DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.033 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.033
苏欣羽, 赵廷宁, 杜源, 等. 公路边坡光伏板降雨再分配效应及其对坡面水蚀的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):57-65,74.
Su Xinyu, Zhao Tingning, Du Yuan, et al. Rainfall redistribution effect of photovoltaic panels on highway slopes and its impact on hydraulic erosion of slope surfaces[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):57-65,74.

公路边坡光伏板降雨再分配效应及其对坡面水蚀的影响

苏欣羽[1], 赵廷宁[1], 杜 源[2], 苏 蓉[2], 陈学平[3],
麻文章[1], 李泽民[1], 魏晓东[1], 刘懿琴[1]
(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;
2.甘肃新发展投资集团有限公司, 兰州 730030; 3.交通运输部科学研究院, 北京 100029)

摘 要:[目的]揭示不同光伏板布设方式下道路边坡坡面水蚀强度的差异规律,为高速沿线光伏的选址、布设及水文生态效应评估提供科学依据。[方法]通过室内人工模拟降雨试验,设置20,40,60,80 mm/h共4个雨强,对比分析了单光伏板、顺坡双光伏板和无光伏板3种布设方式在坡比为1∶1.5的模拟边坡上的径流与泥沙输移过程。[结果]光伏板通过"截留—再分配"机制显著改变侵蚀过程:其不透水表面拦截降雨并在板下缘汇聚形成高能集中水流,诱发产生沿板缘走向的横向侵蚀沟,使侵蚀形态由自然坡面的均匀溅蚀和纵向切沟侵蚀转变为"横向沟壑+纵向衍生"的复合侵蚀。单板减沙效应呈雨强依赖性:20~40 mm/h下总泥沙通量较对照降低10.0%~16.7%,60~80 mm/h削减至≤3.8%,但径流总量均增加。双板在≤60 mm/h时侵蚀量与对照相近,80 mm/h时因板间"二次汇流叠加",径流与泥沙均显著增加,侵蚀风险明显加剧。[结论]不同光伏板布设方式对坡面水蚀强度的影响呈现雨强依赖性:单板布设在中小雨强下具有减蚀效应,双板布设在大雨强下具有增蚀效应;光伏板使侵蚀动能来源与侵蚀形态发生根本性转变。

关键词:光伏板; 公路路基边坡; 降雨再分配; 坡面侵蚀; 横向侵蚀沟
中图分类号:S157.1; P339 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0057-09

Rainfall redistribution effect of photovoltaic panels on highway slopes and its impact on hydraulic erosion of slope surfaces

Su Xinyu[1], Zhao Tingning[1], Du Yuan[2], Su Rong[2], Chen Xueping[3],
Ma Wenzhang[1], Li Zemin[1], Wei Xiaodong[1], Liu Yiqin[1]
(1.*School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2.*Gansu New Development Investment Group Co., Ltd., Lanzhou* 730030, *China*; 3.*China Academy of Transportation Sciences, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to explore the difference law of road slope water erosion intensity under different photovoltaic panel layout schemes, so as to support the site selection, arrangement and hydro-ecological assessment of photovoltaics along expressways. [**Methods**] Indoor artificial rainfall simulation experiments were conducted at four rainfall intensities (20, 40, 60 and 80 mm/h) to compare runoff and sediment transport processes on a simulated slope with a slope ratio of 1∶1.5 under three modes: a single PV panel, two PV panels arranged downslope in series, and no PV panel. [**Results**] PV panels significantly altered the erosion process through an "interception-redistribution" mechanism. Their impervious surfaces intercepted rainfall and concentrated high-energy flow at the lower edges, inducing lateral erosion gullies aligned with the panel edges. This transformed the erosion morphology from uniform splash erosion and longitudinal rill erosion on natural

收稿日期:2025-11-03 **修回日期:**2025-12-25 **接受日期:**2026-01-09
资助项目:甘肃省交通运输厅科研项目"甘肃交通与新能源融合发展关键技术与路径机制研究"(甘交科技函〔2022〕32号)
第一作者:苏欣羽(1998—),女,四川成都人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zzs_5270@126.com
通信作者:赵廷宁(1962—),男,河北阳原人,博士,教授,主要从事水土保持、工程绿化和恢复生态研究。E-mail:zhtning@bjfu.edu.cn

slopes to a composite mode of "lateral gully + longitudinal extension". The sediment reduction effect of the single panel layout exhibited rainfall intensity dependence: at 20—40 mm/h, total sediment flux was reduced by 10.0%—16.7% compared with the no-panel control, while at 60—80 mm/h, the reduction diminished to ≤3.8%, although total runoff increased relative to the control across all intensities. For the two panel layout, total sediment flux remained comparable to the control (differing by ≤3.4%) at ≤60 mm/h; however, at 80 mm/h, the inter-panel gap induced "secondary flow convergence", leading to significant increases in both runoff and sediment flux, with total sediment flux rising by 44.7% and erosion risk markedly exacerbated. [**Conclusion**] The impact of different PV panel layout modes on slope hydraulic erosion intensity is rainfall-intensity dependent. The single-panel layout reduces erosion under moderate to low rainfall intensities, whereas the two-panel layout increases erosion under high rainfall intensity. PV panels fundamentally alter the source of erosion energy and erosion morphology.

Keywords: photovoltaic panels; highway embankment slopes; rainfall redistribution; slope erosion; lateral erosion gullies

在全球能源结构转型与我国"双碳"战略深入推进的背景下,交通运输行业与可再生能源的融合发展已成为必然趋势。太阳能光伏凭借其分布广泛、清洁可再生的独特优势,近年来呈现爆发式增长[1]。据国际能源署统计,截至2024年底,我国的累计光伏装机容量已达892.7 GW,约占全球总容量的43%,并预计在2030年初突破3.5万亿kW·h的年光伏发电量[2]。与此同时,我国规模庞大的公路网络(公路总里程已达549.04万km,其中高速公路约19.07万km)为分布式光伏建设提供了广阔空间[3]。高速公路沿线的边坡与山区服务区边坡因其面积广阔、日照条件优越,成为"高速光伏廊道"建设的核心载体,充分利用公路网络中的闲置土地资源,实现沿线电力自发自用,降低外购电力和碳排放,兼具生态与经济双重效益[4]。

