

黄志元, 刘宝华, 崔星怡, 等. 输变电工程对土壤环境的影响及其防控[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 561-569.

HUANG Zhi-yuan, LIU Bao-hua, CUI Xing-yi, et al. Impacts of power transmission projects on the surrounding soil environment: Prevention and control[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 561-569.

## 输变电工程对土壤环境的影响及其防控

黄志元<sup>1</sup>, 刘宝华<sup>3</sup>, 崔星怡<sup>2</sup>, 许杨贵<sup>2</sup>, 汤泽平<sup>3</sup>, 黎华寿<sup>2\*</sup>

(1. 南方电网广东电网公司, 广州 510060; 2. 华南农业大学资源环境学院 农业农村部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642; 3. 广东省环境辐射监测中心, 广州 510300)

**摘要:** 输变电工程建设及其营运对变电站场和线路工程区及周边局部区域的水土资源产生一定影响, 本文就输变电工程对土壤理化性质、土壤生物、水土保持的影响, 工程活动可能带来的外来物种入侵生态风险等进行综述分析, 并通过地处亚热带地区的广东沿海某 500 kV 输变电工程项目的实际案例, 总结了防控输变电工程土壤侵蚀等环境的具体措施。

**关键词:** 输变电工程; 土壤环境; 防控措施; 土壤动物; 生物入侵

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2019)05-0561-09 doi: 10.13254/j.jare.2018.0245

### Impacts of power transmission projects on the surrounding soil environment: Prevention and control

HUANG Zhi-yuan<sup>1</sup>, LIU Bao-hua<sup>3</sup>, CUI Xing-yi<sup>2</sup>, XU Yang-gui<sup>2</sup>, TANG Ze-ping<sup>3</sup>, LI Hua-shou<sup>2\*</sup>

(1. Limited Liability Company of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, South China Agricultural University/South China Key Laboratory of Tropical Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Provincial Environmental Radiation Monitoring Center, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** The construction and operation of power transmission and transformation projects have certain impacts on water and soil resources within the substation field and the line engineering area, as well as in the surrounding local areas. This paper summarized the impacts of power transmission and transformation projects on soil properties, soil biology, and soil erosion. The engineering activities and associated changes in soil properties would also have an inevitably adverse impact on soil animals. Due to frequent and inadvertent human activities, the risk of invasion by alien species could increase ecological risks, thus affecting the soil biodiversity and the ecological function of the soil. After analyzing and summarizing a 500 kV transmission and transformation project in the coastal area of a subtropical region, this paper proposes prevention and control measures for soil environmental impacts from power transmission and transformation projects.

**Keywords:** power transmission and transformation projects; soil environment; preventive measures; soil animals; biological invasion

人类活动导致土壤面临生态退化和环境污染两大环境问题<sup>[1-2]</sup>, 全球每年因土壤侵蚀而流失的土壤约达 750 亿 t, 所损失的土壤养分几乎等于世界商品肥料产量<sup>[3]</sup>。特别是各类工程项目改变了项目区土壤理化性质, 影响了土壤生产力和生态功能。

2018 年 9 月生态环境部发布了《HJ 964—2018 环

境影响评价技术导则 土壤环境(试行)》, 对规范和指导土壤环境影响评价工作、防止或减缓土壤环境退化提出了规范性的评价要求, 但比发展较成熟的大气环境、水环境和生态环境影响评价, 土壤环境影响评价仍是环评体系中比较薄弱的环节。当前, 以毒害污染物管控为核心的土壤环境风险评估或由暴露风险评

收稿日期: 2018-09-17 录用日期: 2018-12-25

作者简介: 黄志元(1980—), 男, 浙江绍兴人, 高级工程师, 从事电网基建项目管理工作。E-mail: huangzhiyuan@gd.csg.cn

\*通信作者: 黎华寿 E-mail: lihuashou@scau.edu.cn

基金项目: 广东省科技计划项目(2015B090903077); 广东电网公司科技计划项目

Project supported: Project for Science and Technology of Guangdong Province(2015B090903077); Scientific and Technological Planning Project of Guangdong Power Grid Company

估为主导的生态风险评估均已引起广泛关注,相关导则已在具体的土壤环境管控中使用,但有关线性工程等项目土壤环评仍有待进一步深入和完善<sup>[4]</sup>。电力是经济社会发展的基础,我国超(特)高压等不同等级电压交流、直流输变电项目逐年增多<sup>[5]</sup>。输变电工程具有周期长、规模大、开挖扰动大以及弃土弃渣量大等特点<sup>[6]</sup>,破坏植物,扰动土层,对建设区及周边土壤环境造成一定影响<sup>[7]</sup>。一些输变电工程,建在土壤环境敏感区,如耕地、林地、园地、草地和饮用水水源地<sup>[8]</sup>,以及重点生态功能区、自然保护区、生物多样性优先保护区(如森林公园、湿地公园)等生态用地<sup>[9-10]</sup>。本文在综述输变电线路工程对土壤理化性质、土壤生物、土壤侵蚀等影响的基础上,通过实际案例分析工程活动对土壤环境的影响及其防控措施与实施效果,为输变电线路工程与生态保护协调发展提供参考。

## 1 输变电工程对土壤环境的影响

### 1.1 对土壤资源的影响

输变电工程对土壤资源的影响体现为土地占用和临时压占以及地下埋线对土壤的扰动。其中变电站和铁塔对土地的永久性破坏与占用使原有土地利用功能不可恢复;施工场地、牵张场地、施工简易道路和人抬道路等临时设施对土地的压占<sup>[11]</sup>,对土地产生临时破坏作用,暂时改变原有土地的利用功能,工程完工后基本可以恢复<sup>[12]</sup>;输电线路一般分为高压架空输电线路、中低压架空输电线路、高中压地下电缆,前两者架空线路对土壤无扰动影响,但线路巡查维护通道和植被限高管理均对局部范围造成一定影响,地下电缆则需挖掘占用土地,尽管可以结合地表复原减少负面影响,但原来的农用地一般不宜再进行耕种<sup>[13]</sup>。

