

面向碳中和目标的风电场生态友好型建设路径研究

訾宝程

国华(宁夏)新能源有限公司 宁夏 银川 750000

摘要: 在全球应对气候变化、推动能源结构转型的背景下,中国提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的宏伟目标。风能作为清洁、可再生的核心能源,在实现碳中和进程中扮演着至关重要的角色。然而,风电场的大规模、快速化开发在贡献绿色电力的同时,也对区域生态系统带来了不可忽视的扰动,如栖息地破碎化、鸟类与蝙蝠撞击死亡、噪声与光影污染等。如何在保障风电产业健康发展与保护生态环境之间寻求平衡,是实现真正可持续发展的关键命题。本文旨在系统梳理风电场建设对生态环境的主要影响,深入剖析当前生态友好型风电场建设面临的挑战,并在此基础上,从全生命周期视角出发,构建一套涵盖科学选址、绿色设计、智慧施工、智能运维及退役回收的综合性生态友好型建设路径。研究认为,通过强化顶层设计、完善法规标准、推广先进技术、创新协同机制,可以有效化解风电开发与生态保护的矛盾,为我国乃至全球风电产业的高质量、可持续发展提供理论支撑与实践指导。

关键词: 碳中和;风电场;生态友好;全生命周期;生物多样性

引言

工业革命后,人类活动致温室气体排放剧增,引发全球气候变暖等环境难题。《巴黎协定》设定了将全球平均气温较工业化前升高控制在 2°C 以内、努力限制在 1.5°C 以内的长期目标。在此背景下,中国2020年宣布“双碳”战略目标,展现大国担当。实现碳中和,能源系统深度脱碳是关键。风能资源丰富、技术成熟、成本下降,成为全球能源转型主力。截至2025年底,中国风电累计装机容量超6.4亿千瓦,居世界首位。未来,在“十五五”及中长期规划推动下,风电装机规模将不断扩大,在大型风光基地建设中战略地位愈发重要。不过,大规模风电场建设与运营会产生生态问题。风机塔筒等设施铺设占用土地,分割自然生境,形成“栖息地孤岛”,阻碍野生动物迁徙交流;高速旋转叶片威胁飞行中的鸟类,对迁徙物种影响大;风机运行的低频噪声和光影闪烁会干扰周边野生动物行为模式与生理健康,也会干扰附件村民生活质量。这些生态问题若处理不好,会引发社会争议,影响风电产业发展。因此,探索“生态友好型”风电建设路径,既能高效开发风能资源,又能减少对生态环境负面影响,这既是践行生态文明思想的内在要求,也是保障国家能源安全、实现碳中和目标的关键。

1 风电场建设对生态环境的主要影响

风电场对生态环境的影响贯穿于其规划、建设、运营直至退役的全过程,主要体现在以下几个方面:

1.1 栖息地丧失与破碎化

风电场的建设需要占用大量土地用于安装风机基础、修建进场道路、集电线路以及升压站等配套设施。这种

土地利用方式的转变直接导致了原有自然植被(如森林、草原、湿地)的清除,造成原生栖息地的永久性丧失。更为严重的是,线性的道路和电缆网络如同“刀片”一样,将原本连续、完整的生态系统切割成多个孤立的斑块,即所谓的“栖息地破碎化”。栖息地破碎化会带来一系列连锁反应。首先,它限制了野生动物的活动范围,阻碍了种群间的基因交流,增加了近亲繁殖的风险,从而降低了种群的遗传多样性和长期生存能力^[1]。其次,破碎化的边缘效应会改变微气候(如光照、湿度、风速),使得内部物种被迫向更小的核心区域退缩,加剧了生存竞争。对于依赖大范围活动的大型哺乳动物(如鹿、狼)和迁徙性鸟类而言,风电场及其配套路网构成了难以逾越的物理屏障。

1.2 对鸟类的直接致死风险

这是风电场最受关注的生态影响之一。高速旋转的风机叶片和带电的线路杆塔对飞行中的鸟类构成了直接的物理碰撞威胁。研究表明,不同物种的易感性差异巨大。猛禽(如金雕、秃鹫)因常在高空盘旋搜寻猎物,视线专注于地面,对前方的障碍物(如风机)警惕性较低,故撞击风险极高。迁徙季节的夜行性鸟类,由于在夜间或恶劣天气下飞行导航能力受限,也极易与风机和杆塔发生碰撞。蝙蝠的死亡原因更为复杂,除了直接撞击外,还包括气压骤变(气压伤)。当蝙蝠飞近高速旋转的叶片时,叶片后方形成的低压区会导致其肺部过度膨胀而破裂,即使未被叶片击中也可能因此死亡。蝙蝠作为重要的授粉者和害虫天敌,其种群数量的锐减将对生态系统功能产生深远影响。

