

腾格里沙漠光伏阵列对气流场和风沙流的扰动作用

张呈春^{1,2,3}, 张维福^{1,2,3}, 展秀丽^{1,2,3}, 董智今¹, 马思怡^{1,2,3}

(1.宁夏大学地理科学与规划学院, 宁夏银川750021; 2.中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 宁夏银川750021; 3.宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 宁夏银川750021)

摘要: [目的] 研究腾格里沙漠光伏(PV)阵列扰动下的近地层气流场与风沙流结构特征, 评估光伏阵列的防风固沙效果, 为沙漠地区风沙灾害治理和生态环境可持续发展提供理论支撑。[方法] 采用梯度风速观测设备, 实地观测光伏阵列(电板前沿、电板后沿和阵列间中线)和对照点的风速垂直分布、风速流场和风沙流结构, 对比分析电站内外不同位置的气流场与输沙特征。[结果] (1) 电站内整体风速呈现降低特点, 阵列间与电板后沿平均风速随高度上升而增加, 电板前沿平均风速随着高度增加呈先降低后增加的趋势。(2) ①草方格观测断面。电板前沿出风口处的风速明显增加, 电板后沿进风口和阵列间中线100 cm以下的风速降低; ②风蚀坑观测断面。光伏电板150 cm以下的风速降低, 阵列间的风速脉动变化明显; ③砾石观测断面。风速相对变化率与风速流场格局稳定, 电板后沿150 cm以上部分风速增加。平均防风效果: 砾石>草方格。(3) 输沙量表现为: 电板前沿>电板后沿>阵列间中线; 流动沙丘参照点(上风向)与电板前沿 λ (风沙流结构特征值)呈饱和状态, 电板后沿和阵列间 λ 呈非饱和状态。[结论] 与流动沙丘相比, 光伏阵列扰动了风速流场格局, 风速脉动和湍流度发生变化, 输沙量明显下降, 固沙效益明显。

关键词: 光伏阵列; 风速流场; 风速脉动; 风沙流结构; 腾格里沙漠

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0055-11

中图分类号: X169, P931.3

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.006; Zhang Chengchun, Zhang Weifu, Zhan Xiuli, et al. Perturbation of Tengger Desert photovoltaic arrays on airflow field and wind-sand flow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 55-65.

Perturbation of Tengger Desert Photovoltaic Arrays on Airflow Field and Wind-sand Flow

Zhang Chengchun^{1,2,3}, Zhang Weifu^{1,2,3}, Zhan Xiuli^{1,2,3}, Dong Zhijin¹, Ma Siyi^{1,2,3}

(1. School of Geographic Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan,

Ningxia 750021, China; 2. Sino-Arab Joint Laboratory for International Cooperation on

Characteristic Resources and Environmental Governance in Arid Zones, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

3. Ningxia Key Laboratory of Resource Evaluation and Environmental Regulation in Arid Zones, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] The structural characteristics of the near-surface airflow field and wind-sand flow under the disturbance of photovoltaic (PV) arrays in the Tengger Desert were analysed to assess the effect of PV arrays in preventing winds and fixing sands, in order to provide theoretical support for both the management of wind-sand disasters in desert areas and the sustainable development of ecological environments. [Methods] The vertical distribution of wind speed, wind velocity flow field, and wind-sand flow structure of PV arrays (front edge of electric panels, back edge of electric panels, and midline between arrays) and control points were assessed in the field using gradient wind speed observation equipment, and

收稿日期: 2023-12-24

修回日期: 2024-04-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“宁夏河东沙地水分在土壤-植被系统演变中的驱动作用”(42161013); 宁夏回族自治区自然科学基金项目“宁夏荒漠地区光伏发电建设的生态效应观测与分析研究”(2021AAC03048); 宁夏大学研究生创新项目“宁夏荒漠地区光伏阵列对风沙流结构与风场特征的影响”(CXXM202332)

第一作者: 张呈春(1999—), 男(汉族), 山西省运城市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持和荒漠化防治。Email: zcc19990219@163.com。

通信作者: 展秀丽(1983—), 女(汉族), 甘肃省靖远县人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治与生态恢复研究。Email: zhanxiuli@mail.bnu.edu.cn。

the airflow field and sand transport characteristics at different locations inside and outside a power plant were compared and analysed. [Results] (1) The overall wind speed inside the power station decreased, the average wind speed between arrays and along the back edge of the electric panel increased with height, and the average wind speed along the front edge of the electric panel decreased and then increased with height. (2) ① For the grass square observation section, the wind speed at the wind outlet in front of the electric panel increased significantly, and the wind speed along the wind inlet behind the electric panel and below 100 cm of the centre line between arrays decreased; ② For the wind erosion pit observation section, the wind speed of PV panels below 150 cm decreased, and the wind speed pulsation between arrays varied significantly; ③ For the gravel observation section, the relative rate of change of the wind speed and the pattern of the wind flow field were stable, and the wind speed along the back edge of the electric panel above 150 cm increased. The wind speed increased in the section above 150 cm behind the electric plate. The average wind protection effect occurred in the order of gravel > grass squares. (3) The order for sand transport was as follows: front edge of the electric plate > back edge of the electric plate > midline between the arrays; the reference point of the mobile sand dune (upwind) was saturated with λ (a characteristic value of the wind-sand flow structure) at the front edge of the electric plate, and unsaturated at the back edge of both the electric plate and λ between the arrays. [Conclusion] Compared with the mobile sand dune, the PV array perturbed the wind velocity flow field pattern, the wind velocity pulsation and turbulence degree changed, sand transport decreased significantly, and a sand fixation benefit was evident.

Keywords: photovoltaic array; wind velocity flow field; wind pulsation; wind and sand flow structure; Tengger Desert

光伏发电是通过光伏电板将太阳辐射转化为电能,是解决能源需求日益增长的可靠途径^[1]。中国西北地区,太阳能资源丰富^[2],是规模化建设光伏电站的理想场所^[3]。大规模光伏阵列引起了地表流场格局发生变化^[4],改变了电站地表风沙运动规律^[5]。开展沙区光伏电站内风况与输沙特征的分析,为区域防风固沙过程和风沙灾害防治提供科学参考,对生态脆弱地区的生态文明建设具有一定的科学指导意义,有助于科学认识光伏产业的发展^[6]。

迄今为止,针对光伏电站的风况与输沙环境的研究,主要集中在共和盆地^[7-9]、毛乌素沙地^[10-11]、腾格里沙漠^[12]、乌兰布和沙漠^[13]、库布齐沙漠^[4,14-17]、塔克拉玛干沙漠^[18]等。袁方等^[11]在毛乌素沙地研究发现,光伏阵列使得风速流场的空间分布发生了明显的变化;在库布齐沙漠,郭彩贇等^[4]和贾瑞庭等^[17]研究发现,光伏板干扰了流场分布,对风速和输沙具有明显的拦截作用;杨世荣等^[16]研究发现,风速脉动随高度增加呈先减少后增大的趋势;王雪芹等^[18]在沙漠—绿洲过渡带研究发现,植物群落结构的差异增加了风速脉动垂直方向的复杂性;唐国栋等^[19]研究发现,风向夹角是影响站内近地表风沙输移强度的重要因素;陈曦等^[13]在乌兰布和沙漠研究也发现光伏电板对风沙具有明显的拦截作用,同时发现,光伏电板前沿与电板后沿区域风沙流特征呈非饱和状态。综上,目前对沙漠地区光伏阵列风速流场的相关研究较

