张泽忠,张华勇,何昱璇,等.腾格里沙漠单基柱光伏阵列近地层风速流场与风沙输移空间分异特征[J].中国沙漠,2026,46(5):136-148.

腾格里沙漠单基柱光伏阵列近地层风速流场与风沙输移空间分异特征

张泽忠[1a],张华勇[2],何昱璇[3],王 彪[2],王小娜[3],杨 光[1abc],麻云霞[1abc],肖建华[4],张德怡[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,c.内蒙古杭锦荒漠生态系统定位观测研究站,内蒙古 呼和浩特 010010;2. 新疆华电天山发电有限公司,新疆 哈密 839000;3. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 100024;4. 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)

摘要:沙漠地区大规模光伏开发会显著改变局地风场与风沙活动,但其内部不同部位的风沙环境分异及调控机制尚不明确。本研究以腾格里沙漠东缘单基柱支撑、板下净空高度为150 cm的典型光伏阵列为研究对象,采用野外同步观测方法,对板前、板后、板间及旷野对照区(CK)在3种来流风速下的近地层风速廓线、输沙率垂向分布、风沙流结构和阻沙率进行了对比分析。结果表明:(1)光伏阵列显著削弱了近地层风速,防风效应具有明显空间异质性,主要集中在50~100 cm高度,其中板后减速作用最强,防风效果最大可达44.47%;板前20 cm高度防风效果在6.79%~7.63%,在400 cm高度可达19.15%~20.93%。(2)光伏板整体降低了风沙输移强度,但内部输沙格局稳定分异,总输沙率板间最高,板后次之,板前最低;阻沙率板前为45.26%~51.93%,板后为26.68%~33.19%,板间为11.95%~19.10%。(3)光伏板未改变风沙流近地表集中的基本规律,各位置高度输沙量均表现为2~10 cm>0~2 cm>10~20 cm,且板间区域的风沙流结构特征值在高风速下甚至超过CK,板下气流通道强化了沙粒的垂向输移能力。荒漠区光伏阵列防沙应采取分区配置策略,板间区域宜作为重点防护单元,板前可维持其减沙优势,板后则需关注基柱周边局地冲蚀风险。该研究可为荒漠区光伏电站分区防沙设计和精细化运维提供科学依据。

关键词:腾格里沙漠;光伏阵列;近地层风场;风沙输移;阻沙率

文章编号:1000-694X(2026)05-136-13 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00088

中图分类号:X169 **文献标志码**:A

0 引言

由于全球气候变化加剧、能源结构正在加速向低碳方向转型,以光伏为代表的新能源开发已经成为实现“双碳”目标十分明确、重要的路径。而干旱及半干旱地区太阳能资源丰富,土地利用竞争相对较弱,因此近年来逐渐成为大型地面光伏电站建设的首选区域[1-2]。中国西北“沙戈荒”地区目前正大规模推进光伏基地建设,其能源开发与生态治理的耦合效应已经受到党和政府的高度重视。Yang等[3]指出,沙漠地区大规模光伏开发不仅有利于清洁能源转型,也可能通过挡风、保墒和促进植被恢复等途径参与荒漠化防治,应将其作为干旱区可持续管理的重要组成部分加以认识。然而,强烈的风沙活动仍然是制约该类区域光伏电站长期稳定运行的最突出、最直接的环境因素。频繁的起沙输沙过程既会加速组件表面磨损从而降低发电效率,也易造成支架基柱掏蚀、局部地貌重塑,进而影响电站结构安全[4]。

围绕沙漠光伏电站风环境及风沙响应问题,已

收稿日期:2026-04-20;**改回日期**:2026-05-16

资助项目:中国华电有限公司重点科技项目(CHDKJ23-04-01-61);沙戈荒新能源大基地防沙治沙与生态修复区范围、风沙输移、新材料新技术、技术集成示范研究项目(RH2400002872)

作者简介:张泽忠(2002—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:15204763077@163.com

通信作者:杨光(E-mail:yg331@126.com)

有研究主要从风速衰减、阵列阻沙效应和生态效益等方面开展了探讨，且已有充分证据表明光伏阵列能削弱近地层风速，改变局地气流结构，对区域风沙活动有直接抑制作用。例如，张呈春等[5]通过腾格里沙漠野外观测发现光伏电站内平均风速比流动沙丘上风向参照点低82.07%，同时明确了阵列间行道及电板后沿平均风速随高度升高呈增加趋势，电板前沿风速先降低后增加。贾瑞庭等[6]对库布齐沙漠200 MWp光伏阵列的截流阻沙效应进行野外同步观测分析，得出在阵列内上、下风向边缘0.2 m高度风速分别比流动沙地低27.76%和29.83%，0~30 cm断面累计输沙率分别降至对照点的65.07%和47.79%，表明光伏阵列对近地表风沙活动具有明显抑制作用。唐国栋等[7]在库布齐沙漠对光伏阵列对近地表风沙输移干扰效应的垂向分布差异做了研究，指出不同部位的输沙通量有十分明显的垂向变化特征。Jubayer等[8]及Etyemezian等[9]分别从数值模拟和野外观测的角度，论证了环境风向对光伏阵列近地表风速流场分布规律的重要影响。此外，郭彩赟等[10]对库布齐沙漠光伏基地风沙危害的动力学机制进行分析，明确提出光伏板布设会干扰原有流场分布模式。李永得等[11]在腾格里沙漠西南缘进行野外实测，证实光伏阵列能切实降低区域风速，从而改变风沙运动特征。除风场和风沙过程外，已有研究还表明，干旱区光伏电站能够诱发地表冷岛效应并影响周边植被响应[12]。

尽管已有研究从整体上揭示了光伏阵列对区域风场和风沙活动的影响，但针对阵列内部光伏板不同部位的研究仍显不足。特别是在板前迎风区、板后背风区以及相邻板间过渡区，不同部位的气流结构与沙粒输移过程存在明显差异，其动力学响应尚缺乏系统的野外观测支撑。近年来，单基柱、高净空等新型光伏结构得到推广与应用，其结构特征进一步改变了板下气流的通过路径与扰动形式，从而对近地层风沙运动产生新的影响。本研究所指“单基柱”是指每排光伏板由单个支撑立柱承载，与双基柱或多基柱结构相对。该阵列具有“高净空”特征，即光伏板下沿离地面的垂直距离>100 cm。然而，关于此新型光伏结构条件下风沙流场空间响应特征及其作用机制的研究较为有限。

基于上述背景，本文以腾格里沙漠东缘巴彦浩特光伏园区为研究区，选取典型单基柱光伏阵列为对象，开展多位置、多梯度的风速与野外积沙观测。通过对板前、板后、板间及旷野对照区（CK）近地层风速廓线和风沙输移特征的对比分析，探讨不同空间位置风沙流结构的差异及其形成机制，旨在揭示高净空光伏结构对近地层风沙运动的调控作用，为荒漠区光伏电站的防沙减灾与结构优化提供科学依据。

1　研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东缘阿拉善左旗境内，属典型干旱荒漠区。区域内以流动沙丘和半固定沙丘为主，地表起伏明显，平均海拔1 307 m。该地区气候干旱，水热条件失衡。多年平均气温为8.0 ℃，月平均气温介于7.3~25.6 ℃；年均降水量196 mm，而蒸发量远高于降水量，干旱特征较为突出。区内风沙活动频繁，年平均风速为2.97 m·s^{-1}，春、夏季为主要起沙时段，其起沙风频率约占全年74.6%[13]。冬春季盛行西西北—北西北风（WNW—NNW），风速大于5 m·s^{-1}的风沙天气年均可达200 d。地表植被覆盖度极低，下垫面以松散的流沙为主，在风力作用下易发生起动和输移。

