马高生,宋远翔,柳本立,等.风沙环境下风力机/风电场影响沙尘输运的实验研究[J].中国沙漠,2026,46(5):159-169.

风沙环境下风力机/风电场影响沙尘输运的实验研究

马高生[1],宋远翔[1],柳本立[2],余学成[1],彭怀午[3],宋晨光[4]

(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;4.南通大学 电气与自动化学院,江苏 南通 226001)

摘要:“沙戈荒”地区风能资源开发潜力巨大,但风力机与风沙流的相互作用机理尚不明确。本研究利用大气边界层风洞,通过开展不同沙尘强度下的单机及风电场缩比模型实验,系统揭示了粒径、浓度及运行参数对沙尘输运规律与地表侵蚀的影响。结果表明:单机阻沙效应具有显著的粒径非线性敏感性。100 μm颗粒的响应与涡流演化尺度匹配,易在动能耗散区协同沉降;50 μm颗粒受随流性驱动,易逃逸;200 μm颗粒则凭借高初始动量展现出较强穿透性。在下游远尾流区域,湍动能的大量引入虽构建了宏观低输沙区,但也诱发了颗粒落点的离散化。风电场层面,多级动能剥夺降低了地表剪切应力,并在风电场上空形成随粒径减小而增强的聚集效应。规模化开发利用尾流效应抬升了起沙阈值,为荒漠化风电场的生态维护提供了数据支持。

关键词:风洞实验;风力机;风电场;沙尘输运

文章编号:1000-694X(2026)05-159-11 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00098

中图分类号:TK513.5 **文献标志码**:A

0 引 言

过去数十年间,全球风能产业迈入了爆发式增长阶段。目前,风电场选址不再局限于早期的沿海、内陆平原等风资源优越且电网接入便利的区域,战略重心已明显向土地资源丰富、环境干扰阈值较低的沙漠、戈壁及荒漠化地带转移[1]。在近地面大气边界层复杂的流动系统中,作为垂直矗立的尺度宏大的气动阻碍实体,风力机组与其周边的风沙环境构成了深刻的耦合关系(图1),尤其是其对区域性沙尘运移与时空演化规律的扰动机制,已成为当前亟须开展系统化科研攻关的核心课题。

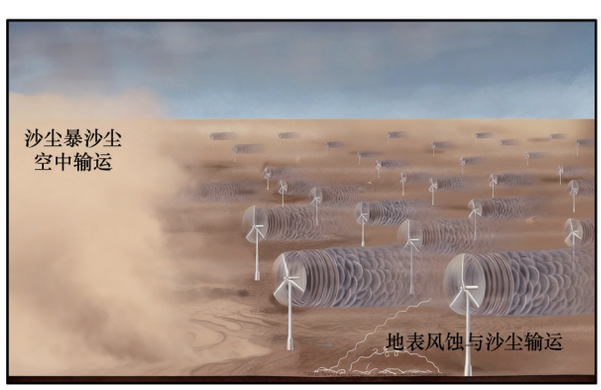


图1 风电场与沙尘输送相互作用示意图

Fig.1 Schematic diagram of interaction between wind farm and sand transport

早期学者关注风力机与惯性颗粒如雨滴、冰雹等的相互作用,Smith等[2]利用注入水滴作为惯性颗粒的风洞实验进行研究,在风力机尾流中发现了水滴聚集,重点考察了水滴浓度对风力机尾流恢复和周围湍动能的影响,结果表明颗粒倾向于在湍流中聚集,并根据颗粒浓度影响流体湍流能量的耗散。Travis等[3]使用多孔盘作为湍流发生器进行了风洞实验,以研究微米级水雾与湍流的相互作用,结果表明颗粒倾向于在湍流强度较大的区域中聚集,颗

收稿日期:2026-03-25;**改回日期**:2026-06-03

资助项目:国家自然科学基金项目(52506252);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:宋晨光(E-mail:chenguang_1987@hotmail.com)

粒浓度影响流体湍流能量的耗散。He等[4]采用CFD模拟方法，分析了单相流、液-气、固-气3种状态的速度压力分布，结果显示尽管单相与两相流的速度演化趋势相似，但两相流中叶片静压分布显著大于单相流。以上研究的惯性颗粒大多为水滴，其性质与沙尘颗粒有所差别，不同强度沙尘暴风沙环境中颗粒的St数不同，但一般可将St数范围限制在2.0~35.9[5]。

2024—2025年，兰州理工大学风沙-风力机相互作用研究团队开展了直接针对风沙环境的数值模拟工作。Wang等[6]采用大涡模拟（LES）结合制动线模型（ALM）模拟的方法，发现涡轮尾流湍流显著削弱了沙尘（主要是PM_{10}和PM_3）浓度与流速的相关性，相关系数降幅达16.6%，同时尾流增强了沙尘的垂向湍流扩散，尤其对较大颗粒PM_{30}更为显著。Ma等[7-8]采用多相质点网格（MPPIC）结合ALM，拓展了粒径范围，模拟结果表明不同粒径分布区域不同，粒径越小越均匀；沙粒倾向于聚集在叶尖涡和低涡度涡核外围，形成“网状结构”；风机对沙尘传输有显著阻滞作用，平均阻沙率随尾流距离先增后减，峰值可达到67.55%；风力机导致沙粒提前沉降，地面沉积在尾流投影区呈“三角形”分布，小粒径沙粒沉积量显著增加，10 μm颗粒沉降量增加20.20%，大粒径颗粒受惯性影响沉积量变化较小甚至减少。谱本征正交分解（SPOD）分析表明沙尘改变了大尺度涡结构，导致尾流尺度缩小，沙尘抑制了大尺度结构能量的卷吸，促进小尺度结构能量活动；尾流区内空中沙尘浓度和粒径均小于两侧，沙尘在尾流中表现出复杂的迂回运动，颗粒越小其轨迹越复杂；风力机的存在促使沙粒提前沉降，在尾流下游区域同样形成三角形沉降模式。

