

山地光伏建设项目水土保持水动力学及侵蚀形态研究

董旭 路冰瑶

中电建新能源集团股份有限公司南方分公司

摘要:为探求山地光伏建设项目水土保持水动力学及侵蚀形态情况,提出有效的防治措施,从水力学及侵蚀形态的角度出发,系统研究了6种坡度(2°、4°、6°、8°、10°、12°),5种流量(8L/min、16L/min、24L/min、32L/min、40L/min)组合冲刷试验条件下细沟水流水动力学特征。结果表明,山地光伏项目坡面水流平均流速与径流流量呈幂函数关系,坡度对其影响较小,其原因在于坡度越大,坡面侵蚀形态越加复杂,阻碍了水流流速的增加;表征坡面发育形态的参数跌坑发育系数SP,随坡度的增加而增加,说明随着坡度的增加,由于受到水流与坡面形态的互馈机制,坡面侵蚀形态发育更加复杂、成熟。因此在建设山地光伏项目时,要采取工程措施来阻止坡面水土流失,以期满足国家水土保持规范要求。

关键词:山地光伏;跌坑发育系数;侵蚀形态;阻力系数

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.18.084

引言

随着全球环境问题的日益严重,新能源正在得到越来越多的关注和推广。作为全球最大的能源消费国家之一,中国也在近年来大力发展新能源,我公司积极响应服务国家“3060”发展战略。新能源发展战略意义主要体现在几个方面:一、减少对传统能源的依赖,二、提升能源利用效率,三、应对全球气候变化,四、推动经

济发展。综上所述,新能源工程建设对国家双碳战略意义重大。

光伏在新能源工程中占据较大比例,随着光伏电站逐年增加,建设条件好的土地逐渐减少,山地建设条件次之的土地便成为光伏建设的另一资源,山地光伏建设进一步毁坏了土地植被,对山体水土流失影响较大。山体光伏项目水土流失与水流水动力学特性关系十分密切,本文通过研究山地光伏项目坡面降雨汇水水动力学特性及坡面侵蚀形态来揭示水土流失本质原因,以期为山体光伏项目水土流失治理提供解决措施。

山地坡面降雨水流水动力学特性的研究主要围绕水流流态、水流流速、水流阻力等方面。张科利通过模拟降水,得到流速是流量的幂函数关系^[1];王龙生通过模拟降水水流阻力沿程增加^[2],由此可见,山地坡面降水因素较多,侵蚀机理尚不明朗,本文拟通过不同坡度、不同流量的组合放水冲刷试验,对山地光伏项目影响水土保持坡面水流的水动力学特性及侵蚀形态进行了系统研究,以期阐明水流水动力学特性对山地光伏项目水土保持的影响,特别是黄土高原地区山地光伏项目对水土保持的影响。

一、材料与方

(一) 试验材料

土壤质地对实验影响结果较大,本实验采用黄土高原地区的土壤,颗粒组成结果见表1:

(二) 试验设计

表1 试验土颗粒机械组成(单位:%)

粒径(mm)	<0.002	0.002~0.02	0.02~0.05	0.05~0.25	>0.25
百分数(%)	24.13	39.05	29.32	4.25	3.25
中径 d_{50} (mm)	0.015				

(1) 实验采用可调坡度钢槽,钢槽长×宽×深=6m×0.4m×0.6m;

(2) 填土前,在钢槽底部铺设20cm厚沙子,并铺设土工布一层,模拟天然透土层;

(3) 根据山地光伏建设项目坡度实际调查情况,坡度分为六级,分别为2°、4°、6°、8°、10°、12°,共6个坡度;

(4) 根据野外实际调查,设计流量为8L/min、16L/min、24L/min、32L/min、40L/min;

(5) 沿钢槽设置观测断面5个,分别为0.5m、1.5m、2.5m、3.5m、4.5m。采用KMnO₄染色示踪法观测断

面表面优势流速(重复测量三次);

(6) 每5min采集泥沙样,进行体积和时间测量,最后烘干求解含沙量;

(7) 每隔20分钟,测得跌坑的间距、深度及水面宽度。

(三) 水流水力要素

(1) 平均流速,山区坡地平均流速可表示为:

$$u = \alpha u_s \quad (1)$$

式中:u为平均流速,m/s;u_s为表流速,m/s;α为流速系数,取0.75。

(2) 按照过水断面近似为矩形,来计算水流水

深，其表达式为：

$$h = \frac{Q}{ub} \quad (2)$$

式中：h为细沟流水深，m；Q为细沟流量，m³/s；b为细沟流过水断面宽度，m。

二、实验结果分析

(一) 平均流速与流量和坡度的关系

在山地光伏项目坡面水土保持研究分析的过程中，坡面降雨平均流速一般是流量和坡度的幂函数关系，然而部分研究指出，山地坡面降水流速仅仅是流量的幂函数关系，与坡度无关^[4]，分析认为势能增加导致动能增加，山地被水流侵蚀造成的形态愈加剧烈，导致阻力增大，阻碍了水流流速的进一步扩大。图1、图2给出了本次试验的断面平均流速随流量和坡度的变化关系：