观测样地位于内蒙古华电腾格里绿色能源有限公司巴彦浩特光伏电站（38°48′31″N，105°7′58″E）。该电站地处腾格里沙漠腹地，太阳能资源丰富，是典型的沙漠光伏开发区域。实地调查发现，电站西北侧部分光伏阵列已出现不同程度的基座掏蚀现象，对设备稳定运行构成潜在威胁，虽然区域内已布设高立式沙障、草方格及PLA沙障等工程措施，但在光伏板局地微环境尺度上，风沙危害仍较为突出。研究区光伏阵列采用单基柱支撑结构，组件坐北朝南，沿东西向排列。相邻两排光伏板间距为800 cm，面板上沿距地面约430 cm，下沿距地面约150 cm。单组光伏板由2排26列标准组件单元（100 cm×240 cm）组成，整体尺寸约为480 cm×2 600 cm，地面投影宽度约为380 cm。

2　研究方法

2.1　试验布设

正式观测前，光伏板不同部位已出现较明显的风蚀与积沙现象。其中，下垫面受光伏板风蚀作用形成了沿板前缘分布的侵蚀沟，板间区域发育有较明显的积沙垄。为减弱原始微地形对近地层气流观测结果的影响，实验开展前对观测样地进行了人

工平整处理，以保证各观测点下垫面条件尽可能一致。整平后，光伏板前缘距地表的垂直高度稳定为1.5 m。

野外观测于2025年4月14—22日进行。该时段处于研究区春季风沙活动高峰期。图1为腾格里沙漠光伏园区4月风向玫瑰图，4月是春季风沙活动最为频繁的月份，观测期间主导风向为西北风，观测结果能够代表该地区典型春季风沙活动条件。

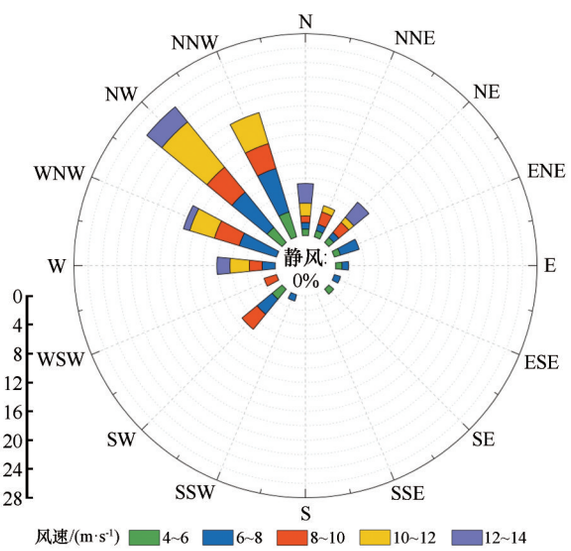


图1 腾格里沙漠光伏园区4月风向玫瑰图

Fig.1 Wind rose for the Tengger Desert Solar Park in April

在西北主导风向下，采用同步对比观测方法，在光伏园区西北侧约400 m处选取旷野地表作为对照点(CK)，避免阵列的直接影响。在光伏阵列的电板前沿、后沿和阵列间依次架设风速梯度仪，观测高度如图2所示。风速记录时间间隔设为1 s，数据存储间隔设为2 s，每次观测时间为30~60 min不等，重复观测3次，以获取不同部位近地层风速的垂向变化特征。

集沙仪观测与风速观测实验同步开展，在光伏电板板间、板前和板后3个位置同时放置集沙仪，集沙仪总高度为50 cm，共设置25个进沙口，单个进沙口尺寸为2 cm×2 cm，观测时集沙仪孔与地面垂直，与主风向平行，底部与地面平齐。观测结束后，将各层位收集的输沙样品分别装入自封袋并编号标记，带回实验室后采用精度为0.001 g的电子天平进行称量。

2.2 数据计算与处理

为定量分析光伏阵列不同部位近地层风速变化及风沙输移特征，本文选取防风效果、风沙流结构特征值和阻沙率等指标进行计算，并对输沙通量垂向分布进行函数拟合。

(1) 平均风速

$$\bar{u} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i \tag{1}$$

式中：$\bar{u}$为平均风速(m·s^{-1})；u_i为第i个时刻的瞬时风速(m·s^{-1})；n为观测时段内的总记录数。

(2) 防风效果

$$F = \frac{v_0 - v_z}{v_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：F为防风效果；v_0和v_z分别为相同高度下对照点与站内观测点的平均风速。

(3) 风沙流结构特征值

$$\lambda = Q_{2-10} / Q_{0-2} \tag{3}$$

式中：λ为风沙流结构特征值；Q_{2-10}和Q_{0-2}分别表示2~10 cm和0~2 cm高度的输沙量。该指标用于表征

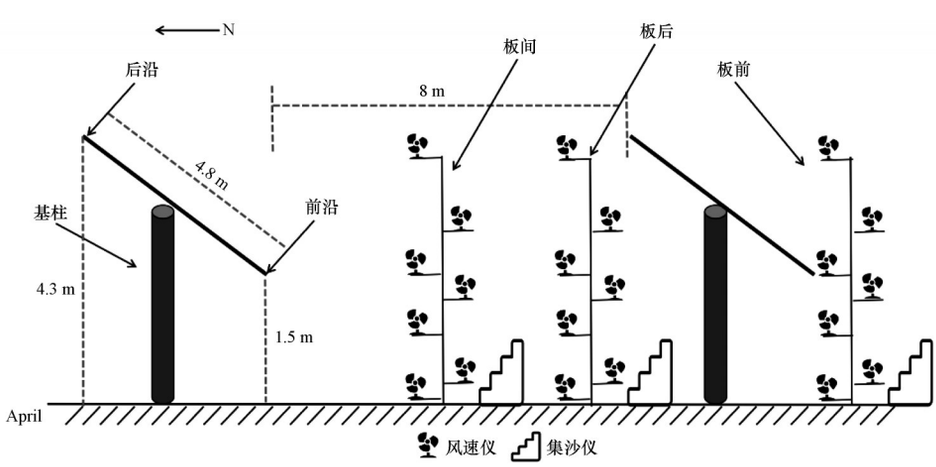


图2 样地布设示意图

Fig.2 Site layout diagram

风沙流中不同高度层输沙分配特征。

（4）阻沙率

$$E = \frac{q_0 - q_z}{q_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：E为阻沙率；q_0、q_z分别为相同高度下对照点与站内观测点的输沙量。