以广东某超高压 500 kV 输变电工程为例,工程总用地面积 64 605.77 m<sup>2</sup>,其中站区占地面积 62 035.56 m<sup>2</sup>(包括站外边坡和排水沟占地),进站道路占地面积 2 570.21 m<sup>2</sup>;围墙内占地面积(即红线范围)52 280 m<sup>2</sup>;输电线路工程共新建双回路铁塔 7 基,塔基总占地面积 2421 m<sup>2</sup>;临时占地共布设牵张场 2 处,每处用地面积约 2000 m<sup>2</sup>,总用地面积约 4000 m<sup>2</sup>,另外塔基施工临时用地面积 5669 m<sup>2</sup>。由于是高压架空电缆线路,当地道路交通较发达,临时占地很少。此输变电工程地处丘陵坡地,上述占地的原用地性质为林地和果园。

### 1.2 对土壤理化性质的影响

输变电工程施工准备期、施工期以及恢复期都可

能扰动土壤并引发不同强度的水土流失,导致养分流失、地力衰退<sup>[14]</sup>。土壤养分流失和地力下降极容易随着坡度的增大而加重,并受当地水文条件和土地利用类型的影响<sup>[15-16]</sup>。

输变电工程对土壤物理性质的影响主要体现在对土壤结构和质地的影响。施工期地貌和土壤受到强烈扰动,随后的水泥道路、站内建筑、生活区和设备区等的建设以及对土地的直接占用等,都改变原土壤结构和功能。如塔基挖掘使得开挖面裸露,破坏地表原有植被,改变土层分布和开挖面的稳定性;施工过程中人员和机器的踩踏、碾压,以及坑基回填也破坏了原来的土壤结构,使得土壤表层植被发生改变。施工场地是施工人员的主要活动场所,对土地破坏的持续时间最长,严重影响土壤的紧实度;牵张场地停放各种牵引机械,施工人员来回走动及牵引机械压占土地,同时为方便牵引,在牵张场地四周开挖地锚坑,以固定牵引装置,对土地破坏的持续时间较长,严重影响施工场内土壤紧实度。施工简易道路需要进行开挖平整,破坏了土壤结构;同时施工车辆碾压地表,对土壤产生压实。部分线路铺设,由于施工车辆无法抵达施工场地,需要修建人抬道路,对土地产生压占和挖损,施工人员背扛施工材料走动也会踩踏地表。挖损破坏了土壤结构及层次,使土壤固结能力降低、结构松散,彻底改变了土壤养分的初始条件,增加了水土流失及养分流失的机会<sup>[15]</sup>。压占一般不会改变土壤结构,但严重影响土壤紧实度,其对土地的破坏是临时性的,土地利用功能一般不会改变。

目前,输变电工程对土壤理化性质和土壤生物影响的定量观测研究还鲜有报道,有限的报道主要集中于冻土的相关文献。刘亚丽等<sup>[17]</sup>就多年冻土区线性工程的生态环境影响进行了综述,认为公路、铁路、输油管线、输电线路等线性工程的修建和运营对沿途周边的冻土热状态、土壤理化性质、水文过程以及陆面过程产生显著影响。冻土区线性工程的环境影响主要体现在以下几个方面。

一是对冻土热状态的影响。多年冻土区大规模线性工程建设常引起冻土冻融过程和土壤理化性质变化,工程对下垫面的干扰改变了地表接收的太阳辐射量和热量的贮存与传输,而且工程施工与营运可能导致地表植被层改变而丧失对热量的缓冲功能<sup>[18]</sup>。对青藏电力输电线路(青海格尔木到西藏拉萨)冻土和融化基础土壤的沉降研究表明,基础土壤的热状况很容易受到工程活动和环境变化的影响,在该线路尤

应关注地温变化对地基的干扰、塔基周围水分条件变化,以及多年冻土地区塔基或桩基承载力的影响<sup>[19]</sup>。二是对地表植被及土壤生物的影响。项目区植被的蒸腾作用和贮水能力常因工程活动而改变,在冻土活动层融化期间,如果恰逢植物生长季,植被清除导致水分过快下渗,影响植被恢复。在早期青藏公路建设的取土迹地和施工区,由于缺少植被、凋落物和地衣覆盖,土壤质地劣化,水分下降;研究发现面积越小的取土迹地土壤水分含量及其年际波动越接近于未干扰地,且工程对土壤水分变化的影响强度与干扰面积呈正相关,因而导致土壤生物的种类和数量都在下降<sup>[18]</sup>。三是对土壤扰动及土壤结构功能的影响。研究表明线性工程沿线容易出现土壤粗颗粒增加、土壤养分流失、一定程度上重金属增加等土壤理化性质劣化现象,在青藏工程走廊早期工程取土迹地上,表层土壤颗粒组成中粒度 $>0.5\text{ mm}$ 的砂砾含量显著增加,土壤持水力下降<sup>[19]</sup>。遥感观测也表明在工程走廊道路缓冲区 $5\text{ km}$ 范围内荒漠化总面积变化最为明显,土地荒漠化总面积与青藏铁路距离呈明显的负相关关系,工程两侧水土流失引起土壤水分和养分流失,土层扰动导致表土有机质大量损失<sup>[20]</sup>。高寒草原与高寒草甸生态系统土壤受到干扰后, $0\sim 30\text{ cm}$ 表层土壤有机质含量与土壤总氮含量显著下降,明显低于未干扰地区,生境条件退化,但高寒草甸退化后有机质和总氮仍然保持着较高的水平,表层土壤未完全移除的区域土壤养分状况较好<sup>[21]</sup>。四是受道路灰尘影响,路侧近距离内土壤易受降尘污染。路侧重金属来源主要为路面径流和道路灰尘,汽车尾气、轮胎磨损和道路抛洒是路侧重金属污染的主要方式。交通源重金属污染主要在路侧近距离富集,随着与道路距离增加含量迅速降低,重金属的富集对路侧生态构成潜在的威胁。在青藏高原的研究发现,许多路段均不同程度地受到Cd的生态威胁,路侧重金属Cu、Zn、Pb也产生了不同程度的富集,随着海拔升高,与燃油相关的重金属的排放量也增大<sup>[22-23]</sup>。

