

毛乌素沙地大型光伏电站对近地表微气象的影响

——以陕西省靖边县伊当湾光伏电站为例

李梦超¹, 屈建军^{1,2}, 谭立海³, 王靖淇¹, 王彦希¹

[1.西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2.南方海洋科学与工程
广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 3.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000]

摘要: [目的] 揭示光伏电站内外近地表微气象特征的差异, 评估毛乌素沙地大型光伏电站布设对近地表微气象的影响, 为光伏电站风沙防治和生态修复提供科学依据。[方法] 利用自动气象站的观测数据, 通过对比对照点和站内各观测点得到微气象要素(风速、风向、气温、相对湿度、辐射)评估毛乌素沙地大型光伏电站的布设对近地表微气象的影响。[结果] ①相比对照区域, 两种光伏阵列在2 m高度处的风向均发生显著变化, 呈现出更为单一的特征。②光伏阵列区域的气温有所降低, 固定可调光伏板间和板下的最大降温分别为0.92℃和0.97℃, 而平单轴光伏板间和板下的最大降温分别为2.24℃和2.46℃。③光伏阵列区域的空气相对湿度有所增加, 固定可调光伏区域的最大增幅出现在12月, 板间和板下分别增加了3.77%和2.31%; 平单轴光伏区域在3月份增幅最大, 板间和板下分别增加了15.86%和15.44%。④光伏阵列对辐射的影响主要体现在光伏板下区域, 其中固定可调光伏板下和平单轴光伏板下的太阳辐射量最大分别减少了91.30%和88.27%, 光合有效辐射量最大分别减少了91.06%和82.29%。[结论] 大型光伏电站具有改变风向, 降低气温, 增加相对湿度以及减少地表太阳辐射量和光合有效辐射量的作用。其中, 平单轴光伏阵列在“降温增湿”方面的效果优于固定可调光伏阵列。

关键词: 光伏电站; 空气温度; 太阳辐射; 光合有效辐射; 毛乌素沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0211-12

中图分类号: P426.1⁺3

文献参数: 李梦超, 屈建军, 谭立海, 等. 毛乌素沙地大型光伏电站对近地表微气象的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 211-222. Li Mengchao, Qu Jianjun, Tan Lihai, et al. Effects of large-scale photovoltaic power stations on near-surface microclimate in Mu Us sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 211-222. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.022; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.022.

Effects of large-scale photovoltaic power stations on near-surface microclimate in Mu Us sandy land

—A case study of Yidangwan photovoltaic power station at Jingbian County, Shaanxi Province

Li Mengchao¹, Qu Jianjun^{1,2}, Tan Lihai³, Wang Jingqi¹, Wang Yanxi¹

[1.College of Urban and Environmental Science, Northwestern University, Xi'an, Shaanxi 710127, China; 2.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, Guangdong 511458, China; 3.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China]

Abstract: [Objective] The differences in near-surface micrometeorological characteristics inside and outside photovoltaic (PV) power plants were revealed, and the impact of large-scale PV power plant deployment on near-surface microclimate in Mu Us sandy land was evaluated, in order to provide a scientific basis for wind-sand control and ecological restoration in PV power plants. [Methods] Observational data were gathered from automatic weather stations to assess how the layout of photovoltaic power stations in the Mu Us sand land affects the near-surface microclimate. Microclimate elements (wind speed, wind direction, air temperature, relative humidity, and radiation) were compared between control points and various

收稿日期: 2024-11-29

修回日期: 2024-12-23

采用日期: 2024-12-24

资助项目: 华能集团总部科技项目“干旱半干旱地区光伏电站对生态环境的影响机制及生态恢复技术研究及应用”(HNKJ21-H76)

第一作者: 李梦超(2000—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为光伏电站的环境效益分析。Email: lmc51777@163.com。

通信作者: 屈建军(1959—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 研究员, 主要从事风沙防治工程、沙漠环境方面的研究。Email: qujianj@lzb.ac.cn。

observation points within the station. [Results] ① Compared to the control area, both types of photovoltaic arrays exhibited significant changes in wind direction at a height of 2 m, presenting a more monotonous pattern. ② The temperature within the photovoltaic array areas was reduced. The maximum temperature decreases recorded between and beneath the fixed adjustable photovoltaic panels were 0.92 °C and 0.97 °C, respectively. In comparison, the horizontal, single-axis photovoltaic panels showed maximum temperature reductions of 2.24 °C and 2.46 °C between and beneath the panels, respectively. ③ The relative humidity of the air in the photovoltaic array area increased, with the greatest increments occurring in the fixed adjustable photovoltaic area in December, where the inter-panel and under-panel areas increased by 3.77% and 2.31%, respectively. The horizontal, single-axis photovoltaic area experienced the largest increase in March, with inter- and under-panel areas rising by 15.86% and 15.44%, respectively. ④ The impact of the photovoltaic arrays on radiation was predominantly observed beneath the panels, with maximum reductions in solar radiation beneath the fixed adjustable and horizontal, single-axis photovoltaic panels of 91.30% and 88.27%, respectively, and maximum reductions in photosynthetically active radiation of 91.06% and 82.29%, respectively. [Conclusion] The deployment of large-scale photovoltaic power stations can alter wind direction, reduce air temperature, increase relative humidity, and decrease surface solar radiation and photosynthetically active radiation. Notably, the horizontal, single-axis photovoltaic array outperformed the fixed adjustable photovoltaic array in terms of its capacity to lower temperature and increase humidity.

Keywords: photovoltaic (PV) power station; air temperature; solar radiation; photosynthetically active radiation; Mu Us sandy land

随着能源行业的持续发展,能源环境问题日益凸显^[1]。为了实现可持续发展,人们逐步将能源消费从传统化石能源转向可再生能源。光伏发电技术因其便捷、清洁和安全的特性,近年来得到了快速发展^[2-4],截至 2022 年底,全球光伏装机容量已达 1 053.115 GW,其中中国内地装机量为 393.127 GW。中国《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》中也提出,要加快在沙漠、戈壁、荒漠地区的大型风电和光伏基地的建设。然而,光伏电站多建在太阳能资源丰富但生态脆弱的干旱半干旱地区,大型光伏电站建设对区域生态环境的影响已成为一个亟待解决的科学问题^[5]。国外,D. Turney 等^[6]对美国光伏电站的环境影响进行了全面评估,结果表明光伏电站对环境的不利影响通常有限,且可以通过适当措施显著降低。继此研究之后,V. Fthenakis^[7]通过分析北美大型光伏电站的模拟和实测数据发现光伏场区内的空气温度在一定高度内高于周边环境。D. Ravikumar^[8]首次对大型光伏电站对下风向的颗粒物浓度的影响进行了量化研究,结果表明光伏电站能有效减少下风向颗粒物的浓度。国内,杨丽薇等^[9]探讨了格尔木荒漠地区光伏电站对微气象的影响,发现光伏电站会显著改变区域的辐射平衡。殷代英等^[10]对共和盆地荒漠区光伏电站微气候效应的分析表明,光伏电站具有降温增湿的效应。杨世荣^[11]对比分析了库布齐沙漠光伏电站建设对风沙运动和蚀积特征的影响,发现光伏

电站的建设也会影响近地表的风速风向。此外,还有一些学者^[12-15]研究了光伏电站建设对局地土壤环境和植被的影响,进一步丰富了该领域的研究成果。

然而,针对毛乌素沙地的光伏阵列板间及板下的同步对比观测,以及不同光伏阵列类型对微气象影响的研究尚不完善。光伏板采光方式的不同导致其对局地微气象的影响存在差异,探究不同类型光伏阵列对微气象的影响对电站光伏板的选型及场区生态环境的保护与修复具有重要意义。本文以位于陕西省靖边县的华能东坑伊当湾 100 MW 光伏电站(简称“伊当湾光伏电站”)为例,对固定可调光伏阵列和平单轴光伏阵列的近地表微气象效应进行分析,旨在评估毛乌素沙地大型光伏电站对近地表微气象的影响,为光伏电站风沙防治和生态修复提供理论依据。

1 研究区概况

靖边县隶属于陕西省榆林市,位于陕西省北部,榆林市西南部,毛乌素沙漠南缘,跨古长城南北,居陕、蒙两省交界地带。地理坐标为 108° 17′—109° 20′ E, 36° 58′—38° 03′ N,总面积 5 088 km²,海拔高度介于 1 123~1 823 m 之间^[13],地势南高北低。靖边县属半干旱大陆性季风气候,光照充足,多年平均气温为 8.7 °C,降水量为 395.4 mm,相对湿度为 52%,平均风速为 2.4 m/s,极端最高温度为 36.4 °C,极端最低

温度为 $-27.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均日照时长为 $2\ 768.2\text{ h}$,年总太阳辐射量为 $5\ 100\sim 5\ 600\text{ MJ/m}^2$,年平均无霜期为 130 d 。

伊当湾光伏电站位于靖边县伊当湾村的东北部,毛乌素沙地的南部边缘,用地面积 2.1 km^2 (图 1)。电站总装机容量为 115.1 MW ,其中:平单轴光伏阵列装机容量为 25.8 MW ,7 个方阵,阵列呈南北走向,板面随太阳位置变化绕南北轴转动;固定可调光伏阵列装机容量为 89.3 MW ,25 个方阵,阵列呈东西走向,板面朝南,与地面夹角固定。

