

单块光伏组件下垫面溅蚀空间格局及其主控因子

王辉^{1,2}, 胡睿哲^{1,2}, 喻启华^{1,2}, 朱俊^{1,2}, 郭培^{1,2}

(1. 湖南农业大学水利与土木工程学院, 长沙 410128; 2. 湖南省灌区精准控灌工程技术研究中心, 长沙 410128)

摘要: [目的] 明确溅蚀主控因子, 为光伏电站科学安装与板下水土保持措施布设提供理论依据。[方法] 采用室内可控模拟试验, 以单块光伏组件为研究对象, 构建下垫面溅蚀动态模拟平台。设置降雨强度(20、40、60、80、100 mm/h)、组件倾角(16°、18°、20°、22°)和下沿离地高度(1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m) 3个因素, 开展完全组合试验, 并采用方差分解量化因子贡献率与交互作用。[结果] 1) 溅蚀总面积随降雨强度呈显著指数增长, 增幅达198%~478%, $p < 0.001$; 降雨强度对总溅蚀面积和逆向溅蚀面积的贡献率分别为68.04%和71.73%, 为主控因子。2) 下沿离地高度为次要控制因子, 高度由1.0 m增至3.0 m时溅蚀总面积增加79%~191%, 且与降雨强度存在显著交互作用。3) 倾角对溅蚀总面积影响较小, 贡献率为1.27%, 但对顺向溅蚀贡献率达41.26%, 显著调控溅蚀方向分配。4) 逆向溅蚀在所有处理中均占主导地位, 占比为68.27%~92.08%, 为溅蚀主导方向。降雨强度升高使最远溅蚀距离扩大; 下沿离地高度呈先增后稳趋势, 倾角对溅蚀最远距离影响较弱。[结论] 光伏板下沿折边结构决定逆向主导的基本格局, 降雨强度驱动溅蚀尺度扩展, 下沿离地高度调控空间范围, 倾角主导方向分异, 三者在滴水线处形成耦合控制机制。

关键词: 光伏组件; 安装参数; 滴水线; 溅蚀; 降雨强度; 红壤

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0152-08

Spatial Patterns of Splash Erosion on Underlying Surface of Single Photovoltaic Panel and Their Dominant Controlling Factors

Wang Hui^{1,2}, Hu Ruizhe^{1,2}, Yu Qihua^{1,2}, Zhu Jun^{1,2}, Guo Pei^{1,2}

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Engineering Research Center of Precision Irrigation Control for Irrigation Districts in Hunan, Changsha 410128, China)

Abstract: [Objective] This study aims to identify the dominant controlling factors of splash erosion, thereby providing a theoretical basis for the scientific installation of photovoltaic power stations and the layout of soil and water conservation measures under the panels. [Methods] A controlled indoor simulation experiment was conducted using a single photovoltaic panel as the research object, and a dynamic simulation platform for splash erosion on the underlying surface was established. Three factors were considered: rainfall intensity (20, 40, 60, 80, and 100 mm/h), panel tilt angle (16°, 18°, 20°, and 22°), and lower-edge height above ground (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 m). A complete combination experiment was conducted, and variance decomposition was used to quantify factor contribution rates and interactions. [Results] 1) Total splash erosion area increased exponentially with rainfall intensity, with an increase of 198%–478% ($p < 0.001$). Rainfall intensity contributed 68.04% and 71.73% to the total splash erosion area and backward splash erosion area, respectively, indicating that it was the dominant controlling factor. 2) Lower-edge height was the secondary controlling factor. When the height increased from 1.0 m to 3.0 m, the total splash erosion area increased by 79%–191%, and a significant interaction with rainfall intensity was observed. 3) Panel tilt angle had little effect on the total splash erosion area,

收稿日期: 2026-03-09

修回日期: 2026-04-23

录用日期: 2026-04-29

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(52509055); 校级科学研究项目(25SF065)

第一作者: 王辉(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理与农业水土环境研究。E-mail: wanghuisb@126.com

通信作者: 王辉(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理与农业水土环境研究。E-mail: wanghuisb@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

with a contribution rate of 1.27%, but it contributed 41.26% to forward splash erosion, significantly regulating the directional distribution of splash erosion. 4) Backward splash erosion dominated under all treatments, accounting for 68.27% – 92.08% and representing the dominant erosion direction. Increasing rainfall intensity expanded the maximum splash distance. The lower-edge height showed a trend of initial increase followed by stabilization, whereas the tilt angle had a relatively weak effect on the maximum splash distance. **[Conclusion]** The folded-edge structure at the lower margin of the photovoltaic panel determines the basic backward-dominated splash pattern. Rainfall intensity drives the expansion of splash erosion, lower-edge height regulates the spatial extent, and tilt angle dominates directional differentiation. Together, these three factors form a coupled control mechanism at the drip line.

