

引用格式:陈晓红,付益鹏,黄骋东,等.特高压工程建设碳排放测算方法与应用[J].资源科学,2023,45(12):2291-2310.[Chen X H, Fu Y P, Huang C D, et al. Method and application of carbon emission calculation for ultra-high voltage (UHV) project construction[J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2291-2310.] DOI: 10.18402/resci.2023.12.01

特高压工程建设碳排放测算方法与应用

陈晓红^{1,2},付益鹏¹,黄骋东¹,汪阳洁¹

(1.中南大学商学院,长沙410083;2.湖南工商大学前沿交叉学院,长沙410205)

摘要:【目的】特高压工程作为中国“十四五”时期“新基建”七大重点领域之一,是中国新型电力系统的主干,对清洁能源的输送具有重要意义。本文旨在构建一套适用于中国特高压工程建设碳排放测算的理论与方法体系,以明确工程建设碳成本,助力工程碳管理和中国“双碳目标”下新型电力系统建设。【方法】本文基于生命周期评价,突破了基于费用清单的测算体系,从碳足迹视角首次构建了特高压工程建设碳源排放清单体系,以此提出了工程建设碳排放量的分组计算方法,增强了方法的适用性和精准性,并以陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程为工程实例进行了测算和减碳潜力评价。【结果】研究表明:①本文构建的方法在一定范围内简化了计算工作,保证了对超大型输电工程建设碳排放相对科学和有效的测算;②陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设阶段整体碳排放量为336.7万tCO₂e,主要碳排放来源于碳不可溯源组项目,占总量的67.140%;③陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程单位投资碳排放量为1.667 tCO₂e/万元,大跨度的电力领域超级工程没有提升单位碳排放水平。【结论】研究结果验证了本文构建的特高压工程建设碳排放测算方法体系的适用性,方法体系为建立中国特高压工程碳成本预算、提升工程建设阶段碳排放管理能力、助力工程碳排放削减提供了理论支撑,同时也揭示了采用充分利用现有电网基础规划工程选址建设、创新施工建设技术和引入绿色材料、充分运用数智技术做好工程建设阶段的过程管理是特高压工程建设阶段最具潜力的减排路径。

关键词:新型电力系统;特高压工程;工程建设;全生命周期分析;碳排放;碳足迹

DOI: 10.18402/resci.2023.12.01

1 引言

电力行业是中国主要的煤炭消费领域和碳排放来源,国际能源署测算中国燃煤发电量约占总发电量的60%,电力行业碳排放量占总排放量的48%^①。为推动中国能源体系低碳转型,习近平总书记多次提出,要建设以清洁能源为主体的新型电力系统和新型能源体系。推动电力行业低碳转型是中国经济社会实现绿色发展的内在要求,加大清洁能源发电比重则是其中的关键路径。然而,中国待开发水电主要分布在西南,陆上风能资源和太阳能资源集中在西部和北部,70%的用电负荷中心却集中在东

中部地区^①。资源开发重心与用电负荷中心的距离在800~3000 km^②。为缓解清洁能源与用能需求逆向分布之间的矛盾,充分利用中国西部地区充沛清洁能源,中国加大了以长距离、跨区域电力调动为初衷的特高压工程建设。特高压工程可以有效实现东部电力负荷中心与西部、北部能源基地的连接,以满足更加安全、高效、清洁、低碳的远距离供电。特高压输电的特性使其被视为传输“绿电”的“高速公路”,被列入新型基础设施建设的七大领域之一,也是构建新型电力系统这一新时期背景下组成“源网荷储一体化”新型电力运行模式的骨架和

收稿日期:2023-09-24;修订日期:2023-12-02

基金项目:国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101);湘江实验室重大项目(23XJ01006)。

作者简介:陈晓红,女,江西永新人,中国工程院院士,教授,博士生导师,研究方向为资源能源环境管理、生态文明与绿色发展等。E-mail: c88877803@163.com

通讯作者:汪阳洁,男,湖北天门人,教授,博士生导师,研究方向为资源环境管理。E-mail: yangjie.wang@csu.edu.cn

① 数据来源:国际能源署(IEA)《中国能源体系碳中和路线图》。

主要通道。截至2023年11月底,中国已建成“18交20直”在建“3交4直”共45个特高压工程。“十四五”期间,国家电网规划建设特高压“24交14直”,总投资3800亿元,涉及线路超30000 km。

然而,特高压工程密集开工将带来大量的资源能源投入,产生较高的碳排放量,迫切需要揭示中国区域间可再生能源输送基础设施的碳成本。同类型研究表明,2013—2020年欧洲可再生能源传输导致的电网扩张将产生1070万tCO₂排放并带来1120万t金属材料投入^[3]。在第二种共享社会经济途径(SSP2)情景下,到2050年全球电网中投入的钢铁和铝将分别达到6亿t和3.5亿t^[4]。而中国在1980—2018年,电力基础设施的材料存量也以7.7%的年增长率持续增长^[5]。在此背景下,特高压工程自身碳排放量成为关乎清洁能源属性定义的重要指标。如何协调好工程建设与环境保护,促进特高压建设过程节能降碳,成为实现电网基建绿色低碳发展的一大考题。

既往研究实证发现特高压工程可以通过促进能源替代和产业集聚等路径来降低区域碳排放总量和碳排放强度^[6],促进区域产业布局优化和协调发展^[7],减少空气污染并改善居民健康状况^[8,9],这些研究为理解特高压输电工程建设完成后的环境和社会效益提供了基础。然而,由于项目投资额大、建设周期长、工程覆盖地域广,特高压工程建设阶段碳排放项目种类繁多,不同碳排放项目所采用的碳排放因子、核算模型、核算边界等存在差异,尚无较为成熟的特高压工程建设碳排放测算方法,导致对特高压工程本身的碳排放问题鲜有着墨。两型工程管理理论认为,资源节约型和环境友好型工程必须从工程建设初期就贯彻绿色发展思想,对工程建设的每个环节进行评价和改进^[10]。虽然新能源发电过程不会排放温室气体和污染物,但是设备制造、建设施工、运行维护等环节却会产生碳排放,建设阶段的碳排放甚至是工程项目对资源环境影响最大的阶段^[11]。此外,虽然建成的特高压对区域碳减排有着显著正向影响,但是从整个生命周期来看,特高压工程建设阶段的碳排放亦不容忽视。那么,特高压工程建设阶段碳排放几何?如何进行核算?

本文意在构建一套适用于特高压工程建设阶段碳排放与减排潜力的测算方法,并以实际案例进行验证。当前碳排放核算方法主要分为基于过程的生命周期评价模型(PLCA)和投入产出模型(EIO-LCA)两类^[12]。然而,两种方法各有优缺点,在特高压等电力工程中的适用性都有不足之处。PLCA方法需要充分掌握工程各项目的过程,且需要大量的数据支撑,这在特高压这类超大型工程的复杂边界条件下是无法实现的;EIO-LCA方法仅关注投入与产出两端而忽略了实际过程,方法对于碳排放的计算相对粗略且无法体现出不同电力工程之间的区别。鉴于此,本文通过构建适用于特高压工程建设的碳排放清单,提出中国特高压工程建设阶段混合生命周期评价模型。在此基础上,以陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设阶段为分析案例,测算和评价特高压工程建设阶段的碳排放和减排潜力。

本文的边际贡献在于:①突破了以往研究中基于费用清单的测算体系,从碳足迹视角提出了中国特高压工程建设碳排放组分分类方法和碳源排放测算清单,补强了费用清单测算体系下碳足迹模糊、过程生命周期分析流于形式的短板,增强了混合生命周期评价方法在大型电力工程领域的适用性。②在PLCA方法上考虑了材料损耗,同时基于工程不同类型的投资行为区分设计了EIO-LCA评价策略,进一步提升了混合生命周期评价模型的碳排放测算精度。③以中国构建新型能源体系和新型电力系统时代背景下规划并建设的特高压工程为研究实例,利用工程全程建设数据开展测算与评价,验证了本文理论方法在中国新时代背景下的适用性,并为后续工程建设总结了相关经验。

2 文献综述

碳排放核算是有效制定碳减排政策、压实碳减排责任、扎实推进碳减排工作的基本前提。虽然碳核算的相关研究已然汗牛充栋,但是各类估计结果相差较大,这一局面的形成被认为是源于各类碳核算方法的不完善^[13],以及中国在本土化生命周期清单数据库和生命周期影响评价模型构建方面尚未完善^[14]。现有碳排放核算方法主要包括3种:过程生命周期评价模型(PLCA)、投入产出模型(EIO-

LCA)和混合生命周期评价模型(HLCA)。过程生命周期评价模型和投入产出模型具有不同特性,适用于不同的核算场景。投入产出模型基于投入产出表而构建,可以追踪到各部门产品的上游产业链。投入产出模型的应用场景通常以某经济系统为边界。在电力系统中,投入产出模型常用于核算电力部门或地区电力系统的碳排放^[15,16]。对于电力部门碳排放的核算,不同来源的电力部门聚合会导致聚合误差,因此相关文献通过对电力部门分解的优化来更精准地核算碳排放^[17]。对于区域电力系统碳排放核算,由于不同区域电力系统相互关联,导致从生产侧和消费侧进行核算所得结论并不一致,相关文献通过建立多区域投入产出模型来克服这一问题^[18,19]。

与投入产出模型不同,过程生命周期评价模型常用于核算单个项目整个生命周期的碳排放足迹,核算过程的关键在于清晰界定系统边界。但是由于任何产品的上游产业链都可以不断追溯,因此系统边界确定后往往会产生截断误差。在电力系统的碳排放核算中,不乏使用过程生命周期评价模型进行估算的研究。最初文献所聚焦的环节往往较为粗略,例如廖夏伟等^[20]研究火力发电则主要聚焦于燃煤环节;Wang等^[21]将火力发电的生命周期评价模型的系统边界拓展至煤炭生产、煤炭加工和逸散性排放、发电以及资源循环利用等环节。新近文献则力求完整无遗地考察电力系统碳排放的全过程。Wang等^[22]从煤炭开采和贸易开始考察,而后审视了发电以及向最终用户的电力传输和分配。尽管这些研究越来越接近于建立电力系统全景碳流追踪,但是截断误差仍旧存在。

