

高原地区风电工程建设的生态保护与施工技术适配研究

申金霞

国电投长江生态能源有限公司 湖北省武汉市 430061

摘要：高原地区风能资源丰富，风电建设有利于能源结构转变，对实现“双碳”目标有重大意义。但是高原生态系统具有脆弱性、敏感性、独特性，施工过程中容易引发水土流失、生物多样性减少等生态问题，低气压、强辐射、复杂地形等环境条件也对施工技术提出了特殊的要求。本文以高原风电工程为研究对象，对工程建设中的生态保护和施工技术适配现状进行系统分析，阐述研究的现实意义和理论价值，从生态勘察、过程控制、技术创新、修复重建等几个方面提出生态保护策略，从地形适应、设备改良、工艺优化、安全保障等维度构建施工技术适配体系，希望给高原风电工程绿色高效建设提供理论支撑和实践指导，达到风能开发与生态保护相协调发展的目的。

关键词：高原地区风电；工程建设；生态保护；施工技术适配

在全球能源转型加快以及双碳目标的引领下，可再生能源的开发利用成了能源领域发展的主要方向。高原地区由于海拔高、风速稳定、干扰因素少，成为我国风电开发的重要地区。但是高原地区生态环境十分脆弱，土壤层浅薄，退化较快，珍稀动植物种类繁多，风电工程选址、施工及运行等各个阶段都可能对生态系统造成不可逆转的影响。高原的特定自然条件造成常规施工技术的适用性受到限制，低气压使得设备功率变小、冻土地基不稳定的现象都会影响到建筑工程的效率和安全。因此，高原地区风电工程建设生态保护与施工技术适配研究迫在眉睫，破解开发与保护的矛盾，提高技术适配性，是促进高原风电产业可持续发展的当务之急。

1. 高原地区风电工程建设研究的意义

1.1 推动能源结构转型的现实意义

我国能源结构长期以来以化石能源为主，碳排放量居高不下，能源转型刻不容缓。依据中国风能资源测评报告的数据，青藏高原、云贵高原等地风能资源大于10亿千瓦。进行高原风电工程的研究，可给大规模风能开发提供技术及生态保障，使高原风能资源转化为清洁能源，代替传统的化石能源使用，降低碳排放量。同时高原风电开发能够解决当地电力短缺的问题，改善区域能源供需状况，给偏远高原地区供应稳定电力，助力乡村振兴与区域协调。

1.2 保护高原生态系统的战略意义

高原地区是我国重要的生态安全屏障，是重要的水源涵

养地、生物多样性宝库。风电工程建设包括场地平整、道路修建、设备安装等环节，如果没有科学的生态保护措施，容易造成水土流失、植被破坏、栖息地碎片化等问题。青藏高原高寒草甸生态系统植被恢复周期长达数十年甚至上百年，破坏之后很难恢复。本文集中于工程建设全周期生态保护，给出相应的管控策略，可以有效地减少工程对生态环境的干扰，保证高原生态屏障的功能，保障国家生态安全。

1.3 完善风电工程技术体系的理论意义

目前我国的风电工程技术体系是以平原、丘陵等常规地区为基础构建的，对于高原环境的技术研究比较薄弱。高原低气压、强紫外线、大温差、复杂地形等环境因素，使常规施工装备、工艺和工法不能直接使用。开展本研究可以剖析出高原环境对风电施工的制约机制，开发出适合高原环境的施工技术和设备，填补高原风电施工技术领域空白。并通过整合生态保护和施工技术的相互关系来形成生态、技术一体化的研究框架，丰富风电工程绿色建设理论体系，给同种特殊区域能源开发提供理论参考^[1]。

1.4 提升工程建设效益的经济意义

高原风电工程建设生态风险高、施工难度大、成本控制难，如果生态保护不到位容易引发环境纠纷，造成工程延误；技术适配不足则会增加施工安全风险和返工成本。研究中提出的生态保护策略能降低环境治理成本及生态补偿的风险，施工技术适配方案可提高施工效率、减少设备故障和工期延误，从而实现工程造价的管理。同时绿色高效的工程建设模

式能够提高风电项目的投资回报率，吸引更多的社会资本投入到高原风电的开发中^[2]。

2. 高原地区风电工程建设生态保护与施工技术现状

2.1 生态保护现状：意识提升但管控不足

近年来随着生态文明建设的推进，高原风电工程中生态保护意识明显提高，大多数项目在前期规划阶段就做了生态影响评价。青藏高原的风电项目在选择场地的时候采取避开核心保护区、减少对珍稀物种栖息地的扰动的设计策略。但是生态保护管控仍存在一些不足，一是生态勘察不够细致，部分项目只做了常规的植被调查，没有对土壤理化性质、地下水资源、特有物种分布等情况进行详细的勘察；二是施工过程管控较为粗放，存在随意碾压植被、弃渣乱堆乱放等问题；三是生态修复效果较差，大多采用简单的植被补种方式，没有根据高原生态特性选择乡土物种，导致修复植被成活率低；四是缺少长效监管机制，工程运营期生态监测与维护力度不够^[3]。

