

# Prediction model of soil erosion on slope during construction of mountain photovoltaic power station and application of environmental and water conservation technology for ecological slope stabilization

Yingtao Guo

China Power Construction Group Hebei Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050021, China

## Abstract

Driven by the dual carbon goals, the photovoltaic power generation industry is gradually expanding into mountainous and hilly areas with intense solar radiation but complex terrain (such as regions with intricate slope landforms). However, during construction phases of mountain photovoltaic power stations, engineering activities like land leveling and road construction can disturb surface conditions, damage existing vegetation, and easily create numerous slopes, leading to prominent soil erosion issues. To address these challenges, this study focuses on slope stabilization during mountain photovoltaic power station construction. Based on field investigations and experimental data, we revised parameters in common soil erosion formulas to establish a soil erosion prediction model, followed by risk analysis and comparative selection of solutions. Simultaneously, we screened and optimized ecological slope stabilization and environmental protection schemes suitable for different types of slopes, while verifying the model and solution effectiveness. The research findings provide scientific guidance and technical support for soil erosion prevention during mountain photovoltaic power station construction, contributing to the green transformation of the photovoltaic industry.

## Keywords

Mountain photovoltaic power station; Construction phase; Slope soil erosion; Prediction model; Ecological slope stabilization

## 山地光伏电站施工期边坡水土流失预测模型及生态固坡的环水保技术应用

郭迎涛

中国电建集团河北工程有限公司, 中国·河北 石家庄 050021

## 摘要

受双碳目标驱动, 光伏发电产业逐步向太阳辐照强但地形复杂的山地、丘陵区域拓展(此类区域山坡地貌复杂)。但山地光伏电站建设施工期内, 平整土地、修筑道路等工程活动会扰动地表, 破坏原有植被, 易形成大量边坡, 导致水土流失问题突出。针对上述问题, 本文以山地光伏电站施工期边坡为研究对象, 在实地调研与实验的基础上, 通过修正水土流失通用公式的相关参数, 构建水土流失预测模型, 进而开展风险分析与方案比选; 同时筛选并优化适配不同类型边坡的生态固坡环水保方案, 对模型及方案效果开展验证。研究成果为山地光伏电站施工期水土流失防治提供科学指导与技术支持, 助力光伏产业绿色转型。

## 关键词

山地光伏电站; 施工期; 边坡水土流失; 预测模型; 生态固坡

## 1 引言

全球清洁能源革命下, 光伏发电规模扩大, 因平原土地紧张, 山地、丘陵成光伏优先选址区。山地地形复杂, 电站建设需大量土方作业, 易破坏植被与土壤, 施工期人为扰动强、地表不稳, 极易引发水土流失, 威胁土壤生态、致河

道淤积污染, 影响项目运营与产业发展。故构建水土流失预测模型、研发生态固坡技术成关键需求。

## 2 山地光伏电站施工期边坡水土流失特征分析

### 2.1 施工期边坡形成与扰动特点

山地光伏电站工程中, 不同分项工程的边坡种类及扰动程度存在差异。平整场地过程中, 需对光伏方阵区域进行土方开挖与回填, 形成大尺度边坡与小型陡坎, 地表土壤整体结构遭到破坏, 团粒结构解体, 抗蚀性显著降低; 为便

【作者简介】郭迎涛(1984-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 高级工程师, 从事新能源项目工程建设研究。

于运输需开挖山体形成道路坡面,该类坡面坡度多为 $25^{\circ}$  -  $45^{\circ}$ ,个别陡坎坡度超 $60^{\circ}$ ,且坡面多为裸露岩石或疏松土质,无植被覆盖;基础开挖与电缆沟开挖作业会形成条状分布的小型边坡,此类边坡单坡面积小但数量多,总扰动面积较大<sup>[1]</sup>。

施工期对地面的扰动分时期、分阶段:早期场地平整与土方开挖阶段,植被破坏严重,土体裸露率显著提升,人为扰动程度最大;中期基础施工与道路修筑阶段,扰动范围趋于稳定,土壤表层经机械碾压后密实度提升,土壤入渗能力随之改变;后期设施设备安装阶段,人为扰动程度较小,但前期形成的边坡土体仍处于裸露状态,遇降雨易引发水土流失。