1.3 噪声与光影污染

风机在运行过程中会产生持续的机械噪声和空气动力学噪声,尤其是在夜间环境背景噪声较低时,这种低频噪声可能传播得更远。虽然对人类的影响已有较多研究和规范,但其对野生动物的影响尚不完全清楚。有证据表明,噪声可能会干扰动物的通讯(如鸟类鸣叫求偶)、捕食和警戒行为,迫使它们离开原有的栖息地。“光影效应”是指风机叶片在阳光照射下周期性地投射移动阴影到地面的现象。这种闪烁的光影对于人类可能只是视觉不适,但对于某些敏感的野生动物(如驯鹿、部分鸟类)而言,可能被视为一种潜在的威胁信号,引发应激反应,导致其回避该区域,从而间接造成栖息地的有效丧失。

1.4 对土壤、水文及局地微气候的扰动

施工阶段的大规模土方开挖、道路修建等活动会严重破坏地表植被和土壤结构,降低土壤的持水能力和抗侵蚀能力,增加水土流失和滑坡的风险。尤其是在山地、丘陵等生态脆弱区,这种影响尤为显著。施工废水、设备运行中的废油若处理不当,还可能污染周边土地和水体。此外,大面积的地表硬化(如风机平台)会改变地表径流模式,影响局地水文循环。密集的风机阵列还可能对局地风场产生微弱但持续的扰动,进而影响热量和水分的交换,对小尺度气候产生一定影响。

2 生态友好型风电场建设面临的主要挑战

尽管生态友好理念日益受到重视,但在实践中仍面临诸多挑战:

2.1 规划选址阶段的冲突

优质的风能资源区(如山脊、海岸、湖泊湿地周边)往往也是生物多样性热点区域或重要的生态廊道。如何在二者之间进行科学取舍,是规划阶段的核心难题。目前,部分项目在前期环评中存在调查不充分、数据不准确、预测模型过于简化等问题,导致对潜在生态风险的低估。

2.2 技术与经济成本的制约

许多有效的生态缓解措施,如高精度雷达-声学联合监测系统、智能停机算法、超声波驱蝙蝠装置等,往往成本高昂。在激烈的市场竞争和降本增效的压力下,开发商可能倾向于选择成本更低但生态效益较差的方案。如何平衡生态保护投入与项目经济效益,是推广先进技术的一大障碍。

2.3 法规标准体系尚不健全

我国现有的风电项目环境影响评价技术导则对生态要素的关注点和评价深度仍有待加强,缺乏针对不同生态敏感区(如候鸟迁徙通道、珍稀物种栖息地)的差异

化、精细化管理要求。同时,对于运营期的长期生态监测、退役后的生态修复责任等环节,相关法规也存在空白或执行力度不足的问题。

2.4 全生命周期管理理念缺失

传统的风电项目管理模式往往侧重于建设和发电效率,对前期精细规划、中期智慧运维以及后期退役回收的生态考量不足。各阶段之间缺乏有效的信息传递和协同机制,导致生态管理呈现碎片化,难以形成闭环。

3 面向碳中和的生态友好型风电场建设路径

为系统性解决上述挑战,必须摒弃“先开发、后治理”的传统模式,转而采用覆盖风电场全生命周期的生态友好型建设路径。

3.1 科学精准的规划与选址(源头规避)

这是实现生态友好的第一道也是最关键的防线。

建立“生态红线+风能资源”叠加分析平台:整合全国生态保护红线、自然保护地、重要物种栖息地、鸟类迁徙通道等高精度空间数据,与风能资源图谱进行叠加分析。利用GIS(地理信息系统)和遥感技术,优先筛选出风能资源丰富且生态敏感性低的区域作为开发备选区,从源头上规避高生态价值区域^[2]。

实施分级分类管控:根据生态敏感度,将国土空间划分为禁止开发区、限制开发区和优先开发区。在限制开发区内,必须进行更为严格的专项生态调查和影响预测,并制定针对性的缓解计划。

3.2 创新驱动的绿色设计与技术应用(过程减缓)