总之,线性工程施工与日常运营造成干扰区土壤理化性质改变,并通过影响土壤质地、土壤水分、土壤养分等作用于地表植被。这种影响在水热条件恶劣的冻土区等生态敏感区表现尤为明显。

此外,变电站和塔基的接地网一般采用镀锌或镀铜层进行防护,热镀锌、钢接地材料的耐腐蚀性能低、可靠寿命短,而采用纯铜造价高、对水源地易造成重金属离子污染等问题,影响局部土壤质量<sup>[23]</sup>。

### 1.3 对土壤侵蚀的影响

输变电工程区域以水土流失为主的土壤侵蚀受自然因素和人为因素的影响。前者主要为地形地貌、地质和气候条件的影响,后者则是在输电线路建设过程中直接导致水土流失<sup>[24]</sup>。工程往往难以实现挖方与填方的平衡而需要借方或产生弃土、弃渣和临时的堆土;另外,为了施工方便而进行砍伐树木和土地占压等活动,也会加剧土壤原有水土保持功能降低<sup>[25]</sup>。谢明亮<sup>[11]</sup>对晋东南-南阳-荆门百万伏级交流输变电工程(湖北段)的监测表明,输变电站施工时期点式工程土壤流失量为 $39.00\sim 736.77\text{ t}$ ,线式工程土壤流失量为 $454.18\sim 1\ 506.80\text{ t}$ ,其中变电站点式工程施工期土壤侵蚀模数 $1\ 499.2\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,运营期为 $497.77\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,线性工程塔基侵蚀模数施工期为 $1\ 506.8\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,运营期为 $406.99\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,土壤侵蚀表现为水蚀。而根据水蚀强度分级如下:轻度为 $200\sim 2500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,中度为 $2500\sim 5000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,强度为 $5000\sim 8000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,极强烈为 $8000\sim 15\ 000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,剧烈为大于 $15\ 000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。造成水土流失的因素主要包括输变电线路沿线施工道路两侧的挖方量通常大于填方量,形成土堆,导致一定水土流失;如果挖方和填方不平衡或堆弃和他用,损坏原有地貌,使得原有的地貌裸露,容易造成水土流失<sup>[26]</sup>;杆塔组立时会对基塔周围土地产生扰动,牵张场的土地利用以及架线和动工过程中需要削减树梢、砍伐林木、破坏植被,从而引起严重的土壤侵蚀<sup>[27]</sup>。在山区甚至容易破坏原来稳定的地质导致岩体失稳,引发崩塌和滑坡<sup>[28]</sup>。

### 1.4 对土壤动物的影响

Biasotto等<sup>[29]</sup>对输变电工程的生态影响进行了系统评价,总结分析了206篇文章和19篇环境影响评价报告,确定了28项与个体、种群和生物群落水平上的生物学效应相对应的影响。尽管对输变电工程生态影响评估的关注度正在提高,但大多数研究都集中在脊椎动物类群,尤其是鸟类,对于栖息地丧失、流动性较低或对物理改变敏感的物种(如两栖动物)的研究很少。输变电工程对不同区域、不同类型生态系统中土壤动物的影响大多数研究仅针对输变电工程建设期,而事实上这种影响很可能延续到运营期间。

Richardson等<sup>[30]</sup>就人类活动区的管道和输变电工程等线性基础设施造成的生物栖息地丧失、景观连通性破坏和生物多样性影响进行了综述,结果表明,管道工程生态影响研究最常用指示生物为哺乳动物和植物,而输变电线路研究主要集中在鸟类和植物上,

评价指标包括施工期植物死亡率、构筑物造成植物和动物群落组成及结构变化、森林和灌木丛因廊道而发生的切割隔离,以及鸟类等的碰撞和触电。但是在绝大多数文献报道中均没有收集相关的基线数据,导致影响程度常常无法科学判定。许多文献提出了减缓生态影响的一种或综合的方法,但减缓的具体技术措施很少被直接测试与评价。因此,今后应精选指示生物和明确线性工程影响的基线,并通过科学收集和数据分析数据,提出切合实际的减缓生态影响的策略。Richardson等<sup>[30]</sup>还特别指出,有关输变电线路工程对土壤动物的影响迄今鲜有报道,需要重点关注。

事实上,输变电工程施工对地表植被的清理及土层结构的破坏,导致工程区地貌和土地利用方式发生改变,同时施工人员和机器碾压也破坏了原来较适合土壤动物生存的土壤结构,甚至直接导致蚯蚓等土壤动物生境消失。此外,电磁辐射也对动物产生直接或间接的影响,其中电力系统电磁辐射污染源是主要污染源<sup>[31-32]</sup>。研究发现长期在强电压下工作会导致人体中枢神经系统机能障碍,并一定程度影响血液系统和内分泌系统<sup>[33]</sup>。高电压条件能导致动物毛发竖立、焦躁不安,但也有资料表明电场对老鼠、兔和狗等动物的动脉血压和心律等无明显影响<sup>[34]</sup>。张鑫等<sup>[35]</sup>就四川雅安至安徽皖南1000 kV交流特高压输变电工程项目对沿线陆生脊椎动物的影响进行了实地调查,结果表明,输变电工程建设、营运过程中会破坏动物的栖息地,造成陆生脊椎动物的直接死亡,大部分陆生脊椎动物迁移到其他地方,远离施工区范围;同时工程对动物的觅食、生殖等活动也构成不同程度的影响。通过实行有效的保护措施以及陆生脊椎动物自身的调节能力,能一定程度降低电磁辐射危害。但现有的国内输变电站的电磁辐射对土壤环境动物的危害方面的研究仍较少,今后应加强相关研究,特别是对自然保护区等敏感区内保护动物(如濒危穴居动物穿山甲)的影响研究。