Keywords: photovoltaic panel; installation parameters; drip line; splash erosion; rainfall intensity; red soil

Received: 2026-03-09

Revised: 2026-04-23

Accepted: 2026-04-29

Online(www.cnki.net): 2026-08-27

发展光伏产业对调整能源结构、推进能源生产和消费革命、促进生态文明建设具有重要意义,我国光伏产业化二十余年来,发展势头强劲。光伏和光伏农业的发展将实现土地资源的高效利用,助力国家碳达峰碳中和战略的实施,但迅猛发展过程中忽略土地利用变化对于土壤生态环境可能造成的威胁,包括可能增加大面积的水土流失风险^[1]。光伏板的倾角与下沿离地高度是协调发电与植被生长的关键参数,其通过降雨再分配,深刻影响板下生态过程^[2-3]。光伏板滴水线处作为水分补给关键区,其空间位置直接由上述参数决定,使得该处成为工程参数影响生态过程的枢纽。然而,高动能的集中水流在此引发的剧烈溅蚀,可能破坏土壤结构并导致养分流失,反而削弱植被的水土保持功能^[4]。南方地区降雨丰沛,年内分布不均,暴雨频次高、强度大,是土壤侵蚀的敏感区域。在农光互补工程中,光伏板的特殊汇流-滴水机制可能进一步放大局地降雨侵蚀效应。因此,研究由光伏板造成水土流失易发区的土壤溅蚀问题,对管控水土流失风险具有重要意义。

光伏板作为典型的不透水人工构筑物,其铺设会显著改变降雨在地表的再分配过程,对坡面侵蚀格局产生新的影响^[5-6]。土壤溅蚀是水蚀过程的初始环节,也是坡面侵蚀和径流形成的重要物质基础。在自然坡面条件下,降雨强度通常被认为是影响溅蚀强度的主控因子^[7]。然而,不同于自然降雨条件,工程扰动下的降雨再分配过程可能改变雨滴的粒径组成、终端速度及撞击方式,从而使溅蚀机理呈现出新的特征^[8]。已有研究^[9]表明,降雨强度、下落高度和入射角度是控制溅蚀发生与发展的关键因素。光伏板在降雨过程中具有明显的汇流效应^[10],降雨沿板面汇集并集中于下沿滴水线处,使局地降雨强度和雨滴动能显著高于自然降雨水平。Elamri等^[8]通

过田间观测发现,光伏板的安装高度和倾角对集雨强度及其空间分布具有显著影响;其中,下沿离地高度直接决定汇流水滴的下落高度及终端速度,而光伏板倾角则通过影响板面汇流路径、雨滴脱离位置及入射角度,控制滴水线位置及溅蚀作用的空间分布特征;已有研究^[11]通过坡面模拟试验和数值模拟方法,分析了不同倾角条件下光伏板对坡面径流起始时间、汇流集中程度及侵蚀强度的影响,结果表明,光伏板倾角变化可显著改变坡面水动力条件,从而影响侵蚀过程的发生与发展;也有研究^[12]从流域或场地尺度出发,探讨光伏电站建设对区域径流量、泥沙产出及侵蚀强度的整体影响,认为光伏板的布设是影响水土流失风险的重要工程因素。

有研究^[13]集中于总体的径流量、总侵蚀量及侵蚀强度的变化,但对滴水线处局部溅蚀空间分异系统研究仍相对匮乏。特别是现有文献未能深入探讨光伏板配置参数(如倾角和下沿离地高度)对滴水线溅蚀面积的具体影响。光伏板的安装高度和倾角会显著影响降雨集中的程度及雨滴的下落速度,但这些研究^[6,14]多集中于定性描述,缺乏对溅蚀空间分布影响的定量研究。特别是,降雨强度、下沿离地高度与倾角三因子对溅蚀空间格局的耦合调控机制尚缺乏定量解析,三者如何在滴水线处协同影响溅蚀总面积、方向分配及最远距离,目前仍未见系统报道。

基于此,本研究以南方典型红黏土为对象,聚焦光伏板下垫面滴水线溅蚀区,通过室内试验,在可控条件下系统分析降雨强度、光伏板倾角及下沿离地高度对溅蚀总面积、空间分布特征及最远溅蚀距离的影响规律,定量解析三因子的独立贡献与耦合交互作用,旨在揭示光伏板配置参数与溅蚀过程之间的作用机制,为光伏电站水土保持措施的科学布设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本试验搭建一套光伏板下垫面溅蚀区动态模拟试验平台(图1)。整体系统由光伏组件安装参数调节单元、模拟降雨供水单元和溅蚀监测单元组成,可实现对光伏组件空间结构参数与降雨输入条件的精确控制。单块光伏组件[长 2.2 m×宽 1.1 m;型号:CETC-535M(H)/144;(535±5)W_p]固定于钢制支架系统上。支架主体采用矩形框架结构,以保证整体刚度与稳定性。下沿离地高度通过蜗轮蜗杆传动机构进行调节。该机构设置于支撑立柱内部,通过旋转手轮驱动蜗杆带动蜗轮,实现丝杆轴向升降,从

而改变组件整体的垂直高度。蜗轮蜗杆结构具有自锁性能,调节至目标高度后可保持稳定定位。组件倾角通过安装于后侧支点的蜗轮蜗杆式螺旋千斤顶调节,旋转手柄带动蜗杆-蜗轮副传动,驱动梯形螺纹丝杆伸缩,改变后支点高度,使板面绕前支点转动,从而实现倾角连续可调,并依靠自锁性能保持角度稳定。光伏板顶端布设3个大容量马氏瓶(单瓶容积 10 L),各马氏瓶底端连接升降台,通过调节瓶底高度以控制出流量。光伏板滴水线正下方设置自制溅蚀网(24目)(长 1.000 m×宽 0.650 m×高 0.007 m),网框内均匀填充 0.7 cm 厚试验土壤。溅蚀网表层土壤被完全剥离、基底裸露的区域作为溅蚀面积(图1)。