在无法完全规避的情况下,通过技术创新最大限度地减轻影响。(1)优化风机布局与机型选择:采用计算流体力学(CFD)模拟,优化风机间距和排布,减少对局地风场的过度扰动。在鸟类活动频繁区域,可选用单机容量更大、转速更慢的风机,以降低单位发电量的叶片通过频率,从而减少撞击风险。(2)部署智能感知与主动防护系统:应用毫米波雷达、热成像相机、声学监测器等多源传感器,构建全天候、立体化的野生动物监测网络。结合AI算法,实时识别高风险物种(如猛禽)的接近,并自动触发临时停机或启动声光驱离装置。例如,“IdentiFlight”系统已被证明能有效识别并保护金雕。(3)推广“近零扰动”施工技术:采用模块化预制、直升机吊装等技术,减少现场土建工程量和重型机械使用,从而最小化对地表植被和土壤的破坏。严格控制施工时间和范围,避开野生动物的繁殖、迁徙等关键时期。

3.3 智慧高效的生态运维管理(持续优化)

将生态管理融入日常运维,实现动态调整。(1)建立长期生态监测与适应性管理机制:在项目运营期内,

持续开展鸟类、蝙蝠、植被、土壤等方面的监测,收集真实世界的的数据。基于监测结果,对原有的缓解措施进行评估和优化,形成“监测-评估-调整”的闭环管理^[3]。

(2) 发展数字孪生技术: 构建风电场的数字孪生体,集成风资源、设备状态、生态监测等多维数据,通过虚拟仿真预演不同运维策略(如特定时段停机)对发电量和生态保护的综合影响,为科学决策提供支持。

3.4 负责任的退役与生态修复(闭环收尾)

确保项目全生命周期的生态责任。(1) 制定强制性的退役与复垦计划: 在项目核准之初,就应明确退役时间表、资金保障机制和生态修复目标。退役后,不仅要拆除所有地上和地下设施,更要对受扰动的土地进行系统的生态修复,如重新引入乡土植物、恢复土壤结构,力求使场地生态功能得到最大程度的恢复甚至提升。(2) 探索风机叶片等复合材料的绿色回收技术: 针对目前难以处理的玻璃纤维/碳纤维叶片,鼓励和支持热解、化学回收、再制造等新兴技术的研发与产业化,杜绝填埋带来的二次污染。

4 保障措施与政策建议

为确保上述路径的有效实施,需要强有力的外部支撑:(1) 强化顶层设计与法规引领: 修订和完善风电项目环境影响评价技术导则,增加对生物多样性、栖息地连通性等要素的强制性评估要求。出台《生态友好型风电场建设指南》,为行业提供明确的技术指引。(2) 完善经济激励与约束机制: 设立生态友好型风电项目的专项补贴或绿色信贷支持。探索建立“生态补偿”机制,要求开发商对不可避免的生态损失进行异地修复或资金补偿。将生态绩效纳入可再生能源电力消纳保障机制考核^[4]。(3) 促进跨部门、跨学科协同创新: 建立由能源、生态环境、林业草原、科研机构、企业等多方参与的协同平台,共享数据,联合攻关关键技术瓶颈。鼓励高校和

科研院所开设交叉学科课程,培养复合型人才。(4) 加强公众参与与透明度建设: 在项目规划和环评阶段,充分征求当地社区和环保组织的意见,公开生态影响评估报告和缓解措施,接受社会监督,增进公众理解与信任。

5 结语

风电作为实现碳中和目标的支柱性清洁能源,其大规模发展势在必行。然而,我们必须清醒地认识到,绿色能源的开发本身也必须是绿色的。风电场建设与生态保护并非不可调和的对立关系,而是可以通过科学规划、技术创新和精细化管理实现协同共赢。本文提出的覆盖“科学选址—绿色设计—智慧运维—责任退役”全生命周期的生态友好型建设路径,为核心矛盾的化解提供了系统性解决方案。这条路径强调从源头规避高风险区域,运用智能化、数字化手段在过程中精准减缓影响,并通过长期监测和闭环管理确保生态责任的全面落实。展望未来,随着生态文明理念的深入人心和技术的不断进步,生态友好将不再是风电项目的附加选项,而应成为其内在基因和核心竞争力。唯有如此,风电产业才能真正肩负起助力国家实现碳中和目标的历史使命,同时守护好我们赖以生存的绿水青山,为子孙后代留下一个繁荣、和谐、可持续发展的地球家园。

参考文献

- [1]张杰.风电场土地利用优化规划与建设工程实践[J].电工技术,2024,(S1):381-383+387.
- [2]许波峰,陆忠民,蔡新.风电场建设环境评价与管理[M].中国水利水电出版社:202112:246.
- [3]刘亚楠,智慧风电场建设关键技术研究.江西省,中国电建集团江西省电力设计院有限公司,2023-06-09.
- [4]彭艳来,杨晓峰.风电场建设智能化转型探索与实践[J].企业管理,2020,(S2):110-111.