输变电工程的噪声污染也会对动物产生影响。110~500 kV典型输变电站各电压等级主变噪声频带均较宽,噪声以1000 Hz以下中低频为主;输变电线路噪声主要有导线和绝缘体电晕放电所产生,潮湿天气时会引起频繁的电晕放电现象,从而产生较大的噪声<sup>[36-37]</sup>。另外施工过程中机器运转和车辆运输等也产生噪声。噪声不仅影响周边居民生活,也对当地其他生物造成负面效应,如干扰表层土壤动物的行为<sup>[38]</sup>。但输变电站噪声对土壤动物影响的定量研究

还鲜见报道。

## 1.5 输变电工程引起的生物入侵

输变电工程涉及的地理范围比点状工程大得多,施工期和营运期人类往来活动等容易带来外来物种,特别是施工结束后对永久占地和临时占地进行生态恢复时,如在引进绿化植物时不慎让号称植物杀手的入侵植物薇甘菊(*Mikania micrantha* Kunth)、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.)混入,这些入侵植物在工程结束后容易蔓延疯长,与当地植被争夺空间、光照、水分和养分等,破坏当地生物多样性<sup>[39]</sup>。土壤动物方面,也容易因为引进植被或者输变电站灯光诱集而引来入侵物种,如在广东、广西一些输变电工程项目及周边曾发现号称“无敌”最毒蚂蚁的红火蚁(*Solenopsis invicta* Buren),其随施工材料和绿化苗木进入,在绿化带及变电站址与基塔周边筑巢安居,并迅速成为周围土壤中的优势动物种。蚁巢不仅改变了土壤的景观,同时也改变了附近土壤的质量,严重影响附近土壤动物和植物生长,对人畜等也造成伤害,造成物种的生态灾害。

## 2 输变电工程土壤环境保护措施

### 2.1 土壤侵蚀预防与表土资源保护

输变电工程站址和输变电线路应同时满足电力系统规划、城市总体规划、土地利用规划、环境保护规划和生态规划等各项要求:尽量避开陡坡及不良地质地段、自然保护区、森林公园和旅游风景区等地区,减少线路走廊宽度;采用高低腿杆塔设计;高跨树林,禁止乱砍乱伐;杆塔基应尽可能避开农田、村庄、果园和陡坡,并合理制定塔基基础的水土保护措施,深埋基础,减少基础降基,加高主柱基础;优先使用原状土基,减少土方开挖量;扰动后的土壤表层应当做好苫布覆盖或植物覆盖,尽可能地利用本地植物和自然形成恢复地表植被,防止水土流失导致的土壤流失。设置堆土场集中堆放施工临时弃土弃渣,并将表土和熟土分开集中堆放,施工结束后按原土层分层回填平整<sup>[24]</sup>。对输变电站站区配备护栏、护坡、截排水等水土保持防护体系,站外道路区配备排水工程、护坡工程和临时防护工程等防护体系,对站外管线区、取土场、弃渣场等进行整治、恢复和植被种植<sup>[26]</sup>。表1为工程分区的水土保持措施及其重点的相关因素<sup>[11,24,26]</sup>,可供水土保持措施体系设计时参考。

有关线性工程中如何做好表土资源保护与利用,作为原国土资源部明确的耕作层土壤剥离再利用试

表1 输变电工程的分区土壤环境保护措施及其相关因素分析<sup>[11,24,26]</sup>  
 Table 1 Analysis of regional soil environmental protection measures and related factors in power transmission and transformation projects<sup>[11,24,26]</sup>

一级分区 Grading partition 1	二级分区 Grading partition 2	水土保持措施 Soil and water conservation	相关因素 Related factors	土壤环境保护措施与成效 Soil environmental protection measures and results
变电站区	变电站区	工程措施	降雨、地形、地质、周边环境	表土剥离回用,站区场地平整、固土硬化处理,站址平整后预留的扩建区作为施工场地,并在其周围设置截洪沟和排洪沟、挡土墙和护坡;站区内除建构筑物 and 站内道路占地外,其余外露土地全部进行绿化;进站道路两侧设置排水沟,供水管线开挖后回填压实。设置临时堆土场并在施工结束后恢复植被等
		设计优化	周边环境、总平面布置	
		植物措施	气候条件、土壤条件、植物适应性、水土保持功能性、与环境统一性	
	进站道路	工程措施	与现有道路衔接、总平面布置、土石方平衡、施工进度、施工措施	
		设计优化	周边环境、总平面布置	
	临时堆土场	临时措施	地形与土壤因素、降雨等气候因素、总平面布置、施工组织	
线路区	线路塔基座	排水沟及基面排水、边坡放坡与砌挡土墙	地形地质特征、雨水量 上坡边坡一次按规定放足,内边坡放坡不足时需砌挡土墙	线路施工尽量减少对农用地占用和对植被破坏,及时恢复施工道路等临时用地原有土地功能,塔基施工弃渣集中堆放,并及时做好场地平整和植被恢复。树木密集区域尽量不设置耐张塔,尽可能借助地势跨越树木以减少树木砍伐量。塔基及施工区根据地形采用全方位长短腿,按地质条件选择基础形式,避免大面积基面开挖和土石方工程量,塔基开挖后及时回填压实。合理选择牵张场地、设置临时堆土场并在施工结束后对临时占地及时复垦回填和恢复植被等
		绿化设计	气候条件、土壤条件、植物适应性、水土保持功能性、与环境统一性	
		设计优化	路径优化、地形地质、基础设计	
	施工便道	工程措施	与现有道路衔接、总平面布置、土石方平衡、施工进度、施工措施	
	牵张场	植物措施	恢复植被,考虑与周围景观相协调	
	临时堆土场	管理措施	管理措施、自然因素(降雨等气候因素)、总平面布置、施工组织	
	人抬道路	管理措施	管理措施、自然因素(降雨等气候因素)、总平面布置、施工组织	