近年来，开始关注风电场对大气污染物扩散和沉降的效应。Ruan等[9]系统评估了张家口风电场对空气质量的直接和间接影响，结果表明风电场部署对北京的$PM_{2.5}$浓度产生直接影响，浓度净增值为0.08%。Wang等[10]基于河北省张北县GW级风电场数据的中尺度模拟，揭示了大范围风电场对当地的影响是显著且持续的，同时影响当地大气边界层并间接影响空气污染物的扩散。Mataji等[11]的数值模拟表明，风电场可以充当物理屏障，阻碍沙尘运动，导致$PM_{2.5}$沉降量增加23.3%，PM_{10}沉降量增加34.2%。王强[12]采用耦合风电场的WRFCMAQ模型评估了风电场对空气质量的影响，研究表明风电场的存在可促使大气污染物重新分布，导致污染物发生区域的扩散和输运，同时呈现出明显的季节变化。Mo等[13]利用WRF-Chem模型模拟大型风电场周边区域的二氧化氮浓度，结果显示在风电场上风边界及近下风过渡区出现浓度升高现象，同时与无风电场情形相比，上风区域污染物浓度相对较高。这些以数值为手段的研究共同表明，风电场布局对沙尘及污染物输送具有显著影响。

以上结果表明，风力机/风电场的尾流会显著改变沙尘的输运特征。但是目前存在以下研究不足：缺少不同级别即对应不同沙尘浓度和粒径沙尘暴天气下，风力机/风电场对沙尘输运的研究；缺少风力机/风电场影响沙尘输运的实验研究。针对以上问题，本研究利用风沙环境风洞模拟沙尘暴天气环境，利用符合相似参数的风力机模型和多台风力机模型错列模拟实际尺寸的风力机/风电场运行，首次开展风力机/风电场影响沙尘输运的实验研究。

1 实验

1.1 风力机模型

本实验选用的风力机叶片是SG6050专用翼型。基于Glauert优化修正的叶素-动量（BEM）理论，设计并制作了两种不同缩比比例的风力机模型：小尺寸缩比模型用于模拟风电场工况，大尺寸缩比模型则用于开展单台机组的实验。该翼型在低雷诺数工况下具有卓越的气动效率与运行稳定性，能够有效保证缩比实验结果的可信度。在保证叶片实度等关键设计参数相似的同时，也关注了雷诺数和弗劳德数等相似性准则。虽然无法完全匹配，但通过适当减小风速，确保了实验的核心物理过程得到准确模拟。为了保证流体动力相似和颗粒运动相似，优先保证弗劳德数相似，对于沙尘颗粒，重力是决定性因素。各模型详细参数见表1。

两模型实物如图2所示。

1.2 风洞实验室

实验在兰州理工大学甘肃省风力机工程技术研究中心的环境风洞实验室进行。风洞全长25.4 m，核心实验段尺寸为17 m×2 m×2 m（图3）。设计风速范围为1~30 $m\cdot s^{-1}$，背景湍流度低于1.0%。此外，实验系统配备了专用的浓度可调式沙尘释放装置，能够实现沙尘颗粒在流场中的均匀稳定供

表 1　风力机模型几何参数与相似比

Table 1　Geometric parameters and similarity ratio of wind turbine model

	D	H_{hub}	δ/H_{hub}	R_s	C_p	C_T	Re	λ
真实风力机	100	118	1.67	4%~9%	0.4	0.85	8.1×10^6	6.4
风力机模型 1	0.15	0.18	1.67	8%	0.21	0.7	5×10^4	7.4
风力机模型 2	0.44	0.3	1.67	8%	0.29	0.78	1.1×10^5	7

注：D 为风轮直径，单位 m；H_{hub} 为风力机轮毂高度，单位 m；δ 为大气边界层厚度，单位 m；R_s 为叶片实度；C_p 为功率系数；C_T 为推力系数；Re 为雷诺数，λ 为叶尖速比。

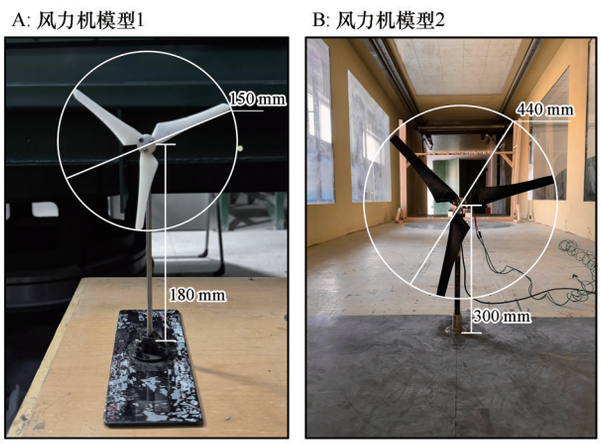


图 2　风力机模型与实验场景实拍图

Fig.2　Wind turbine model and photograph of the experimental setup



图 3　风洞与沙尘释放口

Fig.3　Wind tunnel & sand and dust release port

给（图 3）。

采用在风洞入口处布置尖劈与粗糙元的方式，实现了符合中性大气边界层的风场模拟。集沙设备参考了刘氏集沙仪结构[14]，垂向采集范围 34.84~1 177.58 mm 与 34.84~1 289.08 mm；集沙仪由多个独立的集沙单元组成，每个单元的进沙口截面尺寸均为 30 mm×34.84 mm（图 4）。鉴于本研究主要关注风电场后方的集沙数据，旨在通过相对量计算评估风电场内部不同位置的集沙与输沙特性，故采用侵入式测量方法获取集沙量。

在风洞实验中，集沙仪测得的质量 $M_{measured}$ 并非真实的输沙量 M_{ture}，必须引入采集效率 η 进行修正：

$$M_{ture}=\frac{M_{measured}}{\eta} \tag{1}$$

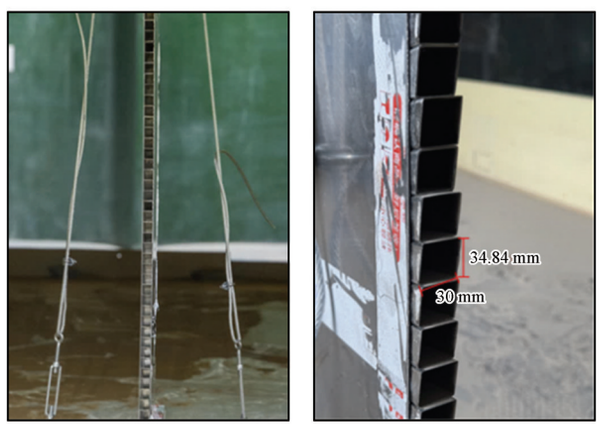


图 4　集沙仪实物图

Fig.4　Sand sampler local diagram

需要注意的是，不同粒径组分采用不同的效率系数 η_d 进行修正[15]。选用腾格里沙漠天然沙作为沙源，经旋振筛沙机制备出 4 种实验材料，包括 3 种单一粒径工况（200 μm 代表沙漠可蚀地表“黑风暴”环境，St>50；100 μm 代表沙漠边缘强沙尘暴，St>10；50 μm 代表扬沙天气，St≈1）以及一种多粒径混合沙样。

