

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.032 CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.032

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.

光伏板配置对坡面产流产沙的影响

杜月^{1,2,3}, 方怒放^{1,2,3,4}, 曾奕^{1,2,4}, 范锐⁴,

胡雨点⁴, 牛浩邦⁴, 余颖⁴, 常恒⁴

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为探究光伏板覆盖对坡面产流产沙的影响,探讨光伏场区的布设方式和水土保持措施。

[方法] 采用室内模拟降雨试验,设计光伏板倾角(30°、35°、40°),安装高度(0.4、0.6、0.8 m)及排列方式(光伏板长边与坡向垂直定义为横向排列L,光伏板长边与坡向平行定义为竖向排列V)3因素组合。对横向排列、安装高度0.8 m、倾角30°的光伏板坡面,增设条形石子与草垫防护措施,进行重复降雨试验。[结果] 1)光伏板覆盖可降低坡面径流量和累计泥沙量,较裸露坡面(CK),最大降幅分别为26.8%、56.6%。高度与坡面径流率、产沙速率、径流含沙量、径流量、累计泥沙量均呈显著正相关($p \leq 0.01$)。2)沿光伏板下边缘形成平行于板缘的板下集流侵蚀细沟。光伏板倾角为35°时,板下集流侵蚀细沟的宽度最小(2.70 cm),坡面径流量和累积泥沙量也最低。3)排列方式影响板下集流侵蚀细沟形态,横向排列板下集流侵蚀细沟数量多但体积小,竖向排列则单条板下集流侵蚀细沟面积、体积较大。4)在光伏板下缘铺设石子或草垫能有效控制侵蚀,与光伏板覆盖但未铺设防护措施的坡面相比,石子铺设使径流量和累计泥沙量分别减少2.3%、31.5%,草垫铺设分别减少14.4%、74.4%。[结论] 光伏板覆盖能够减流减沙,但易诱发板下集流侵蚀细沟;铺设石子、草垫等防护措施则可防止侵蚀细沟发育。其中,产沙量最小的光伏板配置为横向排列,0.4 m安装高度及35°倾角。研究结果可为光伏电场的水土保持提供参考。

关键词: 光伏板配置; 径流; 泥沙; 细沟侵蚀; 防护措施

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0320-11

Effects of Photovoltaic Panel Configuration on Slope Runoff and Sediment Yield

DU Yue^{1,2,3}, FANG Nufang^{1,2,3,4}, ZENG Yi^{1,2,4}, FAN Rui⁴, HU Yudian⁴, NIU Haobang⁴, YU Ying⁴, CHANG Heng⁴

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To examine the impacts of photovoltaic (PV) panel coverage on slope runoff and sediment yield, and to explore suitable panel arrangements and soil and water conservation measures for PV farms. [Methods] Laboratory rainfall simulation experiments were conducted with a 3-factor design involving panel tilt angle (30°, 35°, and 40°), installation height (0.4, 0.6, and 0.8 m), and arrangement modes (lateral arrangement L: panel long side perpendicular to slope; and vertical arrangement V: panel long side parallel to slope). For the lateral arrangement at 0.8 m installation height and 30° tilt angle, repeated rainfall experiments were performed with additional protective measures (strip gravel and turf mats). [Results] 1) PV panel coverage

收稿日期: 2025-08-05 修回日期: 2025-09-28 录用日期: 2025-10-15 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177335); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024ZY-JCYJ-02-18)

第一作者: 杜月(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: duyue22@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 方怒放(1985—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: fnf@ms.iswc.ac.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

reduced slope runoff volume and cumulative sediment yield by up to 26.8% and 56.6%, respectively, compared to bare slope (CK). Installation height exhibited an extremely significant positive correlation ($p \leq 0.01$) with slope runoff rate, sediment yield rate, sediment concentration, runoff volume, and cumulative sediment yield. 2) Concentrated flow along the lower panel edge caused rill erosion beneath the panels parallel to the panel edge. At a tilt angle of 35°, rill width was minimized (2.70 cm), with the lowest runoff volume and cumulative sediment yield. 3) The arrangement modes influenced the morphology of erosion rills. Lateral arrangements (L) resulted in numerous but small rills, whereas under vertical arrangements (V), individual rills had greater erosion area and volume. 4) Gravel or turf mats at the lower edge of PV panels effectively controlled erosion. Compared to PV-covered slopes without protective measures, gravel reduced runoff volume and cumulative sediment by 2.3% and 31.5%, respectively, while turf mats decreased them by 14.4% and 74.4%. [Conclusion] PV panel coverage effectively reduces runoff and sediment yield, but may induce rill erosion beneath panels by concentrated flow. Protective measures such as gravel or turf mats successfully prevent rill development. The optimal PV panel configuration that minimizes sediment yield is the lateral arrangement with 0.4 m installation height and 35° tilt angle. These findings offer valuable insights for soil and water conservation in PV farms.

Keywords: photovoltaic panel configuration; runoff; sediment yield; rill erosion; protective measures

Received: 2025-08-05

Revised: 2025-09-28

Accepted: 2025-10-15

Online(www.cnki.net): 2025-11-03

全球光伏产业迅猛扩张,2019年太阳能光伏累计装机容量已达602 GW(中国占205 GW),预计未来中国光伏装机容量的年新增规模将稳定在40 GW^[1-2]。然而,大规模电站建设加剧土地资源竞争,一方面,光伏电站作为新型土地利用方式会挤压农田用地;另一方面,光伏电站可以推动沙地、丘陵等生态脆弱区开发^[3-4]。在此背景下,“应用农业光伏系统”通过作物与光伏设施立体布局,成为协调耕地保护与能源生产的关键路径^[5-6]。该农光结合模式既有助于缓解作物抗旱压力,提升作物产量,又能生产清洁能源减少碳排放,还能利用其生产的能源反哺农业灌溉、大棚调温等^[7]。光伏电站在干旱区表现出显著生态效益,一方面,由于光伏板具备防风功能,可有效降低风速,从而减轻风蚀作用,抑制沙尘暴^[8-9];另一方面,光伏板表面具有集水效应,有助于生物结皮以及植被生长^[10-11]。基于此,既可将光伏电站区域作为生物结皮苗圃^[12],还能利用光伏电站的集水效应加速干旱地区生态系统修复。

然而,光伏板在一些区域引发新风险。光伏板的“雨伞效应”导致降雨再分配^[13],光伏板下边缘汇集雨滴到达坡面的动能可能达到自然降雨雨滴动能的10倍^[14],诱发板下集流侵蚀细沟,加剧侵蚀^[15]。此过程在暴雨加剧及坡度 $>5^\circ$ 的坡耕地中尤为突出。根据预测,未来大部分地区降雨强度增加,并且光伏电站可调节局部气候增加降水^[16-17],光伏电站区域水蚀风险不断上升。气候条件的变化导致即便在非典型易侵蚀区布设光伏电站也面临坡面水蚀加剧的风

