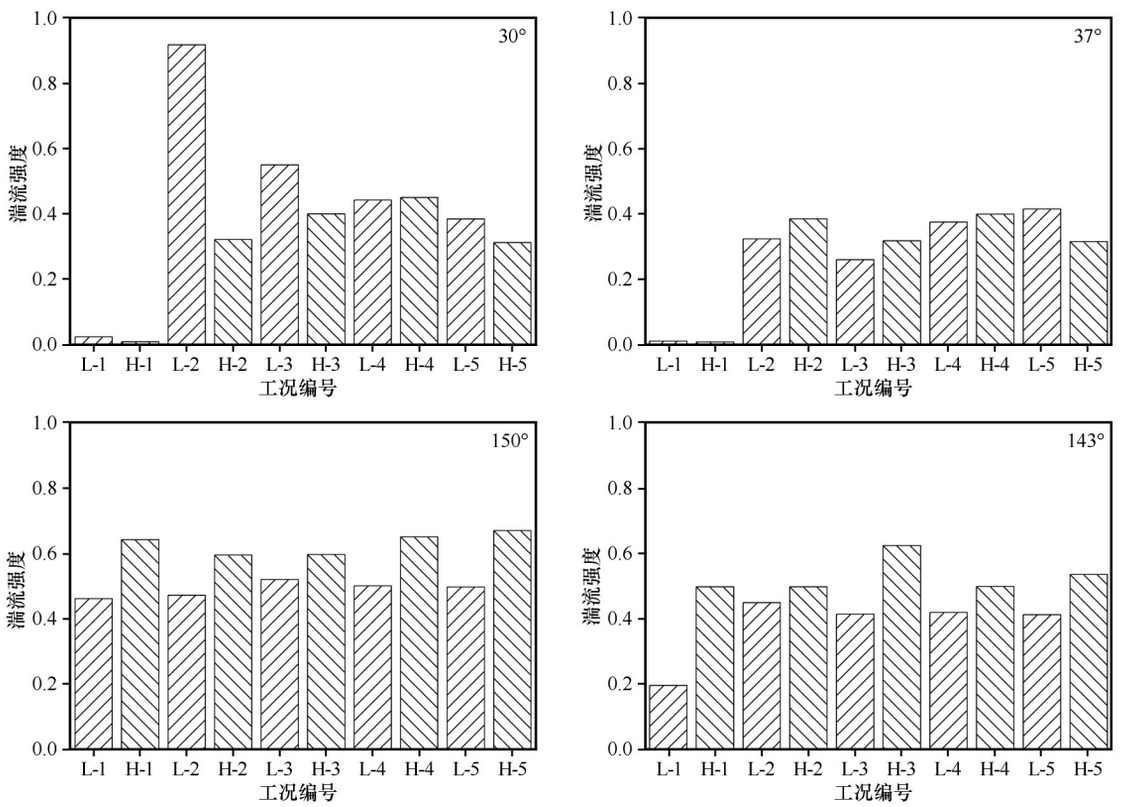


图 11 不同工况高低积尘浓度区湍流强度对比

Fig.11 Comparison of Turbulence Intensity in Zones with High and Low Sediment Concentrations Under Different Operating Conditions

上述负倾角工况的分析填补了当前研究多限于正倾角工况[2,16]的不足。结果揭示：同绝对倾角下负倾角首排积尘较正倾角提升 60% 以上，沉积模式完全反转，表明仅依据正倾角规律制定防沙策略将显著低估跟踪式支架在背风状态下的积尘风险。

3 结论

本文以柴达木盆地典型沙戈荒光伏阵列为研究对象，采用大涡模拟耦合离散相模型，建立经风洞实验标定的沙尘沉积判据模型，系统分析了正负倾角工况下光伏阵列的非均匀覆尘特征与流场调控机制。

增大倾角绝对值可显著降低阵列各排光伏板的平均积尘浓度；相同绝对倾角下，负倾角工况首排光伏板积尘浓度较正倾角提升 60% 以上，后续排数积尘浓度则普遍低于正倾角；所有工况下阵列第二排光伏板均为积尘峰值区，其纵向与横向沉积模式随倾角正负发生完全反转。