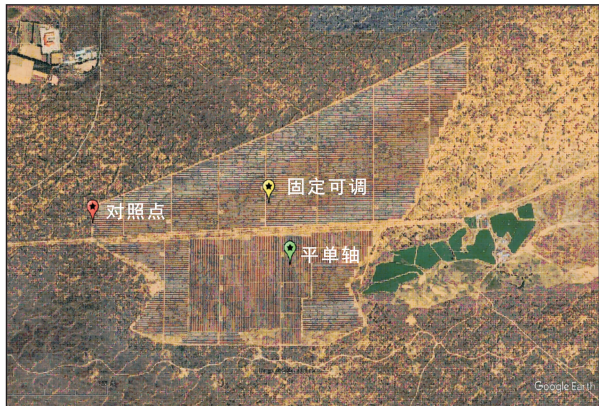


图 1 伊当湾光伏电站区域概况

Fig.1 Overview of Yidangwan PV power station

2 研究方法

微气象观测采用 HOBO U30 自动气象站,分别

在电站内部固定可调光伏区域、平单轴光伏区域及电站西北边缘设置观测点(图 1),以西北边缘的观测点作为对照点,具体位置分别为:固定可调观测点($108^{\circ}38'09''\text{ E}$, $37^{\circ}38'58''\text{ N}$,海拔高度 $1\ 341\text{ m}$),平单轴观测点($108^{\circ}38'13''\text{ E}$, $37^{\circ}38'48''\text{ N}$,海拔高度 $1\ 338\text{ m}$),对照点($108^{\circ}37'25''\text{ E}$, $37^{\circ}38'55''\text{ N}$,海拔高度 $1\ 346\text{ m}$),其中固定可调和平单轴观测点分别有两套气象站对光伏板间和板下的微气象因子进行监测(图 2)。对照点和光伏板间观测点的风速风向、空气温度、相对湿度、太阳辐射量和光合有效辐射量的观测高度分别为: $2.0, 1.5, 1.8, 1.8$ 和 1.8 m ;光伏板下观测点的风速风向的观测高度为 1.0 m ,其余参数的观测高度为 0.8 m 。其中,风速传感器量程为 $0\sim 76\text{ m/s}$,精度为 $\pm 1.1\text{ m/s}$;风向传感器量程为 $0^{\circ}\sim 355^{\circ}$,精度为 $\pm 5^{\circ}$;空气温湿度传感器量程:温度为 $-40\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度为 $0\%\sim 100\%$,精度为 $\pm 2.5\%$;太阳辐射传感器量程为 $0\sim 1\ 280\text{ W/m}^2$,波长为 $300\sim 1\ 100\text{ nm}$,精度为 $\pm 10\text{ W/m}^2$;光合有效辐射传感器量程为 $0\sim 2\ 500\text{ }\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$,波长为 $400\sim 700\text{ nm}$,精度为 $\pm 5\text{ }\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 。测定频率为 10 min , 24 h 不间断测定。为了减少仪器系统误差对试验结果的影响,所有仪器均在实地观测前进行了室内调试。

本文所用的资料为 2022 年 9 月至 2024 年 8 月的微气象因子观测资料,数据均经过数据质量控制,未发现缺测及异常数据。

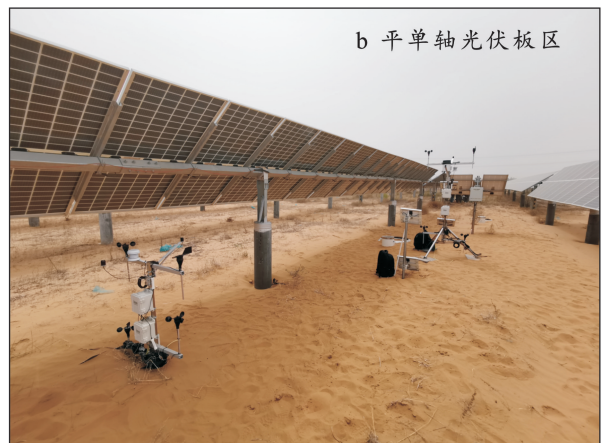


图 2 伊当湾光伏电站固定可调(a)和平单轴(b)光伏板区 HOBO 气象站

Fig.2 HOBOWeather station in fixed adjustable (a) and uniaxial (b) photovoltaic panel area of Yidangwan photovoltaic power station

3 结果与分析

3.1 光伏电站对风向、风速的影响

图 3 显示对照区域、固定可调光伏板间和平单轴光伏板间 2 m 高度处的风速和风向变化。分析表明,

光伏阵列的安装导致局地风向发生显著变化,呈现出单一化的趋势。与对照区域风向多变相比,固定可调光伏板间区域以西北和东南风为主,而平单轴光伏板间区域则以西南、北、东北和南风为主。图 4 显示光伏板下 1 m 高度处的风速和风向的变化情况,可以看

出,光伏板下区域的风向也同样显示出趋向单一的趋势。

综上所述可以初步得出结论:两种类型的光伏阵列均表现出使风向趋于单一的趋势,这与殷代英等^[10]的研究结论较为一致。值得注意的是,固定可

调光伏阵列区域的风向变化比平单轴光伏阵列区域更为显著。这一差异源于固定可调光伏阵列的板面与地面夹角保持固定,而平单轴光伏阵列的板面在白天会随太阳位置变化绕南北轴转动,这在一定程度上减弱了其风向的影响。

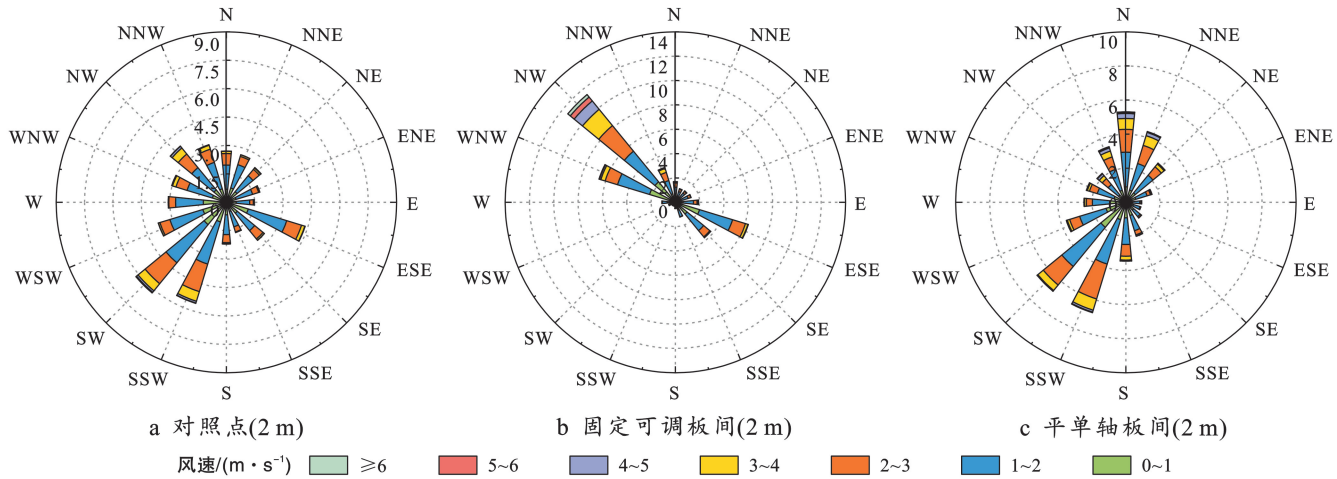


图 3 202209—202408 期间对照点和光伏板间 2 m 高度风的玫瑰图

Fig.3 Wind rose diagram at 2 m height between reference point and photovoltaic panels during 202209—202408

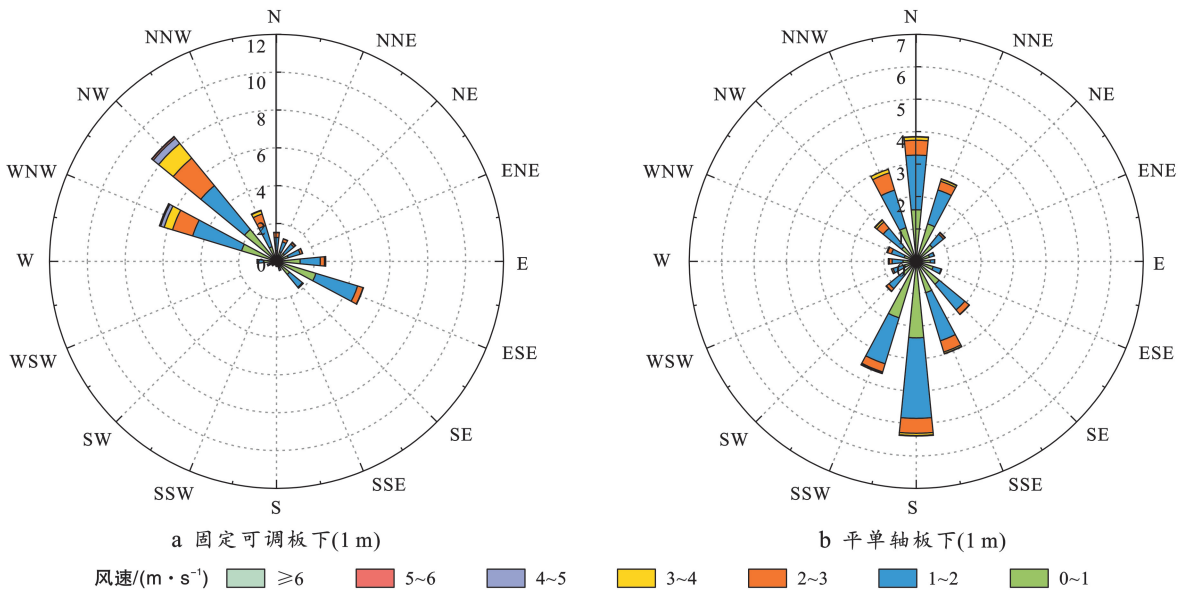


图 4 202209—202408 期间固定可调光伏板下和平单轴光伏板下 1 m 高度风的玫瑰图

Fig.4 Wind rose diagram at 1 m height under fixed adjustable photovoltaic panels and flat single-axis photovoltaic panels during 202209—202408