少,尤其是光伏阵列+草方格防护措施的复杂流场结构探索不够深入。宁夏回族自治区中卫市沙漠光伏产业园是中国最大的沙漠光伏基地,有关该区域光伏阵列的风况和输沙特征的研究尚未见报道。为此,本文以该市沙漠光伏产业园内光伏阵列为研究对象,采用梯度风速观测设备,对风速流场、风速脉动与风沙流结构等进行研究,探索该区域光伏阵列的防风固沙效果,以期沙漠地区风沙灾害治理提供科学参考,也为荒漠地区生态环境可持续发展提供重要的理论支撑。

1 研究区概况

研究观测区地处腾格里沙漠东南缘,该地区气候干旱,环境恶劣,平均海拔约 1 339 m,年均气温 9.6 °C,月平均气温 6.7~24.1 °C,年均降雨量 186 mm,年均风速为 2.8 m/s,春夏两季的起沙风频率占全年总量的 72.3%,主导风向为 WNW—NNW(冬春)和 NE—E(春夏),大于 5 m/s 的风沙天气约 200 d/a^[20]。土壤基质为松散贫瘠的流沙,主要植物为油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)等^[21]。

中卫沙漠光伏产业园(37°32′20N, 105°1′32E)是中国最大的沙漠光伏产业园,总面积 43.33 km²^[22],每 1 m²地区年接收太阳能约为 2 000~3 000 kW·h^[23]。沙漠光伏产业园内地表以裸沙为主,固沙措施为草方

格和砾石,电站偏西北侧光伏阵列区域出现不同程度的掏蚀现象,东侧护栏网外沙丘表现弱堆积形态,电站内腹地与东侧区域有一定程度的植被恢复。

2 研究方法 with 数据处理

2.1 研究方法

2023 年 4 月中旬,开展气流场与风沙流结构野外观测。野外观测试验布置如图 1 所示。

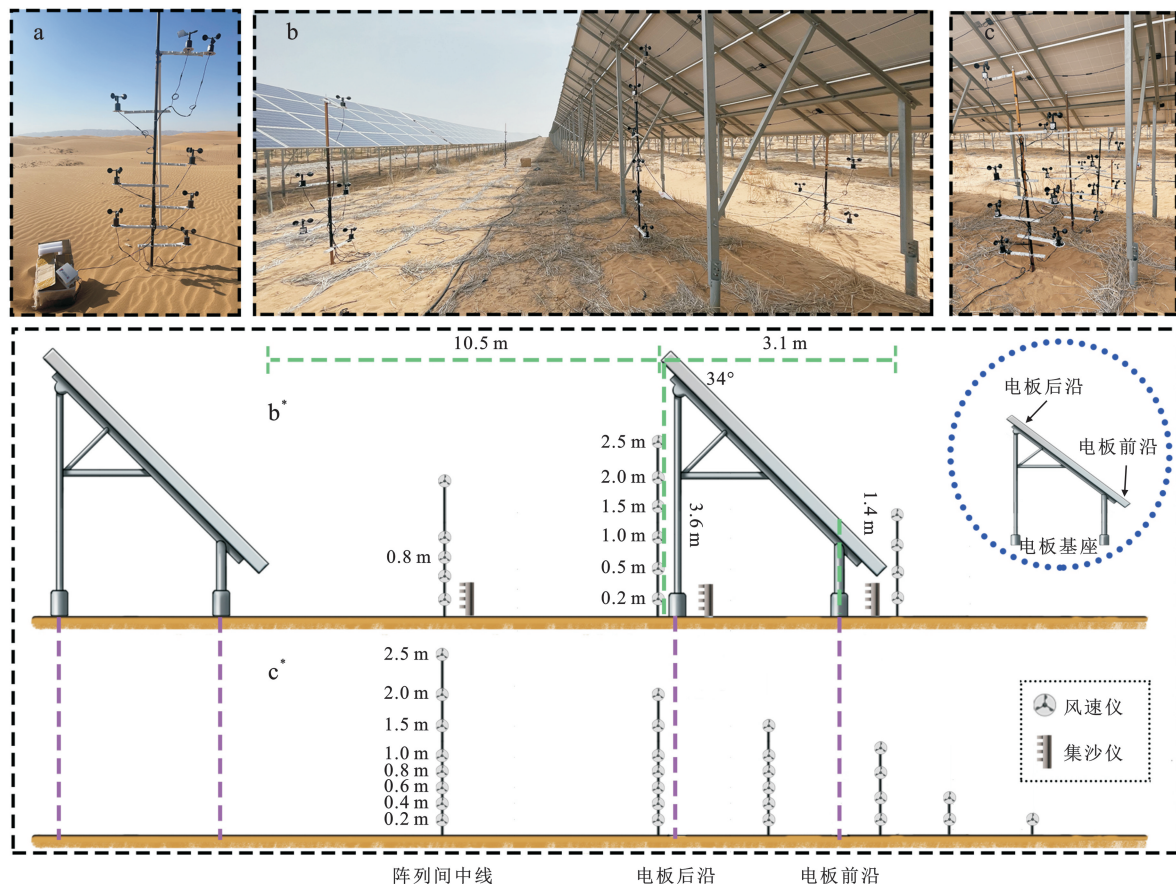
(1) 风速廓线观测布置。分别在光伏电站外西北侧 1 km 处与电站内腹地阵列间区域布置梯度风速仪(图 1a)。

(2) 集沙仪观测布置。选择光伏阵列草方格断面的电板前沿、电板后沿和阵列间布置集沙仪(图 1b*),同时安装梯度风速观测设备,且在流动沙丘(上风向与下风向)设置集沙仪对照观测点,单次观测时间为 50~60 min,共进行 3 组有效观测。集沙仪的集沙孔为 2 cm×2 cm,每层高度 2 cm,共分为 10

层,观测时集沙孔与地面和主风向垂直,底部与地面平齐。收集结束后,对集沙仪中的各层进行称重。

(3) 风速脉动观测布置。选择光伏电站上风向边缘(断面 1)、站内腹地(断面 2)、风蚀坑(断面 3)和流动沙丘(断面 4)区域开展风速流场的观测。在电板前沿、电板后沿和阵列间中线处安装梯度风速仪,观测高度如图 1b* 所示,同时在流动沙丘参照点(上风向)布置对照点同步观测。其中,砾石断面和草方格断面观测同步进行,风蚀坑断面与流动沙丘断面观测同步进行,每次观测时间为 30~50 min,重复观测 3~5 次。

(4) 风速流场观测布置。在各光伏阵列断面的电板前沿、后沿和阵列间,自北向南依次架设梯度风速仪,观测高度如图 1c* 所示,风速仪每 1 min 采集一次数据,单次观测时间为 1h,重复观测 3 次。断面 1 地表为砾石,断面 2 地表为草方格,断面 3 地表性质为风蚀坑,其中,断面 1 和 2 观测同步进行,断面 3 和 4 观测同步进行。



注:a,b,c 分别为风速廓线、风速脉动和风速流场。

图 1 气流场观测点布置示意图

Fig.1 Schematic layout of airflow field observation points

2.2 数据计算和处理

(1) 风速相对加速率是体现近地表流场的重要指标。采用 Jackson 等^[24]定义的计算公式为:

$$\Delta s = \frac{u_z - U_z}{U_z} \quad (1)$$

式中: Δs 为风速相对加速率; u_z 为 z 高度的实测风

速(m/s); U_z 为基点(电板后沿)200 (cm)高度处的实测风速。

(2) 防风效果^[25]。计算公式为:

$$F = \frac{v_0 - v_z}{v_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: F 为防风效果; v_0 , v_z 为在同一高度下参照点和站内观测点的平均风速。