1.3　实验方案

针对单台风力机实验，风洞风速设定为 7 m·s^{-1}，此时叶尖速比 λ 约为 6.4。通过外接电阻调节模型转速，并利用霍尔传感器进行实时监测。单机实验同样涵盖上述 3 种粒径工况，测量截面选定为风轮后方 1D、3D、5D、7D 及 9D 的轴向横截面。每个截面分别选取 5 个径向位置进行采样，即 r/R=0，±0.5，±1.0，测点分布如图 5 所示，单次测量时长为 300 s。需特别说明的是，在模拟小粒径沙尘环境时，为准确复现实际大气中细小颗粒的沉降行为，本实验对风洞风速进行了相应的等比例调低。风电场实验在 11.3 m·s^{-1} 的恒定风速下进行，每种工况运行时间为 300 s。保持集沙仪位置固定，将风力机排数由五排依次递减至零，通过移除不同排数的风力机来反

推整个风电场的作用，详见图 6。测点布置于风电场内部典型位置及下风向 5D、10D 与 20D 处，即对应图中 45D、50D 与 60D 处，以实现对沙尘颗粒数据的空间不同位置采集。

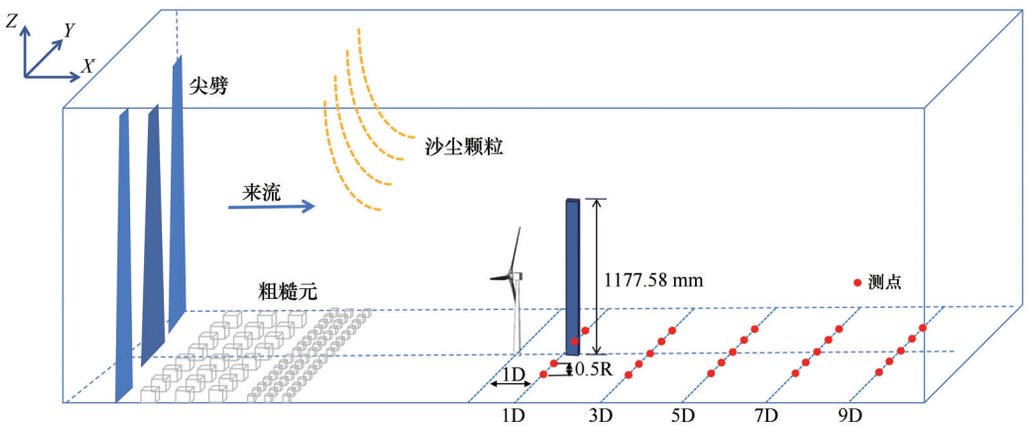


图 5 风力机实验工况图

Fig.5 Experimental condition diagram of wind turbine

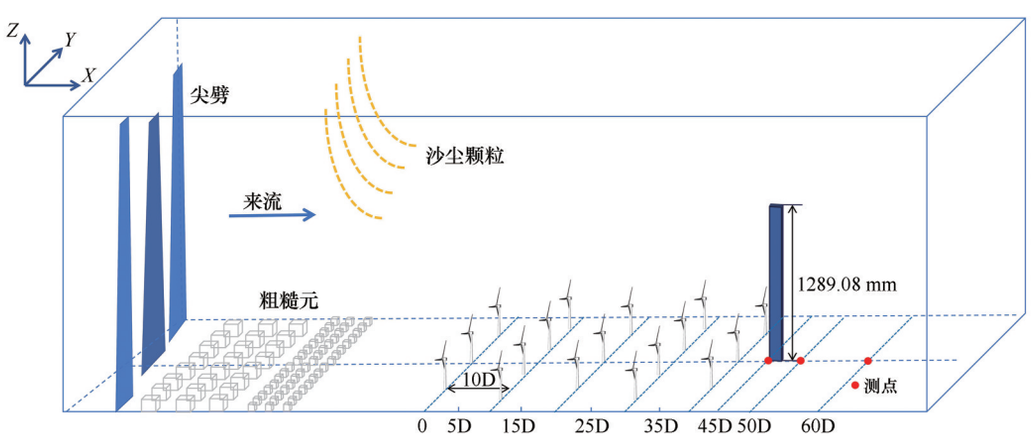


图 6 风电场实验工况图

Fig.6 Experimental condition diagram of wind farm

对空场输沙率分析表明，来流输沙率随高度的增加呈现出显著的指数型衰减分布特征。同时，颗粒粒径对输沙通量的垂直分布具有重要影响——沙尘粒径越大，其分布越向近地表区域集中。具体的输沙通量分布曲线如图 7 所示。

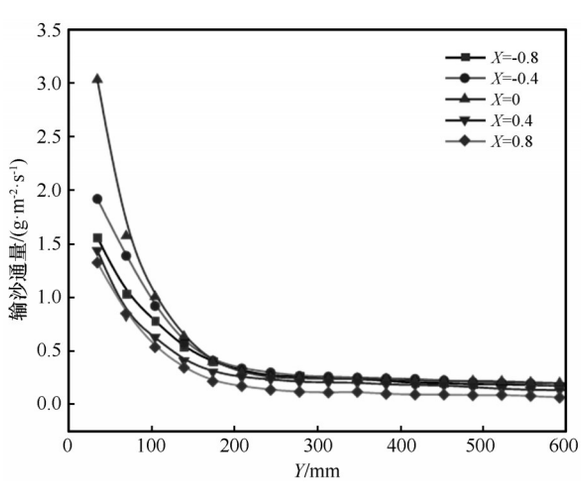


图 7 来流输沙垂直分布

Fig.7 Vertical distribution of incoming sand transport

1.4 数据处理与计算

输沙通量定义为：

$$Q = \frac{M}{S \cdot t} \tag{2}$$

式中：Q 为垂直某高度输沙通量，单位为 $g \cdot m^{-2} \cdot t^{-1}$；$M$ 为该高度集沙质量，单位为 g；S 为集沙单元截面积，单位为 m^2；t 为沙尘收集时间，单位为 s。