为了评估光伏阵列对风速的影响,本研究选取了对照区域最大阵风风速大于 6 m/s 的大风天气过程, 2 m 高度处风速变化如表 1 所示。研究发现,固定可调光伏阵列对南风产生了减速效应,平均风速较对照区域降低了 0.09~3.34 m/s,而对东风和西风则起到了加速作用,导致平均风速增加了 0.21~2.29 m/s。而平单轴光伏阵列对南风 and 北风产生了加速效应,平

均风速较对照区域增加了 0.85~1.48 m/s,但其对东风和西风的影响尚不确定。这种不同的风速效应与光伏阵列的布局和朝向密切相关。固定可调光伏阵列的轴为东西走向,板面朝南,因此对南向风形成阻挡,而东向和西向来风则会被分割向板间汇聚,从而增加风速。相比之下,平单轴光伏阵列轴向为南北向,其光伏板会随着太阳位置的变化沿南北向轴线转

动,故其对平行轴向的南向和北向风起加速作用,对东向和西向风的影响并不统一。综合以上分析可以

得出,毛乌素沙地大型光伏电站的建设对近地表的风向和风速均有显著的影响。

表 1 202209—202408 期间不同风向大风天气 2 m 高度处风速变化

Table 1 Wind speed variation at 2 m height during windy weather with different wind directions from 202209 to 202408

风向	时段	持续时间/h	对照点		固定可调板间		平单轴板间	
			平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大阵风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大阵风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大阵风速/ ($m \cdot s^{-1}$)
S	20230401	6.5	3.99	13.09	2.05	7.55	4.84	11.58
SSW	20230419	10.0	3.69	12.58	1.05	6.04	3.57	10.07
SSE	20230220	13.0	2.15	7.05	2.17	6.04	0.99	6.04
SE	20220913	6.5	2.63	8.05	2.54	8.05	2.22	8.56
SW	20230401	5.5	4.47	12.58	1.13	5.54	3.76	10.57
WSW	20230501	5.0	4.38	12.08	2.89	8.56	4.86	12.58
W	20221214	6.0	2.74	8.56	3.81	10.07	2.53	7.55
WNW	20221212	7.5	3.11	9.56	5.40	11.07	2.90	9.56
WNW	20231126	7.5	3.59	11.58	5.52	12.58	3.43	12.58
NNW	20230428	8.0	3.73	13.09	5.81	15.10	6.12	14.59
NNW	20240419	6.5	2.82	9.56	4.28	11.07	4.01	11.07
ENE	20230520	11.5	2.79	8.56	3.00	8.56	2.73	9.06
ESE	20231004	5.5	2.11	6.54	2.38	7.55	1.15	7.05
N	20230113	6.0	2.39	8.05	2.68	8.05	3.87	9.06

3.2 光伏电站对空气温度的影响

为探究光伏阵列对局地气温影响的季节性变化,本研究对不同季节的观测数据进行了比较,分析了光伏电站内外气温的日平均变化及其差值。由图 5 和图 6 可见,除了春季期间光伏阵列区域的气温高于对

照区域外,在夏季、秋季和冬季,光伏阵列区域的气温均低于对照区域。特别是在冬季,气温差异较为明显,固定可调光伏阵列板间和板下的气温相比对照区域分别降低了 1.55 °C 和 1.10 °C,而平单轴光伏阵列板间和板下气温的降幅分别为 3.03 °C 和 3.15 °C。

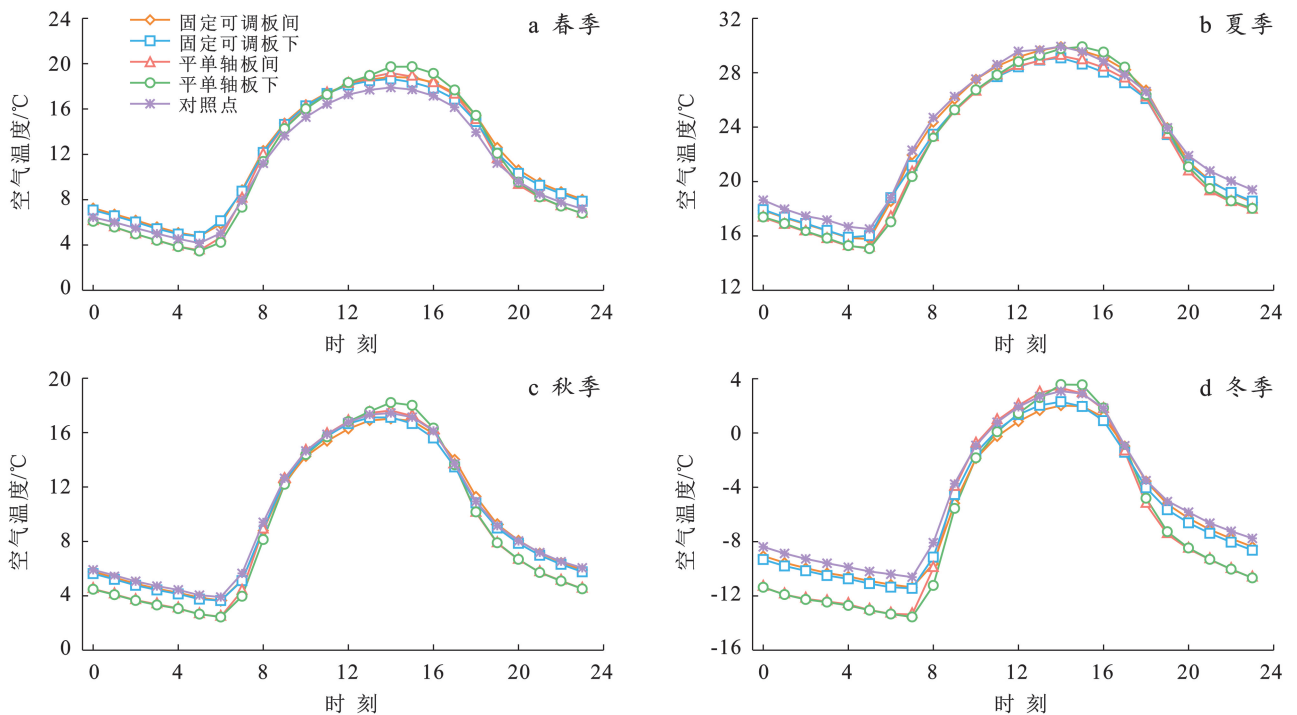


图 5 不同季节光伏电站内外各观测点气温日平均值变化

Fig.5 Daily average air temperature variation at different observation points inside and outside photovoltaic power station in different seasons

图 7 展示了光伏电站内外各观测点气温的月际变化情况。结果显示,光伏电站内部的光伏区域的气温普遍低于对照区域,尤其在 1 月这一现象较为明显。具体到不同类型的光伏阵列,与对照区域相比,固定可调光伏阵列的板间和板下的气温分别降低了 $0.88\sim 0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.93\sim 0.97\text{ }^{\circ}\text{C}$,而平单轴光伏阵列板

间和板下的气温降幅分别为 $2.21\sim 2.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.38\sim 2.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,通过对图 6 和图 7 的分析可以看出,平单轴光伏阵列相较于固定可调光伏阵列展现出较强的降温效果。综上分析,可以初步得出结论,光伏阵列的布置具有降低局地气温的作用,其中平单轴光伏阵列在降温效果上优于固定可调光伏阵列。