为尽可能消除截断误差和聚合误差,混合生命周期评价模型被提出。这种方法将投入产出模型和过程生命周期评价模型结合使用,充分利用了过程生命周期评价模型的高分辨率,同时依靠投入产出模型对其进行补充^[23],得出更为准确的结果^[24]。近些年来,混合生命周期评价模型被广泛用于研究包括电厂、风光电厂、新型储能设施、输电基础设施等大型电力工程的全生命周期碳排放^[23,25-27],逐渐成为主要的研究工具之一。

对于电力系统建设环节的碳核算主要集中在新能源发电领域,所考察的内容精细度较高。例如:王鑫淼等^[28]详细分析了光伏发电系统的碳排放特征与碳中和实现过程;Ge等^[29]对水电基础设施建设进行了细致分拆;Pomponi等^[30]对欧洲核电基础设施建设全生命周期温室气体排放进行了考察;向宁等^[31]对比分析了海上风电系统与陆上风电系统的排放情况。这些研究均表明建设环节是新能源发电的重要碳排放来源^[32]。另有部分文献对于输电基础设施的碳排放进行了核算,相关文献早期主要聚焦于欧美新能源电网基础设施^[3],聚焦于中国输电基础设施的相关文献出现相对较晚。Wei等^[33,34]编制了中国输电基础设施碳排放清单,涉及各类直流和交流输电线路项目、交流变电站项目、直流换流站项目等;分析了1990—2017年中国输电基础设施的碳排放,发现电压等级、传输线长度和地形是影响输电基础设施碳排放的重要因素。

与本文最为相关的文献利用混合生命周期评价模型研究了特高压的碳排放。Wei等^[35]采用《国家电网公司输变电工程通用造价(1000 kV输变电工程分册)》中特高压交流工程典型方案的数据进行了核算;Zhang等^[36]以白鹤滩水电站3个在建特高压直流电项目和4个在建特高压直流电项目为案例,获取工程建设数据进行了核算,但是考察范围局限于特高压受端。相较于以上两篇文献,本文主要的区别体现在两方面:在理论方法层面,构建了特高压工程建设的碳排放清单而非直接使用工程的标准化预算表,使得材料碳排放真正得到了碳足迹溯源,同时区分了工程不同项目的投入产出类型并分别设计了EIO-LCA分析策略;在工程实例分析层面,基于陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程详细工程数据,能够对具体型号的工程材料和具体金额的工程投入展开测算和评价,精确度更高。

3 测算模型构建

3.1 研究思路

图1展示了经由特高压工程构建的电力资源传输全过程。电力资源从火力发电厂、风力发电站、光伏发电站、水力发电站等电源设施生产出来后,通过特高压直流工程或特高压交流工程传输到需求侧,供给生产、生活、交通、通讯等领域的用能设

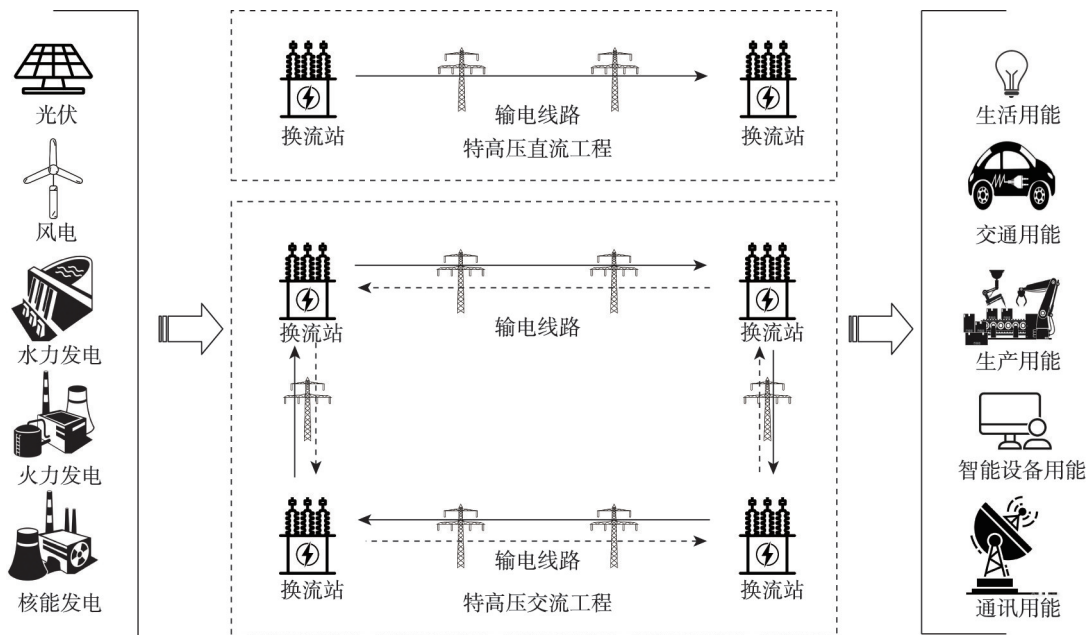


图1 经由特高压工程构建的电力输送流程

Figure 1 Power transmission process constructed through UHV projects

备。虽然特高压输电技术主要分为直流输电和交流输电两种技术类型,但是二者所形成的输电工程在建设项目上并无较大差别,因此,本文在分析时并未区分直流工程和交流工程。此外,特高压工程的生命周期一般可分为3个阶段:建设阶段、运行阶段、退役阶段。中国特高压工程设计使用年限一般较长(50年左右),且目前国内外退役拆除的特高压工程较少。因此,本文在计算特高压工程碳排放量时以建设阶段为主。

特高压工程建设阶段碳排放是指因其工程建设而产生的碳排放,即材料生产环节和施工建设环节产生的碳排放总和。从结构内容来看,特高压工程主要分为换流站与输电线路两个部分,其中换流站包括建筑系统、基建系统、安全系统、环保系统、电力设备系统五大系统,而输电线路包括电塔和输电线。特高压工程建设阶段碳排放构成如图2所示。

本文以连接甘肃省与山东省的中国首个“风光火储一体化”大型综合能源基地外送项目陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程为样本,探讨特高压工程建设碳排放测算方法的应用,评估工程建设阶段的碳排放量,最后就如何降低特高压工程建设阶段的碳排放展开分析,提出相关建议。

3.2 基本假设与变量

3.2.1 特高压工程建设阶段碳排放清单分析

LCA的基本结构分为4个部分:目标和范围的确定、清单分析、影响评价、改善评价或结果解释,其中清单分析关系到混合生命周期评价内部PLCA与EIO-LCA的边界划分和测算的精确程度。已有研究常采用工程的投资费用清单作为LCA的分析清单^[36],其优点是可以系统地建立工程建设投资项目与碳排放之间的关系,但也存在一些问题。一方面,基于费用清单的测算框架模糊了测量对象的碳排放特征,导致碳排放测量取决于费用清单中的内容,而不是工程建设方案。其次,在费用清单的框架内,混合生命周期评价中PLCA和EIO-LCA的边界划分更倾向于后者。同时,大多数成本清单并没有提供每个项目具体材料成分的详细信息,这掩盖了材料的碳足迹,并放大了EIO-LCA的评估权重。EIO-LCA方法不适用于评估特定产品^[37],这不可避免地会产生更多的聚集误差^[17,30,38]。鉴于此,本文在费用清单的基础上,基于碳足迹和工程建设内容开展清单分析,以建立一套适用于特高压工程建设阶段的碳排放清单体系。

依据中国现行特高压工程造价编制与计算的有关规定,特高压工程的主要投入一般由建筑工程

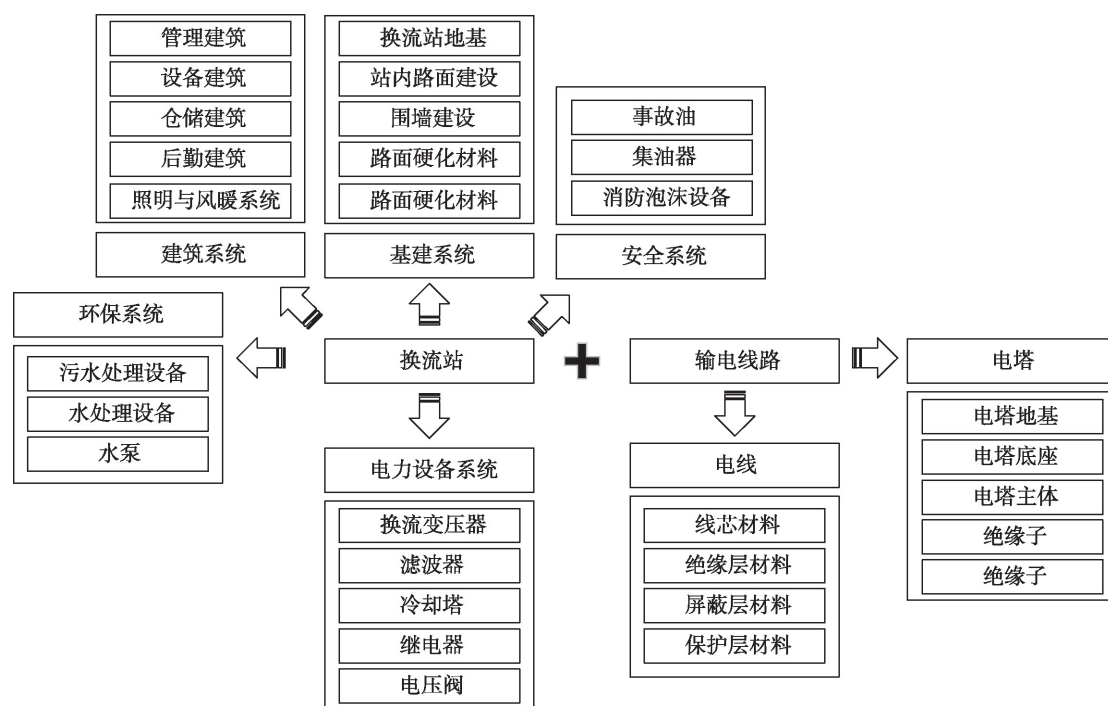


图2 特高压工程碳排放组成示意图

Figure 2 Schematic diagram of carbon emission composition in UHV projects

费、设备购置费、安装工程费、其他费用4大部分组成。其中,设备购置费和建筑工程费投资占总投资的所涉及的材料投入、能源消耗、人力资源投入、工程设备投入比重最大。按照投入与排放正相关的关系,此部分的碳排放比重最大,是工程建设阶段碳排放的主要部分。图3为特高压工程中设备购置费和建筑工程费的主要投入项,其中将设备购置费中所涉及的每个项目根据其重要程度分别编制进入安装工程费的主要生产工程和辅助生产工程部分中,与装置材料费和安装费共同构成安装工程造价表。而建筑工程费则可以将其中所涉及的每个项目继续拆解成为建筑设备费、建筑工程费、人工费。