(3) 风速脉动(I)^[26]。计算公式为:

$$I = |u - u_m| \quad (3)$$

式中: I 为风速脉动; u 为观测瞬时风速(m/s); u_m 为观测期间的平均风速(m/s)。

(4) 湍流度(G)^[26]。计算公式为:

$$G = I/u_m \quad (4)$$

式中: G 为湍流度; u 为观测瞬时风速(m/s); u_m 为观测期间的平均风速(m/s)。

(5) 风沙流结构特征值(λ)^[27]。计算公式为:

$$\lambda = Q_{4-20}/Q_{0-2} \quad (5)$$

式中: λ 为风沙流结构特征值; Q_{4-20} , Q_{0-2} 分别表示

4—20 cm 和 0—2 cm 高度的输沙量[g/(min·cm)]。

(6) 固沙效益^[25]。计算公式为:

$$E = \frac{q_0 - q_z}{q_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: E 为固沙效益; q_0 , q_z 分别为对照点和站内观测点高度的输沙量。

数据处理采用 Excel 和 Origin 2021 进行统计与绘图。

3 结果与分析

3.1 风速垂直分布

由图 2 可知,试验观测期间,主风向为西风 and 西北风,站外流动沙丘观测点平均风速为 9.58 m/s (图 2),电站腹地观测点平均风速为 5.41 m/s。电站内,阵列间行道与光伏电板后沿平均风速随高度上升呈现出增加趋势,光伏电板前沿平均风速随高度上升表现出先降低后增加的趋势,而流动沙丘参照点(上风向)风速随高度上升增幅更快,波动性更强,但在 60 cm 高度处,风速出现小幅下降(图 3—4)。

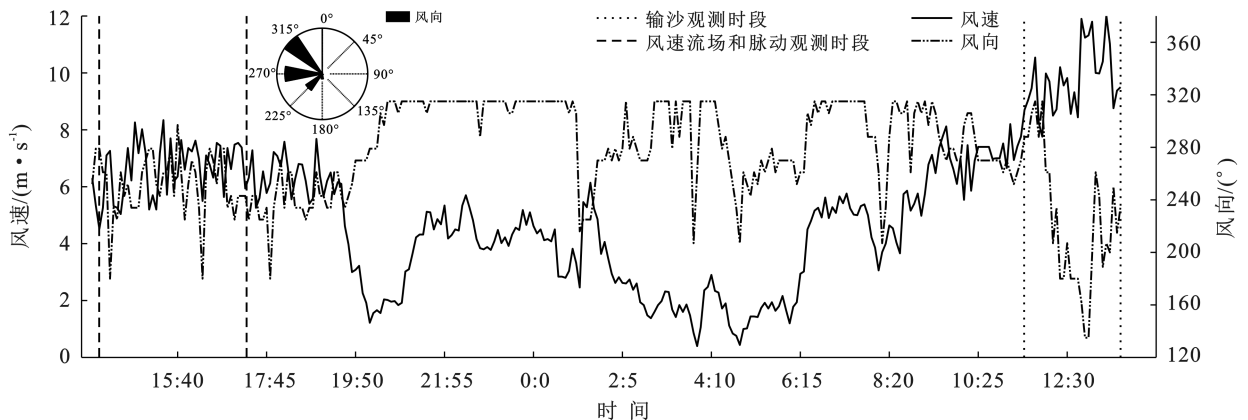


图 2 观测期间流动沙丘参照点(上风向)2 m 高度的风速、风向情况

Fig.2 Wind velocity and direction at a height of 2 m at reference point (upwind) of sand mobile sand dune during observation period

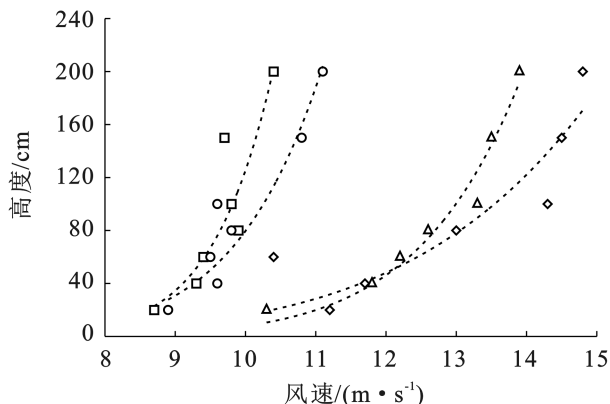


图 3 流动沙丘每 30 min 观测时段的风速垂直分布
Fig.3 Vertical distribution of wind velocity per 30 min observation period in a mobile sanddune

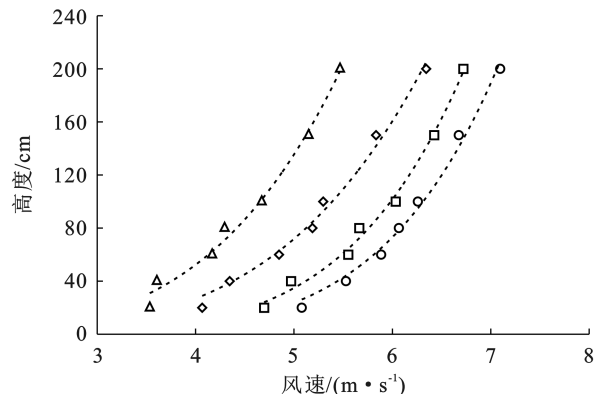


图 4 光伏电站内每 30 min 观测时段的风速垂直分布
Fig.4 Vertical distribution of wind velocity per 30 min observation period in PV power plant

3.2 风速流场与防风效果

由图 5 可知,砾石观测断面(A)风速流场较为平缓,在电板后沿(300 cm)和阵列间(800 cm)200 cm 高度处风速明显增加,40 cm 以下高度处风速降低,20 cm 高度处风速相对加速率呈现下降趋势(图 6a)。草方格观测断面(B)电板前沿(0 cm)区域的风速明显增加,在 150 cm 处形成了小型涡旋区,电板后沿区域风速降低,阵列间 100 cm 高度以上区域风速增加,100 cm 高度以下区域风速降低(图 5),电板前沿的风速相对加速率为正值,电板后沿的风速相对加速率为

负值,阵列间的风速相对加速率随垂直高度上升而增加(图 6b)。风蚀坑观测断面(C)电板前沿和电板后沿 10 cm 高度以下区域风速降低,阵列间行道区域风速明显增加,电板前沿风速相对加速率为负值,风速相对加速率为正值。

由表 1 可知,砾石观测断面的电板前沿、电板后沿、阵列间防风效果分别为 52.36%, 51.59% 和 51.36%,草方格观测断面的电板前沿、电板后沿、阵列间防风效果分别为 47.97%, 52.68% 和 49.55%,砾石观测断面的防风效果较草方格断面更明显。