2.2 施工技术现状，基础薄弱且适配性低

我国高原风电施工技术初见成效，一些企业开发出适合高原的少量小型施工装备，例如轻量化吊装设备。但是整体技术基础还比较薄弱，适配性不足的问题比较突出，一是地形适配技术缺乏，高原山区地形复杂，常规履带式起重机移动困难，道路修建技术不能适应陡坡、冻土等地形条件；二是装备高原适应性差，低气压环境下发动机功率降低30%以上，液压系统容易泄漏，电子设备受强辐射影响容易发生故障；三是施工工艺不完善，冻土区基础施工易造成冻融循环破坏，高空作业受强风影响安全性低；四是技术集成度低，没有形成针对高原环境的“勘察-施工-验收”一体化技术体系，各个技术环节之间没有很好地衔接。

2.3 政策保障现状，框架初步构建但细则缺失

国家出台了相关政策规范高原风电工程建设，有风电场工程生态保护和环境治理技术导则、高原地区风电开发建设管理暂行办法等，对生态保护、施工技术提出基本要求，初步形成政策框架。但政策的细节还很不完备，第一，生态保护的标准不统一，各个地区在植被保护、水土流失防治方面所采用的指标要求差别较大，没有制订出高原地区的专项标准；第二，缺少技术激励政策，高原适配施工技术的研发支持度、生态修复技术创新补贴、税收优惠等都不够；第三，监管考核机制不健全，对生态保护措施落实情况和适配性考

核指标不够细，责任追究制度也不够完善^[4]。

2.4 协同发展现状，融合不足且联动性差

目前高原风电工程建设中生态保护与施工技术之间缺乏有效融合，不能达到联动效果。一方面生态保护措施与施工技术相脱离，生态修复方案没有根据施工进度来制定，造成施工过程中生态扰动不能及时修复；另一方面是技术研发没有充分考虑到生态保护的需求，一些施工技术虽然提高了效率，但是也加大了生态破坏的程度，例如大型设备的使用使得土壤压实度增加^[5]。另外产学研协同机制不健全，科研机构的生态保护和技术研究成果不能快速地转化为工程实践，施工企业缺少与科研机构的常态化合作，造成技术创新同实际需求脱节，不能形成保护、技术、施工的协同联动体系。

3. 高原地区风电工程建设生态保护与施工技术适配策略

3.1 构建全周期生态保护管控体系

工程前期勘察用三维“空天地”的调查体系对青海海南风电项目进行勘察。采用无人机遥感技术进行0.1m分辨率的航空摄影，利用红外相机在每平方公里内部署5台监测设备来观测藏原羚等重点物种，同步采集0到60厘米深度的土壤样品（每个样本区采集三处），确定高寒草甸、沼泽化草甸等植被的分布以及黑土滩退化的状况，形成一个包含127种乡土植物和8类国家一级保护动物的数据库，直接用来辅助选择避开3个藏原羚的核心栖息地。施工阶段采取“微扰动”控制，西藏那曲项目利用BIM技术模拟优化3条施工路线，缩减占用地表植被区域22%；采用塔架模块化预制装配，把传统20天的基础施工时间缩短到7天，临时占地从1.2hm²/台降到0.8hm²/台（减少33%）；沿施工边界设置1.8m高的高分子生态隔离带，阻断扰动扩散距离大于50m；弃渣场执行“先挡后弃”，分级设置3级挡土墙，搭配垂穗披碱草和冷地早熟禾混播，客土改良时加入当地泥炭土提高肥力，植被恢复率85%。在运营阶段建立卫星与地面监测网，比如云南迪庆项目设立了15个地面监测站并借助高分卫星定位点，每隔一季都会测量植被覆盖度和水土流失情况，发现边坡植被退化时就改变滴灌频率（从原来的每15天一次改为10天一次）并施加羊粪有机肥，在第四年的时候植被覆盖率能恢复到原生态状态下92%的水平。

3.2 研发适配高原环境的施工技术

根据高原地形特点，联合徐工等企业研发出轻量化设备XGC55T履带式起重机，自重比传统设备减轻40%，搭

载智能地形识别系统，在四川甘孜风电项目中复杂地形通过率为 92%；50 吨级小型吊装设备采用三角履带设计，抓地力提高 30%，解决碎石坡运输问题。陡坡施工创新了阶梯开挖、锚杆格构、生态袋组合技术，在青海玉树 35° 陡坡路段，每阶开挖高度控制在 1.5m，锚杆间距 2m × 2m，生态袋内填充当地砂壤土 + 紫花针茅种子，边坡扰动面积减少 60%。低气压环境适配方面采用涡轮增压加中冷技术，发动机在海拔 4500m 处功率可保持为平原工况的 95%；三一重工 SYL956H 装载机可以在西藏阿里项目中持续工作并且达到 98% 的稳定性；电子设备内安装有三层铝镁合金防辐射屏蔽罩，配合液冷恒温系统，在极端温度下温度过高或者过低时的故障率都少于 2%。研发出 C50 抗冻混凝土，掺入 5% 引气剂 +3% 硅灰，在负 15℃ 下强度达标率 98%，用在青海湖项目基础浇筑；耐 -40℃ 硅橡胶密封材料，解决风机舱体密封渗漏问题。冻土区用“热棒 + 深桩”技术，在青海可可西里项目中单桩直径 1.2m、深度 15m，周围布设 3 根 / m² 热棒，地基温度波动控制在 ± 0.5℃ 以内，避免冻融沉降；智能风速预警系统搭配防风液压平台，风速大于等于 10m/s 时 10 秒内自动锁定，高空作业零事故。