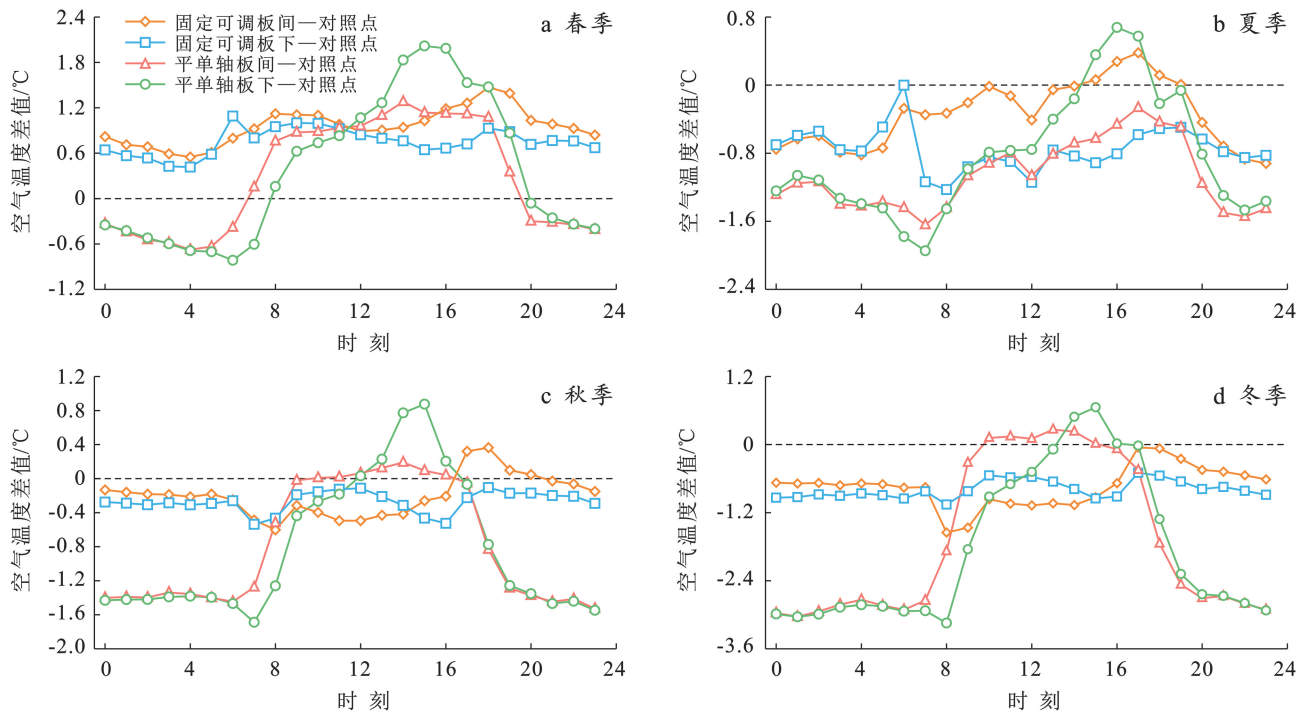


图 6 不同季节光伏电站内各观测点与对照点气温差值日平均变化

Fig.6 Daily average variation of air temperature difference between various observation points in photovoltaic power station and reference point in different seasons

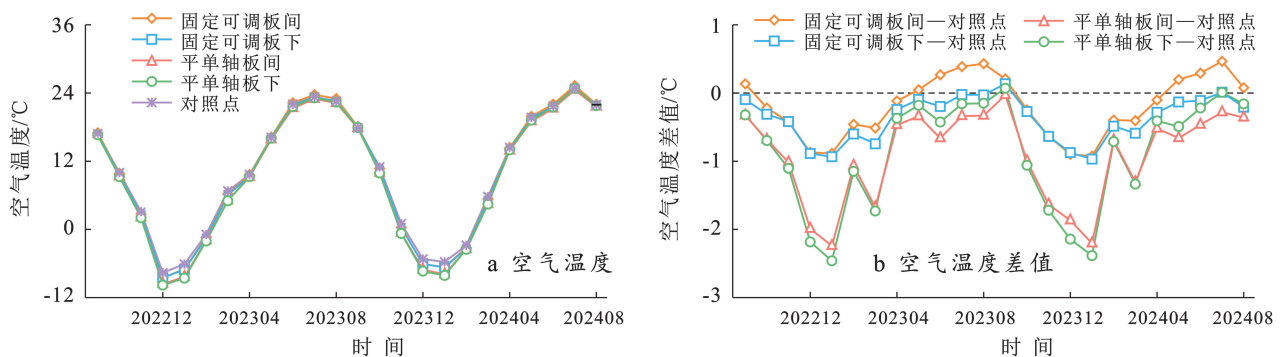


图 7 202209—202408 期间光伏电站内外各观测点气温月际变化

Fig.7 Monthly variation of air temperature at different observation points inside and outside photovoltaic power station during 202209—202408

3.3 光伏电站对空气相对湿度的影响

图 8 和图 9 展示了光伏电站内外空气相对湿度的日平均变化及其差异。结果显示,除夏季白天以及日落前后的特定时段外,站内光伏区域相对湿度均高于对照区域。特别是在日出前后,与对照区域的相对湿度差异最大时,固定可调光伏阵列板间的相对湿度

从 67.16% 上升至 71.86% ,板下相对湿度从 67.16% 提升到 72.77% ;而平单轴光伏阵列的板间相对湿度则由 67.16% 增长至 74.51% ,板下相对湿度上升至 78.97% 。从分析结果可以看出,平单轴光伏阵列的增湿效果优于固定可调光伏阵列,而同一光伏阵列的不同位置(板间和板下)之间的相对湿度差异并不明显。

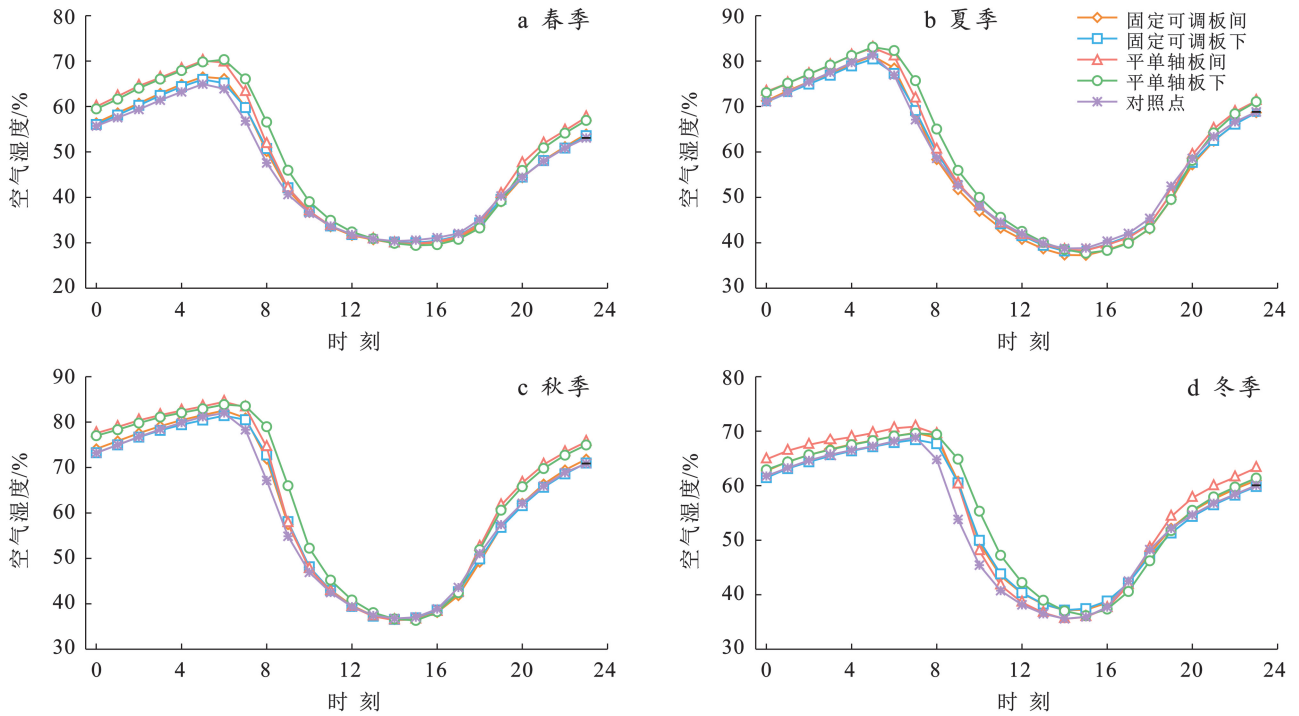


图 8 不同季节光伏电站内外各观测点空气湿度日平均值变化
 Fig.8 Daily average variation of air humidity at different observation points inside and outside photovoltaic power station in different seasons