（5）输沙通量拟合函数

$$y = e^{a + bx + cx^2} \quad (5)$$

式中：y为输沙通量；x为观测高度；a、b和c为拟合参数。

2.3　统计与分析

原始数据在Excel中完成整理、筛选及基础计算，随后采用Origin2024进行统计分析与函数拟合，并利用Surfer2024完成空间插值及流场可视化表达。

3　结果与分析

3.1　光伏板不同位置风速垂直分布

单基柱光伏板由于前后缘离地高度不同，来流在板体作用下会发生分流、抬升和再分配，从而使不同部位近地层风速表现出明显差异。从图3可以看出，在3种来流风速下，CK始终表现为同高度各测点中的最大值，且随高度增加的上升幅度最为明显。相比之下，光伏板周围的风速廓线整体向低风速区偏移，其中板前位置的降速特征最为突出，尤其在150~400 cm高度表现更明显，虽然板前风速随高度升高有所恢复，但与CK之间仍保持较大差距。板间与板后位置的风速总体高于板前，但二者之间的大小规律随风速而变化。在7.74 m·s⁻¹下，板间与板后廓线较为接近，局部高度上板后风速略高于板间；当来流风速增至9.37 m·s⁻¹和11.28 m·s⁻¹时，板间位置的风速恢复能力增强，在中上部高度多表现为板间高于板后，而板前仍维持最低水平。从垂向变化特征看，20~150 cm高度各位置风速差异最大，是光伏板扰动作用最为敏感的高度带；150 cm以上高度，各观测点风速均继续增加，但阵列内部不同位置的廓线分异仍然存在。

3.2　光伏板不同位置风速流场特征

在风速垂直廓线分析的基础上，进一步利用空间插值结果揭示光伏板周围近地层流场的二维分布特征。图4显示，在3种风速下，光伏板上方均为较高风速区，等值线在板体顶部附近明显抬升并变密，反映出来流在受到板体阻挡后沿板面上方发生绕流，风速因此增大。与之相反，板体下方及基柱附近整体为低风速区，尤其在近地表0~100 cm高度，风速等值线较为平缓，支撑结构及板体遮挡对近地层气流具有一定削弱作用。板下空间内风速分布并不均匀，靠近板前缘和板间区域的等值线变化较快，从水平分布看，板后至板下区域是来流受光伏板影响最直接的部位。气流沿板面上抬后，在板体下方和下风侧重新调整，导致板前、板后及板间形成不同的风速响应特征。基柱附近始终为相对低值区，而远离基柱后风速逐渐恢复，等值线趋于平顺。随着来流风速由7.74 m·s⁻¹增至11.28 m·s⁻¹，整个流场的高、低风速分区更加清晰，板体附近等值线弯曲程度增大，高风速区范围扩展，低风速区与过渡区之间的差异更为突出。

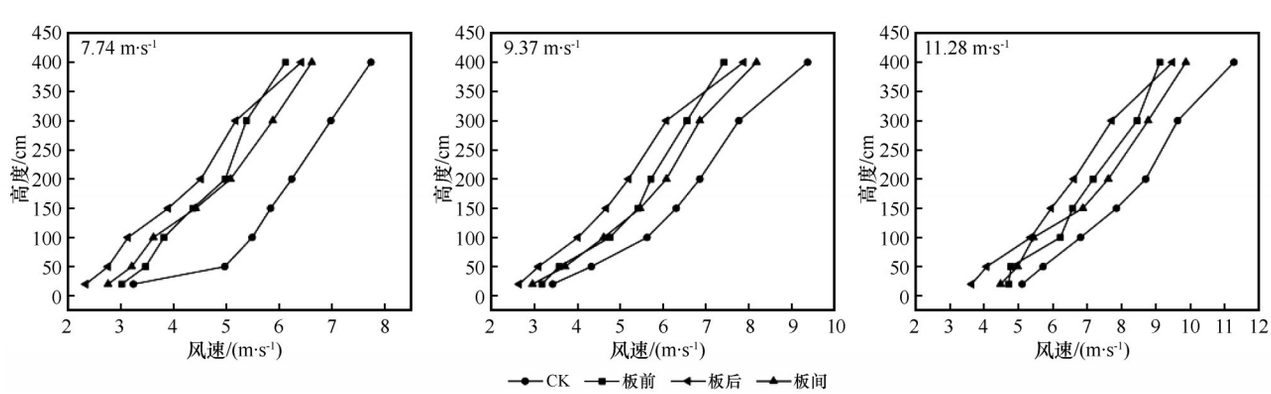


图3　不同来流风速下光伏板不同位置风速廓线

Fig.3　Vertical profiles of wind speed at different locations around the photovoltaic panel under different incoming wind speed conditions

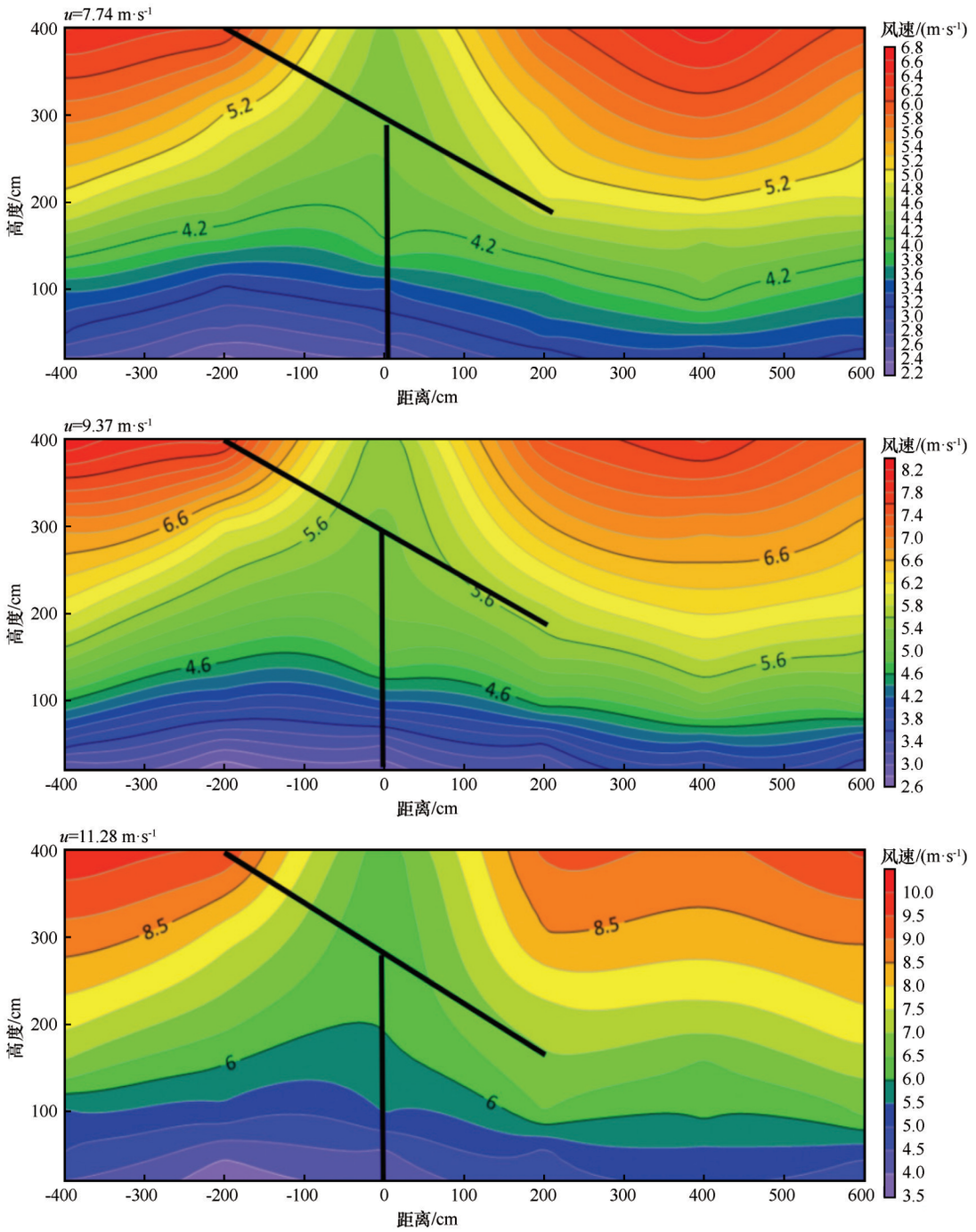


图4 不同来流风速下光伏板近地层风速流场

Fig.4 Near-surface wind field around photovoltaic panels at different inflow wind speeds