然而,分布式光伏板的建设不免会对坡面的水土流失过程产生复杂影响。一方面,光伏板的不透水板面拦截大部分降水,直接削减雨滴溅蚀的发生和地表入渗面积。溅蚀作为坡面水蚀的开端,能破坏土壤结构,增强径流分散和搬运能力。理论上讲,控制溅蚀的发生,可以有效减少坡地的水土流失,改善土壤侵蚀状况,同时提高土壤的渗透性,减少径流的产生[5-6]。但一些研究表明,光伏板建设后坡面的径流量反而增加。例如,Jahanfar等[7]在一项长期研究中比较了绿化屋顶上有无光伏板的屋顶排水量,结果表明,有光伏板的情况下,屋顶累积排水量增加了约30%,峰值排水量增加了超过50%;Pisinaras等[8]在对比了光伏电站建设前后同一片田地汇水区范围内的年地表径流量后,同样指出光伏电站建设完成后地表径流量会增加。同时,还有学者采用数值模型分析了光伏板建设前后的地表产流情况,认为光伏板建设并不会显著影响地表产流[6,8-9]。当雨强较大时,汇集水滴落地冲击力更强,可能加速地表侵蚀,长期在光伏板低缘下方形成横向侵蚀沟,导致产流产沙过程有别于常规坡面。另一方面,光伏板的倾斜面会使截留的降水在板的低缘处汇集,然后落到地表,造成降雨的空间分布不均匀[5-6,10]。当雨强达到某一阈值时,这些由于降水再分配形成的水滴落地后会产生较自然雨滴更强的冲击力,从而加速地表的侵蚀。长此以往,光伏板低缘下方的地表不可避免地形成一条与光伏板低缘走向一致的沟状侵蚀,导致坡面水土流失过程有别于常规裸露坡面。然而,在目前已发表的研究中,尚未有学者专门研究光伏板下横向侵蚀沟的形成机理及其对后续坡面产沙产流的动态效应。Wang虽然在论文中提及该现象,但并未对此进行深入探讨[5,8]。随着高速光伏产业的快速发展,深入研究边坡光伏板的水文效应,对推进沿线分布式光伏项目建设具有关键意义,这一点在我国太阳能资源主要分布的低纬度、高海拔、大气透明度好的高原地区尤为重要。这类地区通常少雨干燥或降雨集中分布于夏季,山地坡面不生或少生乔木,以耐旱耐寒低矮植被为主,土壤保持能力本就较弱。在安装光伏阵列并对降雨进行截留再分配后,有极大可能会加剧坡面降雨侵蚀的发生[7-8,10]。

因此,本研究通过人工边坡的降雨模拟试验,系统比较安装光伏板与常规坡面的水土流失过程,旨在揭示光伏板下侵蚀沟发育及其对产流产沙的影响机制,填补该方向研究空白,为高速沿线分布式光伏的选址、布设及水文生态效应评估提供科学依据。

1 试验设计

1.1 坡面构建

本试验在北京林业大学位于河北省张家口市涿鹿县(40.45°N,115.30°E)的生态修复试验基地进行,

试验设施如图1所示,主要由人工降雨模拟器、径流槽和光伏板构成。试验采用 120 cm×50 cm×20 cm(长×宽×深)的径流槽,坡度固定为33°(坡比1∶1.5),以模拟常见道路路基边坡。参照《公路路基施工技术规范》(JTG/T3610—2019)对路基填土压实度的要求,槽内填土用于模拟道路路基边坡的压实状态[11]。具体填筑过程为将过筛去除大粒杂质的砂质土壤,按目标容重 2 g/cm³计算每层(厚度 5 cm)所需填充量,采用分层填筑法分三次填入槽内,每次填筑后使用小型平板夯进行人工压实不少于6遍,直至表面平整坚实、肉眼观察无明显沉降为止。最终确保填土坡面与出流口齐平且整体均匀无明显落差,以保证产流后径流能顺利汇入接样桶。试验所用光伏板长 0.60 m、宽 0.35 m、厚 0.015 m,表面光滑,架设在径流槽之上使其倾斜角度与坡面坡度一致(33°),板面下缘距填土坡面约 0.03 m。试验选取单板与双板两种布设情形,旨在模拟常见道路边坡光伏系统中“单排光伏板”和“双排光伏板顺坡”的布设模式,以比较单一汇水板缘和双板缘汇水对坡面水力侵蚀过程的影响。试验共设置3种光伏板布设情形(见图2):单一光伏板(P_1)、两块光伏板顺坡排列(P_2)以及无光伏板对照组(CK)。其中,以双板组作为布设基准,其上下板间距设定为 3 cm,为光伏系统中常见板间间距,上板顶部预留 5 cm 空隙,下板板缘至坡脚区域定义为流速测量区。试验前,对两组已填筑完成但未进行降雨的坡面进行五点环刀取样,测定土壤容重、孔隙度与含水率,作为实验边坡土体的基本性质。结果表明:供试坡面土壤类型为沙质壤土,容重约为 1.42 g/cm³,含水率 3.11%,毛管孔隙度约 32.14%;机械组成以砂粒(约 56.8%)和粉粒(约 30.2%)为主,黏粒约占 13.0%。此操作旨在避免试验过程中取样破坏坡面结构。