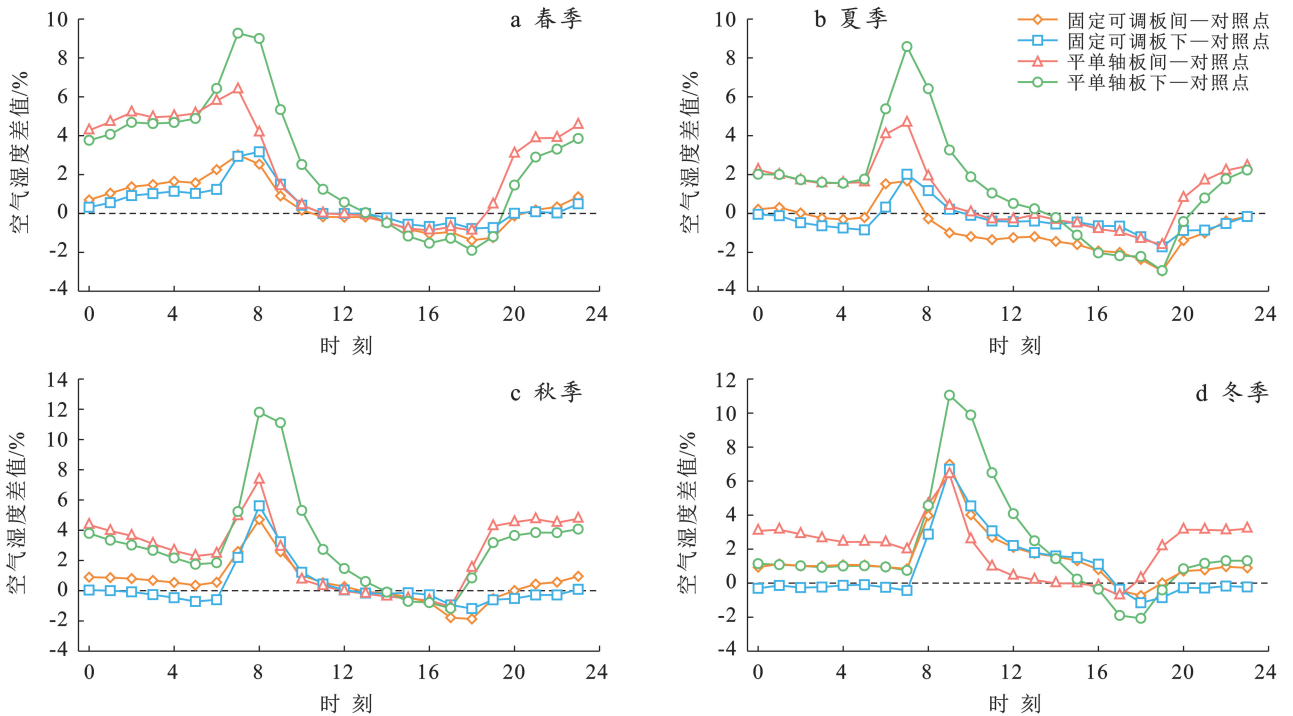


图 9 不同季节光伏电站内各观测点与对照点空气湿度差值日平均变化
 Fig.9 Daily average variation of air humidity difference between various observation points in photovoltaic power station and reference point in different seasons

图 10 展示了光伏电站内外各观测点空气相对湿度的月际变化情况。由图 10 可见,光伏阵列区域的空气湿度高于对照区域,但不同类型的光伏阵列在增湿效果上存在差异。具体表现为:固定可调光伏区域与对照区域的相对湿度差异最大发生在每年 12 月,

板间的相对湿度由 56.30% 上升至 58.42%,板下的相对湿度则从 56.30% 增长至 57.63%;而平单轴光伏区域与对照区域的相对湿度差异在每年 3 月较为显著,板间的相对湿度则由 35.49% 增加至 41.12%,板下的相对湿度则由 35.49% 上升至 40.97%。基于以上分

析结果,可以初步得出结论,光伏阵列的架设具有增加局部空气湿度的作用。光伏电站中,平单轴光伏

阵列在增湿效果上要优于固定可调光伏阵列的增湿效果。

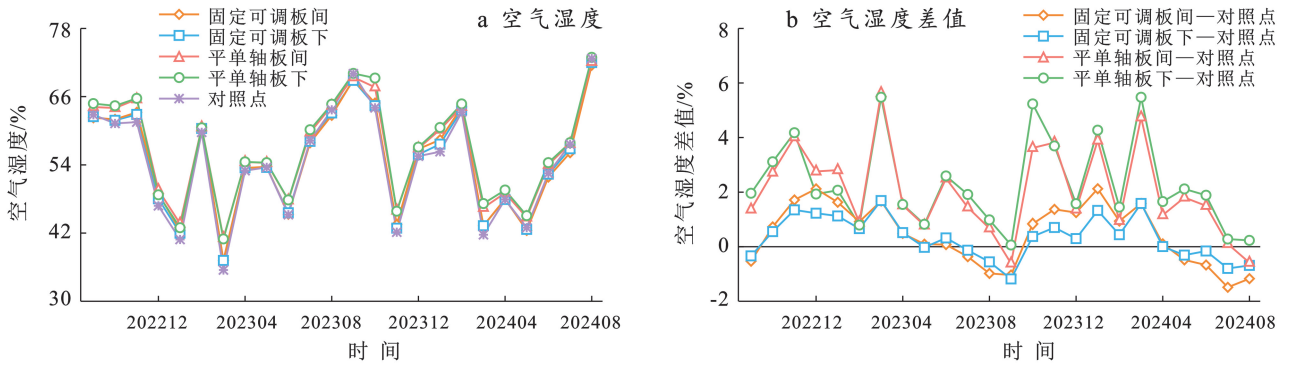


图 10 202209—202408 光伏电站内外各观测点空气湿度月际变化

Fig.10 Monthly variation of air humidity at observation points inside and outside photovoltaic power station during 202209—202408

3.4 光伏电站对辐射的影响

光伏电站的建设和运行会对周围环境中的辐射产生多方面的影响。本节将从太阳辐射(太阳总辐射)和光合有效辐射两方面进行分析,探究光伏电站对局地辐射的影响。

3.4.1 对太阳辐射的影响 图 11 和图 12 展示了光伏电站内外各观测点太阳辐射量的日平均变化及其差值。分析结果显示,与对照区域相比,光伏板间区域的太阳辐射量略有降低,而光伏板下区域的太阳辐射量在白天时段显著降低,并在中午 12 点附近达到最大降幅。对四季数据的分析表明,相对对照区域,

固定可调光伏阵列板下的太阳辐射量在春、夏、秋、冬四季的最大减少量分别为 579.04, 679.52, 488.78, 419.14 W/m^2 , 而平单轴光伏阵列板下太阳辐射量的最大减少量分别为 572.49, 657.92, 478.72, 409.93 W/m^2 。可以看出,夏季太阳辐射量减少最为显著,这主要是由于光伏板的透光率相对稳定,同时光伏电站位于北半球,夏季太阳辐射强度较高,从而导致该季节板下的太阳辐射量减少更为明显。此外,比较两种类型光伏阵列区域的太阳辐射减少量可以看出,平单轴光伏阵列区域的太阳辐射减少量略低于固定可调光伏阵列区域。

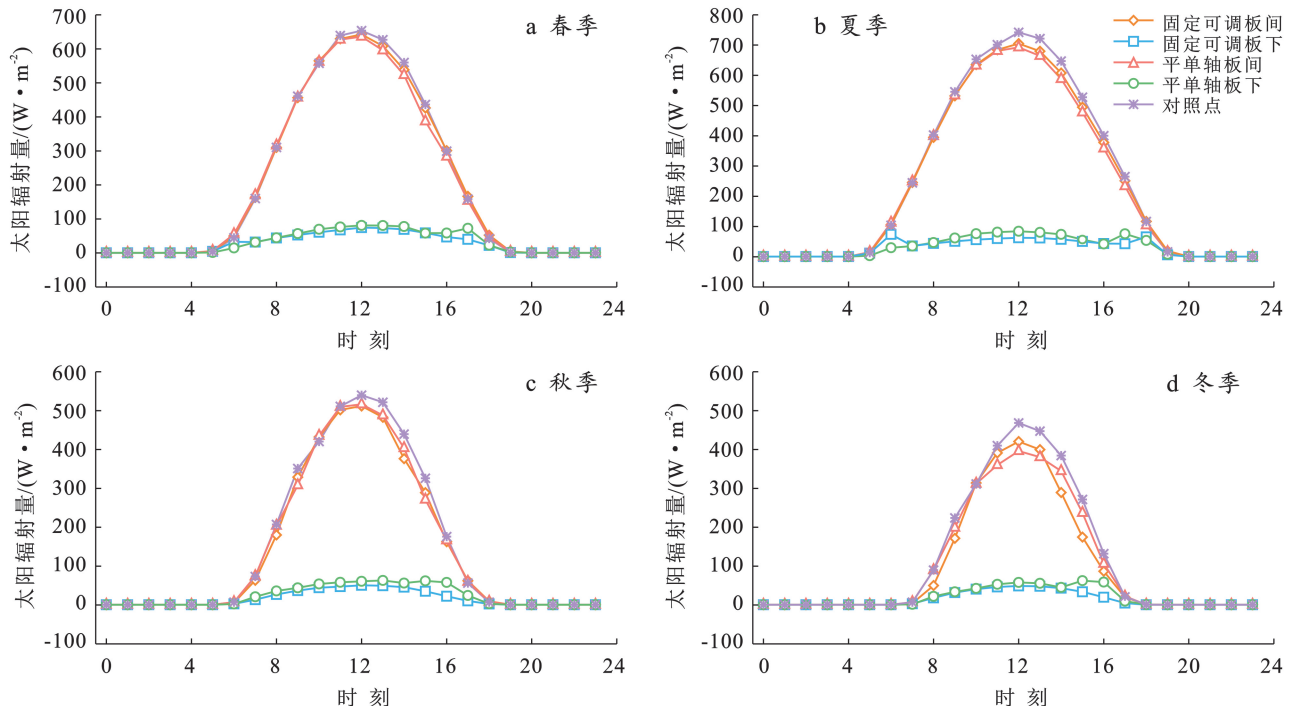


图 11 不同季节光伏电站内外各点太阳辐射量日平均值变化

Fig.11 Daily average value of solar radiation of various points inside and outside photovoltaic power station in different seasons