3.3 光伏板不同位置平均风速变化特征

平均风速能够较好反映一段时间内各观测位置风速的变化特征。在观测期间，主导风向为西北风，指示风速为9.37 m·s⁻¹。由图5可见，CK位置风速整体最大，且不同时间下各高度变化较为稳定，由20 cm高度到400 cm高度风速逐层增大，表现出较好的均一性。板前位置在30 min内各高度风速同样表现为由低层向高层逐渐增大，但整体风速低于CK。板后位置各高度风速也随高度增加而增大，时间序列变化较为平缓，整体上低层风速偏低。板间位置的风速变化规律与其他观测点基本一致，不同高度均呈现随时间小幅波动、随高度逐渐增大的特征，其中中高层风速相对较高。

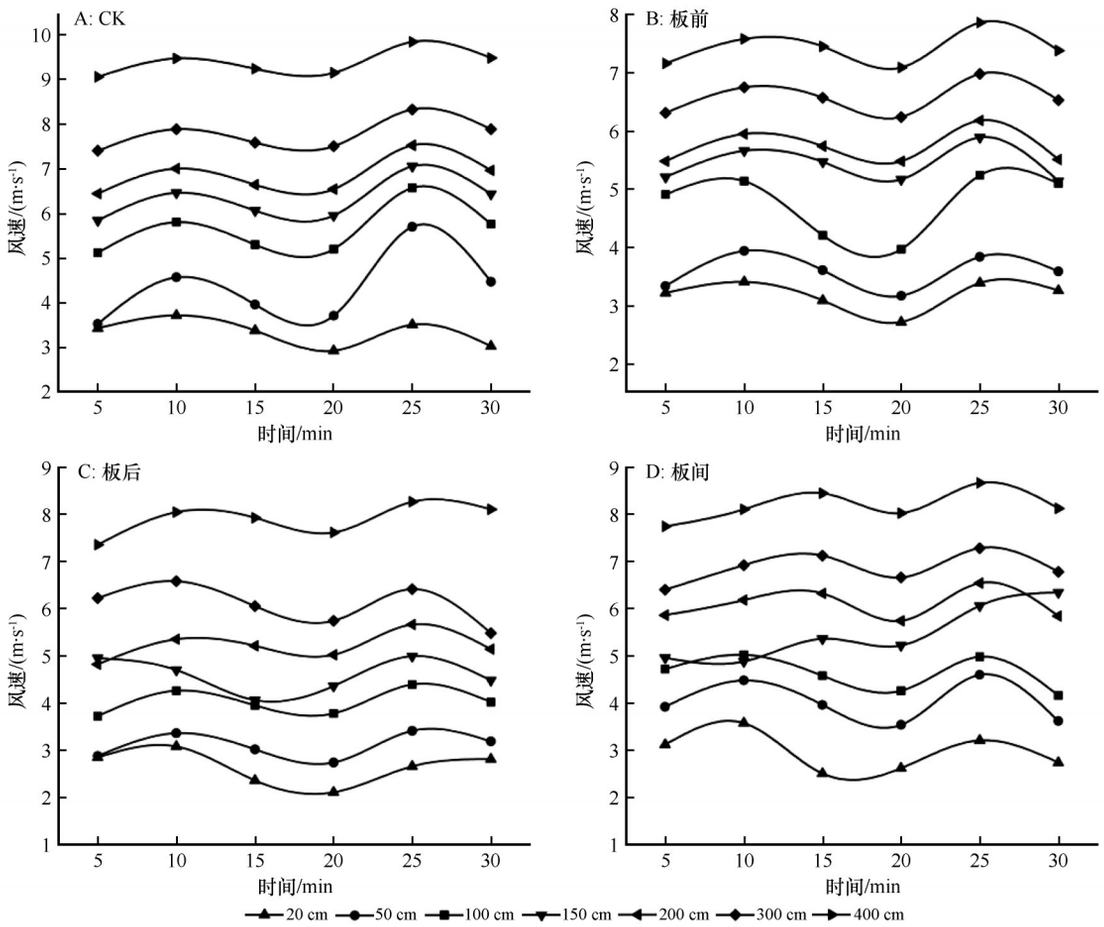


图 5　9.37 m·s⁻¹风速下光伏板不同位置 5 min 平均风速变化

Fig.5　Changes in the 5-minute average wind speed at different locations on the solar panel at a wind speed of 9.37m·s⁻¹

3.4　光伏板不同位置防风效果

各观测点在近地层均表现出一定的防风作用，多数高度层的防风效果随高度增加呈现先增强后减弱的变化特征，较高值主要集中在 50~100 cm 高度，说明光伏板对近地层气流的削弱作用主要发生在板下及其邻近空间（表 1）。板后位置的防风效果整体最好，尤其在 20~300 cm 高度优势较为明显。在来流风速为 7.74 m·s⁻¹时，板后 50 cm 高度和 100 cm 高度分别达到 44.47% 和 42.81%，防风效果明显高于板前和板间。9.37 m·s⁻¹和 11.28 m·s⁻¹时，板后在各高度上仍普遍保持较高的防风水平。板间位置的防风效果总体居中，7.74 m·s⁻¹风速下，板间 50 cm 和 100 cm 高度分别达到 35.41% 和 34.06%，表现出较好的减速能力；随着来流风速增大，其防风效果明显下降，多数高度维持在 10%~20%。板前位置整体防风效果偏低，20 cm 高度在 3 种风速下仅为 6.79%~7.63%。不过，随着高度升高，板前防风效果逐渐增强，并在 400 cm 高度超过板后与板间，分别达到 20.93%、20.81% 和 19.15%。从来流风速变化看，光伏阵列的防风作用总体随风速增大而减弱，但不同部位和高度的响应并不完全一致。7.74 m·s⁻¹板后 50 cm 高度防风效果由 44.47% 降至 11.28 m·s⁻¹下的 28.67%；板间 50 cm 高度则由 35.41% 降至 12.94%，下降更为明显。

3.5　光伏板不同位置累计输沙率的垂向分布特征

随着来流风速由 7.74 m·s⁻¹增至 11.28 m·s⁻¹，各位置累计输沙率均呈增加趋势，但无论风速如何变化，CK 始终保持最大值，阵列内部各位置与 CK 之间的差异保持相对稳定（图 6）。从空间分布看，光伏板周围不同位置的累计输沙率总体表现为板间最大、板后次之、板前最小。7.74 m·s⁻¹风速下，板前累计输沙率明显低于板后和板间；在 9.37 m·s⁻¹和 11.28 m·s⁻¹下，这一大小规律均保持不变。从垂向组成看，各观测位置的输沙量均主要集中在近地表层，0~10 cm 高度是输沙的主要贡献层，20 cm 以上各层