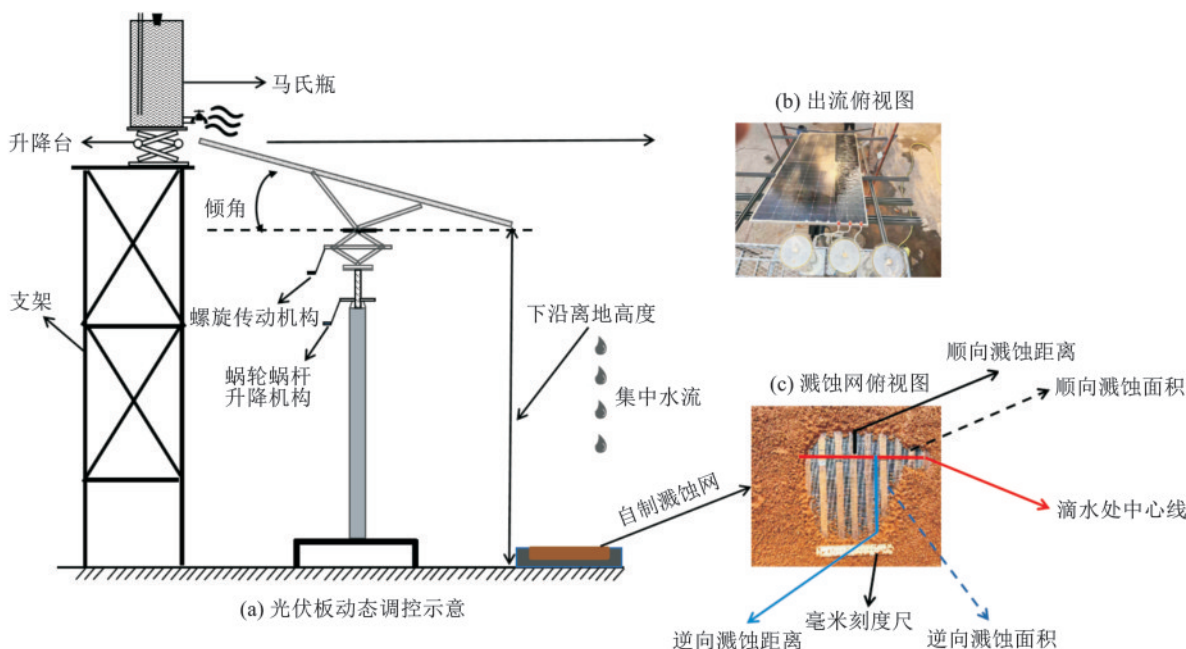


图1 试验平台结构与布置示意
Fig. 1 Structure and layout of experimental platform

供试土壤采集自湖南省长沙市芙蓉区湖南农业大学校园附近农田(28°11'45"N, 113°07'33"E),供试土壤颗粒组成采用比重计法测定,砂粒(>0.02~0.2 mm)含量为 12%,粉砂粒(0.002~0.02 mm)含量为 32%,黏粒(<0.002 mm)含量为 56%,土壤类型为红黏土。采集田间 0~20 cm 土层土壤,带回室内自然风干至初始含水率为 5.5%,剔除植物根系和石块等杂质后粉碎,并通过 5 mm 筛充分混匀备用。装土时按体积法控制土壤体积质量为 1.2 g/cm³。

试验采用 3 因素完全组合试验,其中降雨强度(R)设 5 个水平,下沿离地高度(H)设 5 个水平,光伏板倾角(A)设 4 个水平,共 100 个处理组合,每个处理设置 3 组重复试验。根据南方地区降雨特性^[15],本试验设置 20、40、60、80、100 mm/h 共 5 个降雨强度。试验通过设定降雨强度转换为板面等效汇流流量,并

由马氏瓶在板顶稳定出流,使水流沿板面形成实际汇集过程,从而在滴水线处实现集中释放。流量计算依据雨水管渠的设计流量,计算公式为:

$$Q = a167qF \quad (1)$$

式中:Q 为出流量, L/s; a 为径流系数(光伏板取 1.0); q 为暴雨强度, mm/min; F 为光伏板不同倾角下的垂直投影面积, m²。167 为雨强单位换算系数,即 1 mm/min=167 L/(s·hm²)。根据《关于规范“农光互补”项目建设管理有关事项的通知》^[16]对光伏组件最低点离地高度不宜低于 2.0 m 的规定,同时考虑板下植物生长空间需求^[17],本试验设置 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m 共 5 个光伏板下沿离地高度。根据光伏安装规范及最佳倾角研究^[18],本试验设置 16°、18°、20°、22°共 4 个光伏板倾斜角度。

1.2 测定指标与方法

待马氏瓶放水 30 min 后,在溅蚀区域外放置标准不锈钢刻度尺(量程 30 cm,分度值 1 mm),然后将手机(型号:mate70;像素:5 000 万)固定在离地高度为 40 cm 处拍摄溅蚀区域的照片;所有拍摄处理参数为($f/2$, $S:1/171$ s, $ISO:50$)拍摄过程中,确保溅蚀区域清晰可见,将拍好的照片导入 ImageJ 1.54g 软件采用四点校正法:在溅蚀网四角粘贴黑色圆形标定点(直径 5 mm,位置固定),在每张溅蚀后图像中,使用 ImageJ 的“Rotate”或“Transform”插件中的“Perspective Correction”工具,依次选取 4 个标定点,将其映射至标准矩形坐标(即溅蚀网的实际几何尺寸)。使用“Set Scale”命令,沿刻度尺的 10 cm 长度绘制直线,输入“Known Distance”为 10 cm,单位设为 cm,软件自动计算空间分辨率(pixels/cm)。最终计算出溅蚀面积,顺向溅蚀面积(以滴水线中心线为基准线的光伏板阴影外侧部分面积),逆向溅蚀面积(以滴水处中心线为基准线的光伏板阴影内侧部分面积)及滴水处中心线到两端的最远溅蚀距离(图 1)。