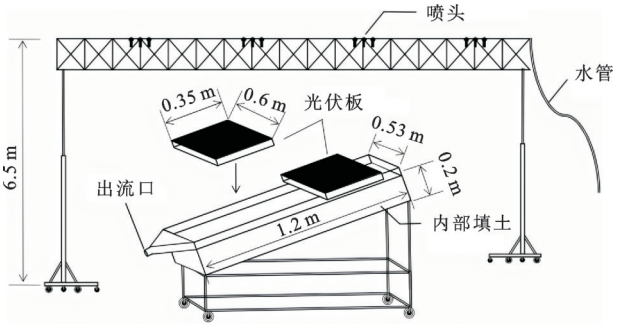


图1　人工模拟降雨试验布设简图

Fig. 1　Schematic diagram of artificial rainfall simulation experiment setup

1.2　降雨试验

降雨试验共设置4个降雨强度:20,40,60 和 80 mm/h,分别代表微雨、小雨、中雨和大雨。每种降雨强度下,对3种试验布设情形各进行两次重复试验,共计24场降雨试验(4种降雨强度×3种试验情形×2次重复)。人工模拟降雨采用西安淼森电子科技有限公司研发的MSR-S20-W1 100(1 500)型野外便携式垂直下喷式降雨设备,该设备由供水系统、控制系统、智能终端和采集系统构成,雨强调节范围为20~240 mm/h(精度 5 mm/h),有效降雨覆盖面积为 14.3 m²(6.5 m×2.2 m),均匀系数>85%。径流槽置于降雨器下方正中央以获得最佳降雨效果。在P_1,P_2布设的下板板缘至坡脚流速测量区,以及CK组的相同对应区域,采用$KMnO_4$染料示踪法测量坡面平均径流流速。自坡面开始产流起计时,80 mm/h雨强组因产流产沙显著且后期坡面塌陷严重,径流收集时长为30 min;其余雨强组径流收集时长为60 min。产流后,前20 min按照每2 min分别收集径流样品,后40 min(对于80 mm/h组,为后10 min)每5 min采集一次径流样品,每场试验共采集18个径流样品(对于80 mm/h组,为12个径流样品)。试验结束后,读出量筒示数,即为该时间段的径流量;随后将含沙样品于实验室中静置沉淀24 h,弃去上清液后将底部泥沙转移至已知重量的铝盒中,置于105 ℃烘箱内烘干24 h后称重,烘干后质量减去铝盒净重,即得到泥沙干重。

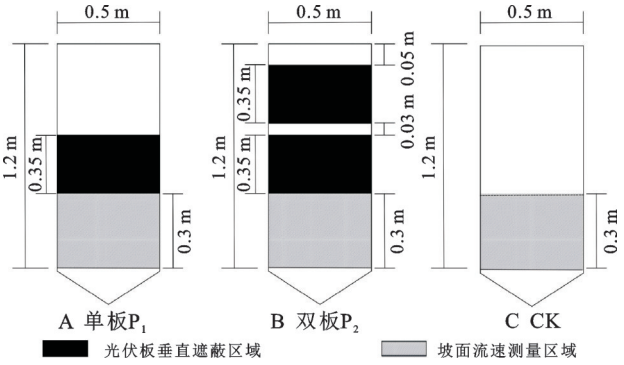


图2　光伏板两种布设方式与对照示意图

Fig. 2　Schematic diagram of two photovoltaic panel layout modes and control group

1.3　指标计算与分析方法

试验所涉及用于分析和讨论的指标如下:

初始产流时间(T_0):为自降雨开始至坡面出现径流的时间,单位 min。

径流率(Q):为单位时间内产生的不含沙径流体积,根据径流量与接样时间之比进行计算,其公式如下:

$$Q=\frac{R_Q}{t}=\frac{(M'-M)}{\rho\times 1\,000\times t} \tag{1}$$

式中:Q为径流率(L/min);R_Q为观测时段内的径流量(L);M'为浑水质量(g);M为产沙量(g);ρ为试验用水的密度(g/ml);t为接样时间(min)。

径流含沙量(R_s):为单位体积径流中所含的泥沙干重,根据收集的径流样品体积与处理后泥样干重

之比进行计算，其公式如下：

$$R_s = M/v \tag{2}$$

式中：R_s为径流含沙量(kg/m³)；M为产沙量(kg)；v为所接样品的体积(m³)。

径流总量(R)：为单次试验收集到的不含沙径流的总体积，根据各样本径流量累加得到。其公式如下：

$$R = \sum_{i=1}^{18} V_i \tag{3}$$

式中：R为径流总量(m³)；V_i为单次采样径流体积(m³)。

总泥沙通量(S)：为单次试验中所收集径流包含的泥沙总干重，根据各次径流水样中泥沙干重之和进行计算，其公式如下：

$$S = \sum_{i=1}^{18} M_i \tag{4}$$

式中：S为总泥沙通量(kg)；M_i为单次采样泥沙干重(kg)。

试验数据的统计分析通过Excel，SPSS 27.0进行，图表绘制通过Origin 2024进行。

2 结果与分析

2.1 坡面径流特征

试验结果中与坡面径流相关的指标包括初始产流时间、径流总量、径流率随产流历时变化趋势与峰值径流率。初始产流时间是坡面水文响应的一个关键起始特征，它直接反映了降雨克服前期光伏板截留以及土壤入渗并触发地表径流形成这一过程所需的时间延迟[12]。如表1所示，光伏板的布设对坡面径流的产生有较为明显的加速作用，单块光伏板下坡面径流开始的时间比对照空白坡面提前，在多数雨强下提前15%～30%，而顺坡增加一块光伏板对初始产流时间的影响则相对较弱，除80 mm/h外，其余雨强下双板产流时间均短于单板，但二者差异幅度均不超过3%。

在不同降雨强度下，设置有光伏板的坡面(P_1&P_2)径流总量均相对于无光伏板的坡面(CK)呈增加趋势，且最大径流总量多出现在双光伏板试验组中。在40 mm/h和60 mm/h的降雨强度下，两块光伏板顺坡排列下的径流总量比单一光伏板分别增加15%和10%，仅20 mm/h微降雨组内单双光伏板布设下的径流总量数值相近。

坡面径流率随降雨历时变化的过程曲线由图3可知，可以观察到CK组的短时径流率呈J型上升，而光伏板组则在40 mm/h和60 mm/h的降雨强度(相较另外两组雨强更具普遍性)下表现出上升后下降的趋势，且过程曲线较为接近。此外，在过程曲线中能明显观察到，光伏板组短时径流率上升时间均早于CK组，而CK组则多在试验末期才表现出激增的趋势。

表1 不同布设方式下不同降雨强度的坡面径流泥沙特征参数对比

Table 1 Comparison of runoff and sediment characteristic parameters on slopes under different layout modes and rainfall intensities

雨强/(mm·h⁻¹)	光伏板布设	初始产流时间/min	径流总量/m³	总泥沙通量/kg	峰值径流率/(L·min⁻¹)
20	P_1	62.13	0.0016	0.005	0.904
	P_2	61.44	0.0016	0.006	0.754
	CK	65.62	0.0012	0.006	0.472
40	P_1	24.54	0.0091	1.279	0.247
	P_2	24.14	0.0100	1.469	0.244
	CK	33.52	0.0087	1.421	0.490
60	P_1	9.69	0.0113	1.677	0.318
	P_2	9.53	0.0125	1.767	0.351
	CK	11.48	0.0106	1.738	0.531
80	P_1	3.12	0.0093	1.736	0.579
	P_2	3.21	0.0126	2.610	0.656
	CK	4.51	0.0075	1.804	0.690