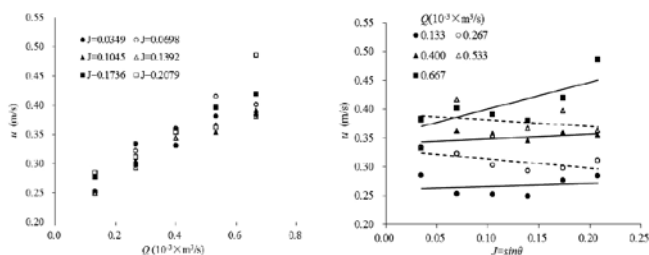


图1 不同坡度下流速与流量之间关系 图2 不同流量下流速与坡度之间关系

由图1、图2可知，同一坡度下，坡面降雨水流平均流速随流量的增加呈现上升的趋势。同一流量下，坡面降雨水流平均流速随坡度的增加有增加的情况也有减少的情况，如流量为16L/min的情况下，坡面降雨平均流速随坡度的增加而减少，在流量为40L/min的情况下，坡面降雨平均流速随坡度的增加而增加，但总体上影响较少。通过数据分析发现，平均流速与两者均呈现幂函数关系，其关系式如下：

$$u = 0.4534Q^{0.2659}J^{0.050} \quad (4)$$

式中Q为冲刷流量（10⁻³×m³/s），R²=0.869，坡度项的指数为0.05，接近于零，删除坡度影响后，幂函数关系为：

$$u = 0.3523Q^{0.2659} \quad (5)$$

式中R²=0.9921。剔除坡度项后相关性提高，说明山地光伏项目坡面降雨平均流速与流量的关系最为密切，坡度对其影响相对较小，或者说没有影响。通过图3、4，分析原因是因为在低坡度下，水流侵蚀能力较弱，未形成跌坑等严重影响水流流速的形态，随着坡度增加，跌坑发育形态成熟，跌坑数量及深度均增加较多，阻力增加很多，流速也随之降低，形态类似于阶梯深潭结构，因此，坡度与坡面降雨水流流速相关性不高。

通过上述试验结果可知，水流流速与流量有关，因

此，在建设山地光伏项目，可在每阶平台上部修建排水沟，将降雨水流在截水沟汇集，同时在场侧两侧也修建排水沟，将横坡水流汇集进纵坡后流入渠道，此工程措施将大大降低雨水对山地表土的冲刷，减少水土流失作用效果显著。



图3 低坡度跌坑数量较少情况 图4 高坡度跌坑数量及深度增加

(二) 山地光伏坡面侵蚀形态发育

试验观测发现，当试验坡度较小时，跌坑沿细沟发育数量较少，且深度很浅（图3）；随着坡度增加，跌坑沿细沟长度方向数量逐步增加，深度也逐渐加深，形态也越加复杂，跌坑的消能能力也逐步增强（图4）。



图5 跌坑、结皮发育示意图

跌坑深度与间距某一单方面并不能很好的反应跌坑的发育程度，为考虑二者的共同作用，引入跌坑发育系数SP，以图5所示跌坑、结皮段为例，发育系数SP定义为：

$$SP = \frac{(AB + BCD + DE + EFG + GH)}{AH} \quad (6)$$

由公式可见，沟床中跌坑未发育时，SP=1；沟床中有连续结皮、跌坑发育时，SP>1.11。

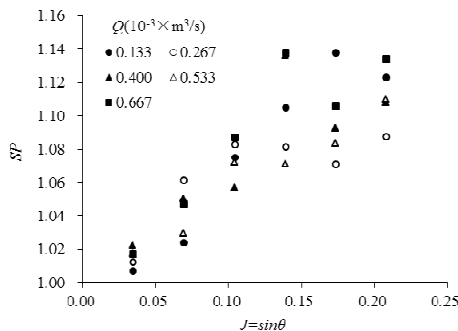


图6 跌坑发育系数随坡度的关系

由图6分析可知, 跌坑发育系数SP随坡度的增加而增加。在小坡度下, 跌坑发育系数数据点较为集中, 说明小坡度下, 流量对山地坡面形态发育影响很小, 随着坡度增加, 流量对坡面形态影响逐渐增加, 但最为关键影响坡面形态发育的因素为坡度, 这是因为, 随着坡度增加, 需要发育成熟的坡面形态来抵消水流能量的增加, 导致阻力增加, 这与降雨坡面平均流速与坡度关系影响较小不谋而合(坡面形态发育成熟情况下)。