1.3 数据处理

数据取 3 次重复处理的算术平均值,采用 Excel 2019, SPSS 21.0 和 Python 软件对数据进行处理与分析;绘图工具采用 Origin 软件,采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较(LSD)和独立样本 t 检验,进行显著性水平检验($p < 0.001$)。根据曹晓娟等^[19]采用的各因子贡献率计算方法,利用 SPSS 软件进行方差分析,通过公式(2)计算得到各因子的贡献率(P_F)。

$$P_F = \frac{SS_F - (DOF_F \times V_{Er})}{SS_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_F 为因子贡献率,%; SS_F 为因子的 III 型平方和; DOF_F 为因子的自由度; V_{Er} 为误差平方和; SS_T 为总离差平方和。

2 结果与分析

2.1 不同雨强下光伏板下沿离地高度和倾角对溅蚀总面积的影响

在不同试验条件下,溅蚀总面积随降雨强度增加、光伏组件下沿离地高度及倾角的增加均呈上升趋势(图 2)。不同降雨强度、下沿离地高度和倾角对溅蚀总面积的影响均达极显著水平($p < 0.001$)。在相同下沿离地高度和倾角下,溅蚀总面积随降雨强度增大呈指数增长。以下沿离地高度 1.0 m、倾角为 16°为例,降雨强度从 20 mm/h 增加到 100 mm/h 时,溅蚀总面积显著增加,由 120.18 cm²增至 695.43 cm²,增幅高达 478%;而当下沿离地高度为 3.0 m、倾角为

22°时,相同降雨强度增幅下溅蚀总面积由 454.24 cm²增至 1 355.73 cm²,增幅为 198%。在试验参数范围内,溅蚀总面积增幅区间为 198%~478%。在相同降雨强度和倾角下,溅蚀总面积随下沿离地高度增加而扩大。当降雨强度为 100 mm/h、倾角为 16°时,下沿离地高度由 1.0 m 升至 3.0 m,溅蚀总面积由 695.43 cm²增至 1 247.02 cm²,增幅达 79%;而降雨强度为 20 mm/h、倾角为 20°时,下沿离地高度从 1.0 m 增加到 3.0 m 时溅蚀总面积由 144.11 cm²增至 418.80 cm²,增幅达 191%,为所有高度组合中的最大增幅。

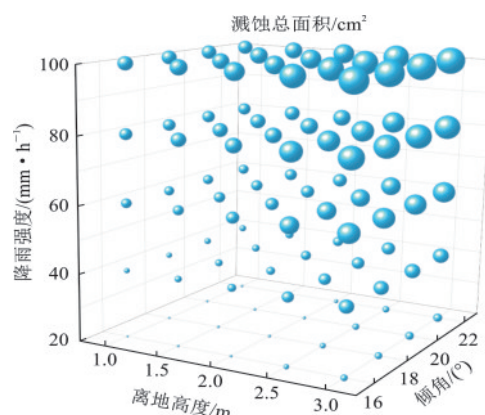


图2 溅蚀总面积 3D 散点图

Fig. 2 3D scatter plot of total splash erosion area

值得注意的是,在相同降雨强度和下沿离地高度下,倾角变化对溅蚀总面积的增幅效应显著弱于前二者。以降雨强度为 20 mm/h、下沿离地高度为 2.0 m 为例,倾角由 16°增至 22°时,溅蚀总面积增幅为 64.1%,显著低于降雨强度(478%)和下沿离地高度(191%)主导条件下的增幅水平。

2.2 不同降雨强度下光伏板下沿离地高度和倾角对顺向与逆向溅蚀面积的影响

不同试验条件下溅蚀面积组分呈现规律性分异。由图 3 可知,逆向溅蚀面积在所有处理中均占据绝对主导地位。相同降雨强度下,不同下沿离地高度与倾角组合间顺向与逆向溅蚀面积均存在极显著差异($p < 0.001$)。以下沿离地高度 1.0 m、倾角 16°为例,当降雨强度从 20 mm/h 增至 100 mm/h 时,逆向溅蚀面积自 111.54 cm²增至 583.89 cm²(增幅为 423%),而顺向溅蚀面积仅从 8.64 cm²增长至 111.54 cm²(增幅为 1 191%),尽管顺向增幅比例更大,但逆向面积的绝对体量及增量(472.35 cm²)远高于顺向(102.9 cm²)。下沿离地高度的增加对顺向、逆向溅蚀面积产生等向放大作用。如在倾角 20°、降雨强度 100 mm/h 时,高度从 1.0 m 增至 3.0 m,顺向面积从 183.16 cm²增至 363.87 cm²,逆向面积从 534.89 cm²增至 961.13 cm²,二者差值从 351.73 cm²扩大至 597.26 cm²。