对比空白组和光伏板组之间的峰值径流率可以发现，光伏板的布设显著削弱了中等雨强(40～60 mm/h)下的峰值径流率：在40 mm/h时，单板、双板较空白坡面对照组分别降低49.6%和50.2%；60 mm/h时降低40.1%和33.9%；但在80 mm/h高雨强下削弱效应减弱，双板组峰值径流率(0.656 L/min)与空白组(0.690 L/min)相近。

在初始坡面干燥的条件下，光伏板的架设还显著影响板缘以下坡面的径流流速分布。如图4所示，光伏板组的平均流速均高于空白坡面，且随降雨强度的增大其相对增幅减少。而双板组较单板组平均流速增加约7%。

2.2 坡面侵蚀产流产沙特征

光伏板布设形式对下垫面降雨侵蚀的影响受到降雨强度的影响较大，如表1所示，在中小雨强(20～40 mm/h)下单板组的坡面总泥沙通量相对于空白组分别降低了10.0%～16.7%，减沙效果明显；而双板组在20～60 mm/h雨强下则得到与空白组相近的总侵蚀量，未表现出明显减沙或增沙效应，但在80 mm/h的强雨强下，双板组总泥沙通量较空白组增大44.7%。再来看反映各时段侵蚀效率的径流含沙量随降雨历时变化曲线，其趋势大致表现为初期小幅度波动、平稳上升和径流含沙量激增3个阶段。初期小幅度波动可在所有的降雨强度下观测到，多见于产流开始后的10 min内，在该范围内能达到的径流含沙量峰值随着降雨雨强的增大而上升。

在20 mm/h小雨强下能观察到空白组曲线先高

于光伏板组,在 45 min后光伏板组径流含沙量激增后又趋于弱势的走向,而类似的含沙量激增在其他雨强下则分别出现在产流开始后的 40,35,25 min。如图 5 所示,光伏板组曲线在前期差距较小,而后随着产流历时和降雨强度的增加,双板组的侵蚀加剧。在 40 mm/h的雨强下,双板组在试验末期的径流含沙量较单板组增加了近 1.5 倍。80 mm/h大降雨进行到 30 min时已有大面积塌陷,表现在动态曲线上则是开始产流 20 min后样品含沙量激增,在 10 min内造成了超过总泥沙通量 90% 的土壤流失。

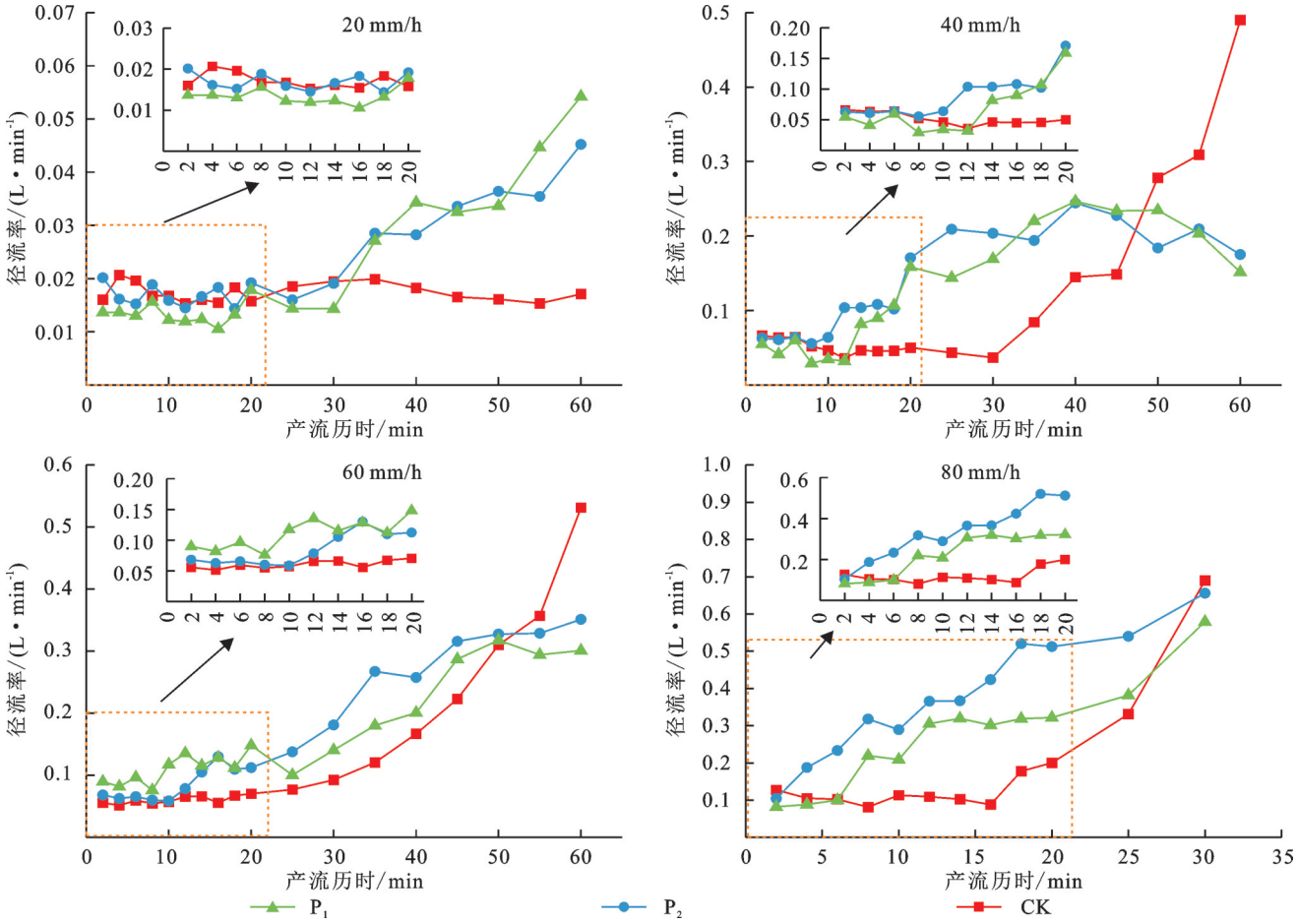


图 3　不同布设方式下不同降雨强度的坡面径流率时间变化过程对比

Fig. 3　Comparison of temporal variation process of slope runoff rate under different layout modes and rainfall intensities