表 1 不同来流风速下光伏板不同位置的防风效果

Table 1 Wind-resistant performance of solar panels at different locations under varying wind speeds

高度/cm	防风效果/%								
	7.74 m·s^{-1}			9.37 m·s^{-1}			11.28 m·s^{-1}		
	板前	板后	板间	板前	板后	板间	板前	板后	板间
20	6.79	27.78	14.81	7.29	22.74	13.70	7.63	28.77	12.33
50	30.18	44.47	35.41	17.32	28.41	14.09	16.43	28.67	12.94
100	30.42	42.81	34.06	15.45	28.60	17.94	8.66	21.29	20.12
150	25.17	33.22	24.32	14.10	25.83	13.31	16.28	24.17	12.47
200	20.19	27.56	18.59	16.62	24.20	11.37	17.57	24.00	12.51
300	22.92	25.79	15.76	15.57	21.75	11.71	12.24	19.92	8.92
400	20.93	17.05	14.47	20.81	15.90	12.70	19.15	15.87	12.41

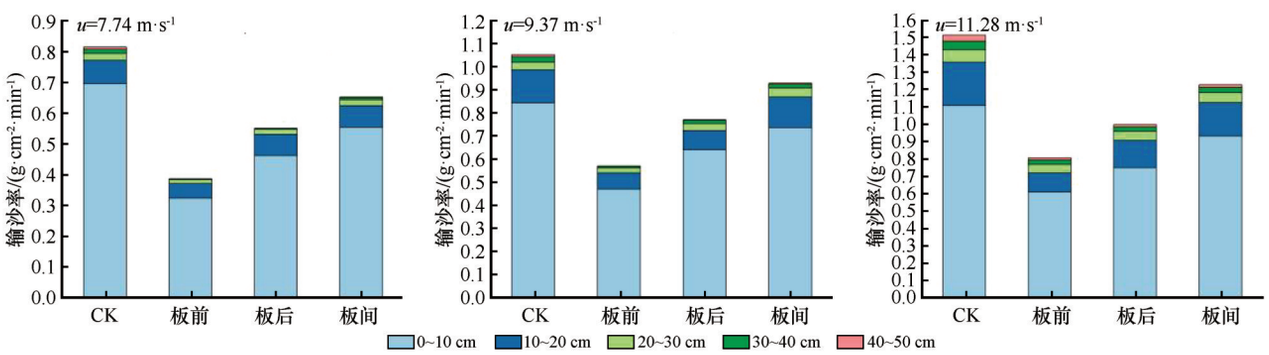


图 6 不同来流风速下光伏板不同位置累计输沙率的垂向分布

Fig.6 Vertical distribution of cumulative sediment transport rates at different locations on photovoltaic panels under varying incident wind speeds

输沙量明显减少。尽管不同风速下总输沙率有所升高,但各高度层的相对组成结构并未发生根本变化,近地表层始终占据主导地位。进一步比较各分层输沙贡献可见,随着来流风速增大,0~10 cm层输沙量绝对值增加最为明显,同时10~20 cm及以上各层的输沙贡献也有所上升,说明较大风速下沙粒向上输移的能力有所增强,但近地表仍然是输沙的主要活动范围。

3.6 光伏板不同位置输沙率垂向分布特征

各观测位置输沙率均随高度增加而减小(图7)。在近地表,输沙率下降最为明显;随着高度升高,下降趋势逐渐平缓。拟合结果表明,采用3参数指数函数对不同位置输沙率垂向分布进行拟合后,决定系数R^2均在0.98以上,说明该函数能够很好地表征光伏板干扰条件下输沙率随高度变化的基本规律。不同来流风速下,各拟合曲线整体形态保持一致,均表现为低层输沙率高、上层输沙率快速衰减的特征。从空间分布看,3种风速下CK的输沙率整体高于光伏板周围各观测位置,表明光伏板布设后削弱了近地层风沙输移强度。在光伏板内部,不同位置之间的输沙率差异保持相对稳定,总体上板间输沙率最高,板后次之,板前最低。随着来流风速从7.74 m·s^{-1}增大至11.28 m·s^{-1},各位置的输沙率均有所增加。其中,中低层高度的增长最为明显,与此同时,较高风速下高层输沙率也有所增大。

3.7 光伏板不同位置风沙流结构与阻沙率

由表2可知,总输沙率整体表现为板间最大、板后次之、板前最小,且这一大小规律在不同风速下均较稳定。风速为7.74 m·s^{-1}时,CK总输沙率分别为板前、板后和板间的2.08、1.45和1.24倍;当来流风速增至11.28 m·s^{-1}时,该倍数分别为1.88、1.50和1.21。从垂向结构看,不同风速和不同位置下的高度输沙量分布均表现为2~10 cm>0~2 cm>10~20 cm。这表明研究区风沙输移主要集中在2~10 cm高度,