光伏阵列内部可识别出前缘分离泡、板后/板下回流涡、尾迹涡街三类核心涡结构，决定了积尘的空间分布特征；涡结构沿流向的逐步耗散，是后排光伏板积尘浓度沿流向逐级递减的核心成因。

涡量与积尘浓度在全工况下呈稳定负相关，是抑制沙尘沉积的普适性核心参数；风速、湍流强度与积尘浓度的相关性随来流方向发生完全反转，正倾角下分别呈正相关、负相关，负倾角下则分别呈

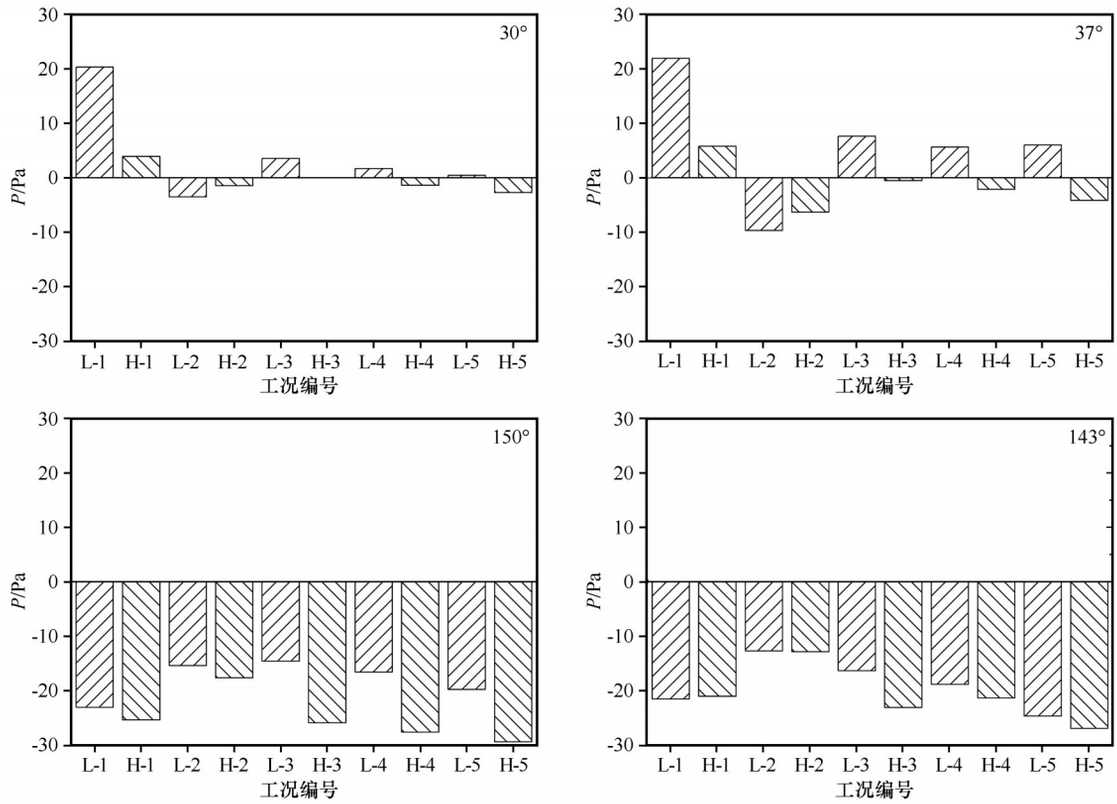


图 12　不同工况高低积尘浓度区压力对比

Fig.12　Comparison of pressure in zones with high and low sediment concentrations under different operating conditions

负相关、正相关，体现了来流方向对湍流—沉积耦合机制的根本性调控作用。

高低积尘区流场特征对比验证了上述规律：所有工况下低积尘区涡量显著高于高积尘区，正倾角下高积尘区风速更高、湍流强度更低，负倾角下高积尘区风速更低、湍流强度更高，进一步阐明了非均匀积尘的流场成因。

参考文献：

[1] Bodnár I, Matusz-Kalász D, Boros R R. Exploration of solar panel damage and service life reduction using condition assessment, dust accumulation, and material testing[J]. Sustainability, 2023, 15(12): 9615.