险。据统计^[18],全国适宜建设大型光伏电站的山地中,坡度 $3^\circ \sim 20^\circ$ 的区域占比28%,其中丘陵地区因降水量相对较大、水文连通性较强土壤水蚀问题更为突出^[16,19]。根据实地调查,安装在黄土高原地区内的光伏板下边缘存在明显的板下集流线形侵蚀细沟,而形成这种线形侵蚀细沟的原因是光伏板对降水的时空再分配。光伏板对降水时空再分配过程又受到光伏板配置参数的影响^[20-21]。光伏板倾角通过控制雨滴入射方向影响雨滴对板下集流侵蚀细沟的侧向侵蚀,而安装高度决定雨滴势能,改变坡面雨滴溅蚀能量^[14,22-23],影响雨滴剥离土壤颗粒。光伏板的布设方向(长边垂直/平行坡向)则影响板下集流侵蚀细沟的空间格局^[24],而板下集流侵蚀细沟则间接影响坡面的产流产沙。因此,光伏板的这3项配置是调控侵蚀的核心参数。尽管有研究^[25-28]证明生物结皮和板间植草、石砾覆盖等措施可局部减蚀,但当前实践忽视配置参数的源头优化。

本研究聚焦于光伏板对降雨的截留过程,分析光伏板高度、倾角及排列方式对下边缘区域侵蚀程度的影响,探讨降水再分配作用下坡面径流的变化特征,并揭示不同配置条件下光伏板对产流与产沙过程的作用机制,旨在为相关政策制定者提供科学依据,指导光伏电站区域水土保持措施的优化实施,促进光伏产业可持续发展。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

本试验所用土壤采自陕西省黄土高原南部杨凌

区(34°14'~34°20'N, 107°59'~108°08'E)耕地表层土壤。杨凌区位于黄土高原向秦岭山地过渡的中间地带,海拔 468 m。该地区属半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 12.9℃,年平均降水量为 635~646 mm,其中 7—9 月的降水量占全年总量的 60% 以上^[29]。区域内主要土壤类型为壤土和黄绵土,分别占土壤总面积的 71.7% 和 10.8%,本研究选用壤土作为试验用土。根据国际制分类体系,质地为壤土黏壤土,结构较为稳定,pH 呈微碱性,体积质量为 1.1~1.3 g/cm³^[30]。

1.2 试验装置及试验程序

在水土保持与荒漠化整治全国重点实验室进行人工模拟降雨试验,试验采用下喷式人工降雨机(均匀性>80%,强度可调范围 30~350 mm/h)和液压升降式可调坡土槽(2.0 m×1.0 m×0.4 m)。土槽底部设排水孔,上方配备高度、倾角可调的光伏板支架,布置 4 块光伏板(57 m×48 m×2.5 cm)模拟截留与再分配效应(图 1)。正式试验前,需对降雨强度进行率定,确保满足设定要求后方可开始模拟降雨。

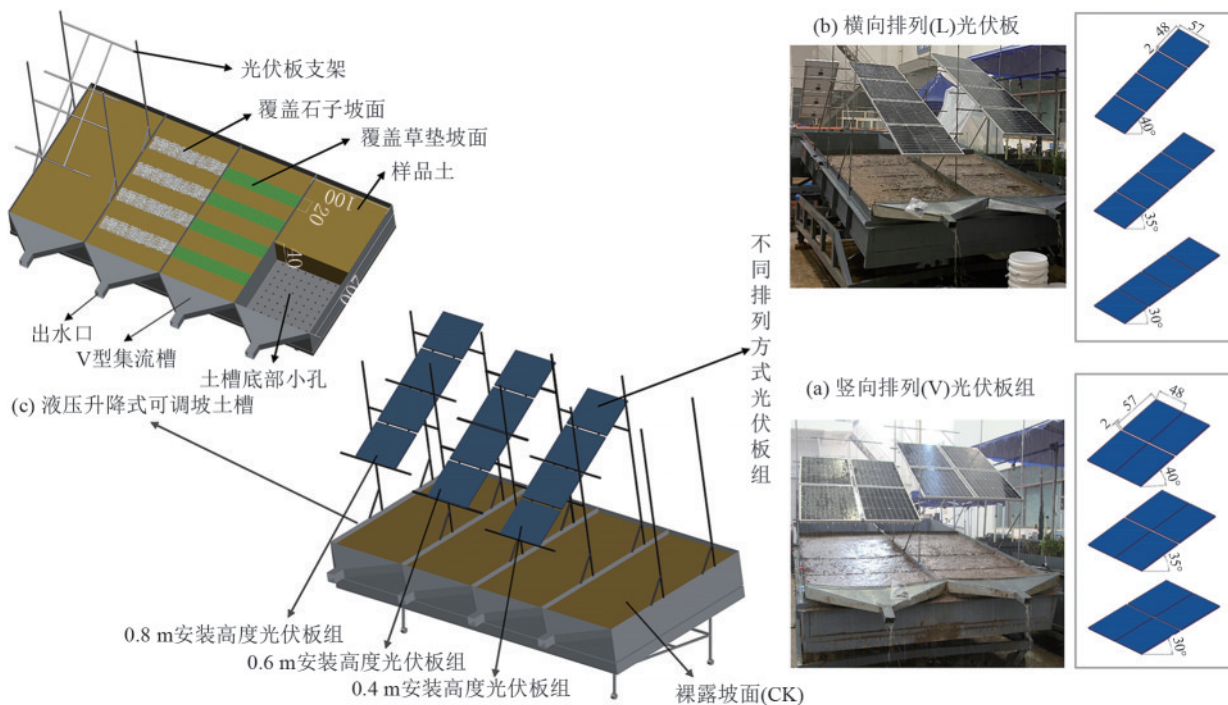


图 1 试验土槽布设示意

Fig.1 Schematic diagrams of experimental soil flume setup

试验土壤经自然风干后过 10 mm 孔径筛网筛去除杂质,采用分层填装法(6层×0.05 m)制备土槽,层间打毛处理并压实边缘以消除界面和边界效应。表面覆盖纱布后,以 20 mm/h 雨强预降雨至近饱和状态,静置 24 h 后开始试验。

试验采用 3 因素完全组合方案:光伏板配置包括光伏板倾角(30°、35°、40°),安装高度(0.4、0.6、0.8 m)及排列方式(光伏板长边与坡向垂直定义为横向排列 L,光伏板长边与坡向平行则定义为竖向排列 V)(图 1)。5°~11.3°是普遍接收的光伏板安装坡度范围^[18,23,31],而实地调查发现山地光伏电站的常见坡度为 10°,因此设置坡度为 10°,并设定 80 mm/h 雨强,代表暴雨条件^[29]。以裸露坡面(CK)为对照,每组重复 2 次(表 1)。针对侵蚀严重的典型光伏板配置,根据 YAVARI 等^[27]提到的光伏电站管理方法增设 20 cm 宽、厚度 1 cm 的草垫和石子覆盖 2 种地表防护措施,