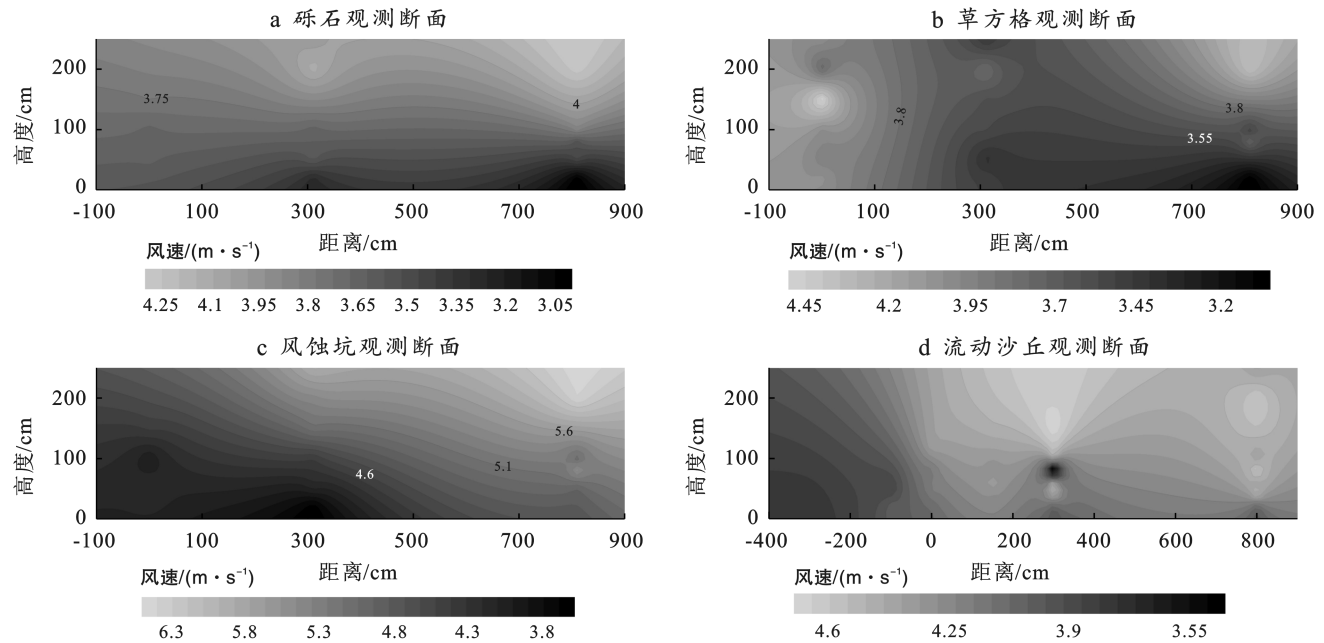


图 5 光伏阵列不同观测断面的风速流场

Fig.5 Wind velocity flow field at different observation sections of PV array

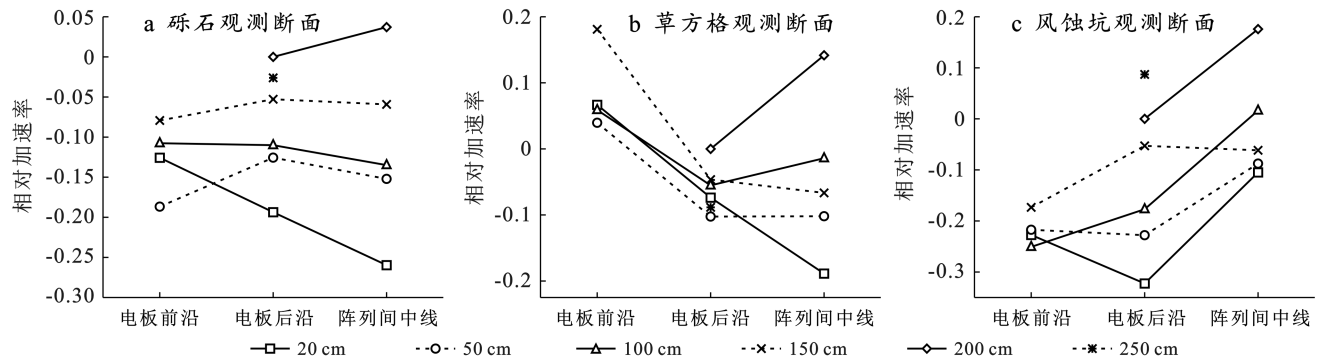


图 6 不同观测断面的风速相对加速率

Fig.6 Relative acceleration rate of wind velocity for different observation sections

3.3 风速脉动与湍流度

由表 2 可以看出,砾石观测断面的电板前沿、电板后沿和阵列间风速脉动分别为 1.13, 1.17 和 1.12 m/s,电板前沿的平均脉动风速随高度的上升呈先减小后增大的趋势,而电板后沿和阵列间的平均脉动风速呈现出随高度的上升而增加的趋势;草方格观测断

面的电板前沿、电板后沿和阵列间风速脉动分别为 1.51, 1.03 和 1.09 m/s,电板前沿和电板后沿的平均脉动风速随高度的上升呈先减小后增大的趋势,而阵列间的平均脉动风速表现出随高度的上升而增加;风蚀坑观测断面的电板前沿、电板后沿和阵列间风速脉动分别为 0.93, 1.27 和 1.69 m/s,电板前沿的平均脉

动风速随高度的上升表现出先减小后增大的趋势,而电板后沿和阵列间表现出随高度的上升而增加的趋势(表 2)。

从图 7 可知,砾石和草方格观测断面的电板前沿

和电板后沿不同高度的风速脉动差异不明显,二者阵列间的不同高度的风速脉动变化均较明显;风蚀坑观测断面电板前沿、电板后沿和阵列间不同高度的风速脉动呈现出明显的不同。

表 1 不同观测断面不同高度的防风效果

Table 1 Wind protection effect at different heights for different observed sections

高度/ cm	防风效果/%								
	草方格观测断面			砾石观测断面			风蚀坑观测断面		
	电板前沿	电板后沿	阵列间中线	电板前沿	电板后沿	阵列间中线	电板前沿	电板后沿	阵列间中线
20	50.65	52.67	60.33	53.31	56.14	61.04	42.41	41.78	22.54
50	49.58	52.89	51.62	55.06	54.59	55.10	44.47	38.87	27.32
100	48.36	53.66	48.96	51.94	52.46	46.93	48.15	34.25	24.92
150	43.28	53.60	—	49.13	49.45	—	33.35	26.45	—
200	—	50.58	37.31	—	45.30	42.40	—	20.90	5.53