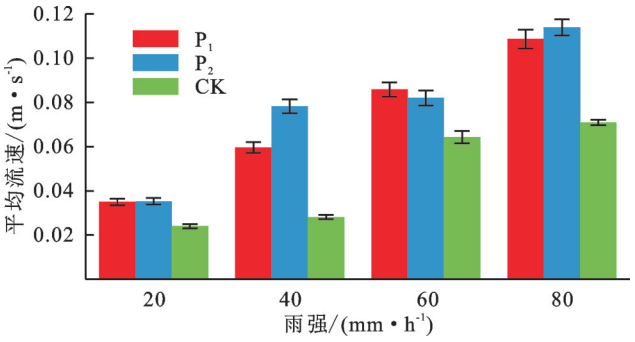


图 4　不同布设方式下不同降雨强度的坡面径流平均流速

Fig. 4　Average flow velocity of slope runoff under different layout modes and rainfall intensities

2.3　坡面侵蚀形态发育特征

光伏板建设对降雨的影响主要表现为遮蔽和截留降雨两部分,其不透水板面拦截大部分降水,直接减少击打地表的雨滴数量和地表入渗面积,使板下区域受到降雨的影响远低于外部区域,但另一方面光伏板的倾斜面又对降雨有一定汇集作用,使截留的降水在板的低缘处汇集,再分配形成新的大雨滴或是股流落到地表。这些集中水流较自然雨滴具有更强的动能和冲击力,从而加速坡面的侵蚀。长此以往,光伏板低缘下方的地表不可避免地形成了一条与光伏板低缘走向一致的沟状侵蚀。

图 6 分别是 60 mm/h降雨下各组试验结束后得到的坡面侵蚀状况:图 6A 为单板组去除光伏板后的侵蚀结果,能观察到中部被光伏板覆盖区域有坡面径流向下冲刷的痕迹,明显来源于上部未遮挡区域受到降雨侵蚀后产生的坡面层流,冲刷痕迹之下横向侵蚀沟之上仍有部分区域相对干燥,其上并无雨水溅蚀痕迹,伴有一道横向裂纹。横向侵蚀沟是本研究的重点观察对象,其位置位于光伏板下沿投影处,由多个圆孔状侵蚀斑连接而成,走向与光伏板水平方向一致。横向侵蚀沟往下则是无光伏板遮挡且

受到板面汇流降雨冲刷影响的主要监测区，该区域土壤侵蚀剧烈，有多道源于横向侵蚀沟的下切侵蚀沟，与空白组侵蚀沟有明显差异；图 6B 为双板组的坡面侵蚀结果，相较于单板组，其上部受 1 号光伏板遮蔽的区域出现了一道完全干燥的分界线，分界线以上为受降雨直接影响的条状裸露区域和降雨下渗部分，以下至中部横向侵蚀沟则明显是从横沟处因毛细作用上移的部分入渗降雨。坡面中部横向侵蚀沟较下部横沟侵蚀较浅，且横沟形态完整，不存在与之相连的纵向侵蚀沟；2 号光伏板下仍存在径流冲刷痕迹和横向裂纹，但相对干燥区域消失；重点监测区仍侵蚀剧烈，形态与单板组观测区一致；图 6C 则为不设置光伏板空白组的侵蚀结果，无光伏板汇水影响下，其坡面不存在横向侵蚀沟阻断径流冲刷，导致下半段形成了更为明显的下切侵蚀沟，且整个坡面完全湿润，遍布雨滴溅蚀痕迹。

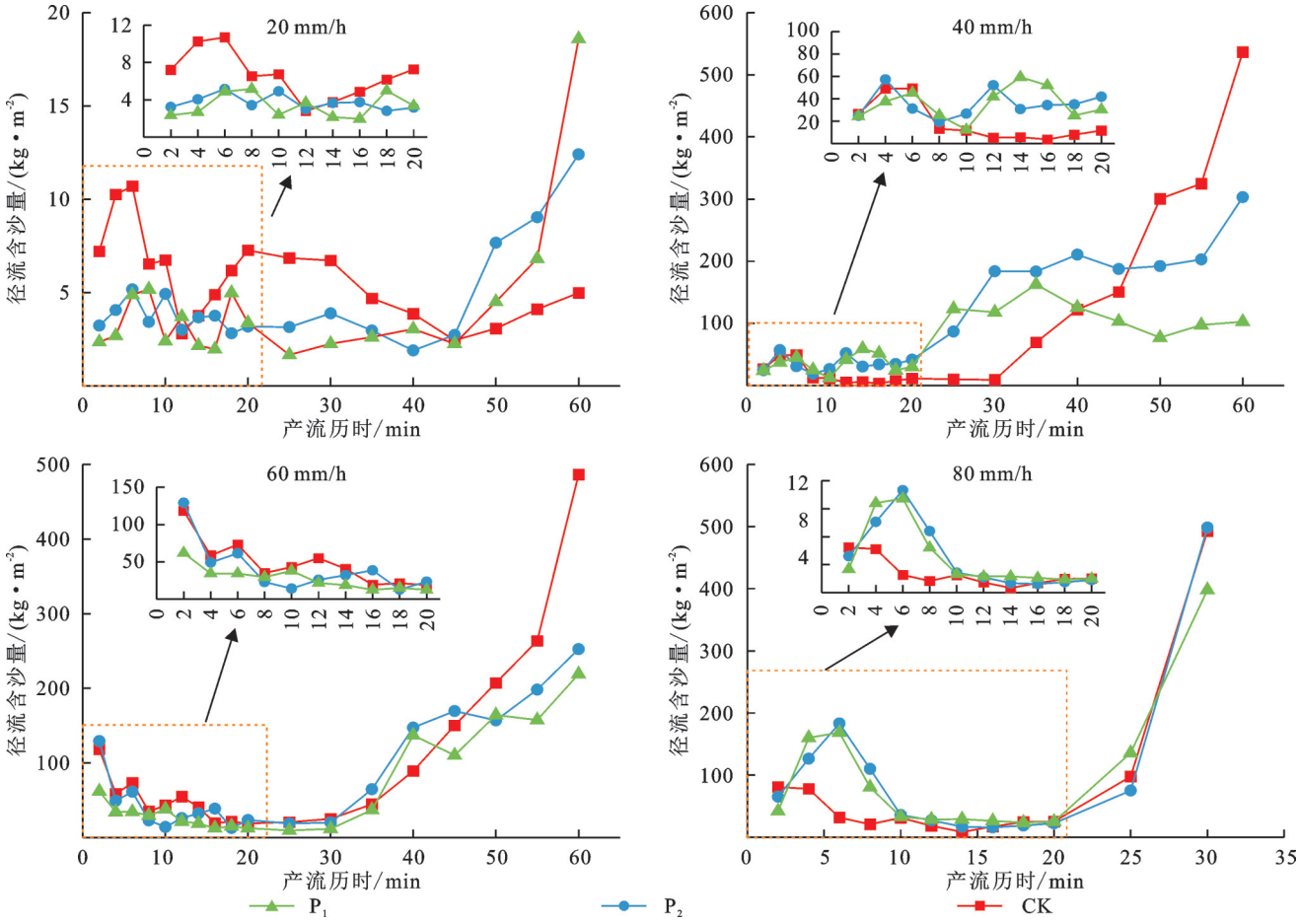
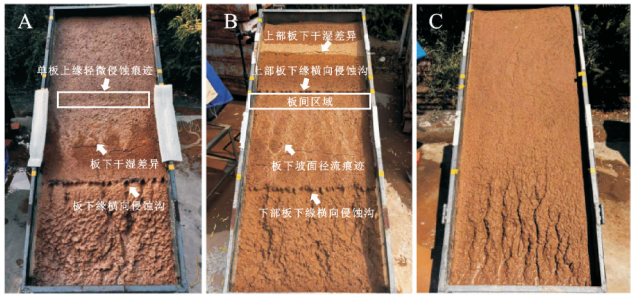