定义无量纲数阻沙率 I，用于定量表征风力机对沙尘输运的影响：

$$I = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \tag{3}$$

式中：M_0为背景场下对应高度集沙单元采集的沙尘质量，单位为g；M_1为布置风力机后对应高度处集沙单元采集的沙尘质量，单位为g。I为正值代表该区域表现为阻沙效应，即风力机减弱了沙尘输运；I为负值则代表该区域表现为扬沙效应，即风力机扰动导致局部沙尘通量增加。

沉降量（M_{dep}）通常指单位时间内沉积于单位地表面积的沙尘质量，沉降率（R_{dep}）则指沉积量占空场总输沙量的比例：

$$M_{dep}=\sum_{i=1}^{n}M_{0i}-\sum_{i=1}^{n}M_{1i} \tag{4}$$

$$R_{dep}=\frac{\sum_{i=1}^{n}M_{0i}-\sum_{i=1}^{n}M_{1i}}{\sum_{i=1}^{n}M_{0i}} \tag{5}$$

各物理量通过垂直积分和相对变化相互联系，但因其度量维度和计算范围不同而具有独立性。在解读各图表时，须区分该图展示的是垂直分布、水平沿程分布还是截面总体变化。

2　风力机对沙尘输运的影响

2.1　风力机对不同粒径沙尘分布的影响

实验对比了3种典型粒径50、100、200 μm沙尘在相同风速条件下的输运表现。如图8所示，风力机对沙尘的拦截与减弱作用呈现出明显的粒径敏感性。其中，200 μm受风力机扰动影响最为显著，其平均阻沙率最大达到了0.65；而50 μm表现出较强的穿透性，平均阻沙率最低达到−0.11。这种差异的物理本质在于颗粒动量与尾流能量分布的耦合程度不同。50 μm细颗粒自身惯性极小，倾向于跟随气流运动；由于尾流中高频脉动动能的携带作用，其容易绕过物理阻挡并随流逃逸。200 μm粗颗粒具备较高的初始动能，风机后方的气动能量亏损不足以显著改变其运动轨迹，导致其直接穿透尾流区。相比之下，100 μm颗粒的气动响应时间与尾流主导涡的耗散时间尺度最为匹配，其既无法像细颗粒那样随涡流逃逸，又缺乏粗颗粒的穿透动能，因而在此特定的能量衰减区内发生大规模沉降。

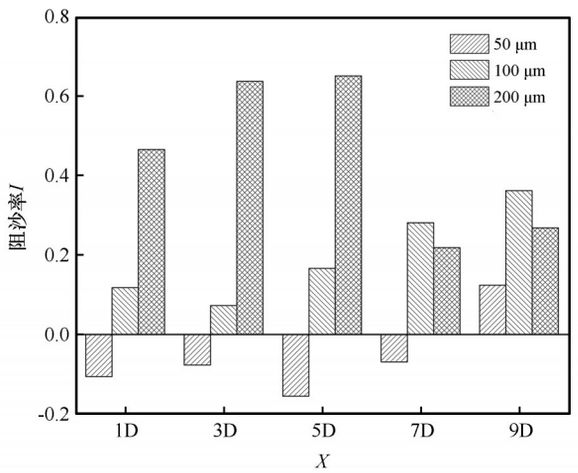


图8　尾流区不同粒径沙尘平均输沙变化因子沿流向的分布

Fig.8　Streamwise distribution of the average sand transport variation factor for different grain sizes in the wake region

对于粒径为100 μm工况，在1D至3D的近尾流区域，受叶片旋转扫掠、塔架阻挡效应及风速亏损影响，输沙量呈现显著下降趋势。值得注意的是，局部流场表现出明显的非均匀性：在面向来流方向的左下角区域及上叶尖高度处，出现了显著的沙尘富集现象（图9）。风力机后方的“沙影区”效应随下风向距离呈现先极值后衰减的演变规律。在5D断

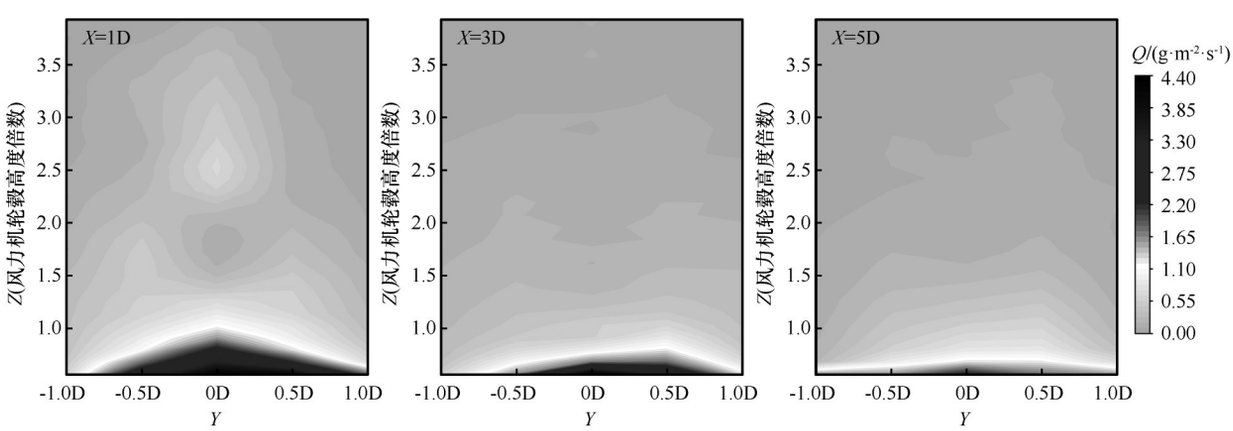


图9　不同流向位置垂直截面输沙通量Q空间分布云图

Fig.9　Contours of the spatial distribution of sand transport on vertical cross-sections at different streamwise locations