注:“—”表示此高度无观测数据。

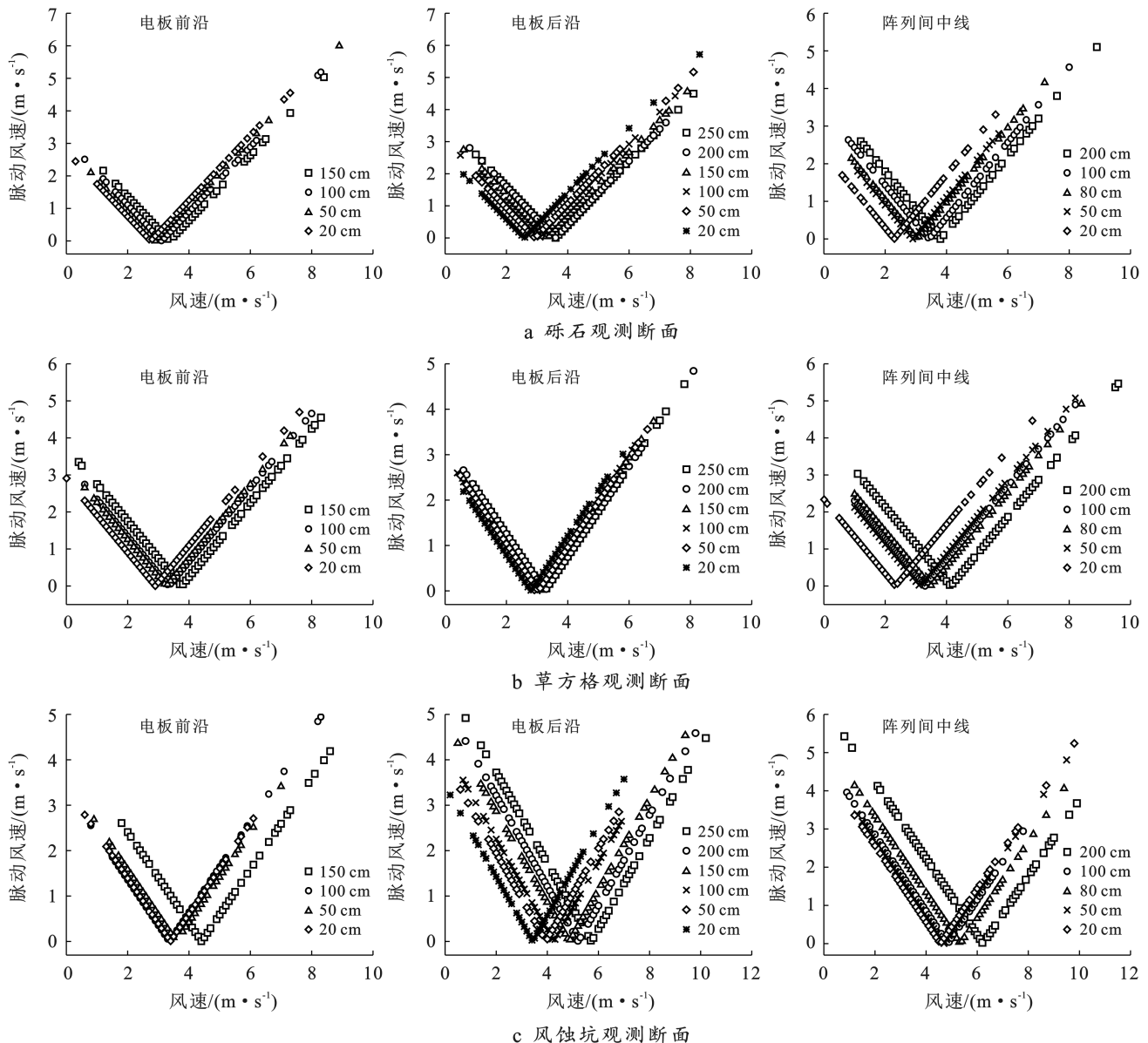


图 7 光伏阵列不同位置的风速与脉动风速的关系

Fig.7 Relationship of wind velocity and pulsating wind velocity at different locations of PV array

由图 8 可知,草方格观测断面的电板前沿、电板后沿、阵列间的湍流度平均值分别为 0.46,0.34,0.35;砾石观测断面的电板前沿、电板后沿、阵列间的湍流度平均值分别为 0.36,0.37,0.36;风蚀坑观测断面的

电板前沿、电板后沿、阵列间的湍流度平均值分别为 0.25,0.27 和 0.33。

因此可以得出,草方格观测断面的电板前沿的湍流度最高,风蚀坑观测断面电板前沿的湍流度最低。

表 2 光伏阵列不同观测断面的平均脉动风速

Table 2 Average pulsating wind velocity at different observation sections of PV array

高度/ cm	平均脉动风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)									流动沙丘
	草方格观测断面			砾石观测断面			风蚀坑观测断面			
	电板前沿	电板后沿	阵列间区域	电板前沿	电板后沿	阵列间区域	电板前沿	电板后沿	阵列间区域	
20	1.51	1.12	0.91	1.15	1.03	0.88	0.93	0.88	1.37	1.25
50	1.44	1.08	0.93	0.97	1.16	1.03	0.91	0.93	1.62	1.31
100	1.44	1.01	1.05	1.13	1.13	1.1	0.83	0.94	1.73	1.32
150	1.66	1.02	1.07	1.25	1.22	1.26	1.06	1.3	1.65	1.37
200	—	1.15	1.5	—	1.27	1.31	—	1.65	2.1	1.43
250	—	0.81	—	—	1.22	—	—	1.89	—	—

注:“—”表示此高度无观测数据。

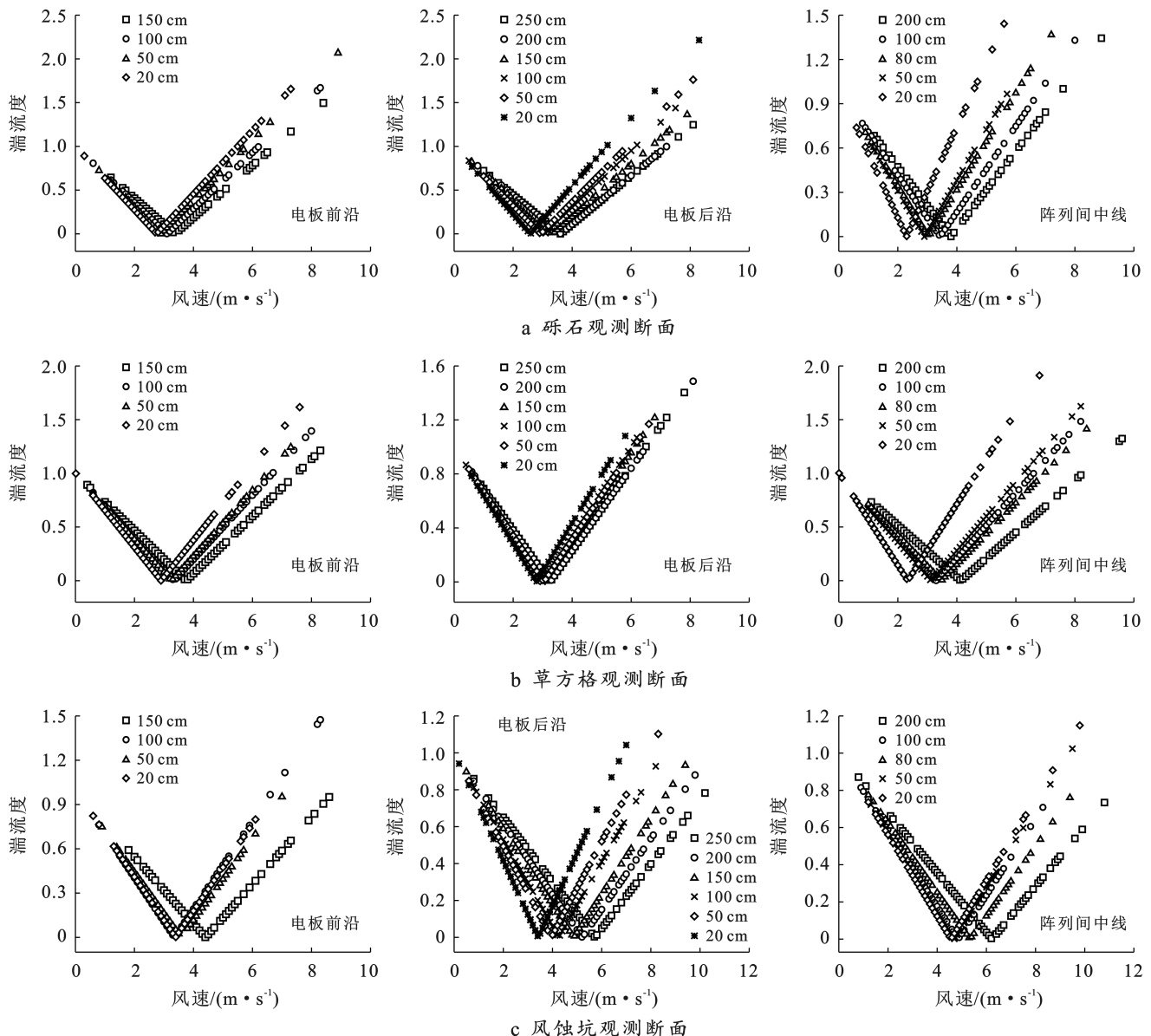


图 8 光伏阵列不同位置的风速与湍流度的关系

Fig.8 Relationship of wind velocity and turbulence intensity at different locations of PV array