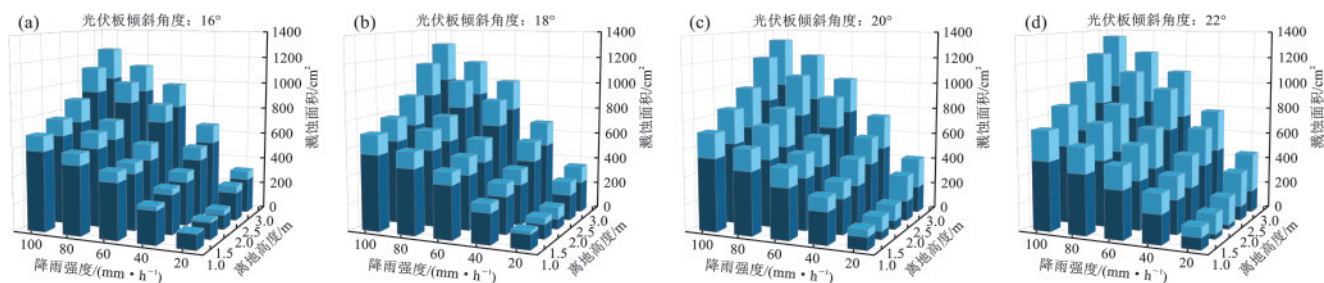


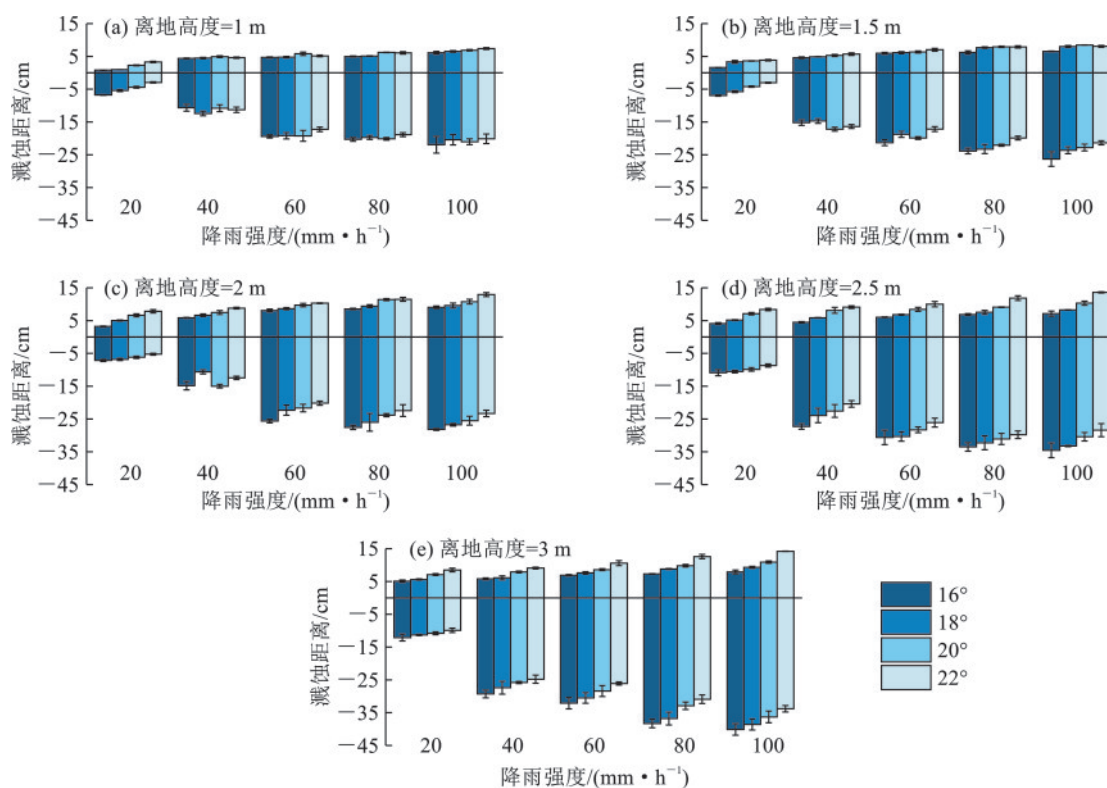
图3 顺向与逆向溅蚀面积总览

Fig.3 Overview of forward and backward splash erosion areas

倾角是调控顺/逆向溅蚀权重分配的关键因子。在1.0 m高度、60 mm/h降雨强度下,倾角从16°增大至22°时,顺向溅蚀面积从75.66 cm²增加至171.28 cm²,而逆向溅蚀面积则从409.29 cm²减少至355.88 cm²,甚至在较高高度(如2.5 m)和较大倾角(22°)下,顺向面积(如100 mm/h时为386.22 cm²)可接近逆向面积(如100 mm/h时为839.57 cm²)。

2.3 不同雨强下光伏板下沿离地高度和倾角对溅蚀最远距离的影响

由图4可知,在相同倾角与下沿离地高度条件下,顺向与逆向溅蚀最远距离均随降雨强度增加呈显著增长趋势。以下沿离地高度1.0 m、倾角16°为例,降雨强度由20 mm/h增至100 mm/h时,逆向溅蚀最远距离由6.77 cm增至21.94 cm,增幅为224%;顺向溅蚀最远距离由0.80 cm增至6.12 cm,增幅为665%。



注:正、负值分别代表顺向、逆向最远溅蚀距离。

图4 各因素下最远溅蚀距离分布

Fig.4 Distribution of maximum splash distance under different factors

下沿离地高度对溅蚀最远距离呈现先增后稳的变化规律。相同降雨强度和倾角条件下,当下沿离地高度由1.0 m升至2.0 m时,逆向与顺向溅蚀最远距离平均增幅分别为45%和52%;而高度由2.0 m升至3.0 m时,增幅明显减缓,逆向与顺向溅蚀最远距离平均增幅分别降至22.9%和7.0%。

倾角变化对溅蚀最远距离的影响相对较弱,但在

一定程度上改变溅蚀方向分布格局。随倾角由16°增至22°,逆向溅蚀最远距离呈缩短趋势,顺向溅蚀最远距离略有增加,二者差值逐渐减小。以降雨强度100 mm/h、下沿离地高度为2.5 m为例,当倾角为22°时,顺向与逆向溅蚀最远距离差值仅为约15 cm。在所有试验条件下,光伏组件滴水线处的溅蚀区间位于-40.1~14.2 cm,试验组观测到的最大溅蚀区间长度为48 cm。