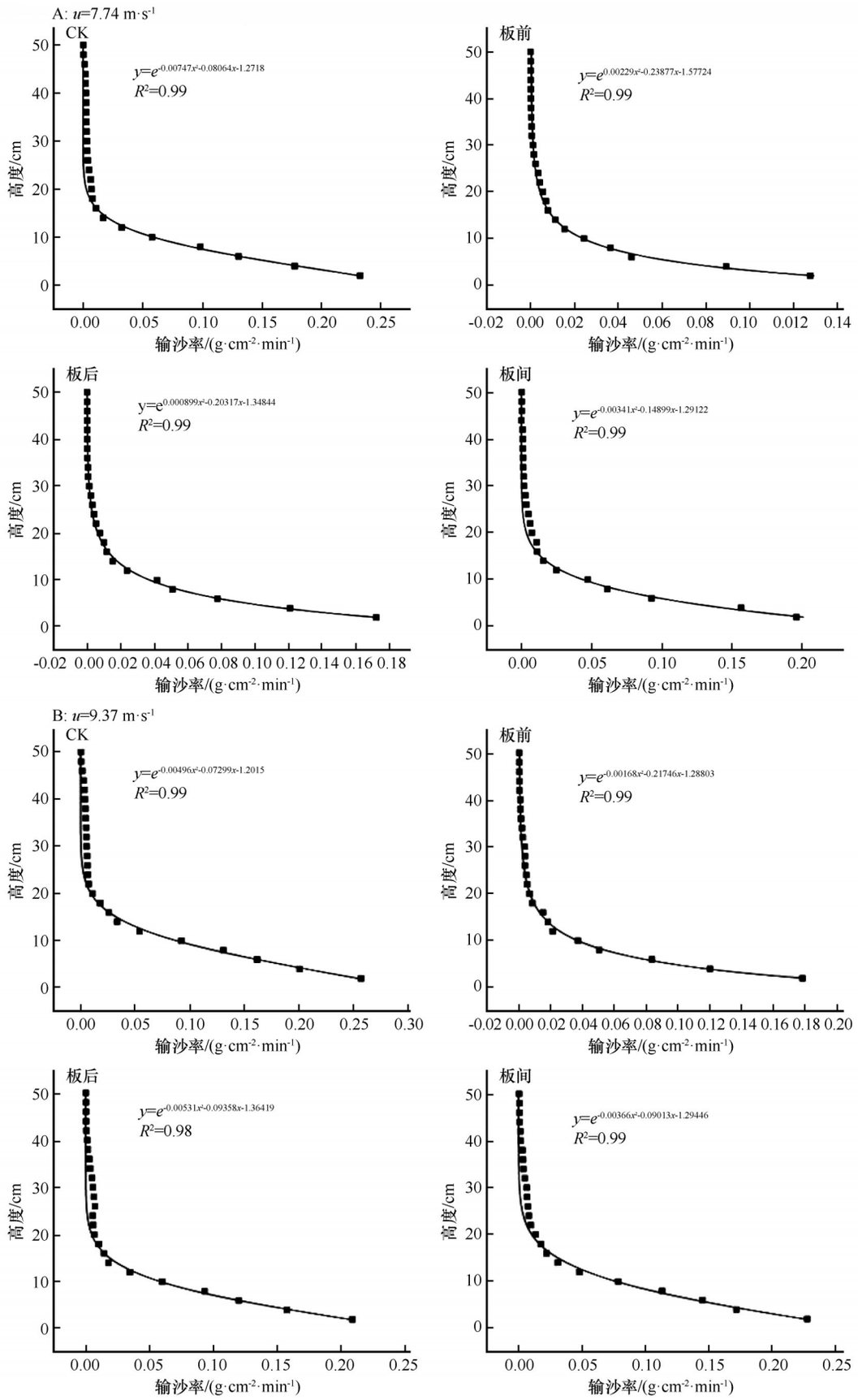

A: u=7.74 m·s-1
CK
y=e-0.00747x²-0.08064x-1.2718
R²=0.99
板前
y=e0.00229x²-0.23877x-1.57724
R²=0.99
板后
y=e0.000899x²-0.20317x-1.34844
R²=0.99
板间
y=e-0.00341x²-0.14899x-1.29122
R²=0.99
B: u=9.37 m·s-1
CK
y=e-0.00496x²-0.07299x-1.2015
R²=0.99
板前
y=e-0.00168x²-0.21746x-1.28803
R²=0.99
板后
y=e-0.00531x²-0.09358x-1.36419
R²=0.98
板间
y=e-0.00366x²-0.09013x-1.29446
R²=0.99
高度/cm
输沙率/(g·cm-2·min-1)

图7 （续）

Fig.7 （续）

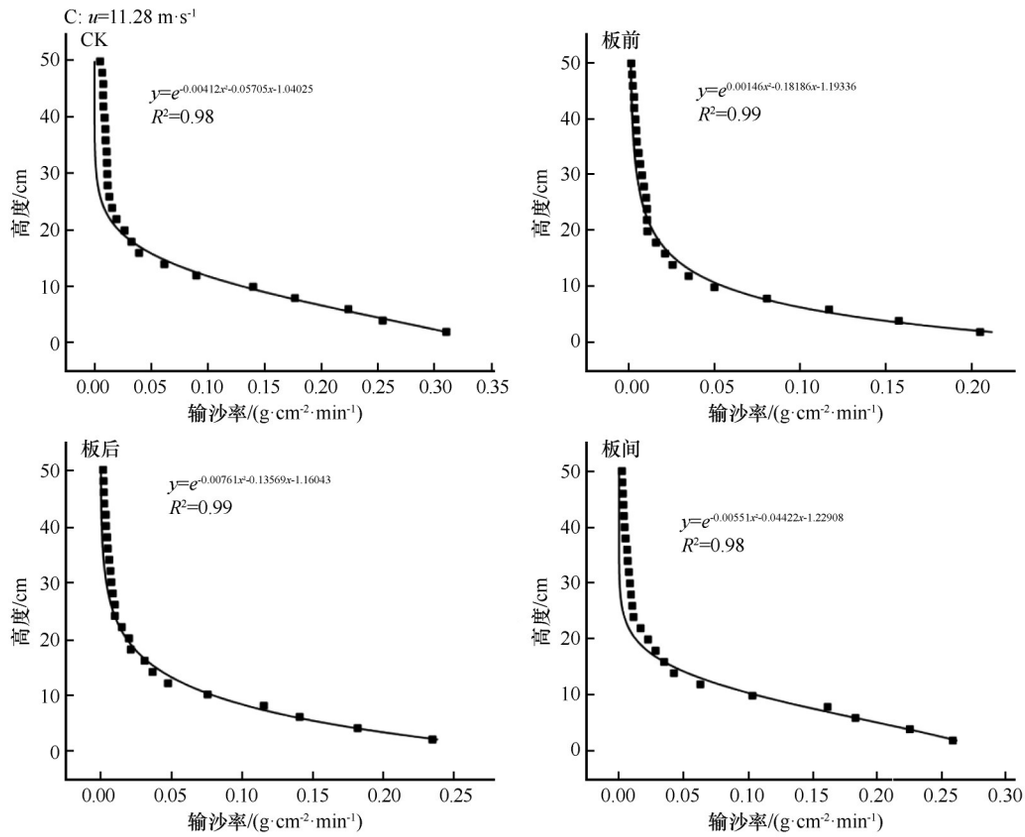


图7 不同来流风速下光伏板不同位置输沙率垂向分布及拟合曲线

Fig.7 Vertical distribution of sediment transport rates at different locations on the solar panel and fitting curves under varying incident wind speeds

风沙流垂向分布具有明显的非均匀性。各位置风沙流结构特征值λ均大于1,进一步说明2~10 cm层输沙贡献高于近地表0~2 cm层。随着来流风速增大,CK、板后和板间的λ值总体升高,其中CK由1.999增至2.561,板后由1.691增至2.188,板间由1.826增至2.604。相比之下,板前位置λ值虽也始终大于1,但整体低于其他位置,说明其垂向输沙结构相对更贴近地表。板前位置在3种风速下均表现出最高的阻沙率,低、中、高风速下分别为51.93%、45.26%、46.99%;板后次之,分别为31.17%、26.68%、33.19%;板间最低,分别为19.10%、11.95%、17.13%。

4 讨论

4.1 光伏阵列对近地层风速垂直分布的影响

单基柱光伏板能够显著改变近地层的风速垂直廓线形态,这种影响并非均匀一致,而是在空间上表现出高度的异质性[14]。与CK相比,板前、板后和板间各位置的风速均受到不同程度削弱,其中板前降速最为明显,板间和板后在中高层恢复较快,说明单基柱高净空结构下风速垂向分异更加突出。与CK典型的对数律风速廓线相比,光伏板所有位置的风速均受到抑制。其中,板前位置的风速削减最为剧烈,尤其是在150~400 cm高度上。这是由于当气流接近光伏板这一障碍物时,在板前形成一个高压停滞区,迫使部分气流向上抬升绕过板体,另一部分则从板下空间通过,导致板前区域的动能显著降低。王浩等[15]和杨世荣等[16]同样研究得出气流在遇到光伏板时受阻抬升,导致板下气流加速和板后涡流减速的关键流场结构变化。

本研究发现板后与板间风速廓线的差异及其对来流风速的响应。在7.74 m·s⁻¹下,板后与板间廓线较为接近,说明在动能较弱时,板体尾流的影响是主导因素。然而,随着来流风速增强,风速分别达到9.37 m·s⁻¹和11.28 m·s⁻¹时,板间位置的风速显著强于板后,尤其是在中上部高度。