## 2.2 水土流失影响因素识别

山地光伏电站施工期边坡水土流失,受自然因素与人为因素共同作用。自然因素中,降雨是核心驱动因子——山地降雨量分布不均,暴雨天气频发,短历时暴雨产生的地表径流冲刷力较强,易导致边坡发生面蚀与沟蚀;土壤性质也是影响水土流失的重要因素:砂壤土与壤土的颗粒粘合力较弱,抗冲刷能力差,易被径流侵蚀;黏土虽不易被直接冲刷,但其透水性弱,易形成地表径流,间接加剧水土流失;地形地貌方面,边坡坡度与坡长直接影响径流特征:坡度越大,径流流速越快、冲刷力越强;坡长越长,径流汇集量越大,二者共同加剧水土流失。

人为因素主要体现在施工组织合理性上:若土方开挖与回填作业安排不当,会导致裸露边坡长时间暴露,极易引发水土流失;若施工弃土弃渣处置不当,不仅会占用土地资源,遇降雨还可能引发泥石流灾害;防护措施的及时性与有效性同样影响水土流失:若未根据边坡类型匹配防护方案,或防护措施施工质量不达标,均会加剧水土流失。

## 2.3 水土流失危害评估

施工期边坡水土流失对项目区及周边环境影响较大。对项目区而言,施工期边坡水土流失的危害体现在两方面:一是导致表层肥沃土壤流失,不利于后期植被恢复;二是引发边坡失稳坍塌,损坏光伏电站设施,增加工程维护检修成本。对周边生态环境而言,边坡泥沙随径流流失会造成周边河道、水库淤积,影响水利工程的调蓄功能;同时,水土流失过程中,泥沙会携带土壤养分、农药残留等污染因子进入水体,破坏水生生物生存环境;此外,水土流失还会破坏山地原有生态环境,导致植被退化、生物多样性降低,影响生态系统稳定性。

# 3 山地光伏电站施工期边坡水土流失预测模型构建

## 3.1 模型构建基础与方法选择

通用土壤流失方程(USLE)、修正的通用土壤流失方程(RUSLE)[6]及中国土壤流失方程(CSLE)均为常用的水土流失预报模型。但CSLE在充分考虑我国土壤侵蚀发生规律的基础上,补充了水保措施因子与工程扰动因子,更

契合我国山地水土流失的预测需求。本文以CSLE为基础,构建山地光伏电站施工期边坡水土流失预测模型,其表达式为: $A=R \times K \times L \times S \times B \times E \times T$ 。式中:A为土壤流失量;R为降雨侵蚀力因子;K为土壤可蚀性因子;L为坡长因子;S为坡度因子;B为生物措施因子;E为工程措施因子;T为工程扰动因子。

模型构建前需开展实地勘测与试验,调取项目区近30年气象站降雨数据,以确定降雨侵蚀力因子R;调取项目区边坡土壤数据,通过室内试验测定土壤颗粒组成、有机质含量,计算土壤可蚀性因子K;通过无人机拍摄与实地勘测,获取项目区边坡坡长、坡度数据,确定坡长因子L与坡度因子S;调取项目区生物措施、工程措施类型数据,结合文献查阅与专家经验,确定生物措施因子B与工程措施因子E;根据施工阶段扰动程度划分工程扰动等级,确定工程扰动因子T。

## 3.2 关键参数本地化修正

### 3.2.1 降雨侵蚀力因子R修正

传统R因子计算多以日尺度降雨资料为基础,而山地地形复杂、局部小气候显著,区域内降雨雨强、历时存在差异。本文通过项目区内多个自动气象台站获取逐小时降雨资料,采用章文波等人提出的基于小时降雨资料的R因子改进计算方法。改进的R因子计算公式如下: $R=\alpha \times \sum P_i^{\beta}$ 。式中: $P_i$ 为某次降雨过程中第i小时的降雨量; $\alpha$ 、 $\beta$ 为地区参数,根据实测降雨与土壤流失资料通过回归分析确定<sup>[2]</sup>。