2.4 降雨强度、下沿离地高度和倾角对溅蚀面积的贡献率

方差分析结果表明,3个试验因素对3类溅蚀面积的影响均达到极显著水平($p < 0.001$),但其主导因子与交互作用模式存在显著差异。逆向溅蚀面积与总溅蚀面积的主导机制高度一致。降雨强度均为绝对主导因子,贡献率分别为71.73%和68.04%,远高于其他因素;下沿离地高度为次要因素,贡献率分别为23.32%和27.99%;倾角贡献率均低于1.30%。

交互作用方面,仅降雨强度与下沿离地高度的二阶交互作用达到显著水平,贡献率相对最高(分别为3.14%和2.11%),其余二阶及三阶交互作用均不显著,表明逆向溅蚀与总溅蚀过程主要由降雨强度的独立效应及其与安装高度的耦合效应所驱动。然而,顺向溅蚀面积的倾角贡献率最高(41.26%),超过下沿离地高度(27.20%)和降雨强度(26.78%);其所有二阶及三阶交互作用均达极显著水平($p < 0.001$),其中以倾角与下沿离地高度的交互作用贡献率最大(1.89%)。顺向溅蚀受多因素复杂交互作用的协调控制,光伏组件配置参数及其与降雨条件的耦合效应共同决定溅蚀的空间分异格局。综上可知,总溅蚀面积与逆向溅蚀面积主要受降雨强度及其与下沿离地高度的交互作用控制;而顺向溅蚀面积则主要由倾角决定,并显著受到多重交互作用的影响。

3 讨论

3.1 降雨强度、下沿离地高度和倾角对光伏板溅蚀特征的影响

研究表明,降雨强度是控制溅蚀总面积的最关键因子,与既有土壤溅蚀研究和初期的光伏场区水土流失观测结果高度吻合。Wang等^[10]在中国北方光伏电站的研究中指出,地表径流和土壤流失量随降雨强度呈显著幂函数关系,高强度降雨事件是光伏阵列下水土流失的主要驱动力。与本研究中的总溅蚀面积随降雨强度增加呈指数增长(增幅198%~478%)的规律在物理机制上高度一致,降雨强度作为溅蚀过程的原始能量输入,直接决定雨滴剥离和输移土壤颗粒的能力^[9]。同时,本研究通过区分顺向与逆向溅蚀分量发现,倾角对顺向溅蚀的主导作用超过降雨强度。光伏组件倾角直接影响板面汇流路径及水滴脱离板面时的初始运动方向;随着倾角增大,水滴沿板面切向速度分量增加,使顺向水平动量增强。在相同下落高度条件下,顺向水滴具有更大的水平位移量,从而扩大顺向溅蚀最远距离。相反,逆向水滴的初始运动方向偏向内侧,入射角趋于陡直,冲击动能更多转化为垂直冲蚀而非侧向抛射,导致逆向溅蚀虽占面积优势,但扩展能力受限。

Liu等^[12]研究指出,倾角可通过改变坡面水文连通性显著影响侵蚀特征;Shobe^[20]研究强调,光伏阵列几何结构参数会重塑局地侵蚀过程。尽管上述研究未对溅蚀方向性进行区分,但其结论为本研究理解倾角在滴水线溅蚀过程中的作用提供重要理论依据。

本研究揭示倾角的作用本质上是重新分配顺向与逆向溅蚀面积的权重,而非单纯地增加总面积。随倾角增大,顺向溅蚀面积增加,逆向溅蚀面积减少。下沿离地高度的作用在本研究中表现出双重性。一方面,其增加会显著提升溅蚀总面积,与雨滴终端速度随下落高度增加而提高的经典自由落体模型一致。随着下落高度增加,水滴冲击瞬间的动能随速度平方增长,冲击产生的动压与剪切应力同步增强,从而提高土壤颗粒的剥离效率和抛射距离,最终表现为溅蚀总面积的扩大。另一方面,其与倾角之间显著的交互作用表明,高度通过与倾角的耦合,共同改变水滴的最终撞击状态。这种复杂的耦合效应是传统农业或自然坡面溅蚀研究中较少关注的,体现了光伏板阵列下水文过程的独特性和复杂性^[21]。

3.2 滴水线溅蚀的空间分异机制

光伏组件下垫面溅蚀在空间上表现出显著的方向性与范围分异,集中体现为顺向与逆向溅蚀面积、最远溅蚀距离的明显不对称分布。此空间格局并非由单一因子决定,而是降雨强度、下沿离地高度与倾角在滴水线这一能量汇聚点耦合作用的结果。逆向溅蚀在所有试验条件下均占主导地位(占比68.27%~92.08%),表明滴水线处水滴的初始运动方向并非简单沿光伏组件倾斜方向释放。其根本原因在于光伏组件下沿折边结构形成的局部几何约束。当板面汇流到达下沿时,水流受结构引导沿内侧表面贴附流动,在脱离瞬间形成具有明显向内分量的射流。该过程类似于附壁效应^[22],使水滴在脱离板面时已获得指向板内侧的初始动量,从而导致逆向溅蚀在空间分布上长期占据优势。各因子对溅蚀空间分布的调控机制存在本质差异。降雨强度是溅蚀空间分布扩展的核心驱动力。随着降雨强度增大,板面径流迅速汇集并以更高流量集中汇入滴水线,使得多水滴以较高动能连续冲击土壤表面。此过程不仅增强一次冲击造成的颗粒抛射,还强化由颗粒反弹和水滴破碎引发的二次溅射,从而推动最远溅蚀距离在顺向和逆向上同步扩展,解释了高降雨强度下溅蚀空间尺度显著放大的现象,与模拟降雨研究^[23]中关于雨强主控溅蚀扩展的认识高度一致。