基于上述梳理,设备购置费和建筑工程费投资均含有占总费用较大比重的设备费。其中设备购置费中所列设备以变流器、继电器、电抗器等电力工程设备为主,而建筑工程费中的建筑设备费所列设备以照明、空调、通风等设备为主。此外,建筑工程费中包含的建筑类型一方面有以人员办公与管理、装载电力设备、场地基建等的通用类型建筑,此类建筑属于一般的建筑工程,另一方面也包含有电

塔、直流场等电力工程建筑。二者在所投入的建设材料存在较大差异,其碳排放也存在差异。因此,在中国现行特高压工程造价编制和以上梳理的基础上,可将特高压工程包含的建筑工程费、设备购置费、安装工程费、其他费用根据碳排放特点进一步整理,提炼出主要的碳排放项目包括:建筑消耗、电力工程消耗、设备投入、建造过程、其他项目5大类,具体细分清单如图4所示。

如图4所示,建筑工程费被拆解为建筑消耗、电力工程消耗、建筑设备3个部分。其中建筑消耗、电力工程消耗按照图3分别解析形成对应的材料投入,建筑设备与电力设备费共同形成设备投入子清单。装置材料费和安装费进一步解析的项目构建形成了建造过程子清单。其他费用中的建设场地征用及清理费、项目建设技术服务费、生产准备费、项目管理费4个大项包含在其他项目中。

3.2.2 特高压工程建设阶段碳排放组分分析

依据以上特高压工程建设阶段碳排放清单,在建筑消耗、电力工程消耗、设备投入、建设过程和其他项目5类子清单中,建筑消耗和电力工程消耗两类子清单中项目碳排放主要来源于材料的生产过

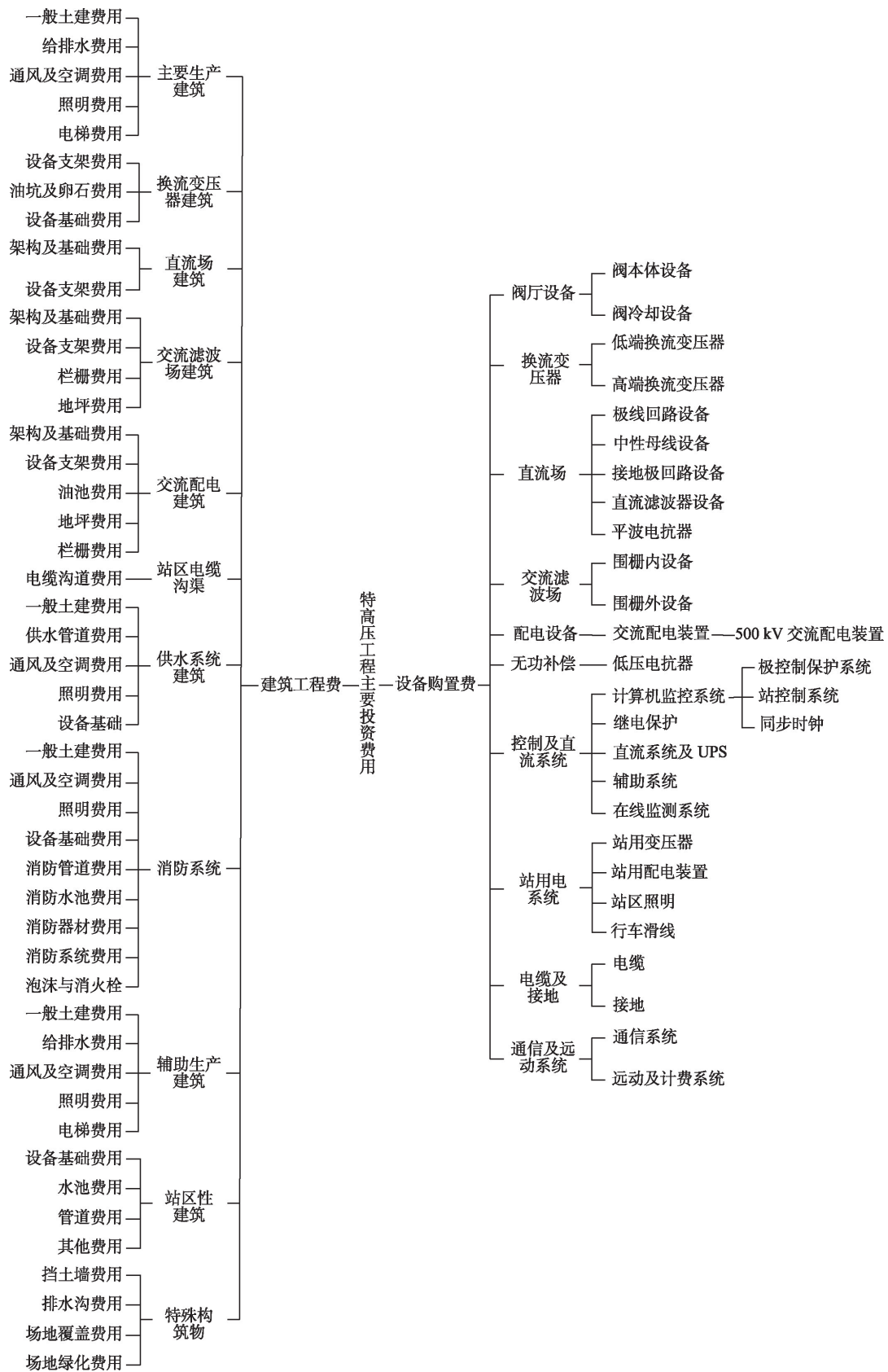


图3 特高压工程建设阶段主要投入项目组成示意图

Figure 3 Schematic diagram of the main investment projects in the construction phase of UHV projects

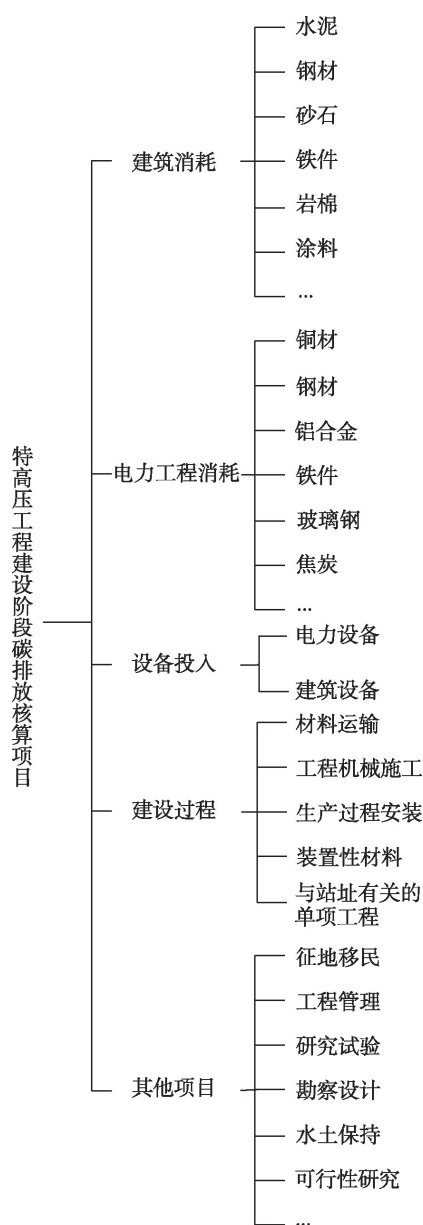


图4 特高压工程建设阶段碳排放核算清单

Figure 4 Carbon emission accounting list for the construction phase of UHV projects

程,碳排放足迹非常清晰,可以相对准确的进行分析和测算。而设备投入、建设过程和其他项目3类子清单中项目的碳足迹不确定性较高,无法准确量化。其中设备投入子清单中主要碳排放可溯源至投入于设备生产的原材料和能源,并进一步溯源至二者的生产过程,由于需要多次溯源并且设备零件涵盖材料复杂,难以有效获取其碳排放足迹。建造过程涉及材料运输、工程机械施工、生产过程安装、装置性材料投入等一系列繁杂的工作,这期间的碳

排放既无法清晰获取其源头,又无法准确搜索其碳足迹。其他项目中涉及到的征地移民、勘察设计、可行性研究等项目执行过程相对模糊,但投入和产出结果较为明确。

综上所述,依据上述碳排放清单中个项目排放特点,本文将建设阶段的碳排放清单划分为碳可溯源组和碳不可溯源组。碳可溯源组包括建筑消耗与电力工程消耗中所列举的以材料为主的项目,碳不可溯源组包括设备投入、建设过程、其他项目中所列举的相关项目。

3.3 测算模型

3.3.1 基于过程的生命周期碳排放核算模型构建

根据前文分析结果,对于碳可溯源组项目采用基于过程的生命周期评价方法(PLCA)。对于建筑消耗和电力工程消耗两个子清单中涉及的所有项目,其开采、精炼、合成、运输等过程中产生的所有碳排放计算如下:

$$CE_{\text{material}} = \sum (1 + \omega_i) \times m_i \times EF_i \quad (1)$$

式中: CE_{material} 表示上述两个子清单中所有项目碳排放总和; ω_i 表示建设过程和施工过程中带来的第 i 种材料损耗率; m_i 表示建筑消耗和电力工程消耗的第 i 种材料的使用量; EF_i 表示第 i 种材料的碳排放因子($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{单位}$)。根据 Gustavsson 等^[39]的研究结论,工程涉及的生产消耗和建设消耗所列项目中,混凝土损耗率为 1.5%,钢筋的废弃率为 15%,其他材料假定废弃率为 5%。