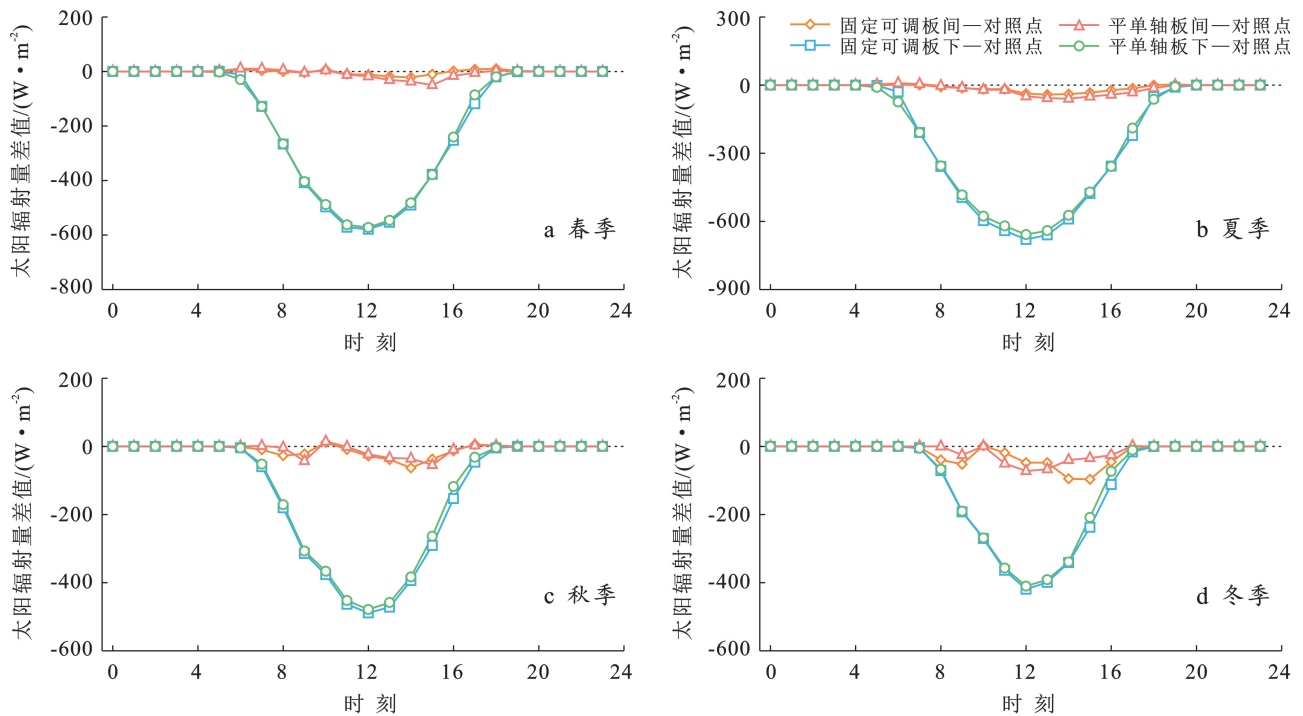


图 12 不同季节光伏电站内各点与对照点太阳辐射量差值日平均变化

Fig.12 Daily average variation of solar radiation difference between various points in photovoltaic power station and reference point in different seasons

图 13 显示了电站内外各观测点太阳辐射量的月际变化情况。由图 13 可见,两种类型光伏阵列板间的太阳辐射量与对照区域差异较小,而板下的太阳辐射量显著降低,特别在 4 月和 5 月,固定可调光伏阵列板下的太阳辐射量相对对照区域降低了 176.77~242.32 W/m²,而平单轴光伏阵列板下的太阳辐射量

的下降幅度为 172.76~241.59 W/m²。

通过上述分析可以初步得出以下结论,光伏阵列的建设对光伏板间的太阳辐射的影响较小,但显著降低了光伏板下的太阳辐射量。其中,固定可调光伏阵列对太阳辐射的减少作用略强于平单轴光伏阵列。

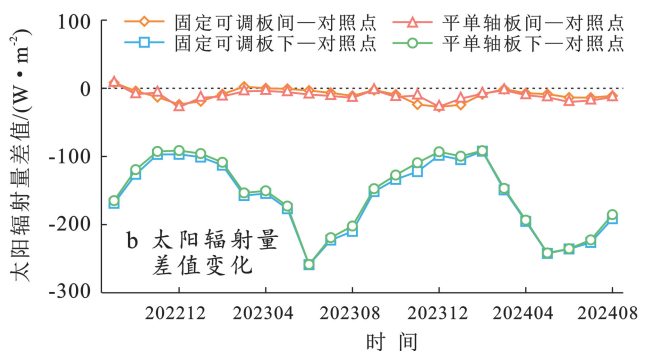
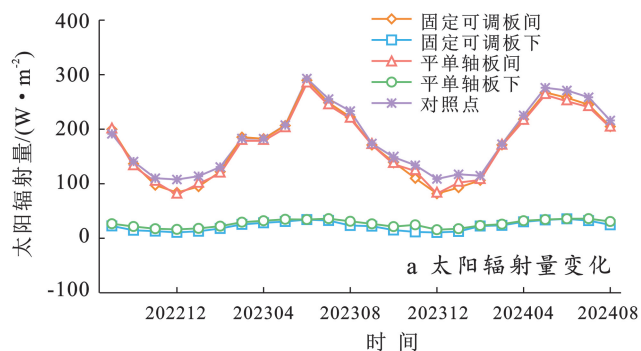


图 13 202209—202408 光伏电站内外各观测点太阳辐射量月际变化

Fig.13 Monthly variation of solar radiation at observation points inside and outside photovoltaic power station during 202209—202408

3.4.2 对光合有效辐射的影响 光合有效辐射是指波长介于 400~700 nm 的太阳辐射,对植物生长和恢复具有重要的研究意义^[16]。图 14—15 显示光伏电站内外光合有效辐射量日平均变化及其差值。结果显示,光伏板下的光合有效辐射量在白天时段显著降低,且在中午 12 点左右达到最大降幅。对于 4 个季

节的数据的分析表明,相对对照区域,固定可调光伏阵列板下和平单轴光伏阵列板下的光合有效辐射量分别减少了 1 164.24~849.10 和 1 130.36~815.53 μE,其中夏季降幅作用最为显著。此外,在 16:00 至日落前后,平单轴光伏阵列板下的光合有效辐射量和对照区域之间的差异显著减小(如图 15 所示)。这是由于平单

轴光伏阵列的板面的转动使该时段光伏板面与地面夹角增大,从而减少了遮蔽效应。值得注意的是,该时段光合有效辐射量的这一变化相较于太阳辐射量(见图 11)更为明显。这主要是由于光合有效辐射量

的单位量级($1 \mu\text{E} = 0.200 \text{ W/m}^2$)^[17]较小,同时太阳辐射和光合有效辐射均由直接辐射与散射辐射组成,光伏板的遮蔽作用对散射辐射的影响相对较小,而光合有效辐射中散射辐射的比例相对较高^[18]。

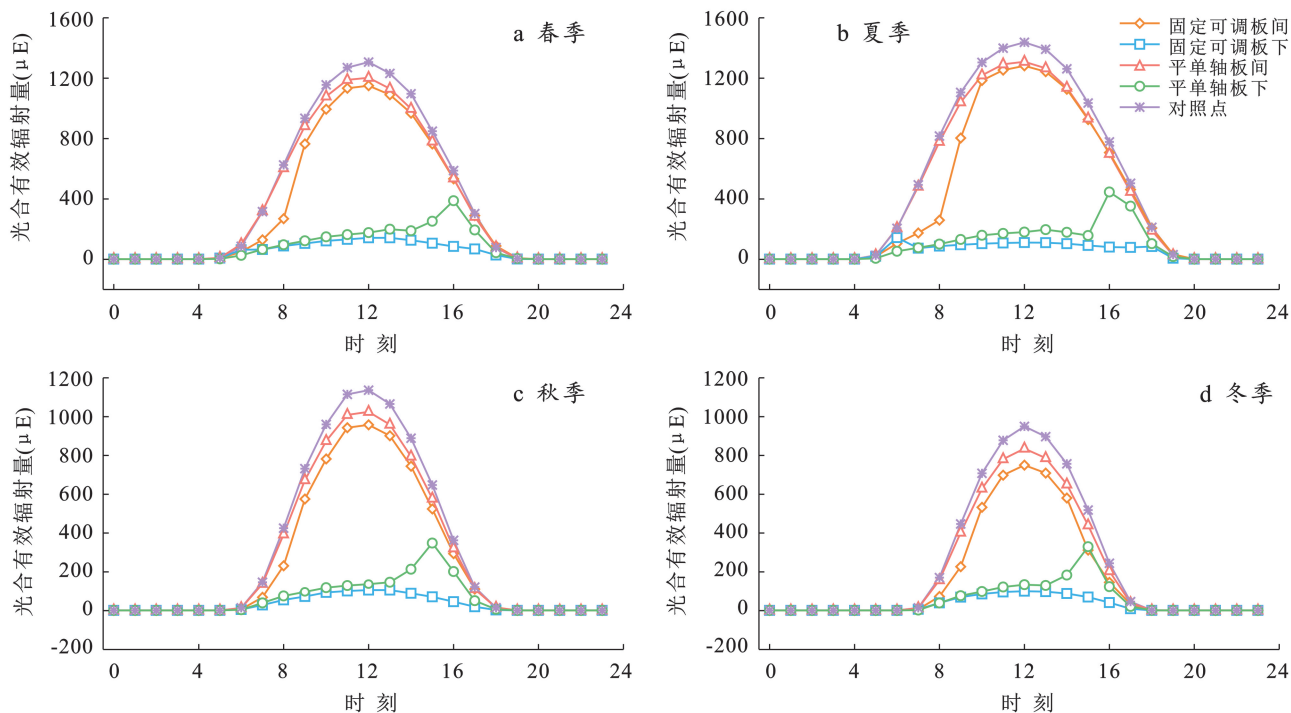


图 14 不同季节光伏电站内外各观测点光合有效辐射量日平均值变化

Fig.14 Daily average variation of photosynthetically active radiation of various observation points inside and outside photovoltaic power station in different seasons