依据板下集流侵蚀细沟间的间距设置防护措施,间隔为 50 cm。

1.3 样品采集与处理

降雨开始后前 10 min 内,每分钟使用塑料桶收集 1 次径流样品,10~25 min,每 3 min 收集 1 次,25 min 后每 5 min 收集 1 次。使用精度为 1 mm 的钢尺测量板下集流侵蚀细沟的长度、宽度和深度。降雨结束后,对所采集的全部径流样品进行称重,随后静置 48 h,待泥沙充分沉降后去除上清液,将底部沉积物转移至烘箱中,烘干至恒重后称重,以获取产沙量等相关参数。利用摄影测量技术,拍摄板下集流侵蚀细沟的影像,随后使用 metashape 1.7.4 软件对影像图进行建模,并测量板下集流侵蚀细沟的面积和体积。

1.4 统计分析

使用 Excel 2019 软件对数据进行基本计算与汇

总。利用 SPSS 25 软件对光伏板高度、倾角和排列方式与板下集流侵蚀细沟的形态特征、坡面水沙调控

指标间的关系进行 Pearson 相关性分析。最后,采用 Origin 2021 软件进行图形绘制。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

序号	光伏板排列情况	倾角/(°)	高度/m	水土保持措施	降雨次数
第 1 组	无光伏板(CK)	—	—	无措施	2
	光伏板横向排列	30	0.4	无措施	2
	光伏板横向排列	30	0.6	无措施	2
	光伏板横向排列	30	0.8	无措施	2
第 2 组	无光伏板(CK)	—	—	无措施	2
	光伏板横向排列	35	0.4	无措施	2
	光伏板横向排列	35	0.6	无措施	2
	光伏板横向排列	35	0.8	无措施	2
第 3 组	无光伏板(CK)	—	—	无措施	2
	光伏板横向排列	40	0.4	无措施	2
	光伏板横向排列	40	0.6	无措施	2
	光伏板横向排列	40	0.8	无措施	2
第 4 组	无光伏板(CK)	—	—	无措施	2
	光伏板竖向排列	30	0.4	无措施	2
	光伏板竖向排列	30	0.6	无措施	2
	光伏板竖向排列	30	0.8	无措施	2
第 5 组	无光伏板(CK)	—	—	无措施	2
	光伏板竖向排列	35	0.4	无措施	2
	光伏板竖向排列	35	0.6	无措施	2
	光伏板竖向排列	35	0.8	无措施	2
第 6 组	无光伏板(CK)	—	—	无措施	2
	光伏板竖向排列	40	0.4	无措施	2
	光伏板竖向排列	40	0.6	无措施	2
	光伏板竖向排列	40	0.8	无措施	2
第 7 组	光伏板横向排列	30	0.8	添加石子	2
	光伏板横向排列	30	0.8	添加草垫	2
合计					52

2 结果与分析

2.1 板下集流侵蚀细沟特征

试验结果表明,光伏板覆盖导致沿光伏板下边缘形成平行于板缘的线形侵蚀,即板下集流侵蚀细沟。其形态特征受光伏板排列方式、安装高度和倾角等影响。横向排列时,形成 4 条板下集流侵蚀细沟(自上而下依次为 G_{L1} 、 G_{L2} 、 G_{L3} 、 G_{L4})、长度为 0.43~0.60 m;而竖向排列时,仅形成 2 条长度为 1 m 的板下集流侵蚀细沟(G_{V1} 、 G_{V2})(图 2)。由表 2 可知,随安装高度由 0.4 增至 0.8 m,板下集流侵蚀细沟的宽度、深度和体积呈递增趋势。板下集流侵

蚀细沟体积分别为 287.67(0.4 m)、446.75(0.6 m)、583.49 cm^3 (0.8 m)(图 3b)。与 30°和 40°倾角相比,倾角 35°时板下集流侵蚀细沟平均宽度最小(2.70 cm)。板下集流侵蚀细沟面积在光伏板倾角为 35°时最小,平均值为 591.59 cm^2 ,与倾角为 30°和 40°相比面积分别减少 21.9% 和 16.1%(图 3a)。

2.2 光伏板在不同配置条件下产流产沙特征

2.2.1 光伏板不同配置条件下径流特征 不同配置条件下坡面径流率变化趋势相似,均呈初期率迅速上升至峰值后趋于稳定的特征(图 4)。裸露坡面的径流率最高,平均值为 1.71 L/min。光伏板覆

盖可降低径流率,且降幅受安装高度影响。当安装高度为 0.4 m 时,坡面径流率最低,平均值为 1.24 L/min,较裸露坡面下降 27.5%。安装高度为 0.6、0.8 m 时,径流率分别为 1.49、1.35 L/min,降幅分别达到 12.9% 和 21.1%。由表 3 可知,裸露坡面平均径流量(103.86 L)高于光伏板覆盖坡面,且光

伏板覆盖坡面径流量较裸露坡面的降幅为 3.3%~26.8%。其中,安装高度为 0.4 m 时,坡面平均径流量最低(82.04 L),较裸露坡面减少 11.1%~26.8%。35°倾角下的平均径流量最小(83.03 L),较 30°和 40°倾角分别减少 2.5%~20.5%和 0.4%~21.1%。



注:图中倾角均为 40°;G_{1.1}为横向排列的第 1 条侵蚀沟;G_{1.2}为横向排列的第 2 条侵蚀沟;G_{1.3}为横向排列的第 3 条侵蚀沟;G_{1.4}为横向排列的第 4 条侵蚀沟;G_{v1}为竖向排列的第 1 条侵蚀沟;G_{v2}为竖向排列的第 2 条侵蚀沟。