面处，受极强尾流亏损主导，输沙量降至空场的35.15%，达到阻沙效能峰值；随后受湍流掺混与能量恢复驱动，沙尘输运能力逐步反弹。至9D断面时，输沙量已恢复至空场的73.11%，阻沙率降至0.27。该过程直观揭示了尾流干预沙尘输运的空间有效范围及其物理衰减机制。

2.2 不同叶尖速比对沙尘输运的影响

叶尖速比的调整不仅改变了风轮的转速，更在本质上决定了机组对来流气动能量的捕获效率。实验对比显示，在λ=6.4工况下，风轮通过提高对上游动能的提取率，诱导了更为显著的动量亏损，使得机组后方的平均阻沙率较λ=5.0工况提升了11.29%，如图10~12所示。但是，在5D至7D的下游区域，高叶尖速比引发了更剧烈的剪切层不稳定性，导致尾流涡旋在破碎过程中释放出大量的湍动能。宏观上的能量衰减形成了大范围的低输沙区，局部高频脉动的动能增加了气固两相流的复杂性，导致沙粒受力失稳，落点分布更具离散性，甚至在特定点位诱发了输沙波动的加剧。综合分析表明，叶尖速比对防风固沙效能的影响具有双重属性，因此，在荒漠化地区的风电场运行调控中，不能盲目追求高叶尖速比，而应基于此规律，在发电效率、机械疲劳与生态维护之间寻求平衡。

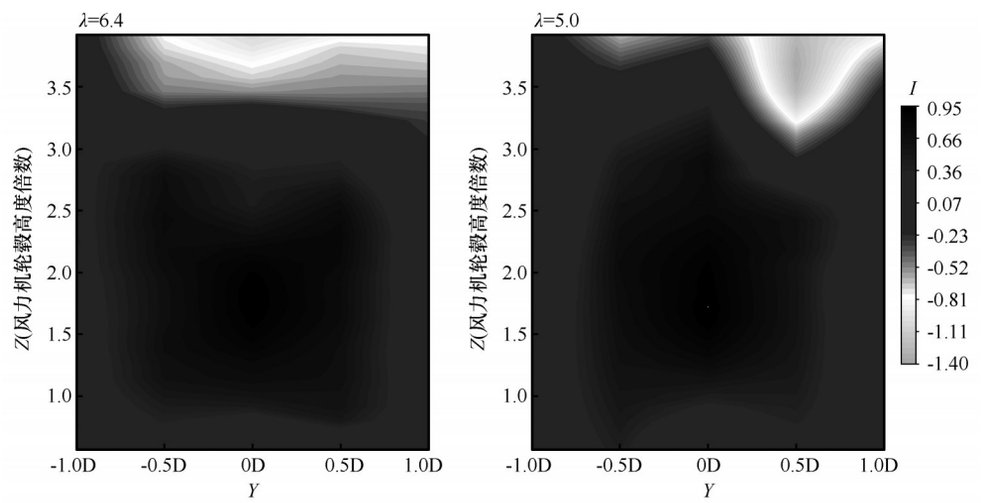


图10 不同叶尖速比工况X=1D垂直截面阻沙率I云图

Fig.10 Contours of the sand transport variation factor on the vertical plane at X=1D for various tip speed ratios

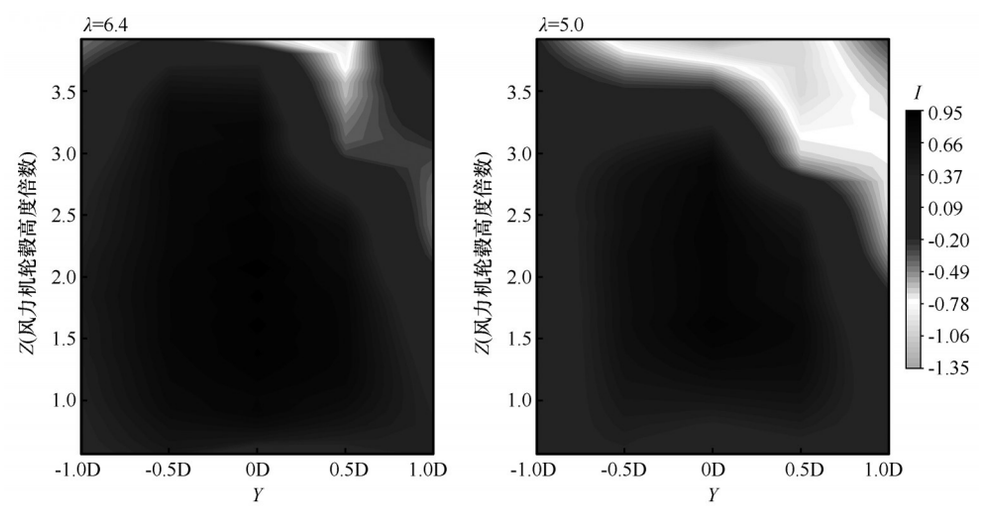


图11 不同叶尖速比工况X=3D垂直截面阻沙率I云图

Fig.11 Contours of the sand transport variation factor on the vertical plane at X=3D for various tip speed ratios

综上所述，单台风力机对沙尘输运的影响是流场动力学特征与沙粒物理属性深度耦合的过程。研究表明，沙尘输运过程具有显著的粒径敏感性与空间非均匀性：100 μm粒径颗粒对尾流扰动的响应

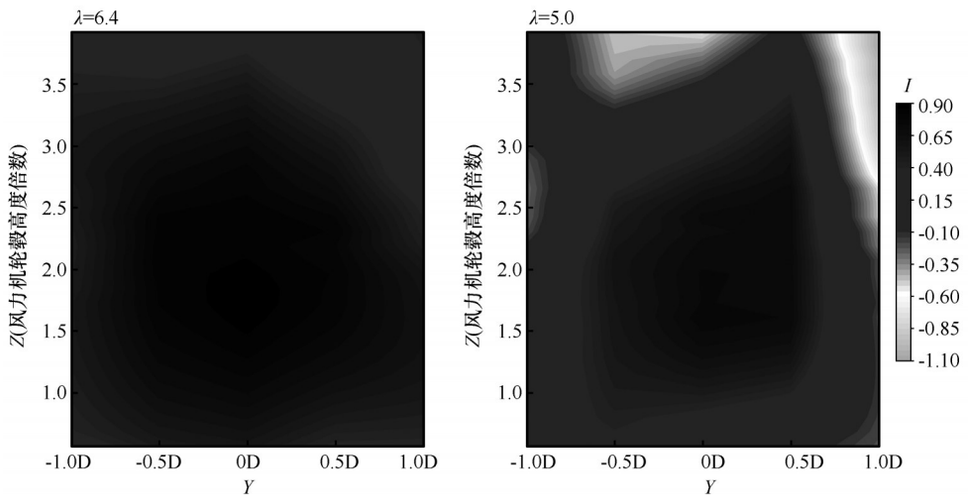


图 12　不同叶尖速比工况 X=5D 垂直截面阻沙率 I 云图

Fig.12　Contours of the sand transport variation factor on the vertical plane at X=5D for various tip speed ratios

