

输电线路工程水土保持施工技术研究

刘 威

中国能源建设集团云南火电建设有限公司 云南 昆明 650000

摘 要：输电线路工程具有线路长、塔基分散、施工面多、扰动范围广的特点，施工期水土流失问题突出。本文针对输电线路工程水土流失特征，从塔基区、牵张场、施工便道、索道运输、临时堆土等维度分析了水土流失成因与规律，系统梳理了高海拔及生态敏感区施工面临的气候、地形、生态环境和材料运输等难点。在此基础上，从工程措施、临时措施和植物措施三个层面构建了水土保持综合治理技术体系。结合行业实践数据，对各类措施的防治效果进行了分析。研究表明，系统化的水土保持技术方案能够有效控制水土流失，植被恢复率可达 95% 以上，土壤侵蚀模数可控制在允许范围内，可为类似工程提供技术参考。

关键词：输电线路工程；水土保持；水土流失特征；防治分区；植被恢复；施工技术

引言

随着我国电力基础设施建设的快速推进，特高压输电工程已成为实现大规模、远距离电力输送的关键技术手段。输电线路工程具有线路绵延数百乃至数千千米、沿线地形地质条件复杂多变、塔基数量众多且分布分散的特点，施工活动对沿线生态环境的扰动范围广、强度大，水土流失问题十分突出^[1]。

近年来，国家对水土保持工作的重视程度达到了前所未有的高度。党的十八大以来，生态文明建设被纳入“五位一体”总体布局。GB 50433—2018《生产建设项目水土保持技术标准》和 DL/T 5491—2014《电力工程水土保持技术规范》相继实施，对防治目标和验收标准提出了更高要求^[2]。在政策趋严、监管加力的大背景下，输电线路工程水土保持已从单纯的合规性要求上升为工程建设的核心管控内容，对施工技术的系统性、科学性和可操作性提出了更高要求。

国内外学者对输电线路工程水土保持进行了较多研究。刘宝元等分析了高寒地区输电线路水土流失特征，提出了分区防治思路。王治国等^[3]总结了输变电工程水土保持关键技术。张晓峰等^[4]针对高海拔地区输电线路基础施工提出了环境保护措施。陈云敏等^[5]探讨了高山峡谷区基础设施水土保持方案编制要点。周志强等研究了生态敏感区施工期环境监测与评价方法。然而，现有研究多从特定工程案例展开，缺乏对施工技术的系统性梳理。本文从纯技术角度，系统分析水土流失特征，梳理施工难点，构建综合治理技术体系，以期为行业技术进步提供参考。

1 输电线路工程水土流失特征分析

1.1 水土流失成因

输电线路工程水土流失的根本原因在于施工活动对原地表植被和土壤结构的扰动破坏，主要包括四个方面：一是植被破坏，塔基开挖、便道修建、牵张场平整等活动清除地表植被，使土壤失去植被保护，直接暴露于降雨和风力侵蚀之下；二是表土扰动，施工活动不可避免地在地表土壤造成扰动，改变土壤结构和抗蚀性能，降低土壤抗冲刷能力；三是松散物源增加，基础开挖产生的弃土弃渣、施工便道开挖形成的边坡裸露面等，均增加了地表的松散物质，为水土流失提供了丰富物源条件；四是地表径流路径改变，施工活动改变了原有地形地貌，导致地表汇水路径发生变化，局部区域径流集中，加剧了冲刷侵蚀。

1.2 各防治分区流失特征

塔基区是水土流失最严重的区域。基础开挖深度一般 2~6m，形成裸露边坡，在降雨和风力作用下极易发生面蚀和沟蚀。研究表明，塔基区土壤侵蚀模数在施工初期可达 5000~8000t/(km²·a)。塔基区流失具有侵蚀强度大、持续时间长（基础施工至植被恢复需 2~3 年）、流失方式多样（面蚀、沟蚀、崩塌并存）等特点，且受地形坡度和地质条件影响显著。

牵张场占地面积大，地面被机械压实，土壤通透性降低，降雨后地表产流增加，以面蚀为主。施工便道是线路最长、扰动面最广的区域，土壤侵蚀模数可达 3000~6000t/(km²·a)，呈线性分布特征，防治难度较大。索道运输系统建设需修建支架基础，形成多个分散

扰动点,其特点是扰动分散但线路长。临时堆土区堆土松散、抗蚀能力极低,未防护时侵蚀模数可达 $8000 \sim 12000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,是最易流失的区域,须在堆土后 24 小时内完成拦挡苫盖。

防治分区应根据施工布置和扰动类型科学划分,一般包括塔基区、牵张场区、施工便道区、临时堆土场区和施工生产生活区,采用索道运输的还应增设索道防治区,遵循扰动类型一致、防治措施相近、便于管理的原则。