图 2 光伏板倾角 40°时板下集流侵蚀细沟

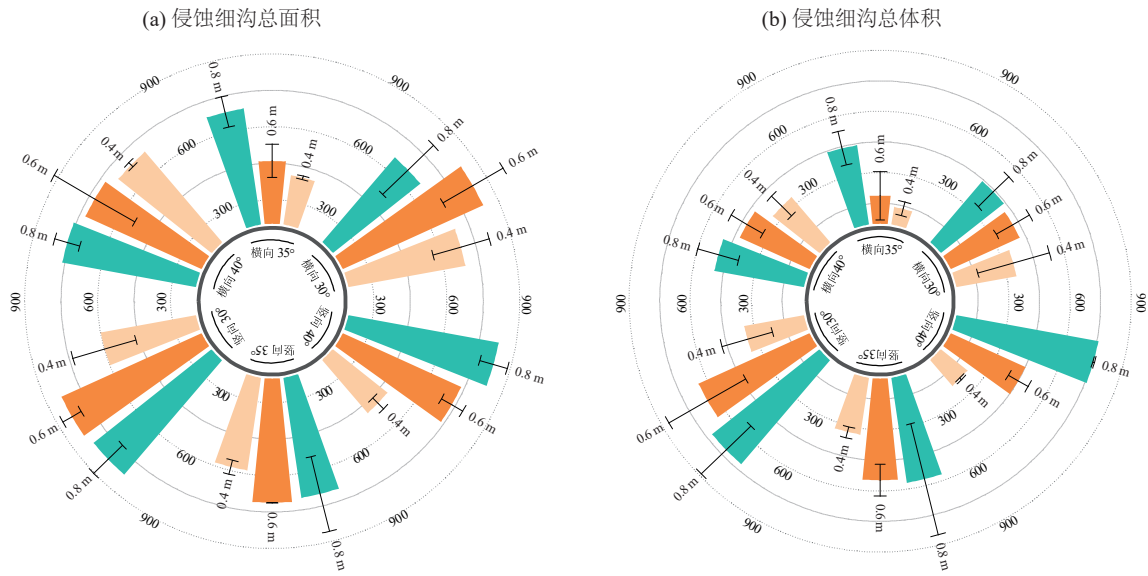
Fig.2 Concentrated flow erosion rills beneath PV panels with tilt angle of 40°

表 2 光伏板不同配置条件下板下集流侵蚀细沟宽度和深度

Table 2 Width and depth of concentrated flow erosion rills beneath PV panels under different panel configurations

排列方式	倾角/(°)	细沟宽度/cm			细沟深度/cm		
		0.4 m	0.6 m	0.8 m	0.4 m	0.6 m	0.8 m
横向排列	30	2.73±0.22	3.13±0.22	4.21±0.22	1.62±0.12	1.63±0.12	1.81±0.12
	35	2.25±0.26	2.33±0.26	2.73±0.26	1.494±0.15	1.91±0.15	1.86±0.15
	40	2.96±0.26	2.80±0.26	2.99±0.26	1.39±0.15	1.48±0.15	1.52±0.15
竖向排列	30	2.93±0.37	4.53±0.37	4.15±0.37	1.87±0.21	1.83±0.21	1.91±0.21
	35	2.59±0.31	3.09±0.31	3.20±0.31	1.34±0.17	1.53±0.17	1.84±0.17
	40	2.81±0.37	3.65±0.37	3.16±0.37	1.44±0.21	1.50±0.21	2.44±0.21

注:表中数据为平均值±标准差。下同。



注:总面积单位为 cm^2 ;总体积单位为 cm^3 。

图 3 光伏板不同配置条件下板下集流侵蚀细沟面积和体积

Fig.3 Area and volume of concentrated flow erosion rills beneath PV panels under different panel configurations

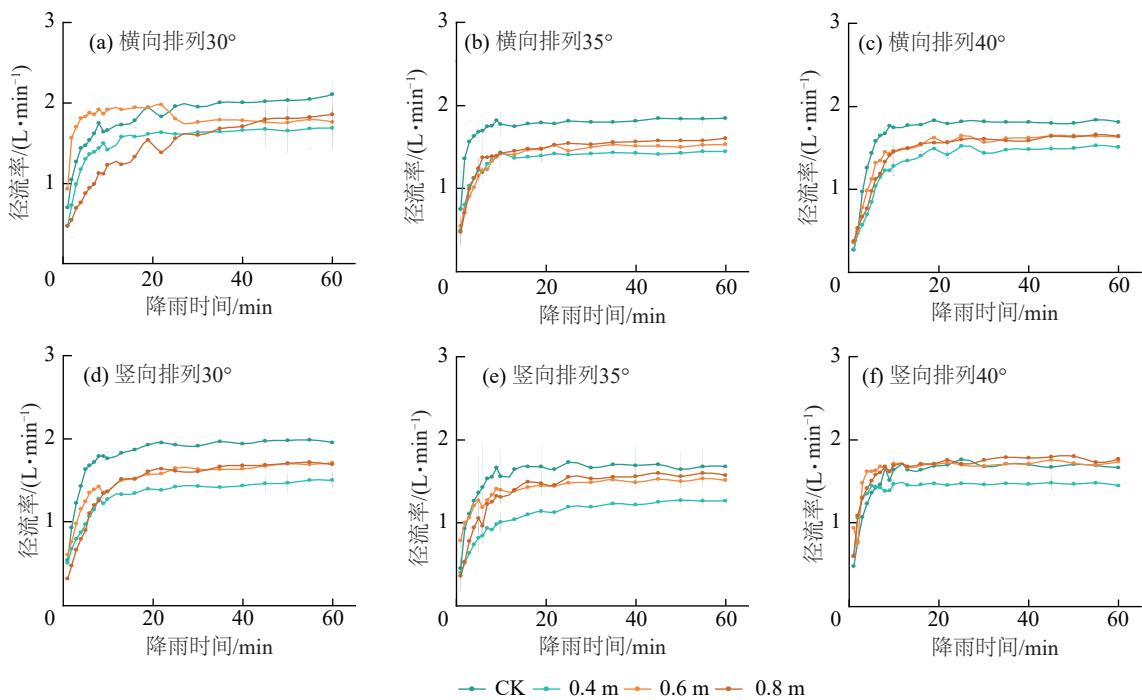


图 4 不同光伏板配置下坡面径流率随降雨时间的变化

Fig.4 Variations in slope runoff rate with rainfall duration under different PV panel configurations

表 3 光伏板不同配置条件下坡面径流量平均值

Table 3 Mean slope runoff volume under different PV panel configurations

排列方式	倾角/ $^{\circ}$	坡面径流量/L			裸露坡面
		0.4 m	0.6 m	0.8 m	
横向排列	30	90.99±15.07	108.09±2.94	91.22±2.03	112.66±3.76
	35	82.36±1.83	85.96±4.04	88.92±1.45	106.48±6.27
	40	81.77±3.43	90.55±1.60	89.32±5.04	102.64±2.20
竖向排列	30	82.95±7.81	94.8±1.03	94.62±2.71	113.36±1.03
	35	67.99±1.03	86.25±6.49	86.68±7.62	91.19±17.70
	40	86.15±3.44	100.13±3.68	101.81±1.51	96.89±3.49