最为剧烈，而 200 μm 粒径颗粒则展现出较强的运动惯性与穿透特征。空间维度上，风力机下游形成的“沙影区”效应在 5D 断面附近达到峰值，随后受湍流掺混与能量恢复驱动，输沙能力逐步回升。此外，叶尖速比作为风力机关键运行参数，通过改变旋转叶轮的有效阻隔强度与尾流湍动能，显著调控了阻沙效能。实验证实，优化风力机运行状态可有效增强其在特定区域的防风固沙贡献。本研究不仅量化了风力机对风沙环境的干扰边界，更为干旱与半干旱地区风电场的防沙治沙策略及生态环境评价提供了科学的理论支撑。

3　风电场对沙尘输运的影响

3.1　风电场对不同粒径沙尘分布的影响

图 13 所示风电场内部及尾流区的阻沙率空间分布，是基于间接方法获得的等效空间分布，反映了各位置在逐级累积效应下的阻沙变化特征。由于风电场内多机组尾流存在非线性叠加效应，该分布应理解为统计意义上的等效结果，而非严格意义上同时运行状态下各点的瞬时阻沙场。如图 13 所示，风电场上方区域普遍出现阻沙率 I<0 的现象，表明该区域存在明显的沙尘净聚集。这一现象主要源于上叶尖涡与风轮扫掠产生的空气动力学效应，导致不同粒径的沙尘在风电场上方形成高浓度聚集区。定量分析表明，聚集区的空间跨度随粒径增大而显著减小：混合粒径沙尘的聚集区范围较 100 μm 粒径工况缩减了 70.83%。此外，各工况下聚集区内的沙尘浓度均随水平距离的增加而逐渐降低。以 100 μm 粒径为例，在 600 mm 高度处，50D 位置的沙尘浓度相较于 15D 位置下降了 22.68%，呈现出清晰的沿程扩散与沉降趋势。

在风电场尾流影响区内，本研究观察到 200 μm 及混合粒径沙尘存在显著的沉积现象。具体而言，在 60D 位置布置风力机后，200 μm 颗粒的沉积量增加了 41.96%，混合粒径颗粒的沉积量增幅则达到 56.25%。该现象可归因于多机组尾流的相互叠加作用，导致场后区域风速沿流向持续衰减，而湍流强度显著增强[16]。这种流场特征一方面通过增强湍流脉动为部分跃移颗粒提供了额外动能，另一方面也强化了沙尘的垂直输运与混合，这与经典风沙物理理论中大粒径沙粒在风力作用下更易进入跃移运动的观点相吻合[17]。

3.2　风电场对不同粒径沙尘沉降的影响

如图 14 所示，机组阵列的物理阻滞与尾流动量亏损削弱了流场挟沙能力，打破了颗粒受力平衡，引发沙尘沉降。不同尺度颗粒因惯性与流场跟随性的差异，其沉降位置与富集强度表现出高度的粒径依赖性。

随着颗粒粒径减小，核心沉降落区呈现显著的空间前移与越逃规律。对于受惯性与重力主导的混合粒径及 200 μm 大尺度沙尘，在经历风电场内部的波动性沉降后，其集中重力富集主要发生在远尾流区：在 60D 位置处，混合粒径沉降率达到 0.67，200 μm 沙尘沉降率则达到 0.20。当粒径减小至 100 μm 时，颗粒对流场风速衰减的响应更为迅速，沉降主峰显著前移至风机阵列内部，沉降率在 15D