点项目的广西柳州(鹿寨)至南宁高速公路改扩建工程是成功的范例<sup>[39]</sup>。该项目在梳理耕作层土壤剥离利用的相关政策、部门协同等管理机制基础上,提出了部门协同优化方案,对用地单位(建设单位桂海公司)提交的土壤剥离保证金实行专户储存、专款专用,激励用地单位积极主动进行表土剥离工作,国土部门对临时用地进行协调,解决储存点临时占地;农业部门对剥离区、被剥离区进行土壤质量评价,评估适宜剥离耕作层的面积数量;对回覆区进行评估,确定土壤匹配方案;国土、农业部门联合监督用地单位土地剥离实施情况并进行专项验收,保证了表土资源的保护和利用。

### 2.2 防治重金属污染

路侧重金属来源主要为路面径流和道路灰尘,汽车尾气、轮胎磨损和道路抛洒是路侧重金属污染的主要方式。做好与工程建设和营运相关的道路交通污染源控制,具有现实意义。应从材料选择与保养方面解决变电站接地网镀锌层和镀铜层腐蚀带来的重金属污染土壤和周边水源的问题。为解决变电站接地网镀锌或铜层腐蚀性等问题,国网山东省电力公司等

单位设计了以铝为基体加入少量铜(质量百分数为5%)和微量稀土元素的接地材料,结合表面喷漆和预氧化复合处理技术,在大幅提高耐土壤腐蚀性能的同时,解决了纯铝易点蚀、腐蚀产物导通不良等问题<sup>[40]</sup>。变电站应用表明,以其替代纯铜作接地材料,土壤中重金属离子浓度下降至纯铜时的1/17,成本降低60%以上<sup>[41]</sup>。该公司还开发了高性能铝锌合金镀层、低表面处理锌修复涂料、不锈钢包钢接地材料和铝碳复合减摩耐磨防腐涂层技术。其中不锈钢包钢接地材料在酸性土壤中耐蚀性能较镀锌钢提高4倍以上,全寿命周期成本为后者的25%<sup>[42]</sup>;实施重工业污染区输电线路杆塔和接地网主要部件设计、安装、运行和防腐维护一体化的方法,可在全寿命周期内将输电线路杆塔成本降低约33%,将接地网的全寿命周期成本降低75.3%<sup>[40,42]</sup>。

### 2.3 保护土壤动物安全

工程过程应当尽量减少项目对地表植被及土壤的扰动,减少施工过程对土地的碾压,并采取表土剥离与植被恢复等生态重建的有效措施,减少土壤养分及有机质下降、土壤板结退化对土壤动物的不良影

响。同时,应采用降低场强的技术降低输变电路下空间场强,并合理规划绿化,种植绿色植物吸收和减弱场强对土壤动物的影响。减少噪声对动物的干扰应当采取以下保护措施:优选噪声在60 dB以内的主变器,并开展吸声、隔声和消声等措施;选用低噪声的机器,并合理安排机器作业时间以及严格控制运输车辆鸣笛。

#### 2.4 预防生物入侵

加强工程区人员与物料无意携带的外来入侵物种监管,特别是在生态恢复和水土保持工程制定过程中,应当选取乡土物种,加强检验检疫,避免造成生物入侵等危害,一旦发现入侵物种,应及时处理和清除。

### 3 案例分析

广东某500 kV输变电工程项目,按照法规落实了环境影响评价、水土保持方案编制和水土保持设施监测与验收制度,从系统防控角度解决输变电工程的土壤环境影响。项目区地处亚热带季风气候区,多年平均降雨量为1770~2300 mm,土壤主要包括水稻土和赤红壤,地带性植被为热带常绿季雨林和常绿阔叶林。项目包括新建500 kV变电站1座,新建500 kV出线4回、220 kV出线10回,涉及输电线路全长60.8 km,其中新建500 kV线路59 km,拆除110 kV线路1.5 km,新立铁塔153基,拆除铁塔8基。根据水保监测验收报告,结合实地调查,将其土壤环境影响进行简析。

#### 3.1 土壤影响预计范围与实际影响面积

项目实际建设的进站道路缩短,临时堆土场大部分都在红线内,优化塔基的施工工艺,部分施工临时道路利用了当地村道。实际土壤扰动及直接影响面

积为21.86 hm<sup>2</sup>,比水保方案报告批复的预计水土流失防治责任范围23.21 hm<sup>2</sup>减少了1.35 hm<sup>2</sup>(表2)。

#### 3.2 工程挖方、弃方与取土方

工程挖方土全部回填和后期绿化利用,未外弃;外借土方主要用于变电站场地回填和塔基填筑,全部向合法的土料场外购,未设置取土场和弃土场。项目实际建设过程中土石方实际开挖量5.48万m<sup>3</sup>,回填量18.05万m<sup>3</sup>,外借12.57万m<sup>3</sup>。

#### 3.3 施工期的临时防护措施

临时水保措施包括临时排水沟950 m,编织袋土拦挡1250 m,土工布覆盖4500 m<sup>2</sup>,泥浆沉淀池97座。具体为:变电站区(含进站道路)的临时拦挡、排水、覆盖工程,场地开挖土方在临时堆放时,周围用临时土袋围堰拦挡,施工结束后拆除,场地周围布设临时排水沟,较好地防止了雨水和径流冲刷对临时堆土和站区施工的水土流失影响;输电线路(含塔基)区设置了泥浆沉淀池、临时排水沟、编织袋土拦挡、土工布覆盖等,基础全部为机械钻孔灌注桩,施工前开挖泥浆池,作为施工期泥浆循环利用中转站、防止钻孔过程中泥浆漫地流入周边地块,施工结束后作为水保沉沙池,因此,外排废水均基本澄清,控制了水质污染和泥沙排放。

#### 3.4 水土保持的工程措施

项目水土保持的工程措施具体如下,①变电站区挡墙支护:四周采用浆砌石挡墙支护,共完成浆砌石挡墙3560 m<sup>3</sup>。②站内排水工程:站区有完整排水系统,采用雨、污水分流制,雨水管道按照建筑设计,共完成排水暗管1220 m,站内排水经道路雨水口收集并汇入排水管道排出站区外。③平整:施工结束后,对场地进行全面整地,为覆绿做准备,全面整地