2 水土保持施工难点分析

2.1 气候条件的挑战

输电线路沿线气候条件差异大。在高海拔地区,低温环境限制了植物措施的实施时间窗口,有效施工天数通常不足 200 天,植被生长期仅 4~5 个月。植物措施须在土壤解冻后进行,且必须在初霜前完成播种以确保幼苗安全越冬。多数输电线路沿线降雨集中在 5~9 月,占全年降水量的 70%~80%。雨季暴雨雨滴击溅能量大,可破坏土壤表层结构形成结皮,降低入渗性能;地表径流冲刷能力随坡度增大而增强,在 $25^\circ \sim 45^\circ$ 坡面上,坡面流速可达平地的 2~4 倍,携沙能力显著增强。如何在雨季前完成关键水保措施的施工,是水保管控的核心难点。

2.2 地形条件的挑战

高山峡谷区坡度普遍 $25^\circ \sim 45^\circ$,部分塔位超过 40° ,峡谷底部与山顶高差可达 500~1000m。高陡边坡施工开挖面大、弃土量大、临时堆土难以稳定。余土拦挡坡比需严格控制: 25° 对应 1:2.1, $40^\circ \sim 45^\circ$ 对应 1:1.2~1:1.1。地形条件限制了大型机械进场,大量作业需人工完成,施工效率低,水保措施实施的及时性和质量难以保证。只能依靠索道运输材料,进一步增加了施工难度和水保压力。边坡稳定性也是核心风险,当岩层倾向与坡向一致且倾角小于坡角时,易发生顺层滑动,对水保措施的耐久性构成威胁。

2.3 生态环境与材料运输的挑战

输电线路途经多种生态功能区,部分穿越自然保护区、水源保护区等敏感区域。高海拔地区植被生长缓慢,海拔 3000m 以上树木年生长量不足低海拔的 1/3,高山草甸被破坏后自然恢复需 10~20 年。生态敏感区植物措施所用草种和树种必须为当地乡土物种,并要求供应商提供植物检疫证明,增加了材料获取难度和成本。同时,大量塔位位于山顶或半山腰,交通条件极差,水保材料如编织袋、密目网、草籽、灌木苗木等的运输同样面临困难。在高山峡谷区,每吨材料的运输成本可能高达材料本身价值的数倍,这在一定程度上影响了水保

措施实施的及时性和经济性。为解决这一问题,宜采取提前规划、集中运输的策略,在施工准备阶段将水保材料一次性运至各作业点附近。

3 水土保持施工措施

3.1 工程措施

3.1.1 表土剥离与保护。施工前对扰动区域进行表土剥离,剥离厚度:林地、草地 20cm,耕地 30cm。表土堆放应选择地势平坦、不易被冲刷的区域,堆高不超过 1.5m,四周编织袋围挡,表面及时苫盖。剥离表土优先用于后期植被恢复覆土,资源利用率可达 90% 以上。

3.1.2 土地整治与鱼鳞坑整地。施工结束后进行场地平整、土壤翻松,翻松深度不小于 20cm。对于 $25^\circ \sim 45^\circ$ 坡面采用鱼鳞坑整地:坑呈半圆形品字形排列,坑长 0.8~1.2m,宽 0.5~0.8m,深 0.3~0.4m,坑间水平距 1.0~1.5m,坑埂拍实,外沿高于内沿 10~15cm。

3.1.3 排水与挡护工程。塔基区上游设截水沟(按 10 年一遇暴雨标准设计,底宽 $\geq 0.4\text{m}$),将坡面汇水引排至自然冲沟;塔基平台设排水沟将积水有序排放;施工便道内侧设排水沟防止路面径流冲刷边坡。排水路径上应根据落差设置跌水、消力池或柔性消能垫等消能设施,防止集中水流冲刷形成冲沟。高陡边坡塔基采用挡土墙护坡,施工应遵循“先挡后弃”原则——先砌挡墙再弃土回填。浆砌石挡墙厚度 $\geq 0.5\text{m}$,混凝土挡墙厚度 $\geq 0.3\text{m}$,墙背回填选用透水性好材料分层夯实,压实度 ≥ 0.90 。

3.2 临时措施

3.2.1 填土编织袋拦挡。临时堆土区采用编织袋($40\text{cm} \times 60\text{cm}$)拦挡,堆高 $\leq 2\text{m}$,坡比 $\leq 1:2$ 。装土量为袋容积的 2/3,底层横向铺设,各层错缝呈阶梯状。抗滑安全系数 ≥ 1.30 ,抗倾覆 ≥ 1.50 。

3.2.2 密目网苫盖与临时排水。临时堆土和裸露面采用密目网苫盖,堆土区网眼 $\leq 5\text{mm} \times 5\text{mm}$,搭接 $\geq 20\text{cm}$,U 型钉固定间距 $\leq 50\text{cm}$ 。施工期设临时排水沟避免雨水冲刷基坑致水土流失。