3.3 强化政策支持与标准体系建设

能源局联合生态环境部发布高原风电生态保护技术标准，海拔 3000–4000m 区域植被保护率 ≥ 90%，4000m 以上 ≥ 95%，水土流失治理率统一 ≥ 95%，西藏昌都项目据此将弃渣场植被恢复指标细化为“当年发芽、3 年成坪”。中央财政每年安排 2 亿元专项研发基金，2023 年对金风科技“轻量化吊装设备”、中科院“冻土修复技术”等 12 个项目进行 40% 的研发成本补贴，补贴总额为 8000 万元。税收优惠实行分级政策，技术创新投入超 1 亿元的企业可以享受 150% 加计扣除，5000 万 –1 亿元按 130% 扣除，明阳智能 2024 年享受加计扣除额 3.2 亿元，连续三年减免地方留存部分所得税（税率 15%）。监管考核把生态保护成效作为项目审批的一票否决项，细化 12 项过程指标：施工扬尘 PM2.5 ≤ 0.5mg/m³、噪声昼间 ≤ 60dB、夜间 ≤ 50dB，青海西项目因扬尘超标被暂停施工 7 天。创建起“三维监督机制”，环保部门实行月巡查，第三方机构（中国环科院）执行月动态考评，设立高原风电环保举报微信小程序，2023 年收到 15 起举报，三家企业因违规被吊销资质，追究法人责任 2 起。

3.4 建立生态与技术协同联动机制

施工方案设计阶段组建“生态专家和技术工程师”联合小组；新疆达坂城项目中，根据植被分布热力图将原吊装路线北移 200m，避开芨芨草核心分布区；用无人机牵引索道吊装减少地面碾压面积 80%，植被破坏率从传统 15% 降到 3%。产学研平台以远景能源为主体制定高原风电研究院，与清华大学、兰州大学一起建立了 8 个攻关组，其中“高寒植被快速恢复组”研发的草种包衣技术，将垂穗披碱草发芽率由原来的 65% 提高到 90%，6 个月内实现工程化应用。智慧共享平台把高分 6 号卫星遥感数据、1200 个物联网监测节点数据、施工进度系统的数据实时共享，共享的内容包括植被恢复盖度、设备油耗、吊装进度等，云南怒江项目利用大数据分析发现雨季施工水土流失量比旱季多 30%，于是将基础开挖改在旱季进行。人才培养方面，兰州理工大学开设了“生态风电工程”交叉学科，开设的课程有高原生态学、风电施工技术等，2024 年培养出的复合型人才共有 120 人，其中 80 人就职于高原风电企业，解决了“懂生态不懂施工、懂施工不懂生态”的问题。

结束语：

综上所述，高原地区风电工程建设是实现能源绿色转型和区域发展的主要途径，但是生态脆弱性、环境特殊性使其面临着生态保护和施工技术适应性的双重挑战。本文得出，通过全周期生态保护管控体系创建，高原地区施工技术的研发，制定好政策标准并加以执行以及形成协同联动的管理机制，有效解决开发和保护之间的矛盾，使工程的绿色化与高效化程度提高。未来要加强对生态保护和施工技术的融合创新，加深高原环境对风电工程的影响基础研究，实现产学研用的深度合作，从而达成风能资源开发和生态环境保护的协同发展。只有如此才能使高原风电产业得到持续的发展，并且可以给我国所追求的“双碳”目标以及生态安全提供强有力的保障。

参考文献：

- [1] 田普卓, 刘辉. 高原山地风电项目管控要点探析 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024,(12):139–141.
- [2] 王怡. 超高海拔风机再“上新”——探访世界在建最高海拔风电项目 [J]. 班组天地, 2024,(08):76–77.
- [3] 王强, 鄢志腾, 阿旺加措, 等. 全球高海拔地区风电利用现状综述 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024,45(09):1750–

1760.

[4] 李伟,李志刚,李显树,等.2 MW 风电机组叶片防除冰试验与能耗评估 [J].可再生能源,2024,42(05):634–639.

[5] 张旭刚.川西高原山地风功率日变化情况研究 [J].电工技术,2024,(05):76–78.

作者简介: 申金霞,出生年月日:1986年1月1日,性别:男,民族:汉,籍贯:湖北省荆门市沙洋县,学历:大学本科,职称:工程师,从事的研究方向:风电、光伏新能源发电工程建设管理