3.4 光伏电板不同位置输沙量特征

在风速条件为 9.51 m/s 时,各观测点单位时间总输沙量分别为:流动沙丘参照点上风向[10.129 g/(min·cm²)]、流动沙丘参照点下风向[4.435 g/(min·cm²)]、电板前沿[0.078 g/(min·cm²)],电板后沿[0.011 g/(min·cm²)]与阵列间中线[0.01 g/(min·cm²)](表 3);在风速条件为 7.57 m/s 时,各观测点单位时间总输沙量分别为:流动沙丘参照点上风向[6.211 g/(min·cm²)]、流动沙丘参照点下风向[4.163 g/(min·cm²)]、电板前沿[0.201 g/(min·cm²)],电板后沿[0.072 g/(min·cm²)]与阵列间中线[0.052 g/(min·cm²)](表 4)。电站内观测点的单位时间总输沙量均表现为:电板前沿>电板后沿>阵列间

中线。

由图 9 可知,各观测点的输沙量随高度的上升而减少,沙粒跃移主要集中在 10 cm 以内,最大值均出现在 0~2 cm 高度内。由表 3—4 可知,流动沙丘参照点(上风向)与电板前沿风沙流结构特征值 $\lambda < 1$,表现为堆积,表明沙粒在搬运过程中向近地面贴近,下层沙量增大很快,呈现饱和状态;而流动沙丘参照点(下风向)、电板后沿和阵列间风沙流结构特征值 $\lambda > 1$,表现为侵蚀,表明近地层流场出现扰动,使得上层气流挟沙能力增强,呈现非饱和状态。光伏阵列电板前沿固沙效益为 98.33%、电板后沿固沙效益为 99.77%,对过境气流具有较强的削弱作用,转化与消耗了风沙流的动力,起到了明显的固沙作用。

表 3 9.54 m/s 风速条件下光伏电板不同位置风沙流结构与固沙效益

Table 3 Structure of wind-sand flow and sand fixation benefits at different locations of PV panels under 9.54 m/s wind velocity conditions

位置	总输沙量/ (g·min ⁻¹ ·cm ⁻²)	不同高度气流场输沙量/(g·min ⁻¹ ·cm ⁻²)			特征值 λ	固沙效益/%
		0—2 cm	4—10 cm	12—20 cm		
上风向	10.129	5.867	3.97	0.292	0.726	—
下风向	4.435	1.815	1.936	0.684	1.444	56.21%
电板前沿	0.078	0.048	0.028	0.003	0.64	99.23%
电板后沿	0.011	0.004	0.003	0.004	2.007	99.90%
阵列间中线	0.01	0.004	0.004	0.002	1.51	99.91%

表 4 7.57 m/s 风速条件下光伏电板不同位置风沙流结构与固沙效益

Table 4 Wind-sand flow structure and sand fixation benefits at different locations of PV panels under 7.57 m/s wind velocity conditions

位置	总输沙率/ (g·min ⁻¹ ·cm ⁻²)	不同高度气流场输沙率/(g·min ⁻¹ ·cm ⁻²)			特征值 λ	固沙效益/%
		0—2 cm	4—10 cm	12—20 cm		
上风向	6.211	3.502	2.567	0.142	0.773	43.61
下风向	4.163	1.724	1.872	0.567	1.415	72.25
电板前沿	0.201	0.104	0.083	0.014	0.935	98.33
电板后沿	0.072	0.014	0.031	0.026	4.029	99.77
阵列间中线	0.052	0.011	0.025	0.015	3.607	99.82

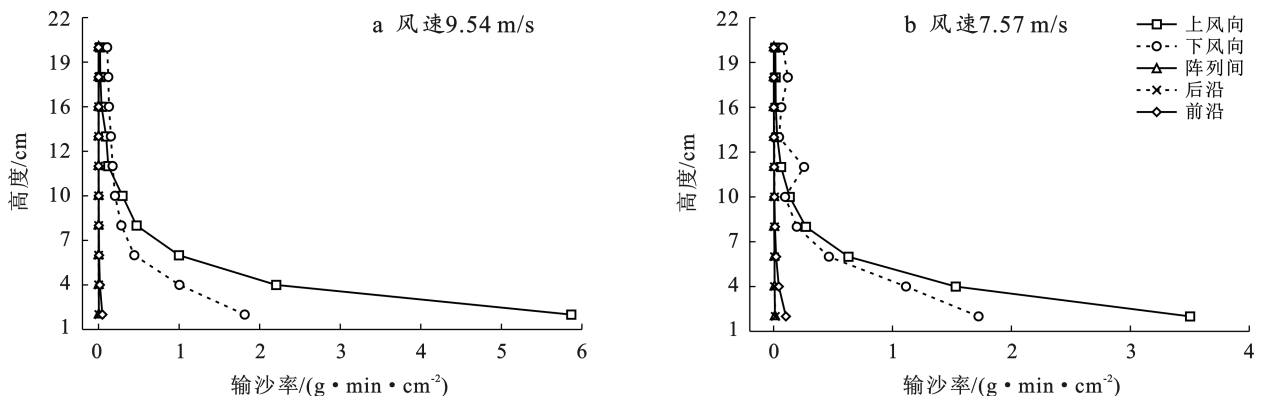


图 9 光伏阵列不同位置输沙量随高度变化

Fig.9 Variation of sand transport with height at different locations of PV array

4 讨论

4.1 风速垂直分布

本研究发现,在电站内,阵列间行道与光伏电板后沿平均风速随高度上升呈现出增加趋势,光伏电板前沿平均风速随高度上升表现出先降低后增加的趋势,而流动沙丘参照点(上风向)风速随垂直高度上升增幅更快,波动性更强,这与杨若婷等^[9]和袁方等^[11]研究结果基本一致,光伏阵列和站内植被对风速具有削减和拦截作用,层层削弱过境气流,光伏板下区域的上方气流与下方地表气流在电板前沿相汇,使得100 cm高度风速略微下降。肖建华等^[28]研究也发现,电站设施引起的表面粗糙度增加导致风速降低了20%。

4.2 风速流场与防风效果

光伏电站边缘区域与腹地区域风况与风能环境不同,风速流场格局差异明显。本研究发现,草方格观测断面的电板前沿出风口处风速明显增加,在150 cm高度处形成小型涡旋,但电板后沿和阵列间100 cm高度以下的风速降低,这与袁方等^[11]在毛乌素沙地研究结果基本一致。这是因为,气流经过多排光伏电板层层阻挡与削弱后能量衰减,且电板布设与地面存在一定夹角,在电板后沿遇阻气流方向改变,随电板集流后从电板前沿相汇加速流出^[4],地表草方格和植被的存在,引起了流场格局发生变异。风蚀坑观测断面的电板前沿100 cm高度处风速降低,形成低速反向涡旋,风沙流颗粒聚积在反向涡旋周围形成堆积,在电板后沿100 cm高度以下风速降低,但阵列间100~200 cm高度处风速增加,这与郭彩贇等^[4]在库布齐沙漠的研究结果基本一致。这是因为,本研究区光伏阵列地基出现了45~70 cm的风蚀坑,在阵列间形成了积沙区,气流在风蚀坑中产生回旋涡流,持续掏蚀砂质地表,与光伏阵列本身的阻风作用叠加,致使梯度风速发生变化,电板后沿风速下降,阵列间区域风速增加。由于本研究区部分区域存在草方格以及少量植被,草方格观测断面的风速流场与风蚀坑观测断面存在着明显的不同,这与郭彩贇等^[4]在库布齐沙漠研究结果基本一致。因此,在未来电站维护过程中,应关注电板前沿风能环境所造成的影响。