图 5 不同布设方式下不同降雨强度的坡面径流含沙量时间变化过程对比

Fig. 5 Comparison of temporal variation process of sediment concentration of slope runoff under different layout modes and rainfall intensities



注：A 单板覆盖坡面；B 双板覆盖坡面；C 无光伏板坡面。

图 6 60 mm/h 雨强下历时 60 min 降雨后不同坡面侵蚀形态特征

Fig. 6 Characteristics of slope erosion morphology after 60 min of rainfall at 60 mm/h intensity

3 讨 论

3.1 光伏板对降雨的截留—再分配及其衍生效应

试验研究证实，在坡面上安装光伏板会显著改变其下垫面水力侵蚀的过程与强度。其核心影响机理在于光伏板对降雨的“截留—再分配”作用：光伏板面将原本分散的降雨有效截留并汇集，随后雨水沿其倾斜表面集中至板缘排出。这一过程在某些研究中被认为具有收集雨水的作用，在提升干旱地区的水资源供应方面展现出巨大潜力[13-14]。然而，从坡面侵蚀的角度看，“截留—再分配”是驱动侵蚀空间出现差异性和强化产流产沙过程的源头，它通过以下衍生机制塑造了

光伏板建设后坡面的独特侵蚀格局和产流产沙过程:

(1) 遮蔽减蚀效应:光伏板拦截降雨,使其下覆盖区不受雨滴击溅影响,大幅削减该区域的侵蚀动力和泥沙来源,一定程度上使遮蔽范围内的土壤表层保有原始的入渗能力,使覆盖区土壤的实际侵蚀风险显著低于裸露区域[5-6,9,15]。

(2) 边缘汇水效应:板面汇集的雨水在板缘处集中后以高能量水滴或股流的形式下落至地表,其最终释放时的动能和水量远超自然雨滴,对板缘下方相对干燥的坡面造成强烈的点源侵蚀[5-6,9,15]。

(3) 间隙二次汇流效应(阵列间特有):在双板或多板阵列中,上部光伏板边缘排出的部分汇水因板缘不平直、风力扰动或水流不稳定发生侧向扩散或飞溅,越横向间隙降落到下部光伏板板面上,与下部板自身截留的雨水叠加汇集,导致下部光伏板的实际汇水量增加[5,10]。

(4) 有效侵蚀面积缩减效应:安装光伏板后,坡面有效侵蚀面积被大幅缩减至接收集中汇水的区域,这些区域因水量高度集中且面积锐减,土壤能以远高于完整坡面的速度达到饱和,导致径流提前产生且受到强烈侵蚀影响[14-15]。

综上所述,遮蔽减蚀、边缘汇水、间隙二次汇流及有效侵蚀面积缩减这四重机制,共同主导了光伏板布设坡面的径流强化与侵蚀加剧过程。因此,下文将以无光伏建设、单板与双板布设为例,重点分析“截留—再分配”效应如何通过上述四重机制,调控坡面径流过程、产沙特征及侵蚀形态的演化。

3.2　空白组:基准侵蚀过程

作为对照组,空白坡面展现了无光伏板干扰下的自然降雨侵蚀响应——由降雨溅蚀提供最初的侵蚀动力和泥沙来源,待整个坡面的土壤逐渐入渗饱和,雨水在坡面表层汇集形成片流和股流[16-17]。其产流产沙过程均呈现出相对均匀的时间演变特征——径流率历时曲线呈先稳态后指数增长的J型模式(图3),符合陡峭易蚀坡面的侵蚀发育规律,且指数增长起始时间随雨强增大而显著提前。在低雨强(20 mm/h)条件下,因坡面饱和产流时间延长,径流发育延缓,试验周期内未触发指数增长阶段。

侵蚀形态特征上,该组坡面表现为相对均匀分布的溅蚀斑痕,并在坡面下半段发育出典型的纵向下切侵蚀沟(图6C)[14,16]。这种侵蚀形态是陡坡在均匀降雨条件下的常见结果,其成因在于坡面径流在向下运移过程中动能不断累积,至坡面下部时达到冲刷峰值,从而导致侵蚀沟在此区域集中发育。

3.3　单板组:侵蚀空间异质性显现

单块光伏板的引入,将完整的受蚀坡面划分成了3块区域:光伏板上部、光伏板覆盖区和光伏板下部。其各部分的产流产沙主导机理均有所差异,最终导致单板组的坡面侵蚀空间格局与水土流失强度有别于其他组。

3.3.1　*径流特征*　光伏板的搭建显著改变了坡面降雨侵蚀的水文过程,其核心驱动机制在于“板缘汇水效应”。倾斜光伏板将截留降雨定向汇集至其低缘处,以高能水滴或细股水流的形式冲击下方坡面,形成一条与光伏板低缘走向一致的滴水线[5,9,18-19]。这一过程导致坡面下部的主要受蚀区(在本试验中约占坡面面积的1/4,如图2蓝色区域所示)迅速饱和,进而显著缩短了整体产流时间[19-20]。这一点在Yavari关于光伏板下土壤湿度空间异质性的研究中也有体现,实地观测结果表明,光伏场内滴水线区域的土壤湿度更高,且在降雨事件结束后3 d仍维持较高水平[18]。