3.3.2 基于投入产出的生命周期碳排放核算模型

本文梳理的碳不可溯源组中,建设过程包含的装置性材料、材料运输、安装工程等项目在中国发布的投入产出表中有明确分类,同时项目中涵盖的材料消耗、资源消耗、人工消耗等均与碳排放有直接关联,仅是因为特高压工程等大型工程的复杂性导致其碳排放足迹和使用情况难以明确溯源。而设备投入和其他项目中涉及的项目,更多仅是以投资额体现,同时包含的征地移民、环保措施、水保措施、电力设备投入等与碳排放更多的是间接关系,故在分析时应与建设过程清单中项目采用不同的分析策略。鉴于以上情况,本文借鉴 Su 等^[40]和张孝存^[41]的思路,基于投入产出表对建设过程子清单中

项目碳排放情况进行分析,借鉴黄跃群等^[42]的思路,基于静态投资与碳排放强度分析设备投入和其他项目两个子清单碳排放情况。

本文对建设过程子清单中项目碳排放分析具体操作方法如下:

$$CE_{\text{project}} = \sum P_j \times EI_j \quad (2)$$

式中: CE_{project} 表示建设过程子清单中碳排放项目的碳排放值; P_j 表示碳排放项目中第 j 种要素的投入资金; EI_j 表示经部门拆分法转换后的第 j 种要素的碳排放强度。

本文对设备投入和其他项目两个子清单碳排放分析具体操作方法如下:

$$E_{n, \text{year-standard}} = I_n \times \left(\frac{CPI_{\text{year}}}{CPI_{\text{year-standard}}} \times PPP_{\text{year-standard}} \right)^{-1} \times EI_n \quad (3)$$

式中: $E_{n, \text{year-standard}}$ 表示第 n 种项目的投资额在基期的碳排放; I_n 表示第 n 种项目的投资额; CPI_{year} 和

$CPI_{\text{year-standard}}$ 分别表示计划投资年和基期的中国居民消费价格指数; $PPP_{\text{year-standard}}$ 表示基期中国对美国购买力平价指数; EI_n 表示第 n 种项目的部门碳排放强度。在此基础上,设备投入和其他项目两个子清单碳排放总和为

$$CE_{\text{investment}} = \sum E_{n, \text{year-standard}} \times \frac{CI_{\text{year}}}{UI_{\text{year-standard}}} \quad (4)$$

式中: $CE_{\text{investment}}$ 表示设备投入和其他项目两个子清单碳排放总和; CI_{year} 为项目投入年中国碳排放强度; $UI_{\text{year-standard}}$ 为基期美国碳排放强度。

综上,特高压工程建设阶段总体碳排放为基于过程的生命周期碳排放核算与基于投入产出的生命周期碳排放核算的结果之和,即

$$CE_{\text{total}} = \sum CE_{\text{material}} + \sum CE_{\text{project}} + \sum CE_{\text{investment}} \quad (5)$$

具体测算思路如图5所示。

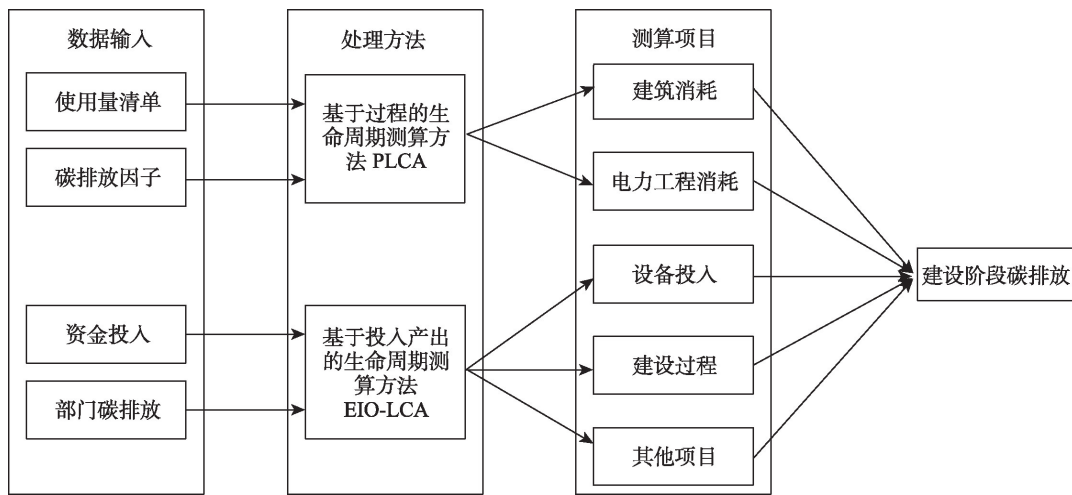


图5 基于混合生命周期评价方法的特高压工程建设阶段碳排放测算逻辑

Figure 5 Logic for carbon emission calculation during the construction stage of UHV projects based on HLCA

4 案例分析

4.1 数据来源

4.1.1 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程介绍

陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程起于甘肃省庆阳市境内,途经甘肃、陕西、山西、河北、山东5省,止于山东省泰安市地区,全线总长

928.120 km。工程于2023年3月开工建设,预计2024年12月竣工投运,输送容量8000 MW,是中国首条“风光火储一体化”送电的特高压输电线路,也是中国在建新型能源体系、建设新型电力系统的重要部署。作为落实习近平总书记关于推动陕甘宁革命老区发展、建设新型能源产业基地等重要指

2023年12月

示精神的工作举措,陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程将充分发挥送端甘肃地区新能源产地优势,较大程度地缓解山东电网用电负荷的缺口。工程投运后,每年可向山东省输送电量超过360亿千瓦时,每年减少燃煤消耗约1085万t,减少CO₂排放约1490万t,减少SO₂排放约1800t,减少NO_x排放约2700t,环境效益显著,对于加速中国电力绿色低

碳转型、助力实现“双碳”目标具有重要意义^[43]。

工程总体共包括送端庆阳换流站、送端接地极线路、送端接地极极址、送电线路、受端泰安换流站、受端接地极线路、受端接地极极址7个主要部分,其中换流站和极址以电力设备与建筑设施为建设主体,而接地极线路和送电线路以电塔与电缆线路为建设主体。工程概况如图6所示。

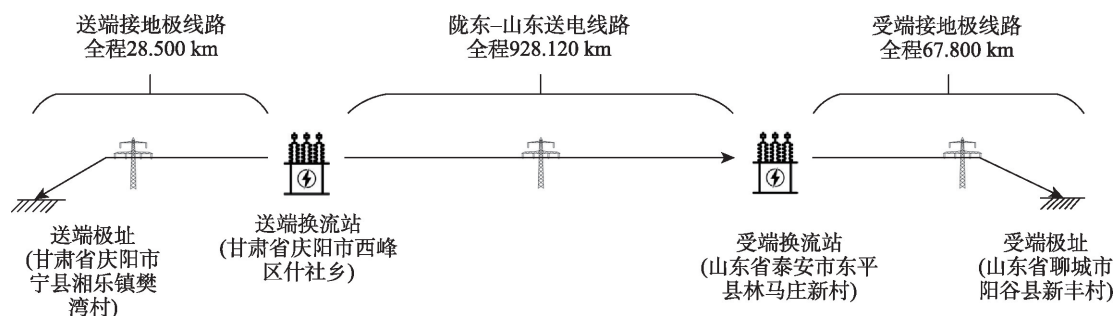


图6 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程概况

Figure 6 Overview of ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

4.1.2 排放清单

本文测算数据来源于陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程设计方提供的审定版可行性研究方案和预算表。工程预期总投资202亿元,全线预期建设换流站两座、接地极极址站两座,架设接地极线路96.300 km、送电线路933.910 km(因跨越黄河多假设1回路增加线路5.790 km),架设电塔1953基。工程全线跨越黄河两次,全程平地占26.46%、山地57.83%、高山9.54%、丘陵6.17%。基于前文提出的碳排放清单,本文通过整理陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程各部分的工程总估算表、建筑工程估算表、安装工程估算表、其他费用估算表等材料,形成了陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程的碳排放清单。其中,包含接地极极址和换流站的站址类工程清单如表1所示,包含直流输电线路和接地极线路的线路类工程清单如表2所示。

本文中建筑投入与电力工程投入中涉及项目的碳排放因子参考现有研究成果^[41,44],建设过程涉及项目的碳排放强度参考Su等^[40]和张孝存^[41]的研究成果。设备投入与其他项目涉及项目碳排放测算过程中,基期为2002年,项目投入年CPI、基期CPI、基期PPP均来源与国家统计局数据,美国2002年碳排放强度数据来源于世界银行,中国2022年碳

排放强度数据根据IEA提供的中国年CO₂排放数据和国家统计局发布的2022年中国GDP测算获得。

4.2 工程建设阶段碳排放测算结果

4.2.1 基于PLCA的特高压工程碳排放评估结果

根据前文确定的测算方法和陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程各部分的可研报告和预算表,本文计算得到了工程送端极址、送端接地极线路、送端换流站、送电线路、受端换流站、受端接地极线路、受端极址7个部分的碳可溯源组碳排放情况,如表3所示。模型结果表明,在当前的工程投资规模和建设内容下,工程碳可溯源组碳排放量为110.639万tCO₂e,其中建筑消耗子清单碳排放量为93.947万tCO₂e,电力工程消耗为16.692万tCO₂e,分别占碳不可溯源组的84.913%和15.087%。

上述7个部分的碳排放量分别为1.393万tCO₂e、0.482万tCO₂e、26.471万tCO₂e、63.547万tCO₂e、17.189万tCO₂e、0.252万tCO₂e和1.305万tCO₂e。其中,送电线路建设过程碳可溯源组项目排放量最大,占比达到57.436%,换流站建设阶段碳排放量占比第二,接地极线路由于距离较短,建设阶段碳排放量最少。从送端和受端来看,各部分总体碳排放量接近,建设环境和建设策略的不同使得碳排放量出现差异。

表1 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设阶段站址类工程碳排放清单

Table 1 Carbon emission inventory for the station projects during the construction phase of the ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