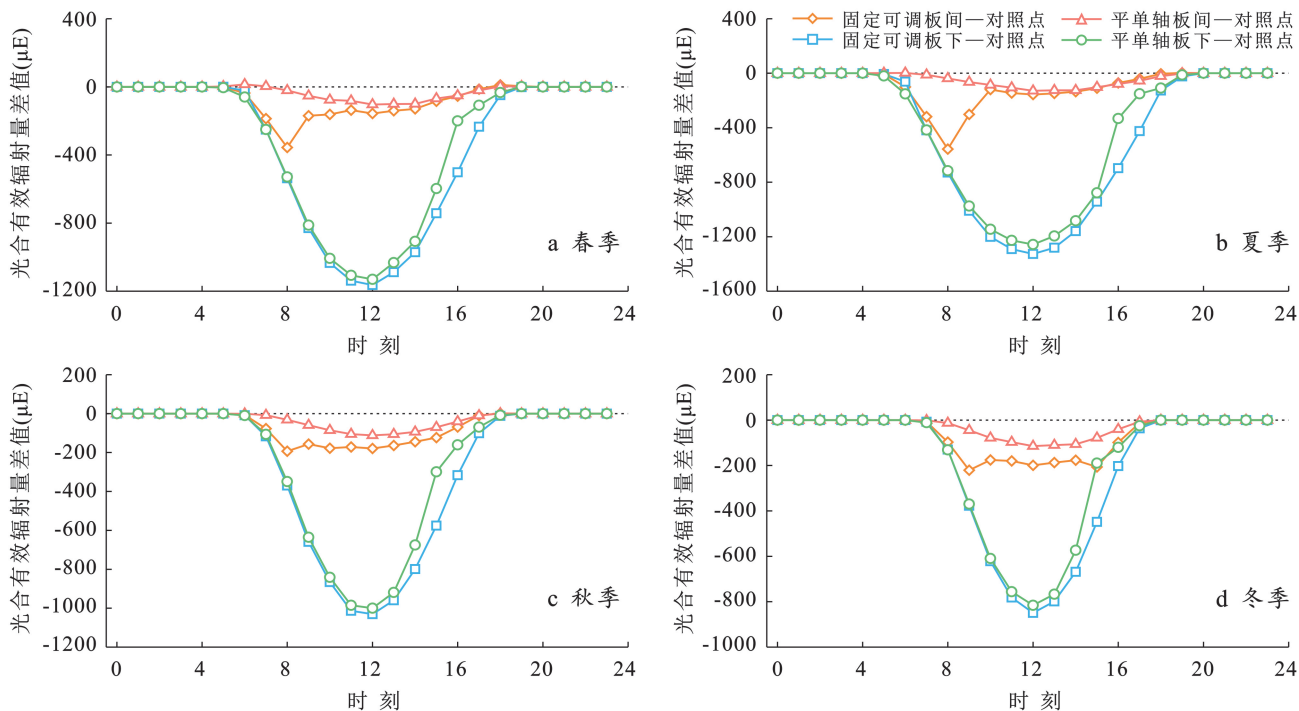


图 15 不同季节光伏电站内各点与对照点光合有效辐射量差值日平均变化

Fig.15 Daily average variation of photosynthetically active radiation difference between various observation points in photovoltaic power station and reference point in different seasons

图 16 反映了电站内外各观测点光合有效辐射量的月际变化情况。与太阳辐射量的变化趋势相似,光伏阵列板间的光合有效辐射量与对照区域差异较小,而板下的光合有效辐射量显著降低,特别在 5 月和 6 月,固定可调光伏阵列板下与平单轴光伏阵列板下的光合有效辐射量分别减少了 366.74~523.64 和

329.47~481.34 μE 。综上分析可以初步得出结论:光伏阵列对板间的光合有效辐射的影响较小,但显著降低了光伏板下的光合有效辐射量。其中,固定可调光伏阵列对光合有效辐射的减少作用略强于平单轴光伏阵列。这些结果为进一步研究光伏电站对植物生长环境的影响提供了重要的基础数据。

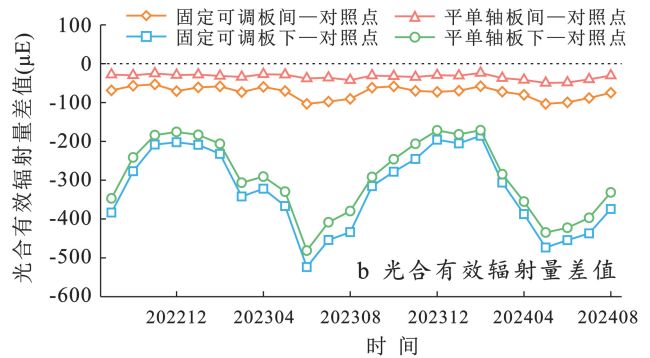
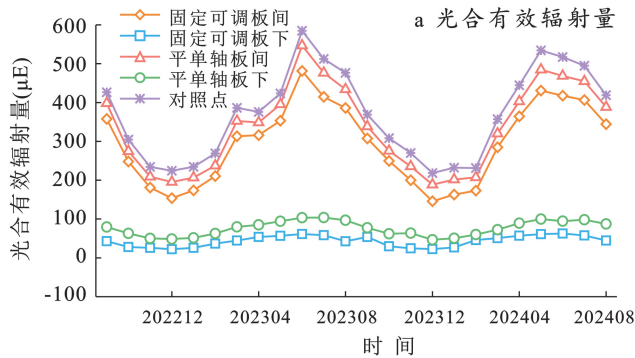


图 16 202209—202408 光伏电站内外各观测点光合有效辐射量月际变化

Fig.16 Monthly variation of photosynthetically active radiation of different observation points inside and outside photovoltaic power station during 202209—202408

4 讨论

光伏阵列的铺设改变了地表的反照率和粗糙度,进而影响了辐射平衡和近地表流场^[19-20]。由于感热和潜热通量受地表性质的影响,不同地质背景下的光伏电站对局地气象的影响存在差异^[21]。本研究深入探讨了毛乌素沙地大型光伏电站对局地微气象环境的影响。由于在实际运营中,人工清洗光伏板的频率较低,且工作人员会定期对场区内的植被进行修剪,其对局地微气象的影响相对有限,故本研究未单独考虑场区内植被及清洁用水对局地气象的影响。

研究依次分析了光伏电站对风向风速、空气温度、空气湿度、太阳辐射和光合有效辐射等气象因素的影响。在对风向和风速的影响方面,已有研究表明,光伏电站的建设会导致风向改变和风速减缓^[13-14],这一观点在本研究中得到了验证。此外,研究中还发现,风速的变化与来风的风向以及光伏阵列的类型密切相关。

在对空气温湿度的影响方面,研究发现光伏阵列具有降低近地表气温并增加空气湿度的作用,这与卢霞、殷代英等^[10,22-23]的研究结果较为一致。此外,研究中还发现平单轴光伏阵列在降温 and 增湿效果上优于固定可调光伏阵列,这是由于平单轴光伏阵列的板面会根据太阳位置变化而旋转,引发空气扰动,加速光伏板与空气间的热量传递,空气温度升高和降低更快。同时,相对湿度与空气温度之间呈显著负相关关

系^[12],而平单轴光伏阵列区域空气温度降幅略大,故平单轴光伏阵列的降温增湿作用优于固定可调光伏阵列。

在对太阳辐射和光合有效辐射的影响方面,研究结果显示光伏阵列显著减少了板下区域的太阳辐射量和光合有效辐射量,且固定可调光伏阵列对辐射的减少作用略大于平单轴光伏阵列。这是由于光伏阵列区域辐射量的减少主要由遮蔽效应引起,而固定可调光伏板的面积较大且夹角固定,相比之下,平单轴光伏板的面积较小^[24-25],且板面随太阳角度变化进行转动,其对辐射的遮蔽效应有所减弱。