4.3 风速脉动与湍流度

本研究发现,草方格观测断面的电板前沿和电板后沿的平均脉动风速均随高度上升呈先减小后增大的趋势,与杨世荣等^[16]在库布齐沙漠研究结果基本一致。砾石观测断面的电板前沿的平均脉动风速随高度上升呈先减小后增大的趋势,电板后沿和阵列间的平均脉动风速随高度的增加呈上升趋势。这是由

于电板前沿的出风口存在集流汇聚作用,150 cm高度处风速脉动增强,在离心力的作用下,涡旋能量传递减弱,导致50~100 cm高度处风速脉动减弱^[16]。流动沙丘参照点(上风向)的平均脉动风速呈现出随着高度的上升而增加的趋势,毛东雷等^[29]研究也发现,流动沙丘的风速脉动幅度和地表植被盖度有明显关系,本研究中,由于光伏阵列的存在以及地表植被覆盖,影响了风速脉动的幅度。近地表湍流度的变化与沙粒运动的干扰有关,距地表越远,湍流度越趋向于稳定^[30]。本研究发现,草方格观测断面电板前沿的湍流度最高,风蚀坑观测断面电板前沿的湍流度最低。这是因为,气流沿光伏电板后沿进入,而电板布设与地面存在一定夹角,气流集流加速从电板前沿流出,引起了湍流幅度增强^[31]影响风速脉动,而风蚀坑观测断面,气流经过凹陷的风蚀坑遇阻减速留住,与电板下方气流汇聚电板前沿扩散形成低速反向涡旋,沙粒在离心力作用下能量衰减,风速降低,引起局部湍流度下降。

4.4 光伏电板不同位置输沙量特征

本研究发现,电站内观测点均表现为:电板前沿>电板后沿>阵列间中线,这与贾瑞庭等^[17]在库布齐沙漠的研究结论相似,可能是因为观测期间电板后沿为进风口,电板前沿为出风口,气流经过电板后沿遇阻减速,电板前沿至地表集流加速流出,风速明显增加,引起了地表沙粒起动^[1],输沙量增加。流动沙丘(上风向)与电板前沿的风沙流结构特征值 $\lambda < 1$,表明沙粒在搬运过程中向近地面贴紧,下层沙量增大很快,呈现饱和状态;而下风向、电板后沿和阵列间的风沙流结构特征值 $\lambda > 1$,表明电板后沿处近地层流场出现扰动,使得上层气流挟沙能力增强,风沙流呈现非饱和状态,这与陈曦等^[13]在乌兰布和沙漠研究结果不同,这可能是因为电板前沿与电板后沿高度不同,对近地表风沙流结构影响表现出差异。

综上所述,气流进入光伏电站后,受光伏阵列的阻挡,风速不断地削弱,风速流场格局发生明显变化,风速脉动和湍流度变化明显,并且光伏阵列的存在改变了风沙流运动,引起了输沙量降低,表明光伏阵列可以有效地防风固沙。本研究基于野外试验观测数据,探索了沙漠地区光伏电站内的风速流场和输沙变化特征,因为本研究区全年主要风向为西北风,在观测计划实施期间,整个观测期间气象站观测的风向也主要为西北风,因此缺少了观测东北风的影响,未来还需完善补充观测内容,进一步开展风速流场数值模拟和下垫面耦合互馈机制的研究,从而深入探索光伏阵列对区域气流场与输沙环境的影响。

5 结论

(1) 光伏电站内的平均风速与流动沙丘(上风向)相比降低了 82.07%, 光伏阵列具有明显减弱风速的作用, 阵列间行道与光伏电板后沿平均风速随高度上升呈现出增加趋势, 光伏电板前沿平均风速随高度上升表现出先降低后增加的趋势。

(2) 草方格观测断面、风蚀坑观测断面和砾石观测断面的风速流场格局存在差异。草方格观测断面, 电板前沿出风口处的风速明显增加, 电板后沿进风口和阵列间中线 100 cm 以下部分的风速降低; 风蚀坑观测断面, 光伏电板 150 cm 以下部分风速降低, 阵列间行道风速上升相对加速率增加, 风速脉动变化明显; 砾石观测断面, 风速相对变化率与风速流场格局稳定变化较小, 电板后沿 150 cm 以上部分风速增加。光伏电板防风效果在 33%~66%, 平均防风效果排序为: 砾石>草方格。

(3) 不同位置输沙量大小关系为: 流动沙丘参照点(上风向)>流动沙丘参照点(下风向)>电板前沿>电板后沿>阵列间中线。输沙量随高度上升而增加, 最大值均出现在 0~2 cm。流动沙丘参照点(上风向)与电板前沿风沙流结构特征呈现饱和状态, 流动沙丘参照点(下风向)、电板后沿和阵列间中线风沙流结构特征呈现非饱和状态。

(4) 光伏电站总体上明显减少风沙输移, 具有较好的防风固沙效益; 根据观测结果建议: 在电站内腹地增加草方格铺设面积, 上风向边缘区铺设砾石增加地表粗糙度, 降低风速, 站内风蚀坑深度达到 20—30 cm 时应引起重视, 需及时填埋维护, 并建议采用草方格措施进行防护。

参考文献 (References)

[1] 崔荣国, 郭娟, 程立海, 等. 全球清洁能源发展现状与趋势分析[J]. 地球学报, 2021, 42(2): 179-186.
Cui Rongguo, Guo Juan, Cheng Lihai, et al. Status and trends analysis of global clean energies [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2): 179-186.

[2] 司建华, 冯起, 席海洋, 等. 关于新时期中国西部发展沙产业的思考[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 1-6.
Si Jianhua, Feng Qi, Xi Haiyang, et al. Thoughts on the development of sand industry in the new period in Western China [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(1): 1-6.

[3] 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(3): 554-561.
Wen Xiaohang, Shang Kezheng, Wang Shigong, et al. Primary study on regional characteristics of solar radia-

tion in China during 1961—2000 [J]. *Journal of Desert Research*, 2008(3): 554-561.

[4] 郭彩贇, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠 110 MW 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.
Guo Caiyun, Han Zhiwen, Li Aimin, et al. Dynamic mechanism research on the secondary blown sand disaster in the 110 MW photovoltaic arrays of the Hobq Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(2): 225-232.

[5] 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 (Earth Surface)*, 2008, 113(F2): F02S04.

[6] 蒋俊霞, 高晓清. 光伏系统气候效应及影响机理研究进展[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 953-962.
Jiang Junxia, Gao Xiaqing. Research progress on climate effect and influence mechanism of photovoltaic systems [J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(4): 953-962.

[7] Sun Liping, Peijian Zhou. Solar energy resources in desertification regions of China and development suggestions [J]. *Environment, Resource and Ecology Journal*, 2022, 6(4): 94-98.

[8] Yuan Bo, Wu Wei, Yue Shengjuan, et al. Multi-scale impact of large-scale photovoltaic power station construction on wind field in the desert area [C]// International Conference on Sustainable Technology and Management (ICSTM 2022). July 22242022. Macao, China. SPIE, 2022: 35-40.

[9] 杨若婷, 牛清河, 屈建军, 等. 青海共和盆地固定支架式光伏阵列对阵内风场的影响[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 114-121.
Yang Ruoting, Niu Qinghe, Qu Jianjun, et al. Influence of fixed-stand photovoltaic array on wind field in Gonghe basin, Qinghai, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(5): 114-121.

[10] Wang Chun, Hill R L, Bu Chongfeng, et al. Evaluation of wind erosion control practices at a photovoltaic power station within a sandy area of northwest, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(4): 1854-1872.