表2 某500 kV输变电工程项目预计土壤影响范围与监测实际影响范围对比(hm<sup>2</sup>)

Table 2 Estimated soil impact range and actual impact range of the 500 kV transmission and transformation project(hm<sup>2</sup>)

影响区域 Area of influence	预计范围 Estimated range	实际影响范围 Actual range	面积差异 Area change	备注 Remarks
项目建设区				
变电站区	5.2	5.2	0	一致
对侧间隔扩建区	0.2	0.2	0	一致
进站道路	1.99	1.68	-0.31	进站道路缩短使占地面积减少
给水管道	0.23	0.23	0	一致
临时堆土场	0.3	0.15	-0.15	大都位于红线内,占地面积减少
塔基区	9.72	9.35	-0.37	塔基施工优化,扰动面积减少
施工道路	2.67	2.35	-0.32	利用已有村道,使面积减少
牵张场区	1.3	1.1	-0.2	场地布设在红线内,占地减少
小计	21.6	20.26	-1.34	
直接影响区	1.6	1.6	0	一致
总计	23.21	21.86	-1.35	

面积为0.20 hm<sup>2</sup>。④输电线路区土地整治:塔基施工平台等平整,共完成土地整治5.71 hm<sup>2</sup>。以上措施及时实施,水土保持效果显著,有效控制了土壤侵蚀。

### 3.5 水土保持的植物措施

#### (1)变电站区水土保持植物措施完成情况

施工前,站区及进站道路为低丘山地,覆盖良好的桉树+铁芒箕群落植被;施工期间,进行了清表和表土剥离,土壤及植被彻底改变;施工结束后,对变电站内绿化用地进行园林绿化,共铺种草皮0.82 hm<sup>2</sup>,进站道路进行了边坡防护,边坡植草1.02 hm<sup>2</sup>,栽种灌木100株。植被养护及水保效果良好。

#### (2)输电线路区水土保持植物措施完成情况

施工结束后,对输电线路区空地进行了表土回覆、植被恢复,撒播草灌木7.20 hm<sup>2</sup>,种植乔木435株,铺种草皮0.20 hm<sup>2</sup>。裸露表土进行有效的植被恢复,较好地改善了土壤环境。

#### (3)外来物种入侵情况

在工程周边地区,发现有大量的薇甘菊(*Mikania micrantha* Kunth)和红火蚁(*Solenopsis invicta* Buren)入侵,对周边环境产生较大的生态风险。但无法断定是否由工程建设引入或者其他人类活动导致。

### 3.6 土壤侵蚀的动态变化

土壤侵蚀背景值通过实地调查并结合《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)中面蚀(片蚀)分级标准来确定,施工期土壤侵蚀模数通过侵蚀沟、临时沉砂池淤积量调查法实际测得,自然恢复期土壤侵蚀模数通过现场调查来确定。项目建设前后和施工过程中各扰动单元土壤侵蚀动态变化见表3。

### 3.7 土壤环境影响调查结果

笔者于2017年1月对该项目输电线路直接影响区和50 m以外的同类型土壤样地各7个进行了土壤容重、pH值、总碳和总氮等的取样和分析。结果表明未受输电线路直接影响的森林土壤的容重为1.06~1.47 g·cm<sup>-3</sup>,塔基或输电线路下人行工作通道周边土

壤容重为1.29~1.62 g·cm<sup>-3</sup>,表明输电线路直接影响区域土壤容重增加,特别是塔基作用后的土壤容重明显高于对照组,增加了溶质流失的可能性。直接影响区域土壤总碳含量为12.76~29.09 g·kg<sup>-1</sup>,对照组含量为11.62~27.68 g·kg<sup>-1</sup>,两组样品进行两配对和样本T检验P=0.361,差异不显著。部分输电线路直接影响区域的总碳比对照组高,这也许是由于为了输电线路安全,项目定期对高大的桉树等植物进行修剪,加速了枝叶的掉落,提高了塔基处总碳的含量。输电线路直接影响区域土壤总氮含量为1.99~3.13 g·kg<sup>-1</sup>,对照组含量为1.79~3.04 g·kg<sup>-1</sup>,T检验P=0.85,差异不显著。但输电线路直接影响区域的土壤总氮和对照组差异较大,不具有相关性。因此输电线路直接影响区域未对土壤总氮产生明显影响。输电线路直接影响区域土壤的pH值为4.75~5.78,对照组为4.12~5.86,均呈酸性,符合华南酸性土壤的特点。除了个别采样点pH高于对照组,其他采样点差异不明显,T检验P=0.968,差异不显著。

以上初步调查结果表明,位于亚热带丘陵区的本项目输电线路直接影响区除使森林土壤容重增加外,其对土壤碳、氮和pH的影响不大。这与多年冻土区线性工程的相关结果有所不同,推测是因为本项目地区水热条件较优越,架空的输变电工程的干扰范围和强度均比公路、输油(气)管道等工程小,从而更易进行生态恢复。

## 4 结论

(1)输变电工程对项目区土壤的理化性质、养分及生物产生直接影响,从而影响当地的土壤资源数量和质量。

(2)在多年冻土区建设的大规模的线性工程常引起冻土冻融过程和土壤理化性质变化,工程对下垫面的干扰使地表植被层改变,从而影响其对水分和热量的缓冲功能。线性工程沿线容易出现土壤粗颗粒增加、容重增加、土壤养分流失、一定程度上重金属增加等土壤理化性质劣化的现象。工程还可能导致外来物种的入侵,改变植被-土壤的景观,带来生态风险。

(3)案例调查分析表明,输变电工程项目应遵循相关法规进行环境管理,合理选址,减少线路走廊宽度,采用高低腿杆塔设计,同时注重土方挖填平衡、表层剥离、临时苫布覆盖或植物覆盖,并做好护坡、截排水、沉沙和植被绿化防护等综合措施,从而有效防控输变电工程带来的水土流失等不利影响。