2.2.2 光伏板不同配置条件下产沙速率变化特征
产沙速率在降雨前 10 min 内迅速达到峰值,随后逐渐下降趋于稳定(图 5)。裸露坡面的产沙速率最高,并且随高度增加呈上升趋势。裸露坡面产沙速率峰值为 0.44 g/s,而 0.4、0.6、0.8 m 安装高度的坡面产沙速率峰值依次为 0.18、0.28、0.31 g/s。当安装高度为 0.4 m 时,坡面的平均产沙速率最低(0.11 g/s),较裸露坡面降低近 60%。由表 4 可知,裸露坡面的累计泥

沙量最大,平均值达 729.03 g;而光伏板覆盖坡面的泥沙量较裸露坡面的下降幅度最高达到 56.6%。安装高度为 0.4 m 的坡面累计泥沙量最低(391.54 g),较裸露坡面减少 37.8%~56.6%。排列方式方面对泥沙量影响较小,横向排列与竖向排列坡面的平均累计泥沙量分别为 608.67、619.52 g。当光伏板倾角为 35°时,坡面的累计泥沙量最小,相较于 30°减少 10.1%~47.5%,较 40°减少 4.7%~35.4%。

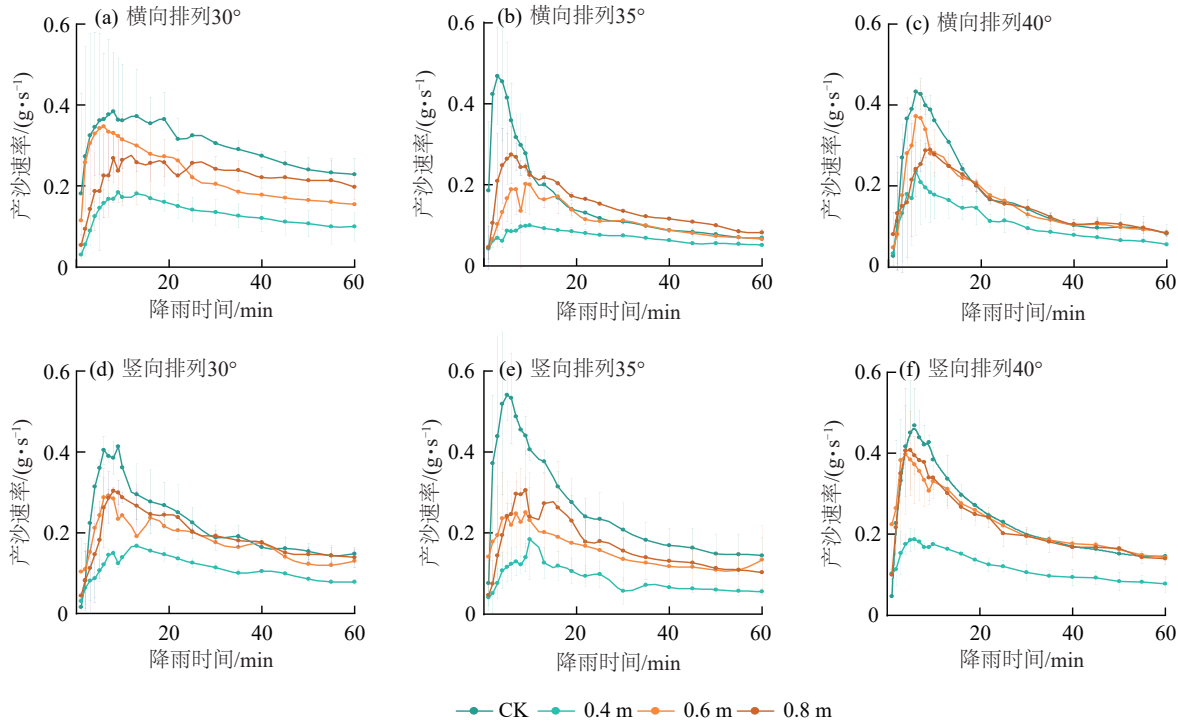


图 5 不同光伏板配置坡面产沙速率随降雨时间的变化

Fig.5 Variations in sediment yield rate with rainfall duration under different PV panel configurations

表 4 光伏板不同配置条件下坡面累积泥沙量平均值

Table 4 Mean cumulative sediment yield under different PV panel configurations

排列方式	倾角/(°)	坡面累积泥沙量/g			裸露坡面	总计
		0.4 m	0.6 m	0.8 m		
横向排列	30	475.28±75.46	790.3±68.16	813.84±88.86	824.26±193.69	608.67±188.95
	35	249.72±14.99	392.58±33.21	515.76±15.47	515.78±15.47	
	40	386.73±65.43	557.67±52.14	541.33±54.6	621.79±16.54	
竖向排列	30	416.2±24.38	656.93±57.04	694.51±6.15	750.92±93.37	619.52±166.61
	35	301.08±50.52	590.35±146.73	616.86±112.65	694.14±107.70	
	40	412.06±23.95	794.64±54.64	774.12±32.96	858.11±92.89	
总计		391.54±90.38	669.24±151.88	686.39±131.31	729.03±157.18	—

2.2.3 产流与产沙关系特征
径流含沙量在降雨开始后的前 10 min 内迅速上升至峰值,随后逐渐降低并趋于稳定,整体呈一致的动态变化趋势(图 6)。光伏板覆盖有效降低径流含沙量,且不同配置参数对含沙量的影响存在一定差异。裸露坡面的径流含沙量峰值最高,达到 18.3 g/L。光伏板覆盖条件下径流含沙量峰值随安装高度增加呈梯度

上升,0.4 m(9.7 g/L)<0.6 m(12.2 g/L)<0.8 m(14.4 g/L)。30°、35°和 40°倾角对应的径流含沙量峰值分别为 11.4、11.0、14.1 g/L。安装高度为 0.4 m 时平均含沙量最低(5.96 g/L),较裸露坡面(9.98 g/L)降低 40.3%;0.6、0.8 m 高度下的平均含沙量分别为 8.38、9.12 g/L,与裸露坡面相比分别减少 16.0%和 8.6%。