[11] 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.
Yuan Fang, Zhang Zhenshi, Bu Chongfeng, et al. Wind speed flow field and wind erosion control measures at photovoltaic power plant project area in Mu Us sandy land [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(2): 287-294.

[12] Chang Zhaofeng, Liu Shizen, Fu Jing, et al. Effect of

- desert photovoltaic on sand prevention and control: Taking Gansu Gulang Zhenfa photovoltaic DC field as an example [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020,601(1):012032.
- [13] 陈曦,高永,翟波,等.沙区光伏电站的风沙流输移特征[J].干旱区研究,2019,36(3):684-690.
Chen Xi, Gao Yong, Zhai Bo, et al. Transport of wind-drift sand in photovoltaic electric field in sand area [J]. Arid Zone Research, 2019,36(3):684-690.
- [14] Tang Guodong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Impact of utility-scale solar photovoltaic array on the aeolian sediment transport in Hobq Desert, China [J]. Journal of Arid Land, 2021,13(3):274-289.
- [15] 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.
Tang Guodong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Near-surface sand-dust flux under the interference of photovoltaic facilities in sandy areas [J]. Arid Zone Research, 2020,37(3):739-748.
- [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.
Yang Shirong, Ling Xia, Meng Zhongju, et al. Wind speed fluctuation at Kubuqi Desert ecological photovoltaic power station [J]. Arid Zone Research, 2019,36(5):1309-1317.
- [17] 贾瑞庭,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠 200 MW_p 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.
Jia Ruiting, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Study on the Intercepting and Blocking Sand Effect of 200MW_p photovoltaic Array in Kubuqi Desert [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(4):137-144.
- [18] 王雪芹,杨东亮,马洋,等.沙漠—绿洲过渡带典型下垫面风速脉动特征:以塔克拉玛干沙漠南缘策勒绿洲为例[J].中国沙漠,2015,35(3):542-548.
Wang Xueqin, Yang Dongliang, Ma Yang, et al. Wind fluctuation over three typical ground surfaces in desert-oasis ecotone: A case at the southern rim of the Taklimakan Desert [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3):542-548.
- [19] 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.
Tang Guodong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Interference effect of solar photovoltaic array on near surface aeolian sand transport in sandy areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(13):101-110.
- [20] 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.
Yang Min, Liu Rentao, Zeng Feiyue, et al. Distribution of ground-active arthropod community diversity during the succession of artificial sand-fixing vegetation in the southeastern Tengger Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):428-439.
- [21] 赵晨光,李慧瑛,鱼腾飞,等.腾格里沙漠东北缘人工植被对土壤物理性质的影响[J].干旱区研究,2022,39(4):1112-1121.
Zhao Chenguang, Li Huiying, Yu Tengfei, et al. Effects of artificial vegetation construction on soil physical properties in the northeastern edge of Tengger Desert [J]. Arid Zone Research, 2022,39(4):1112-1121.
- [22] 徐国风,张振师,李玉进,等.西北地区生态光伏产业现状[J].西北水电,2020(S1):4-7.
Xu Guofeng, Zhang Zhenshi, Li Yujin, et al. Current status of the ecological photovoltaic industry in Northwest China [J]. Northwest Hydropower, 2020(S1):4-7.
- [23] 房名名,何耐江.中卫市光伏产业园:在沙漠里奏响绿洲变奏曲[J].一带一路报道(中英文),2022(3):48-54.
Fang Mingming, He Naijiang. Zhongwei desert photovoltaic industrial park: The way to turn the desert into an oasis [J]. The Belt and Road Reports, 2022(3):48-54.
- [24] Jackson P S, Hunt J C R. Turbulent wind flow over a low hill [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975,101(430):929-955.
- [25] 朱泊年,党晓宏,蒙仲举,等.乌珠穆沁沙地生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障防风固沙效益[J].水土保持研究,2023,30(2):431-437.
Zhu Bonian, Dang Xiaohong, Meng Zhongju, et al. Effects of biodegradable poly lactic acid (PLA) sand barrier on wind prevention and sand fixation in Urumqi sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):431-437.
- [26] 张正偲,潘凯佳,张焱,等.中国西北戈壁区沙尘暴过程中近地层风沙运动特征[J].中国沙漠,2023,43(2):130-138.
Zhang Zhengcai, Pan Kaijia, Zhang Yan, et al. Sand transport characteristics above gobi surface during a dust storm in Northern China [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(2):130-138.
- [27] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:61-71.
Wu Zheng. Sand Geomorphology and Sand Control Engineering [M]. Beijing Science Publishing House, 2003:61-71.

- barren soil of newly added farmland in land consolidation [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2010.
- [7] 刘景辉,刘克礼.春玉米需氮规律的研究[J].内蒙古农牧学院学报,1994,15(3):12-18.
Liu Jinghui, Liu Keli. Study on the nitrogen requirements of spring corn [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural and Animal Husbandry College, 1994, 15(3):12-18.
- [8] 方舰.生物炭对土壤环境的影响及安全性评价[D].天津:天津理工大学,2020.
Fang Jian. Impact and safety evaluation of biochar on soil environment [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.
- [9] 韩利,梅强,陆玉梅,等.AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J].中国安全科学学报,2004,14(7):86-89.
Han Li, Mei Qiang, Lu Yumei, et al. Analysis and study on AHP-fuzzy comprehensive evaluation [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7):86-89.
- [10] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].应用生态学报,2016,27(5):1445-1452.
Tang Bingzhe, He Binghui, Yan Jianmei. Gray correlation analysis of the impact of land use type on soil physical and chemical properties in the hilly area of central Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5):1445-1452.
- [11] 李杉,马鑫文,吴勇,等.川中丘陵区农村生活污水资源化利用后的土壤养分特征[J].水土保持通报,2022,42(6):114-120.
Li Shan, Ma Xinwen, Wu Yong, et al. Soil nutrient characteristics after rural domestic sewage resource utilization in hilly areas of central Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 114-120.
- [12] 李越,徐曼,谢永红,等.不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响[J].环境科学,2024,45(2):974-982.
Li Yue, Xu Man, Xie Yonghong, et al. Effects of different modifiers on aggregates and organic carbon in acidic purple soil [J]. Environmental Science, 2024, 45(2):974-982.
- [13] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74.
Fu Tao, Ni Jiupa, Wei Chaofu, et al. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2003, 9(1):71-74.
- [14] 牛文全,郭超.根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J].应用生态学报,2010,21(11):2785-2791.
Niu Wenquan, Guo Chao. Effects of rhizosphere soil permeability on water and nutrient uptake by maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11):2785-2791.
- [28] Xiao Jianhua, Ye Dongting, Xie Xiaosong, 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.
- [29] 毛东雷,蔡富艳,杨余辉,等.新疆策勒4个典型下垫面近地层风速脉动特征[J].干旱区研究,2017,34(1):126-135.
Mao Donglei, Cai Fuyan, Yang Yuhui, et al. Wind speed fluctuation near ground surface over four typical underlying surfaces in Qira, Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1):126-135.
- [30] 包慧娟,李振山.风沙流中风速纵向脉动的实验研究[J].中国沙漠,2004,(2):132-135.
Bao Huijuan, Li Zhenshan. Longitudinal intensity of airflow turbulence with sand grain saltation in a wind tunnel [J]. Journal of Desert Research, 2004, (2): 132-135.
- [31] 叶天歌,高晓清,李振朝.湖泊光伏电站湍流特征及稳定度的对比分析[J].高原气象,2022,41(4):1006-1016.
Ye Tiange, Gao Xiaoqing, Li Zhenchao. Comparative analysis of turbulence characteristics and stability of lake photovoltaic power plant [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4):1006-1016.

(上接第 65 页)