表3 某输变电工程各扰动类型区土壤侵蚀动态变化(t)  
Table 3 Dynamics of soil erosion in each disturbance area of a power transmission and transformation project(t)

项目区 Project area	变电站区 Substation area	进站道路 Inbound road area	输电线路区 Transmission line area	合计 Total
施工前	1.2	0.2	4.0	5.4
施工期	11.7	0.4	72.3	84.4
自然恢复期	0.4	0.2	10.2	10.8
合计	13.3	0.8	86.5	100.6

## 参考文献:

- [1] 孙波, 解宪丽. 全球变化下土壤功能演变的响应和反馈[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 903-909.  
SUN Bo, XIE Xian-li. Response and feedback of soil function evolution to global change[J]. *Journal of Earth Science*, 2005, 20(8): 903-909.
- [2] 贾琳, 杨飞, 张胜田, 等. 土壤环境功能区划研究进展浅析[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(1):107-114.  
JIA Lin, YANG Fei, ZHANG Sheng-tian, et al. Analysis on soil environmental function zoning study progress[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2015, 36(1):107-114.
- [3] 龚子同, 陈鸿昭, 骆国保. 人为作用对土壤环境质量的影响及对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1):7-10.  
GONG Zi-tong, CHEN Hong-zhao, LUO Guo-bao, et al. Effect of anthropogenic processes on soil environment quality and controls[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):7-10.
- [4] 刘玉, 吴丹, 潘瑜春, 等. 中国线性工程沿线区域土地整治技术的研究进展与展望[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(1):83-87.  
LIU Yu, WU Dan, PAN Yu-chun, et al. Progress and prospect on land consolidation in the area along linear project in China[J]. *Areal Research and Development*, 2014, 33(1):83-87.
- [5] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.  
SHU Yin-biao, LIU Ze-hong, YUAN Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by State Grid Corporation of China in the year of 2005 [J]. *Power System Technology*, 2006, 30(5): 1-12.
- [6] Chen W, Li P. The new technological developments of UHV AC power transmission equipment[C]. Chengdu: IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2016.
- [7] 贺亮, 李光伟, 刘国东, 等. 500 kV 输变电工程水土流失及综合防治[J]. 亚热带水土保持, 2007, 19(4): 48-51.  
HE Liang, LI Guang-wei, LIU Guo-dong, et al. Soil and water loss and comprehensive prevention in 500 kV power transmission and transformation engineering[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2007, 19(4): 48-51.
- [8] 李正余. 输变电工程环境影响综合评价指标体系的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.  
LI Zheng-yu. Study on environmental impact assessment index of electric power transmission[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [9] Araújo C M B, Trondoli L H. Testing through fall of potential with high current injection in grounding system in transmission line of 500 kV of Santo Antonio HPS[J]. *Open Access Library Journal*, 2017, 4: e3323.
- [10] 沈娟. 包头至呼市东 500 kV 输变电工程环境影响综合评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.  
SHEN Juan. The environmental comprehensive impact assessment of Baotou to east Huhhot 500 kV transmission[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [11] 谢明亮. 输变电工程水土流失特征[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
XIE Ming-liang. Characteristics of soil erosion in power transmission engineering [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [12] 吴晓, 吴宜进. 湖北省城区输变电工程水土保持监测实践与分  
析——以武汉戴家湖 110 kV 输变电工程为例[J]. 人民长江, 2011, 42(4):98-101.  
WU Xiao, WU Yi-jin. Soil and water conservation monitoring practice for power transmission and transformation project in Hubei urban district: Case study of Daijia Lake (Wuhan) 110 kV power transmission and distribution project[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(4): 98-101.
- [13] 刘刚, 裴华, 胡绍娟. 输电线路建设土地复垦探讨[J]. 现代农业科技, 2010(8): 318-319.  
LIU Gang, PEI Hua, HU Shao-juan, et al. Study on land reclamation of power transmission line construction[J]. *Journal of Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(8): 318-319.
- [14] 张蕾. 输变电项目竣工环保验收存在的问题及对策分析[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(1): 1-4.  
ZHANG Lei. Study on check and investigations on environmental protection of electric power transmission projects[J]. *Journal of Power Technology and Environmental Protection*, 2011, 27(1): 1-4.
- [15] 罗霞, 华国春. 输变电建设水土流失特点与水土保持监测[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13):182-183.  
LUO Xia, HUA Guo-chun. The characteristics of soil erosion and soil and water conservation monitoring of power transmission and transformation construction[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(13):182-183.
- [16] 朱渝芬. 毛竹林水文生态功能及其土壤肥力变化研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.  
ZHU Yu-fen. Ecohydrological functions of phyllostachy pubescens stands and its dynamics of soil fertility[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [17] 刘亚丽, 王俊峰, 吴青柏. 多年冻土区线性工程的生态环境影响研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 728-737.  
LIU Ya-li, WANG Jun-feng, WU Qing-bai. The linear engineering impact on the eco-environment in permafrost regions: Research status and prospect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4): 728-737.
- [18] Yu Q H, Zhang Z Q, Wang G S, et al. Analysis of tower foundation stability along the Qinghai-Tibet power transmission line and impact of the route on the permafrost[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2016, 121: 205-213
- [19] 王根绪, 姚进忠, 郭正刚, 等. 人类工程活动影响下冻土生态系统的变化及其对铁路建设的启示[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1556-1564.  
WANG Gen-xu, YAO Jin-zhong, GUO Zheng-gang, et al. The permafrost ecosystem changes under engineering activity and its of railway construction[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15):1556-1564.
- [20] Walker D A. Disturbance and recovery of Arctic Alaskan vegetation [M]/Reynolds J F, Tenhunen J D. Landscape function and disturbance in Arctic tundra. Berlin: Springer, 1996: 35-71.
- [21] 毛亮. 青藏高原高寒草原区路基取土迹地自然恢复的面积效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.  
MAO Liang. Response of natural restoration of land used for road-bed construction to areas in the alpine steppe of the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [22] 王冠星, 闫学东, 张凡, 等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 431-438.