本文对不同季节光伏电站对局地微气象的影响进行了初步分析。关于光伏电站对微气象因子影响机制的研究,仍需进行长期数据观测和深入分析,这将是今后研究的主要方向。

5 结论

(1) 光伏电站的建设显著改变了近地表的风向和风速,导致风向趋于单一,尤其固定可调光伏阵列区域变化更为明显。风速方面,固定可调光伏阵列对南风有减速效应,对东风和西风有加速效应;平单轴光伏阵列对南风和北风有加速效应,对东风和西风的影响则不确定。

(2) 光伏阵列的布设降低了局地气温,增加了空气湿度,其中平单轴光伏阵列在降温增湿效果上优于固定可调光伏阵列。相对湿度的增加有助于植被的

生长,进而抑制风沙运动,具有光伏+治沙的潜在效益。

(3) 在辐射方面,光伏阵列对光伏板间的太阳辐射和光合有效辐射影响较小,但显著降低了光伏板下的辐射量,其中固定可调光伏阵列的减少作用略强。

参考文献 (References)

- [1] Stoppato A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation [J]. *Energy*, 2008,33(2):224-232.
- [2] Ito M, Kato K, Sugihara H, et al. A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003,75(3/4):507-517.
- [3] Kaldellis J K, Kapsali M, Kavadias K A. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece [J]. *Renewable Energy*, 2014,66:612-624.
- [4] Slocum A H, Codd D S, Buongiorno J, et al. Concentrated solar power on demand [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(7): 1519-1529.
- [5] Szilágyi A, Gróf G. Estimating the environmental footprint of a grid-connected 20 MWp photovoltaic system [J]. *Solar Energy*, 2020,197:491-497.
- [6] Turney D, Fthenakis V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011,15(6):3261-3270.
- [7] Fthenakis V, Yu Yuanhao. Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms [C]//2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). June 16-21,2013, Tampa, FL, USA. IEEE, 2013:3362-3366.
- [8] Ravikumar D, Sinha P. The impact of photovoltaic (PV) installations on downwind particulate matter concentrations: Results from field observations at a 550-MW_{AC} utility-scale PV plant [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 2017,67(10): 1126-1136.
- [9] 杨丽薇,高晓清,吕芳,等.光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究[J].*太阳能学报*,2015,36(9): 2160-2166.
Yang Liwei, Gao Xiaoqing, Lü Fang, et al. Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of Golmud [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015,36(9):2160-2166.
- [10] 殷代英,马鹿,屈建军,等.大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J].*水土保持通报*,2017,37(3):15-21.
Yin Daiying, Ma Lu, Qu Jianjun, et al. Effect of large photovoltaic power station on microclimate of desert region in Gonghe Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017,37(3):15-21.
- [11] 杨世荣.库布齐沙漠光伏电站风沙运动及蚀积特征研究 [D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
Yang Shirong. Study on wind-blown movement and erosion characteristics of Kubuqi Desert photovoltaic power station [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University,2019.
- [12] 赵鹏宇,高永,陈曦,等.沙漠光伏电站对空气温湿度影响研究[J].*西部资源*,2016(3): 125-128.
Zhao Pengyu, Gao Yong, Chen Xi, et al. Study on the influence of desert photovoltaic power station on air temperature and humidity [J]. *Western Resources*, 2016(3):125-128.
- [13] 王涛.光伏电站建设对靖边县土壤、植被的影响研究 [D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
Wang Tao. The Impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation in Jingbian County [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [14] 王祯仪,汪季,高永,等.光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J].*水土保持通报*,2019,39(1):191-196.
Wang Zhenyi, Wang Ji, Gao Yong, et al. Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(1):191-196.
- [15] 杜慧,孙芳.初步研究光伏电站运营期对植被的影响 [J].*环境与发展*,2017,29(8):30-31.
Du Hui, Sun Fang. Preliminary study on the impact of photovoltaic power plant operation on vegetation [J]. *Environment and Development*, 2017,29(8):30-31.
- [16] 孙刚,刘慧,李丽,等.光合有效辐射及其传感器研究进展[J].*农业工程学报*,2023,39(8):20-31.
Sun Gang, Liu Hui, Li Li, et al. Definition of photosynthetically active radiation (PAR) and its development progress [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(8):20-31.
- [17] 聂修和,聂宜茂,聂俊华,等.光合有效辐射测量原理及其单位换算[J].*山东农业大学学报*,1992,23(3):247-253.
Nie Xiuhe, Nie Yimao, Nie Junhua, et al. The principle for measuring available photosynthetic radiation and related conversion of units [J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1992,23(3):247-253.
- [18] 任小丽,何洪林,张黎,等.1981—2010年中国散射光合有效辐射的估算及时空特征分析[J].*地理学报*,2014, 69(3):323-333.
Ren Xiaoli, He Honglin, Zhang Li, et al. Assessment of the spatiotemporal variations of diffusephotosynthetic active radiation in China from 1981 to 2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(3):323-333.

- Tibet Plateau ecological shelter [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,318:128592.
- [22] Chen Jia, Xiao Haibing, Li Zhongwu, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China [J]. *Ecological Engineering*, 2019,132:109-114.
- [23] 袁腾港,张英,钱继坤,等.甘肃洮河流域水文气象动态及径流和水质驱动机制[J].*冰川冻土*,2024,46(4):1329-1340.
- Yuan Tenggang, Zhang Ying, Qian Jikun, et al. Hydrometeorological dynamics and driving mechanism of runoff and water quality in the Taohe River basin, Gansu Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024,46(4):1329-1340.
- [24] 徐勇,郑志威,孟禹弛,等.西南地区不同类型植被 NPP 时空演变及影响因素探究[J].*环境科学*,2024,45(1):262-274.
- Xu Yong, Zheng Zhiwei, Meng Yuchi, et al. Spatio-temporal variation in net primary productivity of different vegetation types and its influencing factors exploration in Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2024,45(1):262-274.
- [25] Liu Chunyu, Dong Xiaofeng, Liu Yingying. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China [J]. *Catena*, 2015,125:190-199.
- [26] 王丽霞,丁慧兰,刘招,等.基于 CASA 模型探究泾河流域植被 NPP 时空动态及其对气候变化的响应[J].*水土保持研究*,2022,29(1):190-196.
- Wang Lixia, Ding Huilan, Liu Zhao, et al. Spatiotemporal change of NPP based on CASA model and its response to climate change in Jing River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(1):190-196.
- [27] Pan Daili, Gao Xiaodong, Dyck M, et al. Dynamics of runoff and sediment trapping performance of vegetative filter strips: Run-on experiments and modeling [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,593:54-64.
- [28] Chi Dengkai, Wang Hong, Li Xiaobing, et al. Assessing the effects of grazing on variations of vegetation NPP in the Xilingol Grassland, China, using a grazing pressure index [J]. *Ecological Indicators*, 2018,88:372-383.
- [29] 张发,祝小梅,张红,等.伊犁河谷草地水分利用效率时空变化及其对气候因子的响应[J].*环境生态学*,2024,6(4):57-64.
- Zhang Fa, Zhu Xiaomei, Zhang Hong, et al. Spatial-temporal variation of water use efficiency and its response with climate factors in Ili River valley, China [J]. *Environmental Ecology*, 2024,6(4):57-64.
- [30] 赵彦博,赵广举,穆兴民,等.渭河流域植被变化调控输沙的覆盖度阈值[J].*水土保持研究*,2024,31(6):96-102.
- Zhao Yanbo, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Influence and threshold of vegetation change on sediment load in the Weihe River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(6):96-102.

(上接第 222 页)

- [19] 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 Xiaoqing. Research progress on climate effect and influence mechanism of photovoltaic systems [J]. *Plateau Meteorology*, 2022,41(4):953-962.
- [20] 张克存,奥银焕,屈建军,等.巴丹吉林沙漠湖泊一沙山地貌格局对局地小气候的影响[J].*水土保持通报*,2014,34(5):104-108.
- Zhang Kecun, Ao Yinhan, Qu Jianjun, et al. Influences of lake-sand dune landscape on local microclimate in Badain Jaran Desert [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(5):104-108.
- [21] Doran J C, Shaw W J, Hubbe J M. Boundary layer characteristics over areas of inhomogeneous surface fluxes [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995,34(2):559-571.
- [22] 卢霞.荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析:以酒泉市东洞滩百万千瓦光伏示范基地为例[D].兰州:兰州大学,2013.
- Lu Xia. The environmental effect analysis of PV power plant construction in desert Gobbi: Jiuquan City Dongdongtan million kilowatt photovoltaic demonstration base as an example [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2013.
- [23] Zhang Xunhe, Xu Ming. Assessing the effects of photovoltaic powerplants on surface temperature using remote sensing techniques [J]. *Remote Sensing*, 2020,12(11):1825.
- [24] 唐远程,卢小龙,孙志云,等.光伏支架成本及选型分析[J].*太阳能*,2023(10):81-87.
- Tang Yuancheng, Lu Xiaolong, Sun Zhiyun, et al. Cost and type selection analysis of PV brackets [J]. *Solar Energy*, 2023(10):81-87.
- [25] 刘永博.某光伏电站光伏支架选型研究[J].*光源与照明*,2023(5):122-125.
- Liu Yongbo. Study on photovoltaic bracket selection of a photovoltaic power station [J]. *Lamps & Lighting*, 2023(5):122-125.