这也揭示了一个关键的动力学过程,150 cm为

表 2　不同来流风速下光伏板不同位置风沙流结构特征值与阻沙率

Table 2　Structural characteristics and sand retention rates of sand-carrying airflow at different locations on photovoltaic panels under various incoming wind speeds

指示风速	输沙率(g·cm^{-2}·min^{-1})	CK	板前	板后	板间
7.74 m·s^{-1}	总输沙率	0.773	0.372	0.532	0.625
	10~20 cm输沙率	0.076	0.048	0.069	0.070
	2~10 cm输沙率	0.465	0.196	0.291	0.359
	0~2 cm输沙率	0.233	0.128	0.172	0.196
特征值λ	—	1.999	1.539	1.691	1.826
阻沙率/%	—	—	51.93	31.17	19.10
9.37 m·s^{-1}	总输沙率	0.986	0.540	0.723	0.868
	10~20 cm输沙率	0.143	0.070	0.084	0.132
	2~10 cm输沙率	0.586	0.292	0.431	0.509
	0~2 cm输沙率	0.257	0.178	0.209	0.228
特征值λ	—	2.279	1.634	2.062	2.235
阻沙率/%	—	—	45.26	26.68	11.95
11.28 m·s^{-1}	总输沙率	1.357	0.720	0.907	1.125
	10~20 cm输沙率	0.250	0.109	0.157	0.192
	2~10 cm输沙率	0.796	0.405	0.514	0.674
	0~2 cm输沙率	0.311	0.205	0.235	0.259
特征值λ	—	2.561	1.977	2.188	2.604
阻沙率/%	—	—	46.99	33.19	17.13

板下气流提供了宽敞的通道，当上游来流风速增大时，被压缩进入板下空间的“狭管风”或“间隙射流”效应增强，使得板前区域的风速得到快速恢复和加强。这一现象可以从流体力学原理得到解释，Jubaye等[17]的研究为“板下通道”的加速效应提供了最根本的理论依据。相比之下，板后区域始终处于光伏板直接遮蔽形成的尾流区，气流紊乱且动能耗散严重，因此风速恢复较慢。这与张呈春等[5]在腾格里沙漠另一光伏电站的观测结果部分一致，他们同样发现阵列内部风速普遍降低，且板间和板后风速随高度增加，但本研究进一步明确了来流风速对板间与板后风速对比关系的影响机制。传统低净空光伏阵列，其板下空间相对封闭，气流以绕流板体上部为主，板下风速极低。而本研究中的高净空光伏使得板下气流成为影响近地层风场的重要组成部分。这种“抬升”结构显著改变了气流的分配模式，强化了板间区域的加速效应，基于流体力学原理可以推断，结构参数的差异是导致风场响应不同的根本原因[18-19]。

4.2　风速流场重组与防风效应的空间差异

单基柱光伏板的阻挡和导流作用明显改变了近地层流场结构。板体附近风速等值线出现显著弯折，说明原本较为均一的来流在光伏板干扰下转变为具有显著空间差异的局地流场。类似研究中，Xiao等[20]对迪拜沙漠中心塔式太阳能电站进行数值模拟研究，指出大型太阳能场站会显著扰动局地风流，增大地表粗糙度后可使局地风速降低约20%，并进一步改变侵蚀与积沙格局。究其原因，来流穿过阵列过程中受到多排光伏板连续阻滞，气流动能逐渐减弱；同时，由于板体与地表存在一定夹角，气流在后缘处受阻后发生转向，并沿板面及板下空间重新分布，最终在前缘附近汇集，形成局部加速区[21]。

在7.74 m·s^{-1}的低风速下，板后50 cm高度的防风效果高达44.47%。光伏板的直接遮蔽所形成的尾流区是风能耗散最剧烈的区域。相比之下，板间区域的防风效果居中，而板前20 cm高度的防风效果最弱仅约7%。这一现象是由于气流在板前下缘

发生分离，部分气流沿板下通道加速，近地表风速并未得到有效抑制。此外光伏板的防风效果与来流风速呈负相关关系。随着风速从7.74 m·s^{-1}增至11.28 m·s^{-1}，各位置的防风效果普遍下降。其中板后50 cm高度的防风效果从44.47%降至28.67%。在高风速下，更强的来流惯性使得气流能够更快地克服障碍扰动，实现动量恢复，从而削弱了光伏阵列的相对防风能力。板前位置在400 cm高度的防风效果反而高于100 cm高度。由于观测期间主导来流为西北风，且400 cm高度已接近光伏板上缘，该高度层的气流仍可能受到板体遮挡及上缘附近绕流调整的共同影响；同时，CK同步风速波动也可能放大防风效果的计算值，因此板前400 cm高度相对偏高的防风效果更应理解为局地流场响应，而非普遍性的垂向变化规律。

4.3 输沙响应及其与既有研究的差异

风动力条件的差异直接影响光伏板周围不同部位的输沙过程。根据本文CK观测结果，在7.74 m·s^{-1}下，0~10 cm高度的输沙量占总输沙量的90%以上，说明流动沙地的输沙仍主要集中在近地表层。这一特征与张华等[22]关于流动沙地输沙主要集中于0~10 cm范围内的认识一致。光伏板布设后，各观测位置输沙量的垂向分布规律并未发生根本改变，均表现为近地表层贡献最大，但总输沙量整体低于CK，光伏板对过境风沙流具有明显的减沙作用。这与陈曦[23]的研究结果一致，其研究结果表明，电站内输沙量低于裸沙对照，且随着深入电站内部，输沙率呈降低趋势。Tan等[24]也进一步指出，阵列内部输沙率较阵列外降低约83%，且风沙活动参数明显下降。

为探究输沙量随高度的分布特征，本研究通过数学模型进行线性函数、多项式函数、对数函数、幂函数和指数函数进行风沙流通量拟合，发现指数函数拟合相关度较佳，阵列干扰并没有改变风沙流通量函数，这与Namikas[25]和高岳[26]研究结果一致。风沙流结构特征值的分析指出所有位置的λ值均大于1，表明风沙流整体处于非饱和的输运或侵蚀状态，这与腾格里沙漠活跃的风沙环境相符[27]。板间区域的λ值在各风速下均处于较高水平，并在11.28 m·s^{-1}下达到2.604，略高于CK的2.561。尽管光伏阵列整体降低了总输沙量，但板下净空较大的结构并未简单削弱所有部位的风沙活动，而是在板间位置形成了更强的中层跃移输沙响应。板间区域的高λ值，正是近地表气流加速后对沙粒具有更强起动和垂向输运能力的体现。

需要指出的是，本研究观测期内主导风向主要为西北风，因此当前结论主要适用于该风向下的局地响应，对其他风向下的扰动效应仍缺乏直接证据。后续研究应结合多风向连续观测，并辅以数值模拟，进一步分析不同下垫面与结构条件下的气流–风沙相互作用，以更全面地认识光伏阵列对局地风场和输沙环境的影响。已有研究表明，干旱区对光伏开发具有较强的生态适应性和扰动缓冲能力[28]。因此，围绕荒漠区光伏阵列内部风沙过程开展研究，对于提升沙漠光伏建设与生态治理的协同水平具有现实意义。