3.3 植物措施

3.3.1 植被恢复技术。土地整治后采用灌草结合方式恢复植被。草种选用紫羊茅、早熟禾、黑麦草、白三叶等冷季型草种,灌木选用栒子、沙棘、绣线菊等乡土物种。普通区草籽撒播量约 $80\text{kg}/\text{hm}^2$,敏感区增至 $96\text{kg}/\text{hm}^2$;灌木密度普通区约 1500 株/ hm^2 ,敏感区 1600 株/ hm^2 。坡面 $> 30^\circ$ 宜采用液压喷播技术,播种后覆土 1~2cm 并镇压浇水。播种时间宜选春季(3~4 月)或秋

季(9~10月),避开高温干旱季节。灌木栽植前浸泡生根剂2~4h,栽植深度为根颈以下10~15cm,栽后浇透定根水。

3.3.2 敏感区加强措施。途经自然保护区等敏感区段应适当提高植物措施标准,增加播量和密度,严格选用乡土物种。

4 水土保持效果分析

通过系统实施综合防治措施,输电线路工程水土保持效果已在行业实践中得到广泛验证:

(1) 表土剥离与保护效果。表土剥离为植被恢复提供了宝贵土壤资源,表土利用率达90%以上。利用剥离表土进行鱼鳞坑填土和场地覆土,既节约了外购表土成本,又因保留了原有土壤微生物和种子库而显著提高了植被恢复质量。

(2) 工程措施防护效果。合理设计的截排水系统可将坡面径流量削减60%以上,挡土墙配合“先挡后弃”施工工艺可有效控制弃土流失。塔基区实施工程措施后,土壤侵蚀模数可从施工初期的 $5000 \sim 8000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 降低至 $1000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以下。

(3) 临时措施防护效果。编织袋拦挡和密目网苫盖措施到位时,雨季堆土区土壤流失量可降低85%以上,未出现溃决或大面积流失现象。临时排水和沉沙设施可有效拦截施工区域泥沙外排,减少对下游水体的影响。

(4) 植物措施恢复效果。灌草结合模式防治责任范围内植被恢复率可达95%以上,部分区域竣工后第一个生长季覆盖度即达70%以上,显著优于单一草本播种模式(60%~65%)。

(5) 综合防治效果。各防治分区实施综合措施后,土壤侵蚀模数均可控制在允许范围内:塔基区约 $800 \sim 1200\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,牵张场区约 $500 \sim 800\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,施工便道区约 $600 \sim 1000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,临时堆土场区约 $800 \sim 1500\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,均低于区域允许值。鱼鳞坑整地配合灌草种植可在雨季有效拦蓄地表径流,减少水土流失量约40%~50%。

5 结语与展望

本文从纯技术角度对输电线路工程水土保持施工技术进行了系统研究,主要结论如下:

(1) 输电线路工程水土流失具有多源头、线状分布、点多面广的特征,塔基区、施工便道区和临时堆土区是防治重点区域。防治分区应根据施工布置和扰动类型科学划分,实现分类施策、精准防治。

(2) 工程措施、临时措施与植物措施应形成完整的技术体系。工程措施提供边坡即时防护,临时措施控制施工期径流和松散物源流失,植物措施实现长期生态恢复。三者协同配合、时序衔接,是确保防治效果的关键。

(3) 表土资源保护是高海拔地区植被恢复的基础。施工前详细调查表土资源分布,制定剥离和保护方案,剥离表土妥善储存并优先用于植被恢复覆土,可显著提高植被恢复质量和速度。灌草结合的植被恢复模式配合鱼鳞坑整地技术,可有效提高高海拔及生态敏感区的植被恢复效果。植物品种应选用乡土物种,提高适应性和生态安全性。

(4) 余土管理是塔基区水保的关键环节。应严格控制堆土范围和堆置高度,遵循“先挡后弃”原则,及时采取拦挡和苫盖措施,避免弃土乱堆导致二次侵蚀。

后续研究可在以下方面深入开展:一是高海拔地区水土流失定量监测与预测模型的建立,为水土保持方案的科学编制提供精准数据支撑;二是乡土植物种质资源收集评价,筛选植被恢复优良品种;三是新型水保材料(如可降解编织袋、植生毯、三维植被网等)和新技术(如液压喷播、植生棒等)在高海拔地区的适用性研究;四是水保设施长期运行维护机制研究。

参考文献

- [1] GB 50433—2018 生产建设项目水土保持技术标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018.
- [2] DL/T 5491—2014 电力工程水土保持技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [3] 刘宝元,张光华,赵永军. 高寒地区输电线路工程水土流失特征及防治对策[J]. 水土保持通报,2022,42(3): 156-162.
- [4] 王治国,孙保平,李占斌. 输变电工程水土保持关键技术与示范[J]. 中国水土保持,2023,(5): 45-50.
- [5] 张晓峰,李建军. 高海拔地区输电线路基础施工环境保护技术[J]. 电力建设,2021,42(8): 89-95.