另一方面,光伏板建设后坡面的径流空间分布也呈现典型空间异质性:“截留效应”使板下遮蔽区几乎不受降雨的直接影响,使得该区域土壤免受雨滴溅蚀破坏而维持了较高的入渗能力,可有效消纳上部裸露区产生的坡面流[5,18,21-22];而下游主要受蚀区则同时接收板面汇流与直接降雨,成为侵蚀加剧区域。

综上所述,单一光伏板组的总径流量主要由板面汇流和下部受蚀区的直接产流所提供。低雨强条件下,遮蔽区的高入渗能力可吸纳上游径流,减少下游泥沙输送[5,18];但高雨强时,上部裸露区的产流可能超出遮蔽区的入渗能力,导致部分径流携带泥沙下泄,整体上加速并加剧了坡面的水力侵蚀过程。

3.3.2　*产沙特征*　试验结果表明,单光伏板布设能有效降低坡面总土壤流失量,其侵蚀总量低于空白对照组。这一减蚀效果源于三重机制的协同作用。首先,光伏板的“遮蔽效应”导致坡面中部产生一块干燥遮蔽区,该区域不受雨滴溅蚀影响,大幅削减了泥沙供给源头[18,23];其次,该区域内的土壤由于未曾遭到溅蚀破坏,抗蚀和入渗能力得以保持[19],来自上部裸露区的低含沙径流,在进入遮蔽区后流速减缓并大量下渗,显著减少了对下游重点侵蚀区的泥沙补给[16,18];最后,尽管“边缘汇水效应”在板缘下方加剧了局部冲刷,但其影响范围集中于板缘下方的狭窄条带内,产生的侵蚀增量有限。即使高雨强下裸露区产沙增强,且部分径流可能携带泥沙超越遮蔽区入渗能力下泄,与板缘汇流叠加增加侵蚀负荷,试验数据仍证实遮蔽效应主导的减沙优势显著,使单板组总侵蚀量始终低于空白组。这种“源头抑蚀—中途截沙—局部侵蚀受限”的联合机制,使得单一分布式光伏板在道路边坡(其坡长受限,坡度较陡)水土

保持防治中可能存在积极效益。

3.3.3 侵蚀形态 单板组坡面的侵蚀形态发生了根本性转变,其核心标志是与光伏板下部板缘走向一致的横向侵蚀沟(图6A,B)。该形态是"边缘汇水效应"的直接产物——于板缘汇集的降雨以滴水线的形式冲击地表,诱发由点源侵蚀斑连接而成的横向沟壑[13,19]。这条横向沟壑构成了侵蚀形态空间分异的起点。随着降雨持续进行,横沟持续下切加深,逐渐形成汇流通道;但在陡坡条件下,由于沟壁一侧相对高程较低,饱和径流易向该侧溢出,进而衍生出源于横沟的纵向切沟(图6A)。光伏板下方的遮蔽区域侵蚀极其轻微甚至无侵蚀痕迹(图6A),清晰地体现了光伏板"遮蔽减蚀效应"对溅蚀的削减作用。横沟以上的坡面主要受常规降雨侵蚀影响,其产生的片流在进入板下遮蔽区后流速显著降低并迅速下渗,在图6A中可观察到明显的片流中断痕迹,并伴随有因干湿差异导致的表层裂缝[24]。横沟以下的区域则受到雨滴溅蚀以及来自板缘汇水的冲刷影响,侵蚀痕迹较为明显。

3.4 双板组:板间间隙二次汇流主导侵蚀加剧

在目前的光伏工程实践中,光伏板普遍以阵列形式成组布设,其组内存在横向和纵向的板间间隙,宽度常见为3~5 cm。为探究横向板间间隙对下垫面水文过程(特别是产流机制)的影响,本试验构建了具有横向间隙的双光伏板组进行观测。试验结果显示,相对于单板组,双板组因"间隙汇流二次分配"效应,导致坡面侵蚀过程显著复杂化且侵蚀强度加剧。

3.4.1 径流特征 双板组的径流过程呈现出与单板组不同的强化特征。相较于单板组,其起始产流时间进一步缩短,且总径流量系统性增加。这一现象的核心驱动机制是"间隙二次汇流"。具体表现为上部光伏板边缘排出的部分汇流水量,跨越横向间隙降落到下部光伏板表面,与下部板截留雨水叠加汇集。这种水量叠加显著增加了下部板的实际汇流量,使其板缘排出水流兼具更高动能与流量,导致下部板缘以下滴水线处的土壤加速饱和并提前产流[5,19]。

值得注意的是,该效应具有显著雨强依赖性。低雨强时,上部板溅落水量有限且难以跨越间隙,即便少量水流落至间隙地面,亦易被下部板遮蔽区的高入渗土壤消纳[18,22],故径流特征与单板组差异甚微;而高雨强时,上部板汇流水量剧增,使其"间隙二次汇流"效应加剧,重点受蚀区产流时间进一步提前,总径流量显著增加[19]。

3.4.2 产沙特征 试验结果显示,尽管双板配置下拥有更大的遮蔽面积(理论上可抑制溅蚀并提升入渗),但其实测总侵蚀量却系统性高于无光伏板的空白对照组及单板组。这一矛盾现象的核心机制在于"板间间隙的二次汇流"于狭窄间隙下方条带(约3 cm宽)内构建的极端侵蚀环境:首先,该区域同时承受上部板缘水流的直接冲击、下部板面水流下落反弹以及穿透降雨的三重作用[5,18],导致单位面积水力负荷激增;其次,该区域的有限土壤入渗能力难以抵御高能量水流的冲刷,在超高水力负荷与持续雨滴击蚀协同下,条带表土结构迅速崩解,产沙量呈指数级增长[24]。滴水线处的横向侵蚀沟随之快速发育(图6B),剥离的巨量泥沙形成高含沙股流顺坡而下,显著增加下游主要侵蚀区的泥沙补给,最终导致全坡面总侵蚀量增幅显著。