### 3.2.2 土壤可蚀性因子K修正

山地光伏电站施工期边坡土壤受工程扰动影响,土壤结构发生改变,可蚀性存在差异。本文通过采集不同施工扰动阶段的土壤样品,测定土壤有机质、黏粒、粉粒含量,计算EPIC模型初始K值;再通过室内模拟雨淋实验测试不同扰动阶段的土壤侵蚀量,建立K值与扰动力度的回归关系,修正原始K值,最终获得适用于施工期边坡的土壤可蚀性因子K。

### 3.2.3 工程扰动因子T确定

工程扰动因子T,指工程扰动导致的土体破坏程度,目前尚无统一计算公式。本文根据山地光伏电站施工特点,将施工期划分为场地清理阶段、土方开挖阶段、基础施工阶段、安装施工阶段;调查各阶段扰动面积、扰动强度及裸露时间,采用层次分析法确定各阶段扰动权重;结合现场测定的土壤流失量,建立工程扰动因子T与扰动权重的关联模型及关系式,最终确定各施工阶段的工程扰动因子T<sup>[3]</sup>。

## 3.3 模型验证与精度分析

为验证模型可靠性,以某山地光伏电站建设项目的土建施工工程为研究对象,在项目区内选取3处典型边坡(光伏方阵缓边坡、道路陡边坡、电缆沟长条边坡),布设径流小区与泥沙采集槽,监测降雨量、土壤侵蚀量(监测周期6个月)。将监测数据输入模型,计算出3处边坡的预测土壤

流失量，并与实际土壤侵蚀量进行对比分析。

选取平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE)、决定系数 ( $R^2$ ) 作为模型精度评价指标，计算结果显示：MAE 为 0.25-0.38t/(hm<sup>2</sup>·a)、RMSE 为 0.32-0.45t/(hm<sup>2</sup>·a)、 $R^2$  为 0.82-0.89。可见模型预测值与实测值贴合度较高，预测结果准确，可作为山地光伏电站施工期边坡水土流失的预测依据<sup>[4]</sup>。

## 4 生态固坡的环水保技术筛选与应用

### 4.1 生态固坡技术类型与特性分析

生态固坡技术是一类绿色环保、造价经济、景观效果好且协调性强的生态工程技术，可应用于山地光伏电站施工过程中。常见生态固坡技术类型如下：

**植生毯技术：**采用秸秆、椰纤维等自然纤维铺设于边坡，可削减地表径流、避免土壤冲刷，同时为植物生长提供适宜环境，适用于坡度小于 25° 的边坡，如光伏板周边边坡。

**生态袋技术：**使用高分子材料制成生态袋，装入种植土与营养土后分层堆叠于边坡表面，抗冲刷能力强、土壤不易流失，适用于坡度 25°-45° 的边坡，如道路边坡<sup>[5]</sup>。

**喷播植草技术：**将草种与肥料、保水剂混合制成喷播材料，通过高压喷枪喷射至边坡地表，可快速形成植被覆盖层，适用于基础开挖后坡度 < 35° 的土质边坡。

**格宾网技术：**将低碳钢丝编织成网箱，网箱内填充石块并堆置于边坡坡脚，形成网箱护坡以防止边坡坍塌，同时为植物生长提供空间，适用于坡度大于 45° 的山体开挖边坡防护。

### 4.2 基于边坡类型的生态固坡技术筛选

#### 4.2.1 光伏阵列区边坡

光伏方阵区边坡坡度 < 25°，受光伏方阵遮阴影响，区域光照较弱，同时需考虑光伏方阵清洗水的冲刷作用。对此采用“植生毯技术+喷播技术”组合防护方案：植生毯选用耐阴型椰纤维植生毯，喷播植物选用高羊茅、白三叶等耐阴草种。该方案可有效降低地表径流，提升边坡抗冲刷能力，且能适应遮阴环境，保障植物成活率。

#### 4.2.2 道路边坡

道路两侧边坡坡度多为 25°-45°，受车辆振动及雨滴喷淋作用易发生结构破坏，对边坡稳定性要求较高，故选用生态袋技术进行防护。生态袋选用高强度聚丙烯材质（兼具耐候性），袋内填充当地土壤与腐熟有机肥；堆叠码放时采用错缝搭接方式，增强整体结构稳定性；生态袋外表面喷播草灌混合种子，实现坡面植被恢复与生态防护的双重效果<sup>[6]</sup>。