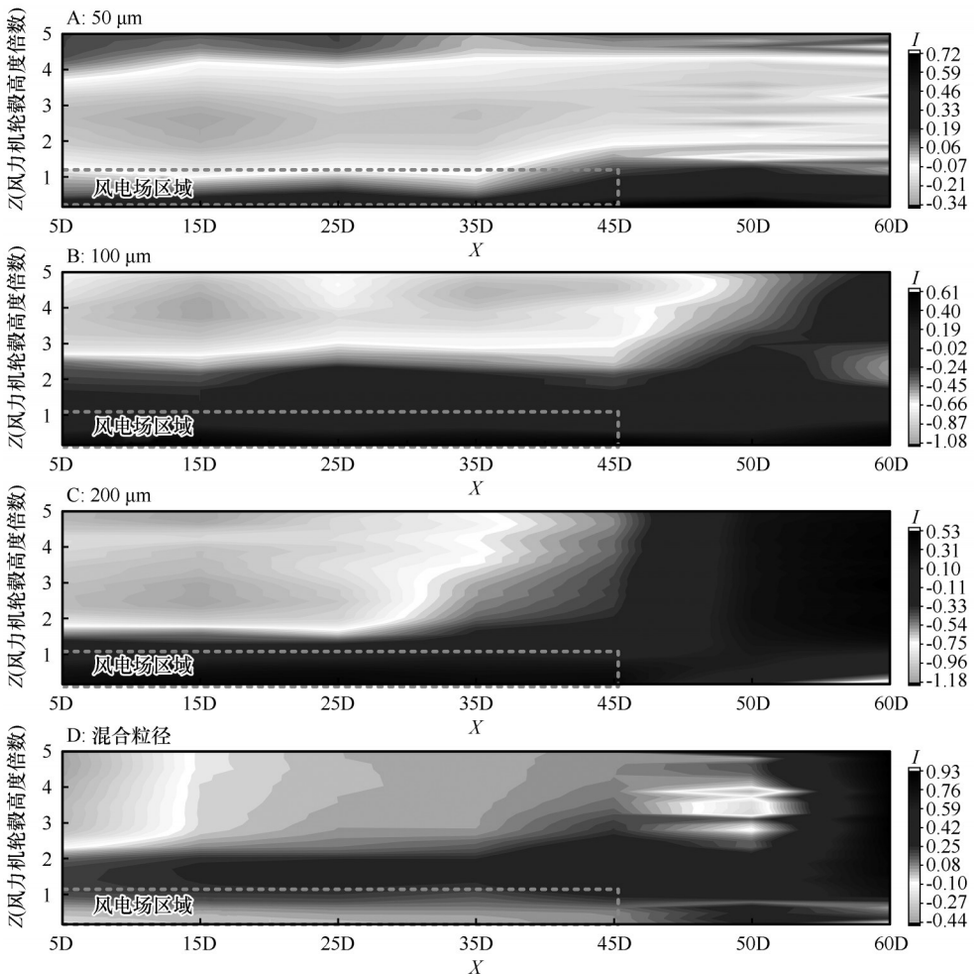


图 13 风电场区域不同粒径沙尘阻沙率 *I* 空间分布云图

Fig.13 Spatial distribution contours of the sand blocking rate for different sand grain sizes in the wind farm region

处达到峰值 0.36，在 45D 处稳定在 0.30 左右，而远场 60D 区域沉降率降低至 0.025。相比之下，50 μm 的微细沙尘由于具备极强的气流跟随性，能够有效借助尾流的强湍流脉动抵消重力，在全流向观测区域内均维持极低沉降率，内部最高沉降率仅为 0.10，在远尾流 60D 处更是低至 0.01，从而成功实现对当前尾流区的沉降越逃，转而以气溶胶形态向下游区域开展平流扩散输运。

4 结论

风力机的阻沙效应存在非单调的粒径依赖特征。受尾流扰动影响，100 μm 粒径沙尘的拦截率相对凸显；而 50 μm 颗粒的强随流性与 200 μm 颗粒的高惯性使其较易穿透风流场。整体阻沙效率随粒径变化呈现具有区间差异的非线性波动。

机后输沙通量在水平方向上并未呈现理想的单调演变，而是表现出复杂的空间波动特征。受风速亏损与结构阻挡主导，近尾流区易形成局部“沙影区”；随着向中远场延伸，在湍流掺混与尾流能量的驱动下，沙尘输运能力呈现波动性回升。此外，复杂的尾流结构加剧了沙尘在空间分布上的非均匀聚集态势。

叶尖速比通过改变风轮扫掠面的能量提取率与尾流能量耗散强度来调制阻沙效能。高叶尖速比下，叶片旋转诱发的强湍动能输出显著增强了气固耦合间的能量交换，导致沙粒在穿越尾流区时因动能损失而加速沉降或扩散，从而在能量层面提升了拦截效率。

在受上叶尖涡与风轮旋转诱导的空气动力学交互作用下，风电场上空形成了稳定的沙尘富集区。实验研究表明，该富集效应的空间尺度表现出显著的粒径依赖性：细颗粒物由于具有更好的跟随性，其形成的富集区范围最为广泛。

核心沉降落区随粒径减小发生空间前移与沉

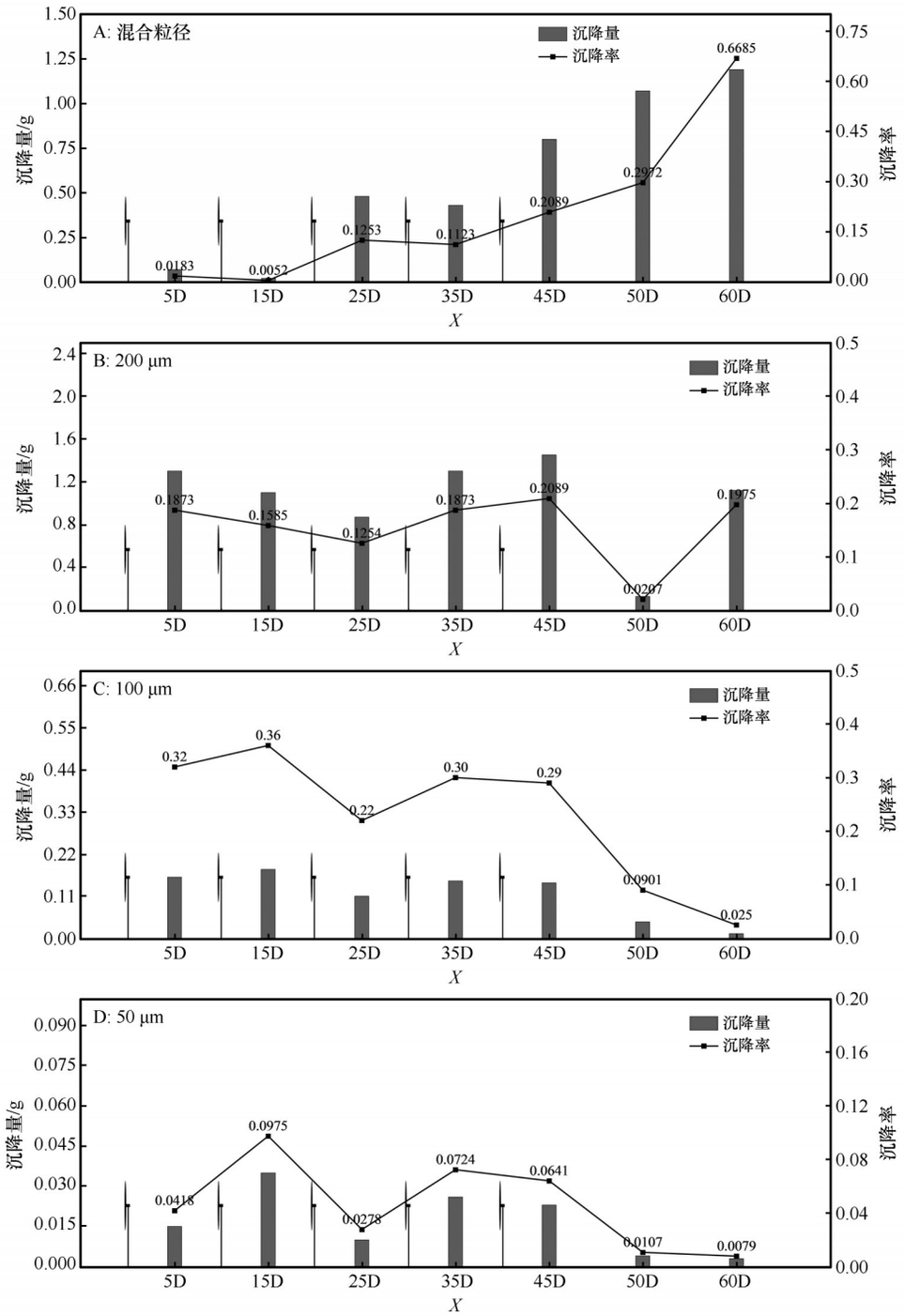


图 14　不同粒径沙尘沿流向的地表沉降量与沉降率变化

Fig.14　Variations of surface deposition amount and deposition rate along the flow direction for different grain sizes of sand