[2] Lu J, Hajimirza S. Optimizing sun-tracking angle for higher irradiance collection of PV panels using a particle-based dust accumulation model with gravity effect[J]. Solar Energy, 2017, 158: 71–82.

[3] Pitois O, Chateau X. Small particle at a fluid interface: effect of contact angle hysteresis on force and work of detachment[J]. Langmuir, 2002, 18(25): 9751–9756.

[4] 胡方越，徐俊超，谢俊. 光伏组件表面灰尘沉积机制及清洁技术研究现状[J]. 太阳能学报，2025，46(10)：197–208.

[5] Dagher M M, Kandil H A. Computational prediction of dust deposition on solar panels[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(5): 12545–12557.

[6] Ndeto M P, Wekesa D W, Njoka F, et al. Correlating dust deposits with wind speeds and relative humidity to overall performance of crystalline silicon solar cells: an experimental study of Machakos County, Kenya[J]. Solar Energy, 2022, 246: 203–215.

[7] Said S A M, Hassan G, Walwil H M, et al. The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust–accumulation mitigation strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 743–760.

[8] Heydarabadi H, Abdolzadeh M, Lari K. Simulation of airflow and particle deposition settled over a tilted photovoltaic module[J]. Energy, 2017, 139: 1016–1029.

[9] Zheng C, Lu H, Zhao W. Numerical simulation of dust deposition characteristics of photovoltaic arrays taking into account the effect of the row spacing of photovoltaic modules[J]. Solar Energy, 2024, 278: 112804.

[10] Ilse K K, Figgis B W, Naumann V, et al. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 98: 239–254.

[11] 李诗源. 风沙环境下光伏板表面风荷载及积尘仿真研究[D]. 银川：宁夏大学，2019.

[12] Yang H, Wang H. Experimental study of particle deposition on a solar photovoltaic panel based on the response surface method

[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(29): 73974−73988.

[13] Wang J, Hu W, Wen Y, et al. Dust deposition characteristics on photovoltaic arrays investigated through wind tunnel experiments[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 1582.

[14] Figgis B, Guo B, Javed W, et al. Dominant environmental parameters for dust deposition and resuspension in desert climates [J]. Aerosol Science and Technology, 2018, 52: 1462473.

[15] Jaszczur M, Koshti A, Nawrot W, et al. An investigation of the dust accumulation on photovoltaic panels [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(2): 2001−2014.

[16] Kaiss E-C A, Hassan N M. Numerical modeling of dust deposition rate on ground-mounted solar photovoltaic panels[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2022, 145(4): 041003.

Mechanism of non-uniform dust deposition on photovoltaic arrays under natural turbulent inflow conditions

Ma Gaosheng[1], Ma Shihao[1], Liu Benli[2], Chen Minru[1], Yang Chengpeng[1], Peng Huaiwu[3]

(1. *School of Green Energy and Storage, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*; 2. *State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 3. *Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xian* 710100, *China*)

Abstract: To address the frequent problem of sand and dust accumulation on photovoltaic arrays in China's desert, gobi, and arid regions, a dust deposition criterion model based on critical capture velocity and near-wall sampling space was developed by coupling Large Eddy Simulation (LES) with a Discrete Phase Model (DPM). We systematically analyzed the characteristics of non-uniform dust deposition distribution and the flow field regulation mechanisms in photovoltaic arrays under both positive and negative tilt conditions, and quantified the dust accumulation risk and cleaning cycles. The results indicate that, under all conditions, the second row of PV panels in the array is the peak dust accumulation zone, and its deposition pattern reverses completely depending on whether the tilt angle is positive or negative; vorticity is the core parameter for suppressing deposition across all conditions, while the correlation between wind speed, turbulence intensity, and dust accumulation reverses completely depending on the direction of the incoming flow; under a 30° positive tilt, the second row of PV panels is the highest-risk zone.

Key words: PV array; dust deposition; flow field structure; tilt angle; Large Eddy Simulation