#### 4.2.3 陡峭开挖边坡

陡坡开挖边坡坡度超 45°，边坡类型多为岩质边坡或松散土质边坡，稳定性差，易发生坍塌破坏。对此采用“格宾网技术+喷播植草技术”组合防护方案：在边坡底部堆码填充块石的格宾网箱，形成挡墙结构以阻止边坡坍塌；在格宾网箱间隙及边坡上部坡面，喷洒草灌种子与粘合剂的混合物，提升植被覆盖率，增强水土保持能力<sup>[7]</sup>。

## 4.3 生态固坡环水保技术集成应用与效果验证

### 4.3.1 技术集成方案

以某山地光伏电站为案例，按边坡类型集成生态固坡技术构建防护体系：光伏阵列区边坡先清杂物与松散土体，铺耐阴椰纤维植生毯并以 50cm×50cm 间距用 U 型钉固定，最后喷 15g/m<sup>2</sup> 浓度的耐阴草种混合液；道路边坡清浮土碎石后，分层堆置高强度聚丙烯生态袋（袋内土与腐熟有机肥 3:1 混合），每层错缝搭接 ≥10cm，堆完后用高压喷枪喷草灌混合种子液（草种与灌木种子 2:1 配比）；陡峭开挖边坡先清表层不稳定岩石与松散土体，边坡底部堆码 1.2m×0.8m×0.6m 规格格宾网箱（内填 20-50cm 粒径块石，密实度 ≥90%），再向网箱间隙及边坡上部喷草灌种子与粘合剂混合浆液（粘合剂为种子重量 5%）<sup>[8]</sup>。

### 4.3.2 效果验证

采用“模型预测+实地监测”验证效果：模型预测显示，光伏阵列区、道路、陡峭开挖边坡土壤流失量较未防护分别减少 72%-78%、68%-75%、65%-72%，水土流失显著受控；实地监测表明，技术应用半年后，三类边坡植被覆盖度分别达 85%、80%、75% 以上，无水土流失、坍塌及植被退化，坡面土壤有机质较初始提升 12%-15%，土壤稳定性改善<sup>[9]</sup>。

## 5 结语

山地光伏电站施工期边坡水土流失关乎生态效益与可持续发展，是平衡能源开发与生态保护的核心。构建科学水土流失预报模型可支撑施工风险评估与方案优化，选适配生态固坡技术能解决水土流失与边坡养护问题，二者可降生态扰动、减土壤流失。未来需结合气候、土壤等差异优化模型参数，探索更经济环保的固坡技术组合，助力产业绿色发展。

## 参考文献

- [1] 陈文雯.大型山地光伏电站水土流失防治途径[J].云南水电,2025,(05):5-9.
- [2] 赵丽仙,崔盛站,苏一波,等.云南省临沧市爱华光伏电站生态修复技术[J].中国水土保持,2025,(06):37-39+88.
- [3] 杨梅,罗松平.“双碳”背景下山区农业光伏电站项目水土流失防治措施探讨——以普定县鸡场坡农业光伏电站项目为例[J].中国水土保持,2024,(10):29-32.
- [4] 刘文祥,万丹,甘国权,等.干热河谷区光伏电站建设的生态效应与植被恢复探讨[J].中国水土保持,2023,(01):15-19.
- [5] 李贵鹏.集中式山地光伏电站设计优化研究[J].现代工程技术,2024,3(17):9-12.
- [6] 张诚紫,罗漪,黄志波.抗滑桩加固黏土边坡可视化模型试验研究[J].林业工程学报,2024,9(6):180-187.
- [7] 张小荣,马艳霞,张吾渝.基于FLAC<sup>3D</sup>的寒旱环境植被根系分布形态对边坡稳定性的影响[J].科学技术与工程,2023,23(9):3831-3838.
- [8] 张小静.河道整治工程中的生态护坡防洪堤设计[J].中国科技期刊数据库 工业A,2023.
- [9] 田光,李硕.露天矿复杂边坡支护关键技术研究与发展[J].采矿技术,2025(2).