下沿离地高度对溅蚀空间分布的影响一方面高度增加提升水滴终端速度,扩大溅蚀最远距离;另一方面,当下沿离地高度过高时,由于光伏板特殊汇水

性产生更大直径的滴水并赋予其更高的速度使其韦伯数接近临界值,显著提高水滴发生空中破碎的概率,反而限制最远溅蚀距离的扩展^[24]。倾角对溅蚀最远距离的整体影响相对较弱,但其对溅蚀方向的调控作用极为突出。随倾角增大,顺向溅蚀最远距离与面积显著增加,逆向溅蚀则相应减少。这种方向性分配机制表明,倾角主要通过改变水滴脱离板面时的溅射角度来重塑空间格局。交互作用分析进一步揭示空间分异的耦合机制。下沿离地高度 $\times$ 倾角的交互项贡献率最高(1.89%),表明光伏组件配置参数之间存在显著的协同效应。在较高高度(2.5 m)和较大倾角(22°)组合条件下,顺向溅蚀面积可达到逆向面积的46%,显示出溅蚀优势方向存在局部逆转的可能,空间格局被系统性重新分配。所有试验条件下滴水线溅蚀区间位于-40.1~14.2 cm,最大溅蚀长度为48 cm,说明滴水线附近存在相对固定的高风险溅蚀带。综上所述,光伏组件下垫面溅蚀的空间分异是多因子协同作用并在滴水线处集中表达的结果。降雨强度决定溅蚀扩展的基本尺度,下沿离地高度调控空间范围,倾角则主导溅蚀的方向性分配。三者并非独立作用,而是以组件几何结构为平台,以滴水线为界面,以水滴运动过程为纽带,形成耦合联动机制。因此,在光伏电站规划与水土保持措施布设中,应将光伏组件几何参数视为一个整体系统,依据区域降雨条件合理组合组件下沿离地高度与倾角;同时,在滴水线集中区域同步配置宽度不小于48 cm的消能缓冲带,以有效消减局地溅蚀集中对侵蚀格局的放大效应。本试验采用马氏瓶板顶供水方式模拟光伏板滴水线处的集中水流冲击,该方法能够实现对降雨强度、下沿离地高度和倾角三因子的精确控制,有效解析各因子对溅蚀空间格局的独立贡献与交互作用。然而,该方法与自然降雨条件下光伏板的实际水文过程存在一定差异。自然降雨中部分雨滴可直接穿过板间空隙降落在下垫面,对滴水线外侧区域产生直接溅蚀,而本试验未考虑这一贡献且板面汇流水滴的粒径与速度谱与自然雨滴存在差异,可能影响溅蚀的绝对量值。因此,本研究揭示的溅蚀空间格局及其主控因子规律具有相对比较意义,定量外推至野外实际条件时需谨慎。未来研究可结合野外原位观测,进一步验证和完善本试验结论。

4 结论

1) 溅蚀总面积随降雨强度呈显著指数增长($p < 0.001$),增幅为198%~478%;对溅蚀总面积和逆向溅蚀面积的贡献率分别达68.04%和71.73%,表明降雨强度是驱动光伏板下溅蚀土壤颗粒剥离与迁移的核心动力机制。

2) 相同降雨强度与倾角条件下,下沿离地高度由1.0 m增至3.0 m,溅蚀总面积增加79%~191%。

3) 倾角对溅蚀总面积影响相对较小(贡献率1.27%),但对顺向溅蚀面积具有显著主导作用(贡献率41.26%)。随倾角增大,顺向溅蚀面积和最远距离增加,逆向最远溅蚀距离缩短,顺逆向差值逐渐减小,说明倾角主要通过调控水滴脱离方向和水平动量分配来重塑空间分异格局。

4) 所有处理下溅蚀区间为-40.1~14.2 cm,最大溅蚀区间长度为48 cm;且因为光伏组件滴水线的向内弯曲结构,逆向溅蚀面积占比达68.27%~92.08%,为优势方向。说明滴水线附近存在相对固定且方向显著偏置的高风险溅蚀带。

5) 降雨强度、下沿离地高度与倾角在滴水线处形成“动力驱动-空间调控-方向分配”的三元耦合控制机制,突破单一因子分析的局限性。在南方农光互补工程中,应以区域降雨强度等级确定防控等级,将板下沿离地高度优化控制在2.0 m以内以抑制溅蚀距离过度扩展,同时在滴水线外侧布设宽度不小于48 cm的消能缓冲带,实现板下水土流失的精准阻控。

参考文献:

- [1] Aman M M, Solangi K H, Hossain M S, et al. A review of safety, health and environmental (SHE) issues of solar energy system [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1190-1204.
- [2] Yavari Bajehbaj R, Cibin R, Duncan J M, et al. Quantifying soil moisture and evapotranspiration heterogeneity within a solar farm: Implications for stormwater management [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 638: e131474.
- [3] 吴照学,袁天韞,鲍恩财,等.光伏组件密度对光伏农业系统微环境及甘薯产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(22): 256-264.
Wu Zhaoxue, Yuan Tianyun, Bao Encai, et al. Analysis of the impact of photovoltaic module layout density on the light-thermal environment and sweet potato growth in agrivoltaic systems [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(22): 256-264.
- [4] Verheijen F G A, Bastos A C. Discussion: Avoid severe (future) soil erosion from agrivoltaics [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: e162249.
- [5] Barron-Gafford G A, Pavao-Zuckerman M A, Minor R L, et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(9): 848-855.
- [6] Baiamonte G, Gristina L, Palermo S. Impact of solar panels on runoff generation process [J]. *Hydrological Processes*, 2023, 37(12): e15053.
- [7] 丁贵惠,任忠政,胡伟,等.侵蚀性降雨对黑土坡耕地土壤侵蚀特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 47-56.