清单类型	送端极址					
	项目	数量	项目	数量	项目	数量
建筑消耗	钢材/t	43.606	镀锌钢材/t	0.623	混凝土 C20/m ³	2509.203
	沙料/m ³	897.000	石料/m ³	1668.000	混凝土 C40/m ³	751.564
电力工程消耗	石油焦炭/t	4050.000	铁件/t	2.405	铜材/t	1.077
	环氧树脂/kg	500.000	镀锌钢材/t	1.718	氯化聚氯乙烯/kg	26.898
	铝合金/t	27.657	钢材/t	0.280	防火涂料/t	0.320
	防火堵料/t	0.154	防火隔板/m ²	100.000		
设备投入	电力设备/万元	1240.886				
建设过程	工程机械施工/万元	206.671	装置性材料/万元	2107.685	安装工程/万元	696.175
其他费用	场地征用/万元	888.200	项目建设技术服务/万元	430.066	生产准备/万元	71.180
	项目建设管理/万元	517.223				
清单类型	送端换流站					
	项目	数量	项目	数量	项目	数量
建筑消耗	钢材/t	49016.512	镀锌钢材/t	5056.068	不锈钢/t	49.371
	铁件/t	990.497	标准砖 240×115×53/千块	3165.631	石料/m ³	72281.829
	沙料/m ³	64363.367	硅酸盐水泥 32.5/t	7665.716	氯乙烯塑料/m	21000.000
	岩棉/t	5.823	纤维增强硅酸盐板/t	24.840	铝合金/t	1.643
	钢筋混凝土管/t	6838.184	各型混凝土/m ³	416005.238		
电力工程消耗	铝合金/t	182.619	镀锡铜材/t	157.639	铜材/t	278.633
	钢材/t	111.991	镀锌钢材/t	1315.849	防火涂料/t	52.500
	防火堵料/t	28.000	防火隔板/m ²	26400.000		
设备投入	电力设备/万元	458393.607	建筑设备/万元	9254.002		
建设过程	工程机械施工/万元	10868.858	装置性材料/万元	17453.016	安装工程/万元	28646.673
	运输/万元	17283.000				
其他费用	场地征用/万元	10288.417	项目建设技术服务/万元	20466.724	生产准备/万元	1986.205
	项目建设管理/万元	15519.989				
清单类型	受端换流站					
	项目	数量	项目	数量	项目	数量
建筑消耗	钢材/t	35881.934	铝合金/t	1.569	镀锌钢材/t	285.956
	铁件/t	826.192	沙料/m ³	40098.809	石料/m ³	75113.562
	硅酸盐水泥 32.5/t	4882.947	石英玻化地砖/m ²	3660.953	氯化聚乙烯橡胶/m ³	33.8523
	各型混凝土/m ³	2.217×10 ⁵				
电力工程消耗	铝合金/t	396.701	镀锡铜材/t	375.126	铜材/t	66.981
	钢材/t	330.920	镀锌钢材/t	603.541	防火涂料/t	37.500
	防火堵料/t	19.035	防火隔板/m ²	21615.000		
设备投入	电力设备/元	344968.814	建筑设备/万元	7891.908		
建设过程	工程机械施工/万元	5085.323	装置性材料/万元	14428.215	安装工程/万元	19844.467
	运输/万元	4484.420				
其他费用	场地征用/万元	10213.501	项目建设技术服务/万元	17585.131	生产准备/万元	1393.291
	项目建设管理/万元	11015.799				

续表1

清单类型	受端极址					
	项目	数量	项目	数量	项目	数量
建筑消耗	钢材/t	325.504	镀锌钢材/t	6.727	铁件/t	13.499
	沙料/m ³	4369.108	石料/m ³	391.254	硅酸盐水泥32.5/t	11.687
	各型混凝土/m ³	3148.899				
电力工程消耗	石油焦炭/t	3500.000	铜材/t	4.929	钢材/t	0.220
	铝合金/t	0.633	镀锌钢材/t	8.371	不锈钢/t	9.300
	环氧树脂/kg	350.000	氯化聚氯乙烯/kg	22.911	防火涂料/t	0.500
	防火堵料/t	0.500	防火隔板/m ²	60.000		
设备投入	电力设备/万元	3365.724				
建设过程	工程机械施工/万元	309.157	装置性材料/万元	1808.985	安装工程/万元	1038.158
其他费用	场地征用/万元	1691.758	项目建设技术服务/万元	221.628	生产准备/万元	83.304
	项目建设管理/万元	567.012				

表2 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设阶段线路类工程碳排放清单

Table 2 Carbon emission inventory for the line projects during the construction phase of the ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

清单类型	送端接地极线路(28.500 km)					
	项目	数量	项目	数量	项目	数量
建筑消耗	钢材/t	1135.033	沙料/m ³	2864.754	石料/m ³	3837.668
	硅酸盐水泥42.5/t	1498.310				
电力工程消耗	钢材/t	121.030	铝合金/t	282.402		
设备投入	电力设备/万元	38.836				
建设过程	工程机械施工/万元	148.099	装置性材料/万元	1574.279	运输/万元	99.820
其他费用	场地征用/万元	1493.771	项目建设技术服务/万元	236.340	生产准备/万元	4.696
	项目建设管理/万元	120.496				
清单类型	送电线路(933.910 km)					
	项目	数量	项目	数量	项目	数量
建筑消耗	钢材/t	168830.442	各型混凝土/t	284512.635		
电力工程消耗	铝合金/t	70210.602	钢材/t	30090.258		
设备投入	电力设备/万元	2057.000				
建设过程	工程机械施工/万元	40493.102	装置性材料/万元	258416.452	安装工程/万元	232535.440
	运输/万元	34765.957				
其他费用	场地征用/万元	48193.071	项目建设技术服务/万元	36233.054	生产准备/万元	686.778
	项目建设管理/万元	12129.832				
清单类型	受端接地极线路(67.800 km)					
	项目	数量	项目	数量	项目	数量
建筑消耗	环氧树脂/m ³	16.000	普通硅酸盐水泥42.5/t	582.414	石料/m ³	1028.600
	钢材/t	489.912	镀锌钢材/t	5.450	沙料/m ³	514.160
电力工程消耗	铝合金/t	331.100	钢材/t	141.900		
设备投入	电力设备/万元	28.375				
建设过程	工程机械施工/万元	146.554	装置性材料/万元	1419.000	运输/万元	124.775
其他费用	场地征用/万元	453.750	项目建设技术服务/万元	378.200	生产准备/万元	3.396
	项目建设管理/万元	87.092				

表3 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程各部分碳可溯源组项目碳排放量

Table 3 Carbon traceable group carbon emissions of the ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

工程部分	送电线路	送端换流站	受端换流站	送端极址	受端极址	送端接地极线路	受端接地极线路	合计
碳排放量/万 tCO ₂ e	63.547	26.471	17.189	1.393	1.305	0.482	0.252	110.639
占比/%	57.436	23.925	15.536	1.259	1.180	0.436	0.228	100.000
建筑消耗排放量/万 tCO ₂ e	50.553	25.796	16.710	0.096	0.173	0.428	0.191	93.947
电力工程消耗排放量/万 tCO ₂ e	12.994	0.675	0.479	1.297	1.132	0.054	0.061	16.692

在以上测算结果的基础上,按照建筑材料、金属材料、非金属材料、其他材料将碳不可溯源组项目进行拆解,结果如图7所示。与建筑工程不同,特高压工程在建设阶段占比重较大的材料类型为钢材、铝合金、铜材、铁件等金属材料,在以电塔为主要建设对象的送电线路工程和接地极线路工程部分,金属材料的占比分别达到了88%和70%以上,即使是在包含建筑项目较多的换流站和接地极址,混凝土、砖块等非金属材料均没有超过50%。而对于接地极址工程,为了保证将电流导入大地带来的工程安全性挑战和满足在建设周期内的抗腐蚀性和耐用性等问题,大量采用了防腐涂料、绝缘材料等以聚乙烯、聚氯乙烯等为主要成分的其他材料。但由于接地极址规模较小,其他材料仅是在接地极址工程中碳排放量占比较大,但其绝对值在碳可溯源组的所有项目中占比小。

4.2.2 基于EIO-LCA的特高压工程碳排放评估结果

根据前文确定的基于投入产出的生命周期分析方法和陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程实际数据,本文测算得到了工程送端极址、送端接地极线路、送端换流站、送电线路、受端换流站、

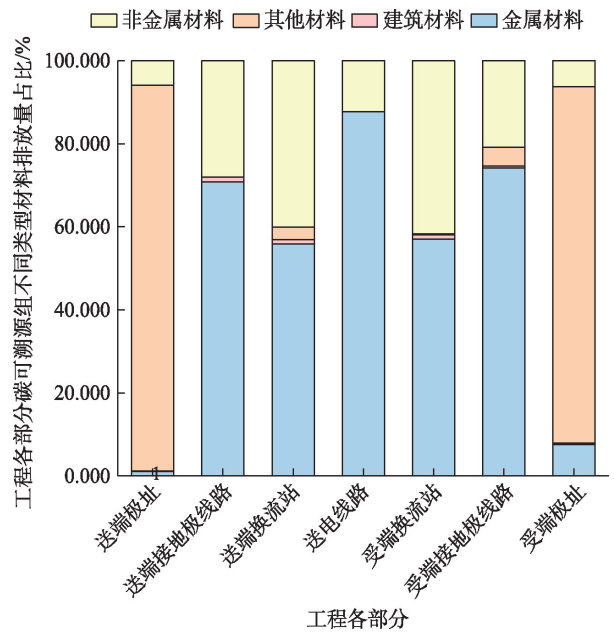


图7 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程碳可溯源组构成情况

Figure 7 Carbon traceable group composition of the ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

受端接地极线路、受端极址7个部分的碳不可溯源组碳排放情况,如表4所示。模型结果表明,在当前

表4 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程各部分碳不可溯源组项目碳排放量

Table 4 Carbon emissions of the carbon non-traceable group of the ± 800kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

工程部分	送电线路	送端换流站	受端换流站	受端极址	送端极址	送端接地极线路	受端接地极线路	合计
碳排放量/万 tCO ₂ e	154.470	39.060	29.517	1.103	0.918	0.534	0.458	226.060
占比/%	68.331	17.279	13.057	0.488	0.406	0.236	0.203	100.000
设备投入碳排放量/万 tCO ₂ e	0.113	21.089	15.912	0.152	0.056	0.002	0.001	37.325
过程投入碳排放量/万 tCO ₂ e	149.972	15.795	11.792	0.835	0.776	0.448	0.415	180.033
其他项目碳排放量/万 tCO ₂ e	4.385	2.176	1.813	0.116	0.086	0.084	0.042	8.702

2023年12月

的工程投资规模和建设内容下,工程碳不可溯源组碳排放量为226.060万tCO₂e,设备投入子清单、建设过程子清单和其他项目子清单的碳排放量分别为37.325万tCO₂e、180.033万tCO₂e和8.702万tCO₂e,分别占碳不可溯源组的16.511%、79.640%和3.849%。