(三) 坡面形态发育与消能率的响应因素

为进一步研究坡面形态影响水流侵蚀的能力, 特研究跌坑发育和消能效果之间的关系, 对于山区河流, 跌坑能够效能达到91%^[22]。由水力学知识可知, 整个坡面细沟的总能量可通过任意两个计算断面进行分析, 其公式为:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E - E_0}{E} \quad (7)$$

E和E₀的计算公式如下:

$$E = \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_1 + H \quad (8)$$

$$E_0 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_2 \quad (9)$$

式中: η 为消能率, %; E和E₀分别为进水口和出水口断面总能量, m; v₁和v₂为二者的断面平均流速, m/s; h₁和h₂为二者的断面平均水深, m; H为二者断面高度差, α_1 和 α_2 分别为进水口与出水口的动能修正系数, 本试验近似取值为1; g为重力加速度, m/s²。

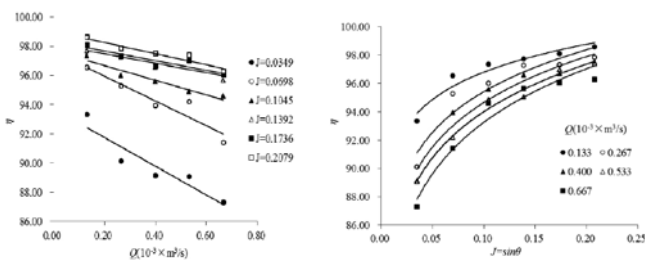


图7 不同坡度下 η 与流量之间关系 图8 不同流量下 η 与坡度之间关系

由图7、8可知, 同一坡度下, 跌坑消能率随流量的增加呈线性减小的趋势, 同一流量下, 消能率随坡度的增加呈幂函数增加的趋势。具体分析可知, 流量增大, 更多水流与边界接触占比减少, 导致能量消杀较少; 坡度增加, 坡面侵蚀形态愈加发育成熟, 主要表现为跌坑的发育, 由此能量消杀随着坡度增加大幅增加, 故消能效率随坡度等增加呈现幂函数关系。

通过上述2.2山地光伏坡面侵蚀形态研究、2.3坡面

形态发育与效能率的相应因素, 可知, 坡面形态与坡度关系密切, 因此在坡度较大的情况下, 一定要采取工程措施, 进行消能, 不然会导致山地光伏项目水土流失严重, 在桩基埋深不够的情况下, 导致桩基抗倾覆、抗拔能力大大减弱, 可能导致桩基倾倒等情况的发生。因此在大坡度情况下, 要采取植被措施或工程措施, 植被措施为种植乔木、灌木、植草措施, 在个别项目上, 如种植一些喜阴的中草药, 实现光伏发电和农作物经济效应的双赢效果。

三、结论和讨论

(1) 山地光伏项目坡面水流流速与流量的幂函数关系拟合更优, 表明坡面流速仅仅是试验流量的函数; 流速与坡度无关, 是由于坡面形态在大坡度下发育更加成熟, 阻碍了流速的增加。因此在建设山地光伏项目中, 在阶梯坡地上部建设排水沟, 有效拦截降雨水流对坡面的冲刷, 已达到防治坡面水土流失的目的。

(2) 坡面形态发育采用跌坑系数SP表达, 坡度越大, 跌坑发育系数越大, 同时, 坡度越大, 效能率越高, 说明在大坡度坡面形态发育平衡、成熟的情况下, 坡面形态愈加复杂, 对水流的阻力作用就越加凸显出来。在山地光伏建设过程中一定要采取植物、临时及工程措施来阻止水土流失, 尤其是坡度情况下, 降雨对坡面侵蚀是很严重的, 可能造成桩基的承载力及抗倾覆能力降低, 危及建设及运营安全。

(3) 阻力系数与坡度表现出正相关关系, 也印证了坡度越大, 坡面侵蚀的形态越加复杂, 阻力也越大。

参考文献

[1] 张科利, 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J], 泥沙研究, 1999, (1): 54-61.
 [2] 王龙生, 蔡强国等. 黄土坡面发育平稳的细沟流水动力学特性[J], 地理科学进展, 2014, 33(8): 1118-1125.
 [3] 沙际德, 白清俊. 黏性土坡面细沟流的水力特性试验研究[J], 泥沙研究, 2001, (6): 39-43.
 [4] 任熠, 王先拓, 王玉宽. 紫色土坡面细沟流的水动力学特征试验研究[J], 水土保持学报, 2007, 21(6): 39-45.
 [5] 李经顺. 光伏项目水土保持防治措施[J], 河南水利与南水北调, 2018, (10): 10-12.

作者简介: 董旭(1991.7-), 男(汉族), 内蒙古人, 工程师, 一级建造师, 主要从事新能源工程(光伏、风电)建设。