- Ding Guihui, Ren Zhongzheng, Hu Wei, et al. Effects of erosive rainfall on soil erosion characteristics of black sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 47-56.
- [8] Elamri Y, Cheviron B, Mange A, et al. Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(2): 1285-1298.
- [9] 张转敏, 王彬, 饶伟, 等. 初始含水率和降雨能量对黑土团聚体溅蚀特征的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 68-75.
- Zhang Zhuanmin, Wang Bin, Rao Wei, et al. Impact of initial soil moisture and rainfall energy on splash erosion characteristics of black soil aggregate[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 68-75.
- [10] Wang Feng, Gao Jihui. How a photovoltaic panel impacts rainfall-runoff and soil erosion processes on slopes at the plot scale[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: e129522.
- [11] 杜月, 方怒放, 曾奕, 等. 光伏板配置对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 320-330.
- Du Yue, Fang Nufang, Zeng Yi, et al. Effects of photovoltaic panel configuration on slope runoff and sediment yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 320-330.
- [12] Liu Hu, Wu Chuandong, Yu Yang, et al. Effect of solar farms on soil erosion in hilly environments: A modeling study from the perspective of hydrological connectivity[J]. Water Resources Research, 2023, 59(12): e2023WR035067.
- [13] Wu Chuandong, Liu Hu, Yu Yang, et al. Ecohydrological effects of photovoltaic solar farms on soil microclimates and moisture regimes in arid Northwest China: A modeling study[J]. Science of the Total Environment, 2022, 802: e149946.
- [14] Gullotta A, Aschale T M, Peres D J, et al. Modelling storm-water runoff changes induced by ground-mounted photovoltaic solar parks: A conceptualization in EPA-SWMM[J]. Water Resources Management, 2023, 37(11): 4507-4520.
- [15] 王雪梅, 刘荣华, 刘晓婉, 等. 中国山丘区极端降雨演变的时空分异特征[J]. 水科学进展, 2025, 36(5): 783-795.
- Wang Xuemei, Liu Ronghua, Liu Xiaowan, et al. Spatiotemporal differentiation characteristics of extreme precipitation evolution in China's mountainous areas[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(5): 783-795.
- [16] 湖南省发展和改革委员会, 湖南省自然资源厅, 湖南省农业农村厅. 关于规范“农光互补”项目建设管理有关事项的通知(试行)[Z]. 湘发改能源[2024]399号, 2024-06-03.
- Hunan Provincial Development and Reform Commission, Hunan Provincial Department of Natural Resources, Hunan Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs. Notice on regulating the construction and management of "Agriculture-PV complementary" projects (Trial)[Z]. Xiang Fa Gai Neng Yuan[2024]No. 399, 2024-06-03.
- [17] 张龙, 吴翠南, 鲍恩财, 等. 光伏组件遮阴对光伏农业系统光环境及无花果产量影响分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 294-302.
- Zhang Long, Wu Cuinan, Bao Encai, et al. Effects of photovoltaic module shading on internal light environment and fig (*Ficus carica* L.) yield in agrivoltaic systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(23): 294-302.
- [18] 陈艳, 张科智, 鲁长琴. 固定式光伏方阵最佳倾角的计算与分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1567-1575.
- Chen Yan, Zhang Kezhi, Lu Changqin. Calculation and analysis of optimum tilted angle for fixed photovoltaic array[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(6): 1567-1575.
- [19] 曹晓娟, 谢林妍, 张风宝, 等. 沙层特性对沙盖黄土坡面产流产沙变化贡献的定量分析[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 962-974.
- Cao Xiaojuan, Xie Linyu, Zhang Fengbao, et al. Quantifying the contributions of sand layer characteristic to variations of runoff and sediment yields from sand-covered loess slopes during simulated rainfall[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 962-974.
- [20] Shobe C M. How impervious are solar arrays? On the need for geomorphic assessment of energy transition technologies[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47(14): 3219-3223.
- [21] 吴川东, 苏泽兵, 刘鹄, 等. 干旱、半干旱区光伏发电设施的生态-水文效应研究评述[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 690-701.
- Wu Chuandong, Su Zebing, Liu Hu, et al. Eco-hydrological effects of photovoltaic power generation facilities on dryland ecosystems: A review[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 690-701.
- [22] 程以炫, 董恒瑞, 闫睿奎, 等. 气泡羽流摆动特性及附壁效应研究[J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(4): 904-911.
- Cheng Yixuan, Dong Hengrui, Yan Ruikui, et al. Characteristics of bubble plume oscillation and the Coanda effect[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2020, 34(4): 904-911.
- [23] 张兴义, 乔宝玲, 李健宇, 等. 降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 110-117.
- Zhang Xingyi, Qiao Baoling, Li Jianyu, et al. Effects of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of downslope ridge on farmland in black soil areas of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 110-117.
- [24] 宋赫, 常士楠. 过冷大水滴袋状破碎实验及数值仿真研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(9): 2791-2798.
- Song He, Chang Shinan. Experimental and numerical investigation of water droplet bag breakup[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(9): 2791-2798.