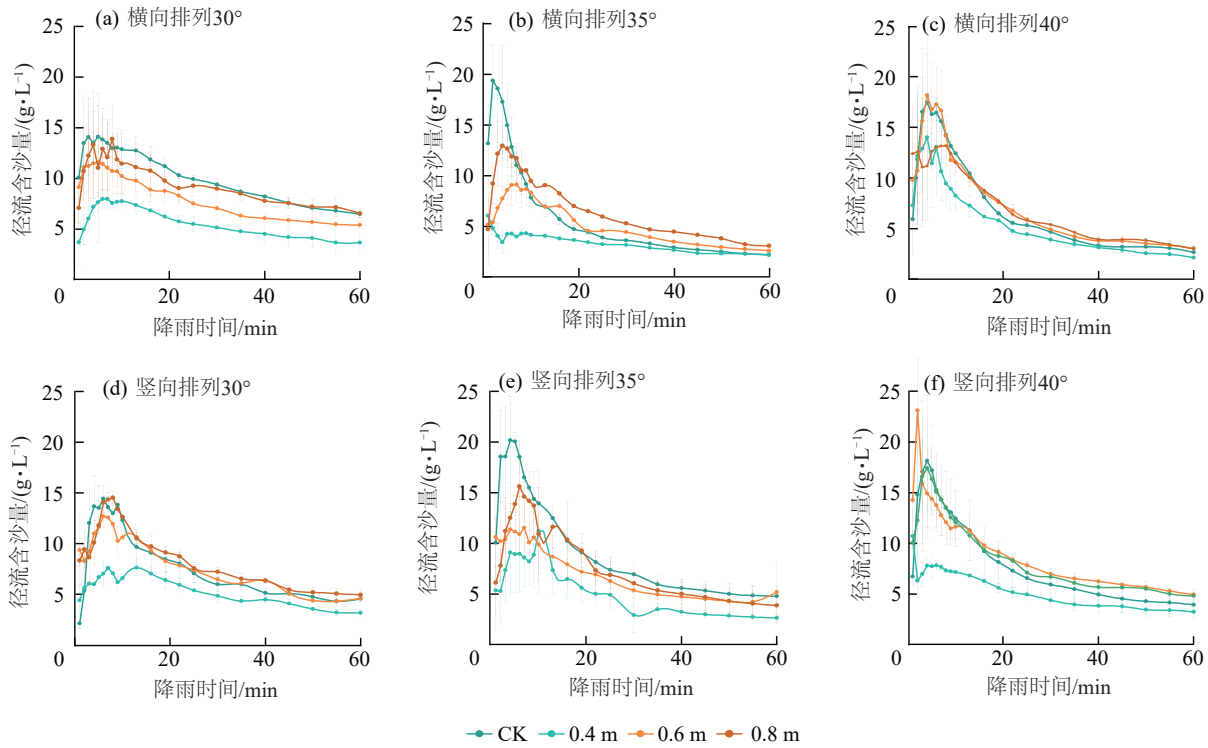


图 6 径流含沙量随降雨时间变化

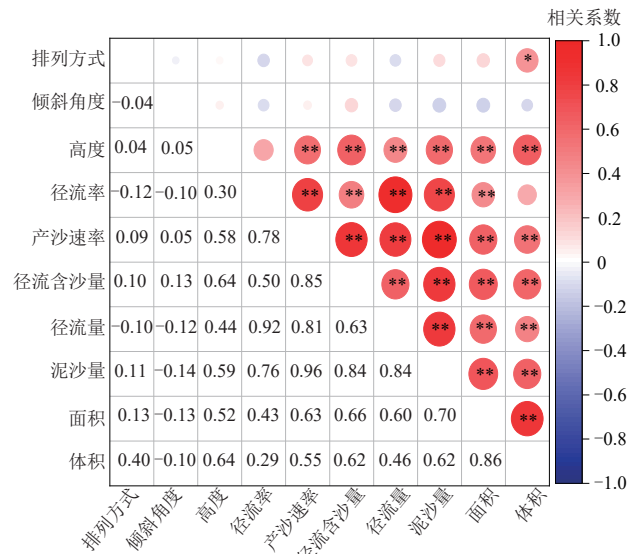
Fig.6 Variations in runoff sediment concentration over time

2.2.4 光伏板配置与径流泥沙的相关性 将光伏板不同配置(高度、倾角、排列方式)与坡面产流产沙相关指标进行相关性分析表明,光伏板安装高度与径流率、产沙速率和径流含沙量呈极显著正相关($p \leq 0.01$),同时与径流量和累计泥沙量也呈显著正相关($p \leq 0.01$)。相比之下,光伏板的排列方式和倾角与上述产流产沙指标无显著相关性。在板下集流侵蚀细沟发育方面,光伏板安装高度与板下集流侵蚀细沟面积及体积存在极显著的正相关($p \leq 0.01$),而光伏板排列方式影响着单条板下集流侵蚀细沟体积,竖向排列坡面的单条板下集流侵蚀细沟面积大于横向排列(图 7)。

2.3 光伏板下缘线形侵蚀的地表防护措施减流减沙效益

本研究选取侵蚀风险最高的光伏板配置(横向排列、0.8 m 安装高度、30°倾角)作为防护措施试验对象。试验结果表明,添加石子带和草垫带对径流率的调控效果有限,但与未防护坡面相比仍有所改善(图 8)。2 种措施在抑制泥沙输出方面表现出显著成效。石子将平均产沙速率降至 0.18 g/s,较未采取措施的坡面降低 14.9%,较裸露坡面降低 38.6%;草垫将平均产沙速率降至 0.12 g/s,较未采取措施的坡面降低 45.3%,较裸露坡面降低 60.5%。铺设石子坡面

径流含沙率较未采取措施的坡面和裸露坡面分别降低 16.7% 和 25.2%;铺设草垫坡面的径流含沙量分别降低 37.6% 和 44.0%。结合表 5 分析发现,铺设石子带的坡面与无措施坡面相比,径流量和累计泥沙量分别减少 2.3%、31.5%;而铺设草垫带则分别减少 14.4%、74.4%。



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$ 。

图 7 光伏板配置与坡面水沙调控指标、板下集流侵蚀细沟面积和体积的相关性

Fig.7 Correlations of PV panel configuration with slope water-sediment regulation indicators and concentrated flow erosion rill area and volume beneath panels

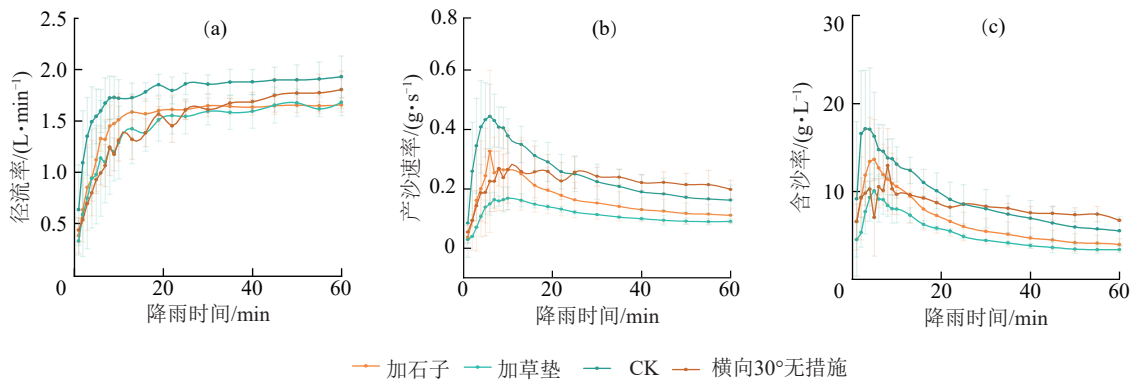


图8 坡面添加措施后径流率、产沙速率和径流含沙量随降雨时间变化

Fig.8 Variations in runoff rate, sediment yield rate, and sediment concentration over time after applying conservation measures to slopes