降越逃现象。大尺度颗粒的集中沉降发生在流场动量耗散的远尾流区；100 μm 颗粒对风速衰减响应迅速，导致沉降主峰前移至风电场阵列内部；50 μm 微细颗粒则借助尾流湍流抵消重力，在全流场维持极低沉降率，实现对当前尾流区的沉降越逃并向远场平流输运。

本实验采用的缩比模型与集沙仪之间的尺度失配是一个普遍存在于风洞风沙–风力机模拟研究中的难题。理想情况下，集沙仪应覆盖从地表到约 2 到 3 倍轮毂高度的范围，但受限于风洞截面尺寸和集沙仪结构，难以做到严格匹配。本实验优先保证低层测量密度与精度。后续研究可采用 PIV 和 PTV，实现更宽高度范围且与模型尺度匹配的同步测量。同时，可结合数值模拟对风洞实验的尺度效

应进行修正，以进一步验证本文结论的可靠性。

参考文献：

[1] Wang Y, Wang R, Tanaka K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China [J]. Nature, 2023, 619(7971): 761-767.

[2] Smith S E, Travis K N, Djeridi H, et al. Dynamic effects of inertial particles on the wake recovery of a model wind turbine[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 346-361.

[3] Travis K N, Smith S E, Vignal L, et al. Characterization of coupling between inertial particles and turbulent wakes from porous disk generators[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 933: A42.

[4] He P, Chen N C, Hu D M. Study of Wake Characteristics of a horizontal-axis wind turbine within two-phase flow[J]. Key Engineering Materials, 2011, 474: 811-815.

[5] Song Z, Wang J, Wang S. Quantitative classification of northeast Asian dust events[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D4): 007048.

[6] Wang Y, Guan R, Lu P, et al. Large-eddy simulation of dust transport and coherent structures in a wind turbine wake [J]. Physics of Fluids, 2025, 37(9): 0289853.

[7] Ma G, Han H, Li Y, et al. Numerical and experimental study of the effects of wind turbine operation on sand-dust transport characteristics[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2024, 67(4): 244711.

[8] Ma G, Zheng Q, Li D, et al. Interaction between wind turbine wakes and sand transport in a wind-sand environment [J]. Renewable Energy, 2025: 124531.

[9] Ruan Z, Lu X, Wang S, et al. Impacts of large-scale deployment of mountainous wind farms on wintertime regional air quality in the Beijing-Tian-Hebei area [J]. Atmospheric Environment, 2022, 278: 119074.

[10] Wang Q, Luo K, Wu C, et al. Impact of substantial wind farms on the local and regional atmospheric boundary layer: case study of Zhangbei wind power base in China[J]. Energy, 2019, 183: 1136-1149.

[11] Mataji M, Ashrafi K, Shafie Pour-Motlagh M. Can wind turbine farms increase settlement of particulate matters during dust events? [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2023, 15(1): 0129481.

[12] 王强. 风电场尾流效应及其对大气环境影响的中尺度数值模拟研究[D]. 杭州：浙江大学，2020.

[13] Mo J, Huang T, Zhang X, et al. Spatiotemporal distribution of nitrogen dioxide within and around a large-scale wind farm: a numerical case study [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(23): 14239-14252.

[14] 李振山，倪晋仁，刘贤万. 垂直点阵集沙仪的集沙效率[J]. 泥沙研究，2003，28(1)：24-32

[15] Liu X, Kang Y, Chen H, et al. Application of a high-precision aeolian sand collector in field wind and sand surveys[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(14): 7393.

[16] 黎作武，贺德馨. 风能工程中流体力学问题的研究现状与进展[J]. 力学进展，2013，43(5)：472-525.

[17] 王萍，胡文文，郑晓静. 沙粒的跃移与悬移[J]. 中国科学：物理学、力学、天文学，2008，38(7)：908-918.

An experimental study on sand transport influenced by wind turbines/wind farms in aeolian environments

Ma Gaosheng[1], Song Yuanxiang[1], Liu Benli[2], Yu Xuecheng[1], Peng Huaiwu[3], Song Chenguang[4]
(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. *PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an* 710100, *China*; 4. *School of Electrical Engineering and Automation, Nantong University, Nantong* 226001, *Jiangsu, China*)

Abstract: The desert-gobi-wasteland region holds substantial potential for wind energy development, yet the interaction between wind turbines and windblown sand flow remains poorly understood. In this study, scaled single-turbine and wind-farm models were tested in an atmospheric boundary layer wind tunnel under different dust concentration levels to systematically investigate the effects of particle size, concentration, and operational parameters on sand transport dynamics and surface erosion. The results show that the sand-blocking effect of a single turbine exhibits a strong non-linear sensitivity to particle size. Specifically, 100 μm particles, whose aerodynamic response matches the scale of vortex evolution, tend to settle synergistically in kinetic energy dissipation zones; 50 μm particles are prone to escape due to their high flow-following capability, while 200 μm particles demonstrate strong penetrability owing to their high initial momentum. In the far-wake region, the substantial entrainment of turbulent kinetic energy creates a macro-scale low-transport zone but also induces discrete patterns of particle deposition. At the wind-farm scale, multi-stage kinetic energy extraction reduces the surface shear stress and generates a dust accumulation zone above the farm that intensifies as the particle size decreases. In summary, large-scale wind power utilization raises the threshold for dust entrainment through wake effects, providing data support for ecological maintenance in desertified areas where wind farms are deployed.

Key words: wind tunnel experiment; wind turbine; wind farm; sand transport