5 结论

在3种来流风速下，阵列内部各位置风速均低于CK，光伏板对过境气流具有持续阻滞作用。防风效应主要集中在50~100 cm高度，其中板后位置减速作用最强。板前20 cm高度防风效果仅为6.79%~7.63%，而在400 cm高度可达19.15%~20.93%，单基柱高净空结构并未形成均一低风速带，而是在不同高度和位置上形成了差异明显的局地流场。

不同来流风速下，CK总输沙率始终高于阵列内部各位置；阵列内部则表现为板间最大、板后次之、板前最小。在3种来流风速下板前固沙效益最高在45.26%~51.93%；板后的阻沙率在26.68%~33.19%；板间最低，在11.95%~19.10%。板前是阵列内部减沙作用最明显的部位，而板间则是风沙输移最活跃的区域。

光伏阵列改变了输沙强度及其空间分布，但未改变风沙流近地表集中的基本规律。各位置高度输沙量均表现为2~10 cm>0~2 cm>10~20 cm，中层跃移输沙仍是近地层输沙主体。板间区域在高风速下表现出较高的风沙流结构特征值，板下通道增强了局地中层输沙活动。因此，荒漠区光伏阵列防沙应实行分区配置，板间为重点防护区，宜优先采取阻沙和地表固结措施；板前应注重维持其减沙优势；板后则需重点防范基柱周边的局地冲蚀。

参考文献：

[1] 肖建华，司建华，刘淳，等.沙漠能源生态圈概念、内涵及发展

模式[J].中国沙漠,2021,41(5):11-20.

[2] Zhou J, Xiao J H, Ren Y, et al. Assessment of suitability for photovoltaic plant siting and planning of power transmission corridors in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2026, 552:147888.

[3] Yang H, Feng Q, Xiao J, et al. Rapid solar energy development in deserts: a missing element in desertification control and achieving sustainable development goals[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2026, 123(10):e2601509123.

[4] Yao Z Y, Xiao J H, Xie X S, et al. Design of optimal sand fences around a desert solar park: a case study from phase IV of the Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park[J]. Natural Hazards, 2022, 113(1):673-697.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 郭彩赟,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] 李永得,马瑞,王强强,等.腾格里沙漠西南缘光伏阵列风沙运动特征的观测研究[J].水利规划与设计,2025(10):160-165.

[12] Sun F H, Luan Y K, Tan Q L, et al. Quantifying photovoltaic power plant-induced cool island effect and vegetation response in arid regions[J]. Ecological Indicators, 2026, 185:114765.

[13] 杨敏,刘任涛,曾飞越,等.腾格里沙漠东南缘人工固沙植被演替地面节肢动物群落多样性分布特征[J].生态学报,2024,44(1):428-439.

[14] Li M L, Chen T, Ma S J, et al. Wind field characteristics of photovoltaic arrays based on wind tunnel tests[J]. Solar Energy, 2025, 300:113867.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Jubayer C M, Hangan H. Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 134:56-64.

[18] Yao N Z, Wang H, Wang B, et al. Venturi-effect rotating concentrators and nonreciprocity characteristics based on transformation hydrodynamics[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(10).

[19] 朱志昊,屈建军,殷轶男,等.光伏立柱刷状草绳防掏蚀性能的风洞模拟[J].中国沙漠,2026,46(2):188-200.

[20] Xiao J H, Ye D T, Xie X S, et al. Numerical simulation of the airflow at the world's largest concentrated solar power plant in a desert region[J]. Solar Energy, 2022, 232:421-432.

[21] 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.

[22] 张华,李锋瑞,张铜会,等.科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征[J].水土保持学报,2002(2):20-23.

[23] 陈曦.沙区光伏电站对气固两相流及地表土壤粒径的影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.

[24] Tan L H, Wang B, He Y X, et al. Impact of a large-scale desert photovoltaic power plant on aeolian saltation and dust emission [J]. Solar Energy, 2026, 305:114245.

[25] Namikas S L. Field measurement and numerical modelling of aeolian mass flux distributions on a sandy beach[J]. Sedimentology, 2003, 50(2):303-326.

[26] 高岳.库布齐沙漠柔性支架光伏电站风沙运动与地表蚀积规律[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2025.

[27] 屈建军,张伟民,彭期龙,等.论敦煌莫高窟的若干风沙问题[J].地理学报,1996,(5):420-425.

[28] Xiao J H, He P X, Li Y, et al. Ecological dichotomies of solar energy expansion: resilience in arid regions versus fragility in humid ecosystems[J]. Frontiers in plant science, 2025, 16:1549519.

Spatial differentiation characteristics of near-surface wind field and aeolian sand transport under a single-column photovoltaic array in the Tengger Desert

Zhang Zezhong[1a], Zhang Huayong[2], He Yuxuan[3], Wang Biao[2], Wang Xiaona[3], Yang Guang[1abc], Ma Yunxia[1abc], Xiao Jianhua[4], Zhang Deyi[1a]

(1.a. *College of Desert Control Science and Engineering*, b. *State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Areas*, c. *Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Research Station*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010010, *China*; 2. *Xinjiang Huadian Tianshan Power Generation Co., Ltd.*, *Hami* 839000, *Xinjiang*, *China*; 3. *Beijing Engineering Corporation Limited*, *PowerChina*, *Beijing* 100024, *China*; 4. *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*)

Abstract: Large-scale photovoltaic (PV) development in desert regions can significantly alter local wind fields and aeolian activity, yet the spatial differentiation of wind-sand environments and their regulatory mechanisms within different parts of PV arrays remain insufficiently understood. In this study, a typical single-column PV array with a ground clearance height of 150 cm on the eastern margin of the Tengger Desert was selected as the study object. Based on synchronous field observations, we comparatively analyzed near-surface wind speed profiles, the vertical distribution of sediment transport rates, sand-flow structure, and sand-blocking rates at the panel front, panel rear, inter-panel space, and an open control site (CK) under three incoming wind-speed conditions. The results showed that: (1) The PV array significantly reduced near-surface wind speed, and the wind-reduction effect exhibited clear spatial heterogeneity, mainly concentrated within the 50−100 cm height range. The strongest deceleration occurred at the panel rear, where the maximum wind-reduction effect reached 44.47%, while the wind-reduction effect at 20 cm in front of the panel was relatively weak, ranging from 6.79% to 7.63%, and 19.15%−20.93% at 400 cm height. (2) The PV panel as a whole reduced aeolian sediment transport intensity, but the internal transport pattern remained stably differentiated, with total sediment transport ranked as inter-panel space > panel rear > panel front. The sand-blocking rate was 45.26%−51.93% at the panel front, 26.68%−33.19% at the panel rear, and 11.95%−19.10% in the inter-panel space. (3) The PV panel did not alter the basic law that aeolian sediment transport is concentrated near the ground surface. At all positions, sediment transport at different heights followed the order 2−10 cm>0−2 cm>10−20 cm, and the sand-flow structural parameter in the inter-panel space even exceeded that of CK under high wind-speed conditions, indicating that the airflow passage beneath the panel enhanced the vertical transport capacity of sand particles. The results suggest that sand-control measures in desert PV arrays should adopt a zonal configuration strategy, with the inter-panel space treated as the key protection unit, the panel front maintaining its sediment-reduction advantage, and the panel rear requiring attention to local erosion risk around the supporting columns. This study provides a scientific basis for zoned sand-control design and refined operation and maintenance of PV power plants in desert regions.

Key words: Tengger Desert; photovoltaic array; near-surface wind field; aeolian sand transport; sand retention rate