上述7个部分的碳排放量分别为0.918万tCO₂e、0.534万tCO₂e、39.060万tCO₂e、154.470万tCO₂e、29.517万tCO₂e、0.458万tCO₂e和1.103万tCO₂e。与碳可溯源组测算结果展现出的趋势一致,送电线路工程碳不可溯源组的碳排放量最高,这主要源自于工程933.910 km的输电距离带来的大量的工程机械工时、装置性材料、运输费用和其他费用投入。同时,送端和受端在换流站、接地极线路、极址的碳不可溯源组项目碳排放量接近,建设环境和建设策略的不同使得碳排放量出现差异。

对工程碳不可溯源组碳排放量按照设备投入、建设过程、其他项目3个子清单的主要项目进行拆解,拆解情况如图8所示。结果显示,对于设备投入子清单,无论是电力设备投入还是建筑设备投入,主要的碳排放量来源于换流站的工程建设,其中送端换流站的电力设备投入碳排放量和建筑设备投入碳排放量最大,分别为20.672万tCO₂e和0.417万tCO₂e,输电线路工程以电塔和电缆为主,设备投入碳排放较小。在建设过程子清单方面,除运输投入项目外,各项目的碳排放与各部分工程的建设量成正相关关系,送电线路工程的工程机械投入碳排放量、装置性材料碳排放量、安装工程碳排放量和运输投入碳排放量均最大,分别为12.754万tCO₂e、62.358万tCO₂e、67.519万tCO₂e和7.341万tCO₂e。其他项目子清单分解结果显示,场地征用碳排放量和建设过程子清单中项目碳排放量分布情况相似,送电线路工程最大且与其他部分差距明显,为2.173万tCO₂e。建设技术服务的碳排放量上虽然整体趋势维持碳排放与建设量成正相关关系,但送电线路工程与换流站工程之间的碳排放量差距有所缩小,送电线路工程、送端换流站工程、受端换流站工程在此项目的碳排放分别为1.634万tCO₂e、0.923万tCO₂e和0.793万tCO₂e。在工程准备项目上,由于换流站电力设备安装工程量较大,更多的费用投资

于生产职工培训与工作器具的购置,其中送端换流站在此项目的碳排放量最大,为0.090万tCO₂e。工程建设管理项目方面,大型电力设备的购置与生产过程带来了更多的招标费用和生产监理费用,送端换流站在此项目碳排放量最大,为0.700万tCO₂e。

4.2.3 工程碳排放总和

综合以上工程碳可溯源组和碳不可溯源组项目的测算结果,本文测算得到了陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设阶段的总体碳排放量和工程各部分碳排放量,结果如表5所示。结果显示,工程建设阶段碳排放总量为336.699万tCO₂e,单位投资碳排放量为1.667 tCO₂e/万元,小于大坝等水力发电工程的单位投资碳排放量^[42]。从工程部分类型上来看,站址类工程的碳排放量为116.956万tCO₂e,占工程整体的34.736%,线路类工程的碳排放量为219.743万tCO₂e,占工程整体的65.264%。从工程各部分上来看,送电线路工程为排放量最大的部分,达到了工程整体的64.751%,为218.017万tCO₂e,送电线路和送端、受端换流站一共产生了工程建设阶段98.086%的碳排放量,共计330.254万tCO₂e,工程其余部分碳排放量相对较少,仅占工程整体碳排放量的1.914%。

本文进一步对工程总体和各部分碳可溯源组和碳不可溯源组碳排放情况进行对比分析,结果如图9所示。图9的左图为受端极址、受端接地极线路、送端接地极极址、送端极址4个工程部分的碳可溯源组和碳不可溯源组碳排放量对比分析。从中可以看出,上述4个工程部分两个组分的碳排放量相对均衡,受端接地极线路虽然碳不可溯源组碳排放量明显高于碳可溯源组,但由于绝对值较小,总体差距并不明显。图9的右图为受端换流站、送电线路和送端换流站3个工程部分的组分碳排放量对比分析。从中可以看出,3个工程部分的碳不可溯源组碳排放量要远高于碳可溯源组,同时两组之间的绝对值差距也较大。

选取Wei等^[35]和Zhang等^[36]的研究结果与本文结果进行对比分析。Wei等^[35]分析得出±1100千伏特高压交流工程换流站典型方案建设碳排放量为71.200万tCO₂e,与本文送端换流站65.531万tCO₂e建设碳排放量比较接近;比本文结果高出的8.653%

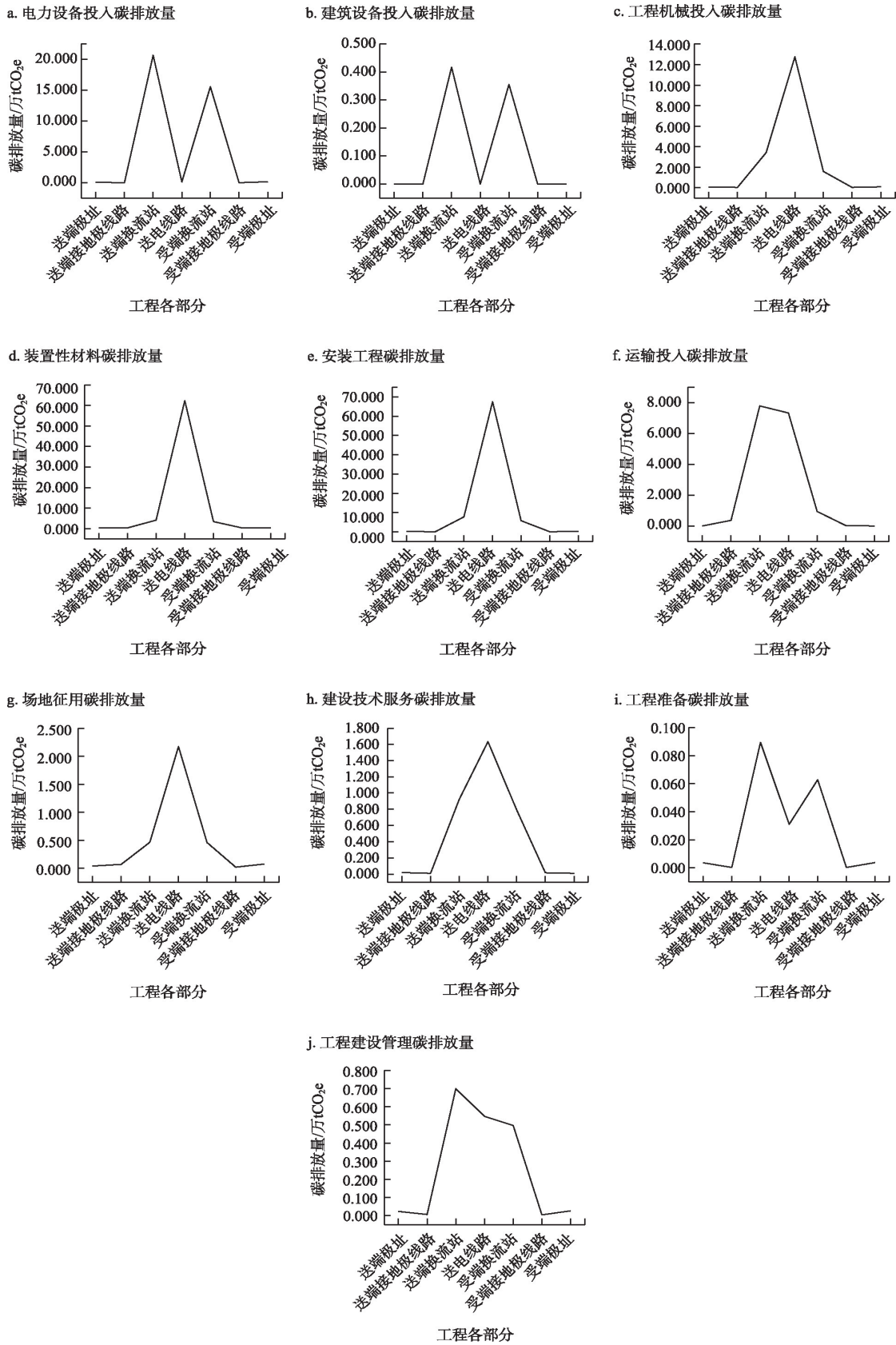


图8 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程碳不可溯源组各项目碳排放量

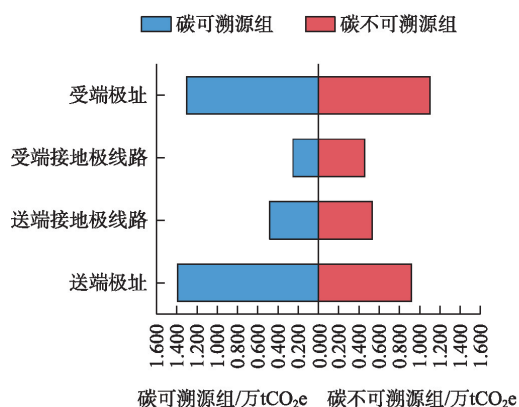
Figure 8 Carbon emissions of the carbon non-traceable group of the ±800kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

表5 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程碳排放量

Table 5 Carbon emissions of the ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

工程部分	送电线路	送端换流站	受端换流站	受端极址	送端极址	送端接地极线路	受端接地极线路	工程总计
碳排放量/万 tCO ₂ e	218.017	65.531	46.706	2.408	2.311	1.016	0.710	336.699
占比/%	64.751	19.463	13.872	0.715	0.686	0.302	0.211	100.000

a. 双端接地极线路与极址工程组分碳排放量对比



b. 送电线路与双端换流站工程组分碳排放量对比

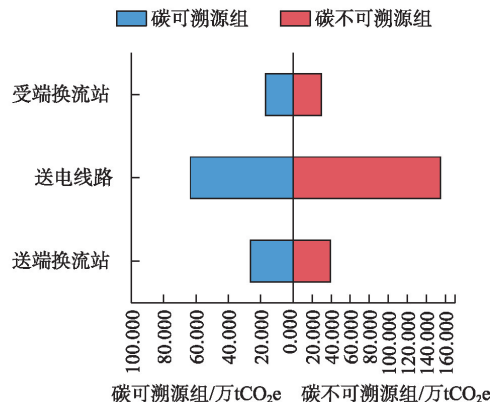


图9 陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设阶段组分碳排放量对比

Figure 9 Comparison of group carbon emissions during the construction phase of the ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong

可能是直流工程和交流工程的具体差异导致。Zhang等^[36]通过分析15个±500千伏输电线路数据预测了中国9条特高压直流输电工程的碳排放情况,选取其中与本文研究线路距离相近的晋北—江苏±800千伏特高压直流输电工程和蒙东—山东±800千伏特高压直流输电工程作为对比分析对象,对比结果如表6所示。

从对比分析结果可以看出,本文测算结果要高于2条对比分析线路的预测碳排放量。这一方面是因为Zhang等^[36]在研究过程中并未考虑双端的接地极线路工程与极址工程,同时认为换流站工程碳排

放量为单侧换流站碳排放量的2倍。以本文为例,双端的接地极线路工程与极址工程碳排放量为6.445万tCO₂e,占工程建设碳排放量的1.914%,两侧换流站建设碳排放量相差18.825万tCO₂e,占工程建设碳排放量的5.591%。另一方面,Zhang等^[36]的研究仅将水泥和钢铁作为工程主要的核算材料,且是基于±500千伏输电工程分析结果预测特高压直流工程建设碳排放量,存在一定误差。而本文从碳足迹和工程建设内容角度构建的清单体系拓宽了PLCA的边界,核算材料更加丰富,并且完整的工程实际数据更利于混合生命周期评价方法的应用。

表6 本文结果与文献[36]预测中国条特高压直流输电工程碳排放情况对比分析

Table 6 Comparative analysis of the results of this study and the carbon emissions predicted by reference [36] for UHVDC transmission projects in China

工程名称	线路长度/km	分析结果/万 tCO ₂ e	与本文结果差异量/万 tCO ₂ e	差值占本文结果比重/%	与本文主要工程结果差异量/万 tCO ₂ e	差值占本文主要工程结果比重/%
晋北—江苏工程	1119.000	203.000±22.000	-(133.699±22.000)	33.175~46.243	-(127.254±22.000)	31.871~45.194
蒙东—山东工程	1234.000	242.000±24.000	-(94.699±24.000)	20.998~35.254	-(88.254±24.000)	19.456~33.990

注:因为Zhang等^[36]并未考虑双端的接地极线路与极址工程,表中“本文主要工程”为陇东—山东工程的输电线路、送端换流站和受端换流站3个工程部分。

4.3 特高压工程建设阶段碳排放削减潜力分析

基于对陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设阶段的碳排放测算结果和工程预定的建设方案,从工程规划、碳可溯源组和碳不可溯源组3个角度分析特高压工程建设阶段碳排放削减潜力。

4.3.1 工程规划的减排作用分析

对陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程各工程部分建设阶段碳排放的测算中发现,送端工程和受端工程的碳排放量总体接近,而在受端输电线路工程和送端输电工程的碳排放量上有较大差距。对比工程的可研方案发现,受端接地级线路利用现有直流线路架设线路55.300 km,从而实现了工程线路比送端长39.300 km,而总体碳排放量减少0.306万tCO₂e,这体现出在工程可行性研究阶段通过项目规划为工程整体碳排放带来的减排潜力。

4.3.2 碳可溯源组的减排潜力分析

陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程碳可溯源组项目碳排放量为110.639万tCO₂e,占碳排放总量的32.860%。从碳排放量来源来看,金属类材料和非金属类材料碳排放量最大,分别为80.930万tCO₂e和25.966万tCO₂e,是碳可溯源组项目碳排放削减的重点领域。基于现有的工程建设实践经验,特高压工程建设阶段碳可溯源组碳排放削减可以从材料减排和建设技术减排两方面实施。在材料减排方面,在对陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程材料溯源的过程中看出,工程材料参数和选材整体较为保守,主要使用的还是传统的建筑材料和非金属材料。从工程本身安全情况来看,其并无不当之处。但随着中国“双碳目标”的提出和新型能源体系、新型电力系统建设的大力推进,对特高压工程自身的清洁属性提出更高要求,继续秉持传统特高压工程的设计理念显然不符合时代发展的要求。因此,在保证工程设计参数的同时,应考虑绿色材料的引入和现有材料的利用效率提升。

在建设技术减排方面,以杆塔工程为例,参考陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程建设方案,大量架设的电塔是工程钢材、铝材等金属材料和各型混凝土等非金属材料大量投入的主要原因。电塔主要包括钢结构塔身和混凝土塔基,受工程建设参数要求限制,钢结构塔身碳排放削减能力

较弱,而在混凝土塔基上则有较大的减排空间。目前特高压工程塔基建设方案主要为混凝土灌注桩基础,在此建设技术方案下,每基电塔需要消耗大量的混凝土。若采用预应力锚杆建设桩基工程,在保证电塔技术参数的同时,在很大程度上将减少混凝土的用量,实现工程碳可溯源组碳排放量削减。

4.3.3 碳不可溯源组的减排潜力分析

陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程碳不可溯源组项目碳排放量为226.060万tCO₂e,占碳排放总量的67.140%,是工程整体碳排放削减的重点领域,表明过程管控是特高压工程碳减排的重要抓手。对此,可加快工程智慧化应用,优化管控过程,推动“智慧工地”助力现场管控,依托“大、云、物、移、智”等信息化技术建立工程综合数据平台,集成现场人员、机械、设备、材料、环境等信息数据,助力工程的研发制造、物资供应、人力保障、建设施工、运营维护等流程的精准管控。同时,可利用模块化的管理与设计,发挥了模块化缩短建设工期、减少现场工作量、降低施工风险、可重复利用、规范化施工、质量可靠等优势,以减少不必要的污染排放并实现了资源与能源的高效利用。

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文基于混合生命周期评价模型,以陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程为例,测算了工程建设阶段整体和各部分的碳排放情况,验证了本文构建的特高压工程建设碳排放测算方法体系的适用性,讨论了特高压工程建设阶段碳排放削减潜力。研究结论如下:

(1)本文通过从工程建设内容和碳足迹构建的碳源特高压工程建设碳源排放清单体系,重新划分了混合生命周期评价方法中PLCA与EIO-LCA的边界,使得利用PLCA方法能够对具备相对清晰碳足迹的材料、能源的碳排放充分计算、利用EIO-LCA方法可以对碳足迹模糊的大型设备、建设过程和其余投资分策略测算碳排放。基于对研究案例陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程的分析,验证了本文方法在一定范围内简化计算工作,保证对超大型工程建设阶段碳排放的相对科学和有效的测算。

2023年12月

(2)案例研究结果显示,工程整体碳排放量为336.699万tCO₂e,工程各部分建设阶段碳排放量分别为送端极址2.311万tCO₂e、送端接地极线路1.016万tCO₂e、送端换流站65.531万tCO₂e、送电线路218.017万tCO₂e、受端换流站46.706万tCO₂e,受端接地极线路0.710万tCO₂e、受端极址2.408万tCO₂e,单位投资碳排放量为1.667tCO₂e/万元,表明大跨度的电力领域超级工程没有提升单位碳排放水平,仅是增加了碳排放的绝对值。

(3)通过对陇东—山东±800千伏特高压直流输电工程碳可溯源组和碳不可溯源组的分析发现,其因材料投入而产生的碳排放占工程建设阶段碳排放总量的32.860%,设备投入、建设过程、其他项目等占总量的67.140%。碳可溯源组中金属材料和非金属材料为工程建设阶段的碳排放削减提供了空间,碳不可溯源组的过程控制优化是工程建设阶段碳减排的重要抓手。

另外,本文也存在一定的局限性。由于仅选择了一个中国在建特高压直流输电工程作为研究案例,不同直流工程、直流工程与交流工程可能会在工程规划、配套建设内容、跨越地形等因素上存在一定的差异。这些因素会对工程建设碳排放量产生怎样的影响、工程建设平均碳排放水平等还有待进一步的研究与探讨。

5.2 政策建议

基于以上结论,本文针对中国特高压工程建设阶段碳排放管理提出如下对策建议:

(1)做好工程规划阶段的线路设计。在工程线路规划过程中,充分利用送端、受端和送电沿途的现有电网基础,借助已有符合工程要求的电塔和电站。一方面考虑换流站与当地已有或规划建设的变电站合建的规划设计思路,提高电站的利用效率,降低场地征地、环保工程、安全工程等其他项目的成本投入。另一方面,在技术参数允许的范围,做好工程线路巨长控制的同时,高效利用已有电塔,减少建设材料的投入。

(2)创新施工建设技术和引入绿色材料。在确保工程技术要求的前提下,对于混凝土浇筑、桩基工程、建筑工程等材料投入较大的工程项目,引入

建筑领域先进施工技术,在满足工程要求的同时减少材料的投入。同时,加大绿色建材的使用,对于高污染高排放的PVC等化学材料,寻找相关的替代材料。

(3)充分运用数智技术做好工程建设阶段的过程管理。将工程绿色两型建设管理与数智技术相融合,运用到中国特高压工程建设阶段的过程管理中。从工程的智能化建设、模块化建设、集约化建设出发,充分探索和实践物联网、人工智能、云计算等新一代信息技术在工程建设过程中的应用,科学采用模块化建设方式实现减少现场工作量、缩短工期、规范建设施工和提高材料利用率,通过集约化的管理方式,提高建设全过程的统筹协调与科研、设计、设备、建设、验收、调试、投运等关键环节的决策部署和集成管控效率,从而降低碳不可溯源组的碳排放,实现工程建设阶段的碳排放有效管理。

参考文献(References):

- [1] 杨海龙,陈振婷,孙业红.“双碳”背景下电力系统的结构性矛盾及对策[J].宏观经济管理,2023,(7):77-85.[Yang H L, Chen Z T, Sun Y H. The structural contradictions of the electrical power system under the background of “carbon peaking and neutrality” and suggestions on countermeasures[J]. Macroeconomic Management, 2023, (7): 77-85.]
- [2] 余长林,马青山.特高压输电与区域经济发展:来自特高压工程的经验证据[J].数量经济技术经济研究,2023,40(10):202-224.[Yu C L, Ma Q S. Ultra-high voltage transmission and regional economic development: Empirical evidence from UHV projects [J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2023, 40 (10): 202-224.]
- [3] Jorge R S, Herwich E G. Grid infrastructure for renewable power in Europe: The environmental cost[J]. Energy, 2014, 69: 760-768.
- [4] Deetman S, de Boer H S, Van Engelenburg M, et al. Projected material requirements for the global electricity infrastructure-generation, transmission and storage[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105200.
- [5] Li F Y, Ye Z Y, Xiao X L, et al. Material stocks and flows of power infrastructure development in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104906.
- [6] Wang H, Zhang Y Y, Lin W F, et al. Transregional electricity transmission and carbon emissions: Evidence from ultra-high voltage transmission projects in China[J]. Energy Economics, 2023, DOI:

- 10.1016/j.eneco.2023.106751.
- [7] 段巍, 王明, 吴福象. 能源结构、特高压输电与中国产业布局演变[J]. 中国工业经济, 2022, (5): 62–80. [Duan W, Wang M, Wu F X. Energy structure, UHV transmission and the evolution of industrial distribution in China[J]. China Industrial Economics, 2022, (5): 62–80.]
- [8] 赵静. 执行协商的政策效果: 基于政策裁量与反馈模型的解释[J]. 管理世界, 2022, 38(4): 95–108. [Zhao J. The policy effect of deliberative implementation: An explanation based on the policy discretion–feedback model[J]. Journal of Management World, 2022, 38(4): 95–108.]
- [9] Li Y, Yi B W, Wang Y. Can ultra–high voltage power transmission bring environmental and health benefits? An assessment in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124296.
- [10] 陈晓红, 唐湘博, 李大元, 等. 构建新时代两型工程管理理论与实践体系[J]. 管理世界, 2020, 36(5): 189–203. [Chen X H, Tang X B, Li D Y, et al. Practical system of two–oriented engineering management in the new era[J]. Journal of Management World, 2020, 36(5): 189–203.]
- [11] Wang L K, Wang Y, Du H B, et al. A comparative life–cycle assessment of hydro–, nuclear and wind power: A China study[J]. Applied Energy, 2019, 249: 37–45.
- [12] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. 当代经济管理, 2021, 43(8): 33–38. [Gao C Y, Niu J G, Wang F R. Review of carbon emission accounting methods and carbon emission factor in steel production[J]. Contemporary Economic Management, 2021, 43(8): 33–38.]
- [13] Feng R, Hu L T, Hu X Y, et al. Knowledge gaps are making it harder to formulate national climate policies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2023, DOI: 10.1073/pnas.2218563120.
- [14] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446–455. [Zhai Y J, Zhang T Z, Shen X X, et al. Development of life cycle assessment method[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 446–455.]
- [15] Fan F Y, Wang Y Y, Liu Q Y. China’s carbon emissions from the electricity sector: Spatial characteristics and interregional transfer [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2022, 18(1): 258–273.
- [16] Ma J J, Du G, Xie B C. CO₂ emission changes of China’s power generation system: Input–output subsystem analysis[J]. Energy Policy, 2019, 124: 1–12.
- [17] Luo F, Guo Y, Yao M T, et al. Carbon emissions and driving forces of China’s power sector: Input–output model based on the disaggregated power sector[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121925.
- [18] Wei W D, Zhang P F, Yao M T, et al. Multi–scope electricity–related carbon emissions accounting: A case study of Shanghai[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119789.
- [19] Peng X, Tao X M, Zhang H, et al. CO₂ emissions from the electricity sector during China’s economic transition: From the production to the consumption perspective[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 27: 1010–1020.
- [20] 廖夏伟, 计军平, 马晓明. 2020年中国发电行业碳减排目标规划相符性分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 553–559. [Liao X W, Ji J P, Ma X M. Consistency analysis between technology plans and reduction target on CO₂ emission from China’s power sector in 2020[J]. China Environmental Science, 2013, 33(3): 553–559.]
- [21] Wang N, Guo Z Q, Meng F X, et al. The circular economy and carbon footprint: A systematic accounting for typical coal–fuelled power industrial parks[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 1262–1273.
- [22] Liu K Y, Wang K, Wang S X, et al. Tracking carbon flows from coal mines to electricity users in China using an ensemble model [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(33): 12242–12250.
- [23] Li R X, Zhang H R, Wang H R, et al. Integrated hybrid life cycle assessment and contribution analysis for CO₂ emission and energy consumption of a concentrated solar power plant in China[J]. Energy, 2019, 174: 310–322.
- [24] Pomponi F, Lenzen M. Hybrid life cycle assessment (LCA) will likely yield more accurate results than process–based LCA[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 210–215.
- [25] Velez–Henao J, Vivanco D F. Hybrid life cycle assessment of an onshore wind farm including direct and indirect services: A case study in Guajira, Colombia[J]. Journal of Environmental Management, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112058.
- [26] Cellura M, Luu L Q, Guarino F, et al. A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells[J]. Science of the Total Environment, 2024, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168019.
- [27] Harrison G P, Maclean E J, Karamanlis S, et al. Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain[J]. Energy Policy, 2010, 38(7): 3622–3631.
- [28] 王鑫淼, 马志勇, 周旺潇, 等. 光伏发电系统碳中和及其影响因素[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1735–1744. [Wang X M, Ma Z Y, Zhou W X, et al. Carbon neutralization in photovoltaic power generation system and influencing factors[J]. Resources Science, 2022, 44(8): 1735–1744.]
- [29] Ge Z W, Geng Y, Wei W D, et al. Embodied carbon emissions induced by the construction of hydropower infrastructure in China

2023年12月

- [J]. *Energy Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113404.
- [30] Pomponi F, Hart J. The greenhouse gas emissions of nuclear energy: Life cycle assessment of a European pressurised reactor[J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116743.
- [31] 向宁, 王礼茂, 屈秋实, 等. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 745-755. [Xiang N, Wang L M, Qu Q S, et al. Comparison of emissions from offshore and on-shore wind power systems based on life cycle assessment[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 745-755.]
- [32] Ding N, Liu J R, Yang J X, et al. Comparative life cycle assessment of regional electricity supplies in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 119: 47-59.
- [33] Wei W D, Wang M, Zhang P F, et al. A 2015 inventory of embodied carbon emissions for Chinese power transmission infrastructure projects[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 318-318.
- [34] Wei W D, Li J S, Chen B, et al. Embodied greenhouse gas emissions from building China's large-scale power transmission infrastructure[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(8): 1-9.
- [35] Wei W D, Wu X D, Li J S, et al. Ultra-high voltage network induced energy cost and carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 276-292.
- [36] Zhang Y J, Liu T, Yao L, et al. Negligible carbon costs of UHVDC infrastructure delivering renewable electricity[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106940.
- [37] Lenzen M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories[J]. *Journal of Industry Ecology*, 2001, 4(4): 127-148.
- [38] Acquaye A, Feng K, Oppon E, et al. Measuring the environmental sustainability performance of global supply chains: A multi-regional input-output analysis for carbon, sulphur oxide and water footprints[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 187: 571-585.
- [39] Gustavsson L, Joelsson A, Sathre R. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(2): 230-242.
- [40] Su B, Huang H C, Ang B W, et al. Input-output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: The effects of sector aggregation[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 166-175.
- [41] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. [Zhang X C. Research on the Quantitative Analysis of Building Carbon Emissions and Assessment Methods for Low-Carbon Buildings and Structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.]
- [42] 黄跃群, 刘耀儒, 许文彬, 等. 水利水电工程全生命周期碳排放研究: 以犬木塘工程为例[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(8): 1366-1373. [Huang Y Q, Liu Y R, Xu W B, et al. Life cycle carbon emissions of water reservoir and hydroelectric projects: A case study of the Quanmutang project[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(8): 1366-1373.]
- [43] 拾杨. 我国首个“风光火储一体化”送电的特高压工程建设获核准[N]. *国家电网报*, 2023-03-03(01). [Shi Y. The Construction of China's First Ultra-High Voltage Project for Integrated Transmission of Wind, Solar, and Thermal Energy Has Been Approved[N]. *State Grid News*, 2023-03-03(01).]
- [44] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. [Cui P. The Establishment of a Life-Cycle Carbon Emission Factor Database for Buildings and Research[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.]

Method and application of carbon emission calculation for ultra-high voltage (UHV) project construction

CHEN Xiaohong^{1,2}, FU Yipeng¹, HUANG Chengdong¹, WANG Yangjie¹

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Advanced Interdisciplinary Studies, Hunan Technology and Business University, Changsha 410205, China)

Abstract: [Objective] As one of the seven key areas of “new infrastructure” development during China’s 14th Five-Year Plan period, the ultra-high voltage (UHV) projects are the backbone of China’s new power system and is of great significance to the transmission of clean energy. This study constructed a theoretical and methodological system suitable for the carbon emission measurement of UHV project construction in China, in order to clarify the carbon cost of project construction and assist project carbon management and the construction of new power systems under China’s “dual carbon” goals. [Methods] Based on the life cycle assessment method, this study broke through the cost list-based measurement system and for the first time constructed the carbon source emission inventory system for UHV project construction from the perspective of carbon footprint. On this basis, a grouping calculation method for project construction carbon emissions was proposed, which enhances the applicability and accuracy of the method. The calculation and carbon emission reduction potential evaluation of the ± 800 kV UHVDC transmission project from Longdong to Shandong were conducted as an example. [Results] The results show that: (1) The method constructed in this article simplifies the calculation work to a certain extent, ensuring a relatively scientific and effective calculation of carbon emissions in the construction of ultra large transmission projects; (2) The overall carbon emissions in the construction phase are 3.367×10^6 tCO₂e, with the main source of carbon emissions coming from non-traceable projects, accounting for 67.140% of the total; (3) The carbon emissions of unit investment are 1.667 tCO₂e/10000 yuan, and the unit carbon emissions level of the large-scale super project in the power sector has not been improved. [Conclusion] The results verify the applicability of the carbon emission calculation method for UHV project construction formed in this study. The method provides a theoretical support for establishing carbon cost budgets for UHV projects in China, improving carbon emission management capabilities during the project construction phase, and assisting project carbon emission reductions. The study also revealed that fully utilizing the existing power grid foundation to plan project site selection and construction, innovating construction technology, introducing green materials, and application of digital technology in project construction management are highly promising paths of carbon emission reduction.

Key words: new power system; UHV project; project construction; life cycle analysis; carbon emissions; carbon footprint