3.4.3 侵蚀形态 双板配置下,坡面上部受到溅蚀影响的范围缩小至5 cm,其带来的水土流失也相应减弱,即便在60 mm/h的雨强中,也仅在上部板覆盖区内留下了约3 cm的下渗痕迹,并且无径流产生,并没有对下游侵蚀产生影响。如图6B所示,板上部出现了明显的干燥区域分界线,界线以上为溅蚀侵蚀痕迹,其下润湿部分则来源于从横向侵蚀沟向上运移扩散的上部板汇流降雨,该部分坡面表层明显没有遭到任何外力侵蚀影响。

两板间隙下的区域受到上部光伏板汇集降雨和穿透降雨的双重影响,在横向侵蚀沟周边还伴随有雨滴溅蚀的痕迹,并共同对下游坡面造成侵蚀。在图6B中,能观察到下部板下覆盖区已完全湿润,并有径流状的冲刷痕迹,横沟以下区域内的侵蚀痕迹明显,符合该区域受到溅蚀和板面汇水双重侵蚀的特征。

3.5 对光伏边坡工程布设的启示

基于上述对光伏板"截留—再分配"效应及其衍生机制的分析,本研究结果对公路边坡光伏工程的规划、设计与水土保持防护具有明确的启示作用:在侵蚀敏感或干旱少雨地区,宜优先采用单板布设,以发挥其"遮蔽减蚀效应",并可结合板面集水进行局部绿化[5,9];而在降雨强度高、土壤抗蚀性差的区域,应谨慎使用顺坡紧密双板布设,避免因板间"二次汇流叠加"加剧侵蚀。

工程中需重点关注光伏板下缘这一高动能侵蚀风险点,可通过加装板下导流槽收集汇流用于局部绿化灌溉,或是设置地面散水墩或植草格等坡面防护措施以分散汇流冲击力[9];对于边坡面积较大可布设多板光伏阵列的区域,可在板下及板间区域种植耐阴耐旱的乡土植物进行生态防护,充分利用光伏板的遮荫与集水潜力,构建"光伏+生态"协同系统,实现发电效益与边坡绿化的双重目标[9-10,22]。

4　结　论

(1)道路路基边坡布设光伏板,通过“截留—再分配”机制根本性改变坡面侵蚀过程:其不透水面将分散降雨拦截并转化为板缘高能集中水流,诱发横向侵蚀沟,使侵蚀动能来源由自然雨滴击溅转变为板缘汇流的集中冲刷,侵蚀形态从均匀溅蚀与纵向切沟侵蚀转向“横向沟壑+纵向衍生”的复合侵蚀。

(2)在中小雨强(20~40 mm/h)下,单板布设因遮蔽减蚀效应主导,总泥沙通量较无光伏板对照组降低10.0%~16.7%,减沙效果明显;随雨强增大至60~80 mm/h,单板减沙效应减弱至≤ 3.8%,但其坡面径流总量仍较对照组增加。双板布设在≤60 mm/h雨强下与对照组差异不大,但在80 mm/h高雨强下因板间“二次汇流叠加”,径流总量与总泥沙通量均显著高于对照组(总泥沙通量增大44.7%),侵蚀风险明显加剧。

(3)为平衡光伏发电与路基边坡水土保持,建议在干旱少雨区域优先采用单板布设,发挥其遮蔽减蚀与板面集水潜力;在雨强较高、土壤抗蚀性差的区域应慎用顺坡双板布设。工程中可优化板缘排水设计(如加装缓冲导流槽),并对板缘及板间区域实施植草格等防护措施,构建“光伏+生态”协同防护体系。

参考文献(References):

[1] 张丽,林垚,孙逸帆,等.基于专利计量的公路领域太阳能光伏应用技术发展分析[J].交通运输研究,2022,8(6):108-119.
Zhang L, Lin Y, Sun Y F, et al. Development analysis of solar photovoltaic application technology in road field based on patentometrics[J]. Transportation Standardization, 2022,8(6):108-119.

[2] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2024[R/OL]. Paris: IEA, 2024 [2025-08-10]. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024.

[3] 中华人民共和国交通运输部.2009年公路水路交通运输行业发展统计公报[J].交通财会,2010(5):90-93.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of highway and waterway transportation industry in 2009[J]. Finance & Accounting for Communications, 2010(5):90-93.

[4] Yuan M M, Mai J F, Liu X F, et al. Current implementation and development countermeasures of green energy in China's highway transportation [J]. Sustainability, 2023,15(4):3024.

[5] Cook L M, McCuen R H. Hydrologic response of solar farms[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(5):536-541.

[6] 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, 2023,620:129522.

[7] 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.

[8] Pisinaras V, Wei Y, Bärring L, et al. Conceptualizing and assessing the effects of installation and operation of photovoltaic power plants on major hydrologic budget constituents [J]. Science of the Total Environment, 2014,493:239-250.

[9] Liu H, Wu C D, Yu Y, 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.

[10] Choi C S, Cagle A E, Macknick J, et al. Effects of revegetation on soil physical and chemical properties in solar photovoltaic infrastructure[J]. Frontiers in Environmental Science, 2020,8:140.

[11] 中华人民共和国交通运输部.公路路基施工技术规范:JTG/T 3610—2019[S].北京:人民交通出版社,2019.
Technical Specifications for Construction of Highway Subgrades: JTG/T 3610—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.

[12] 张乐涛,高照良,李永红,等.模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J].农业工程学报,2013,29(8):145-153.
Zhang L T, Gao Z L, Li Y H, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(8):145-153.

[13] Ye W Y, Ma E P, Liao L W, et al. Applicability of photovoltaic panel rainwater harvesting system in improving water-energy-food nexus performance in semi-arid areas[J]. Science of the Total Environment, 2023,896:164938.

[14] Hassanpour Adeh E, Selker J S, Higgins C W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency[J]. PLoS One, 2018, 13(11):e0203256.

[15] Liu Y, Zhang R Q, Huang Z, et al. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem [J]. Land Degradation & Development, 2019,30(18):2177-2186.

[16] 徐刘洋,郭伟玲,贾纪昂.东南丘陵地区土壤侵蚀时空变化及其驱动因素:以湖南省张家界市为例[J].水土保持通报,2024,44(1):218-226,237.
Xu L Y, Guo W L, Jia J A. Spatial and temporal variability and driving factors of soil erosion in hilly areas of southeast China: A case study of Zhangjiajie City, Hunan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):218-226,237.

(下转第74页)