- WANG Guan-xing, YAN Xue-dong, ZHANG Fan, et al. Influencing factors of heavy metal concentration in roadside-soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 431-438.
- [23] Fraga A D O, Klunk M A, Oliveira A A D, et al. Soil corrosion of the AISI1020 steel buried near electrical power transmission line towers [J]. *Journal of Materials Research*, 2014, 17(6):1637-1643.
- [24] 张凤梅. 山西省输变电工程水土流失特点及防治措施体系研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- ZHANG Feng-mei. Analysis of soil and water loss's characteristics and prevent-controlling soil erosion measure system in Shanxi Province of power transmission and transformation project[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [25] 李智广. 开发建设项目水土保持监测[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
- LI Zhi-guang. Monitoring of soil and water conservation in development and construction projects[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [26] 杨家旺. 输变电工程水土流失规律研究及防治对策[D]. 武汉:华中农业大学, 2010.
- YANG Jia-wang. A study on soil and water loss law and control countermeasure of power transmission project[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [27] 陈知送. 广州市输变电工程水土保持设施补充验收问题探讨[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2013, 11(2):39-41.
- CHEN Zhi-song. Discussion on the supplementary acceptance of water and soil conservation facilities in Guangzhou power transmission and transformation project[J]. *Journal of Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electricity Engineering*, 2013, 11(2):39-41.
- [28] 郑树海. 哈密-河南(郑州)特高压直流工程水土流失防治经验[J]. 中国水土保持, 2018(1):20-22.
- ZHENG Shu-hai. Experience on Hami-Henan (Zhengzhou) special high voltage direct current engineering soil erosion control[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(1):20-22.
- [29] Biasotto L D, Kindel A. Power lines and impacts on biodiversity: A systematic review[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, 71: 110-119.
- [30] Richardson M L, Wilson B A, Aiuto D A S, et al. A review of the impact of pipelines and power lines on biodiversity and strategies for mitigation[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2017, 26(8):1801-1815.
- [31] 吴大伟. 电力频段电磁污染与人体健康[J]. 环境保护, 1984(4): 23-25.
- WU Da-wei. Power frequency electromagnetic pollution and human health[J]. *Journal of Environmental Protection*, 1984(4): 23-25.
- [32] 张邦俊, 仇丰, 张莉, 等. 居住区内高压输电线路工频电磁污染分布研究[J]. 中国环境科学, 2002, 23(3):272-276.
- ZHANG Bang-jun, QIU Feng, ZHANG Li, et al. Studies on distribution of power frequency electromagnetic fields pollution generated by high-voltage transmission lines in uptown[J]. *China Environmental Science*, 2002, 23(3): 272-276.
- [33] 梁保英, 高升宇. 高压输变电设备电磁辐射环境影响分析[J]. 电力环境保护, 2000, 16(3):57-59.
- LIANG Bao-ying, GAO Sheng-yu. Environmental impact analysis on electromagnetic radiation from high voltage transmission and power transfer[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2000, 16(3): 57-59.
- [34] 丁玉斌. 武汉市高压输电变电电磁辐射对城市环境的影响研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2008.
- DING Yu-bin. The research in influence of electromagnetic radiation by high voltage transmission and transformation of Wuhan to urban environment[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2008.
- [35] 张鑫, 潘红星, 李翠花, 等. 输变电工程对陆生脊椎动物的影响和保护措施[J]. 安徽农业科学, 2013(2): 763-765.
- ZHANG Xin, PAN Hong-xing, LI Cui-hua, et al. Effects of power transmission projects on terrestrial vertebrates and its protection measures[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013(2): 763-765.
- [36] Bartlett E J, Moore P J. Experimental investigation into VHF electromagnetic radiation from power system arcs[C]. London: Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 1999.
- [37] 叶建斌, 陈雁. 变电站环境噪声现场测试分析讨论[J]. 广东电力, 2005, 18(10): 53-56.
- YE Jian-bin, CHEN Yan. Analysis and discussion on field measurement of substation ambient noise[J]. *Guangdong Electric Power*, 2005, 18(10): 53-56.
- [38] 吴孝焯, 杨亚平, 刘建, 等. 500 kV 变电站噪声测试与特性分析[J]. 华东电力, 2010, 38(6): 887-889.
- WU Xiao-xuan, YANG Ya-ping, LIU Jian, et al. Measurement and characteristic analysis of noise of 500 kV substation[J]. *East China Electric Power*, 2010, 38(6): 887-889.
- [39] 梁健健, 姚胜彪. 线性工程耕作层土壤剥离利用管理机制研究[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(3): 5-7.
- LIANG Jian-jian, YAO Sheng-biao. Study on management mechanism of soil peeling and utilization in linear engineering tillage layer [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2017, 28(3): 5-7.
- [40] 国网山东电科院. 国网山东电科院一项项目高质量通过验收[DB/OL]. [2016-06-16]. [http://www.cpn.com.cn/js/201606/t20160616\\_895348.html](http://www.cpn.com.cn/js/201606/t20160616_895348.html).
- Chinese Shandong Electric Institute. A project hosted by State Grid Shandong Electric Power Research Institute passed the acceptance test[DB/OL]. [2016-06-16]. [http://www.cpn.com.cn/js/201606/t20160616\\_895348.html](http://www.cpn.com.cn/js/201606/t20160616_895348.html).
- [41] 蔡焕青, 周明, 邵瑰玮, 等. 不锈钢复合材料用于输电线路杆塔接地系统及其耐腐蚀性研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2938-2944.
- CAI Huan-qing, ZHOU Ming, SHAO Gui-wei, et al. Research of stainless steel composite material applied to grounding device for transmission line tower and its corrosion resistance[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9):2938-2944.
- [42] 常栋梁, 何立柱, 孟令增, 等. 一种提高输电线路杆塔接地网防腐蚀能力的方法: CN103001098A[P]. 2013-03-27.
- CHANG Dong-liang, HE Li-zhu, MENG Ling-zeng, et al. A method to raise the capacity of transmission line tower grounding network anti-corrosion: CN103001098A[P]. 2013-03-27.