表5 不同措施下坡面径流量、累计泥沙量平均值

Table 5 Mean runoff volume and cumulative sediment yield under different measures

坡面措施	累计泥沙量/g	径流量/L
裸露坡面	950.85±156.54	104.78±9.58
无措施坡面	751.95±28.98	93.93±4.01
铺设石子	514.79±190.14	91.73±9.85
铺设草垫	193.97±103.32	80.37±14.30

3 讨论

3.1 光伏板配置对产流产沙及板下集流侵蚀细沟的影响

与 ARMENISE 等^[32]的研究结果一致,光伏板下方形成的局部微环境有助于雨水滞留与入渗,进而减少地表径流生成。在侵蚀方面,光伏板覆盖减少雨滴对坡面的直接击溅^[15],抑制局部泥沙的产生。但光伏板截留雨滴通过板间缝隙集中下落并击打坡面^[28],促进板下集流侵蚀细沟的发育和土壤颗粒剥离^[33]。安装高度是影响侵蚀的重要因素,较高的安装高度条件下,雨滴动能增大导致板下集流侵蚀细沟加深扩容,蓄水与溢流冲刷能力增强,泥沙输出量上升。此时,光伏板对侵蚀的促进作用(如下缘溅蚀与板下集流侵蚀细沟冲刷)与抑制作用(如遮蔽区溅蚀减少)相互抵消,最终安装高度较高的坡面产沙速率与裸露坡面差异较小。而较低安装高度条件下,光伏板对侵蚀的抑制作用仍占主导地位,整体表现为产沙量降低。光伏板倾角的变化可改变雨滴下落路径与坡面间的夹角,该夹角随倾角增大而略有减小^[34]。因此,当倾角较大时(如40°),雨滴对板下集流侵蚀细沟沟壁的切向力较强,容易引发沟壁侧向冲刷,促进板下集流侵蚀细沟宽度增加。倾角较小时(如30°),雨滴近乎垂直下落,沟底的下切作用增强,侵蚀深度增加,同时板下集流侵蚀细沟的蓄水能力增强。当积水溢出时,冲刷沟壁^[35],进而导致板下集流侵蚀细沟宽度扩大。因此,本次试验中35°倾角表现出相对较弱的侵蚀效应。

3.2 水土保持措施对不同配置光伏板覆盖坡面的减

流减沙效果

在光伏板下边缘区域铺设石子和草垫能够有效控制坡面侵蚀,其中草垫的减沙效果优于石子,与 WANG 等^[36]研究结果一致。石子和草垫的作用机制类似于跌水消能池,即通过吸收雨滴动能,降低雨滴汇集对坡面的冲击能量,从而减少光伏板集流对坡面土壤的剥离,实现减沙控蚀的目的^[22]。布设措施可能打乱地表径流路径,减少泥沙输移,而石子持水效果不如草垫,所以草垫表现出更优越的水土保持性能。

4 结论

光伏板覆盖可有效减少坡面径流量及泥沙输出,较裸露坡面最大降幅分别达到26.8%和56.6%。排列方式对板下集流侵蚀细沟有影响。横向排列时单条板下集流侵蚀细沟面积和体积均小于竖向排列时。

1)光伏板的倾角控制板下集流侵蚀细沟的宽度。35°倾角条件下,板下集流侵蚀细沟的宽度最小(2.70 cm)。同时,倾角为35°的坡面径流量较30°与40°分别减少2.5%~20.5%和0.4%~21.1%;累计泥沙量降低10.1%~47.5%和4.7%~35.4%。

2)光伏板的安装高度与产流产沙均呈极显著正相关($p \leq 0.01$)。其中,安装高度为0.4 m时,径流率、产沙速率及径流含沙量较裸露坡面分别降低约27.5%、60.0%、40.3%;径流量(82.04 L)、累计泥沙量(391.54 g)分别减少11.1%~26.8%与37.8%~56.6%。安装高度为0.4 m时,板下集流侵蚀细沟的尺寸最小,平均宽度和深度分别为2.71、1.53 cm。

3)防护措施可防止板下集流侵蚀细沟的发育,降低坡面产沙量。与光伏板覆盖且无防护措施的坡面相比,铺设石子坡面径流量和累计泥沙量分别减少2.3%、31.5%,铺设草皮分别减少14.4%、74.4%。

5 研究展望

从水土保持效益的角度出发,在本次试验设计的配置中横向排列、安装高度为0.4 m、倾角为35°的光伏板可减少径流和泥沙输出。然而,光伏板的配置也影

响发电效能,即横向排列的光伏板在积雪非均匀覆盖时功率损耗更少^[37]。现有研究^[38-42]表明,光伏板的最佳倾角与光伏安装区域的纬度相关,光伏板最佳倾角范围普遍为 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。光伏板安装高度可通过影响光伏组件温度而影响光伏发电量。光伏板安装高度较高时,下方气流可冷却光伏组件温度,提高输出功率^[43],同时也加剧光伏板边缘局部侵蚀,该矛盾在山地、耕地等易侵蚀区域尤为突出。光伏板排列方式与倾角可通过优化设计最大限度实现发电能效与水土保持的协同提升,但仍需要进一步深入研究找到光伏板安装高度在发电效率与水土保持间的平衡点。在光伏电站建设过程中,也应结合具体地形与降雨特征,科学优化光伏板布局,并配套实施有效的地表防护措施,从而实现光伏发电与生态保护的协同发展。

参考文献:

- [1] ANDRE T. Renewables 2020 global status report [M/OL]. Paris: REN212020 [2025-07-30]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=105m02804d7c0v50cn120gj074340276>.
- [2] DONG H, ZENG B, WANG Y, et al. China's solar subsidy policy: Government funding yields to open markets [J]. *Ieee Power and Energy Magazine*, 2020, 18(3): 49-60.
- [3] MOSCATELLI M C, MARABOTTINI R, MASSACESI L, et al. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in central Italy coastal area [J]. *Geoderma Regional*, 2022, 29: e00500.
- [4] HERNANDEZ R R, HOFFACKER M K, MURPHY-MARISCAL M L, et al. Solar energy development impacts on land cover change and protected areas [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(44): 13579-13584.
- [5] ADEH E H, GOOD S P, CALAF M, et al. Solar PV power potential is greatest over croplands [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): e11442.
- [6] KANNENBERG S A, STURCHIO M A, VENTURAS M D, et al. Grassland carbon-water cycling is minimally impacted by a photovoltaic array [J]. *Communications Earth and Environment*, 2023, 4: e238.
- [7] 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: 848-855.
- [8] CHEN X J, JIA L Q, JIA T, et al. An industrial chain of desert-photovoltaic power generation-ecological agriculture and animal husbandry-carbon neutrality: Practice from the Ulan Buh Desert, Dengkou County, Inner Mongolia [J]. *China Geology*, 2022, 5(3): 549-552.
- [9] XIA Z L, LI Y J, ZHANG W, et al. Solar photovoltaic program helps turn deserts green in China: Evidence from satellite monitoring [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: e116338.
- [10] CHANG Z F, LIU S Z, FU J, 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): e012032.
- [11] LUO L H, ZHUANG Y L, LIU H, et al. Environmental impacts of photovoltaic power plants in northwest China [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 56: e103120.
- [12] HEREDIA-VELÁSQUEZ A M, GIRALDO-SILVA A, NELSON C, et al. Dual use of solar power plants as biocrust nurseries for large-scale arid soil restoration [J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 955-964.
- [13] JAHANFAR A, DRAKE J, SLEEP B, et al. Evaluating the shading effect of photovoltaic panels on green roof discharge reduction and plant growth [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 919-928.
- [14] COOK L M, MCCUEN R H. Hydrologic response of solar farms [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(5): 536-541.
- [15] VERHEIJEN F G A, BASTOS A C. Discussion: Avoid severe (future) soil erosion from agrivoltaics [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 873: e162249.
- [16] BORRELLI P, BALLABIO C, YANG J E, et al. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion [J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): e406.
- [17] LI Y, KALNAY E, MOTESHARREI S, et al. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation [J]. *Science*, 2018, 361(6406): 1019-1022.
- [18] YANG Q, HUANG T Y, WANG S G, et al. A GIS-based high spatial resolution assessment of large-scale PV generation potential in China [J]. *Applied Energy*, 2019, 247: 254-269.
- [19] FENG Q L, NIU B W, REN Y, et al. A 10-m national-scale map of ground-mounted photovoltaic power stations in China of 2020 [J]. *Scientific Data*, 2024, 11(1): e198.
- [20] JACKSON N A. Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100(4): 323-336.
- [21] 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.
- [22] 张宝军, 吴汉, 熊东红, 等. 干热河谷冲沟沟头跌水消能减蚀措施效益试验初探 [J]. *中国水土保持*, 2020(7): 32-35.
- [22] ZHANG B J, WU H, XIONG D H, et al. The benefit of measures of energy dissipation and erosion reduction

- by falling water in gully head of dry hot valley [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(7):32-35.
- [23] WANG F, GAO J H. How a photovoltaic panel impacts rainfall-runoff and soil erosion processes on slopes at the plot scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: e129522.
- [24] BAIAMONTE G, GRISTINA L, PALERMO S. Impact of solar panels on runoff generation process [J]. *Hydrological Processes*, 2023, 37(12): e15053.
- [25] LIU Y, ZHANG R Q, MA X R, et al. Combined ecological and economic benefits of the solar photovoltaic industry in arid sandy ecosystems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: e121376.
- [26] ULDRIJAN D, KOVÁČIKOVÁ M, JAKIMIUK A, et al. Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 168: e106274.
- [27] YAVARI R, ZALIWCIV D, CIBIN R, et al. Minimizing environmental impacts of solar farms: A review of current science on landscape hydrology and guidance on stormwater management [J]. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2022, 2(3): e032002.
- [28] LI S Y, QU S M, ZHANG D M, et al. Ecological impact of rain splash erosion on saline-alkali grassland surfaces under photovoltaic panels [J]. *Catena*, 2025, 254: e108988.
- [29] 陈科兵, 吴发启, 姚冲. 黄土高原南部地区人工模拟暴雨条件下不同坡度谷子坡耕地产流产沙过程 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 90-95.
CHEN K B, WU F Q, YAO C. Runoff and sediment yield processes in millet cultivated land with different slopes under artificial simulated rainstorm in the southern Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 90-95.
- [30] 李瑞栋, 王文龙, 姜义宝, 等. 模拟降雨条件下砾石含量对壤土工程堆积体坡面产流产沙的影响 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 3027-3036.
LI R D, WANG W L, LOU Y B, et al. Effects of gravel content on runoff and sediment yield on Lou soil engineering accumulation slopes under simulated rainfall conditions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11): 3027-3036.
- [31] KIM H G, PARK C Y. Landslide susceptibility analysis of photovoltaic power stations in Gangwon-do, Republic of Korea [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, 12(1): 2328-2351.
- [32] ARMENISE E, SIMMONS R W, AHN S, et al. Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 211-219.
- [33] 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.
- [34] 康宏亮. 黄土塬区草地沟头溯源侵蚀过程及形态演化机制模拟研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
KANG H L. Simulation study on gully head erosion processes and morphological evolution mechanisms on grassland in the Loess tableland region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [35] 温云浩, 刘铁军, 马林芊, 等. 东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 63-70.
WEN Y H, LIU T J, MA L Q, et al. Process of flow and sand production at cross-ridge slope land in black soil area of northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6): 63-70.
- [36] WANG C, HILL R L, BU C F, et al. Evaluation of wind erosion control practices at a photovoltaic power station within a sandy area of northwest, China [J]. *Land Degradation and Development*, 2021, 32(4): 1854-1872.
- [37] HOSSEINI S, TAHERI S, POURSMAEIL E, et al. Analysis of electrical behaviour of PV arrays covered with non-uniform snow [J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(4): 192-194.
- [38] 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 Y, ZHANG K Z, LU C Q. Calculation and analysis of optimum tilted angle for fixed photovoltaic array [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(6): 1567-1575.
- [39] MAHMOUD P H, BEHNAM M. Optimization of power system problems: Methods, algorithms and MATLAB codes [M/OL]. Cham: Springer International Publishing, 2020 [2025-07-30]. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-34050-6>.
- [40] POURGHARIBSHAHI H, ABDOLZADEH M, FADAEINEDJAD R. Verification of computational optimum tilt angles of a photovoltaic module using an experimental photovoltaic system [J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2015, 34(4): 1156-1165.
- [41] 闫欣. 西北地区地表太阳辐射估算及光伏板最佳倾角设计 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2024.
YAN X. Estimation of surface solar radiation and optimal inclination design of photovoltaic panels in northwest China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2024.
- [42] LI X, PENG J Q, LI N P, et al. Study on optimum tilt angles of photovoltaic shading systems in different climatic regions of China [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 1157-1164.
- [43] LIN C L, SHIH C H, LIN C F, et al. Study of constructions for the photovoltaic system to increase the economic efficiency of energy generation [C] // 2014 IEEE 11th International Conference on E-Business Engineering. November 5-7, 2014, Guangzhou, China. IEEE, 2014: 207-212.