第 51 卷 第 6 期：2610-2619 高电压技术 Vol.51, No.6: 2610-2619
2025 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241613

基于生命周期评估框架的绝缘油碳足迹核算：方法与实践

廖正海[1]，杨怀伟[2]，郑树海[2]，赵　军[1]，干喆渊[1]，张建功[1]
（1. 中国电力科学研究院有限公司电网环境保护全国重点实验室，武汉 430074；
2. 国家电网有限公司特高压建设分公司，北京 100053）

摘　要：碳足迹核算是制定产品碳减排策略的关键工具。文中构建了基于生命周期评估框架的绝缘油产品碳足迹核算模型，通过算例比较了天然酯绝缘油与矿物绝缘油的碳排放规律。研究发现，燃烧处置下，天然酯绝缘油的全生命周期碳排放量为 2 874.90 kg CO_2e，得益于天然酯绝缘油原料作物的固碳作用，其原辅料投入阶段排放量为−1 582.69 kg CO_2e，表现为碳吸收，矿物绝缘油的全生命周期碳排放量为 3 918.06 kg CO_2e。与燃烧处置方式相比，再生处置方式显著减少了绝缘油的全生命周期碳排放，天然酯绝缘油和矿物绝缘油碳减排了 4 085.47 kg CO_2e 和 3 068.28 kg CO_2e，并使天然酯绝缘油展现出独特的净负碳排放特性，其全生命周期碳排放量低至−1 210.57 kg CO_2e，这是因为绝缘油原材料固存的碳在燃烧后释放回大气，总碳排放为原料固存碳与资源投入碳之和，而再生处置则将原材料固存的碳绝大部分存储在再生绝缘油中，总碳排放为资源投入碳与原料固存碳之差，形成了碳结余。

关键词：碳足迹核算；绝缘油；全生命周期；不确定度分析；敏感度分析

Carbon Footprint Accounting for Insulation Oils Based on Life-cycle Assessment Framework: Strategy and Practice

LIAO Zhenghai[1], YANG Huaiwei[2], ZHENG Shuhai[2], ZHAO Jun[1], GAN Zheyuan[1], ZHANG Jiangong[1]
(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
2. State Grid UHV Project Construction Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: Carbon footprint accounting is a key tool for formulating product carbon reduction strategies. We constructed a carbon footprint accounting model for insulating oil products based on the life-cycle assessment (LCA) framework. Through case studies, the carbon emission patterns of natural ester insulating oil and mineral insulating oil were compared. The study reveals that, under combustion disposal, the total carbon emissions of natural ester insulating oil is 2 874.90 kg CO_2e. Benefiting from the carbon sequestration effect of the raw material crops of natural ester insulating oil, the emissions in the raw material input stage is −1 582.69 kg CO_2e, showing carbon absorption. In contrast, the total carbon emissions of mineral insulating oil is 3 918.06 kg CO_2e. Moreover, compared with combustion disposal, regeneration disposal significantly reduces the total life cycle carbon emissions of insulating oil. Natural ester insulating oil and mineral insulating oil achieve carbon reductions of 4 085.47 kg CO_2e and 3 068.28 kg CO_2e, respectively. This results in a unique characteristic of net-negative carbon emissions for natural ester insulating oil, with its total carbon emissions reaching as low as −1 210.57 kg CO_2e, and the reason is that the carbon sequestered in the raw materials of insulating oil is released back into the atmosphere after combustion. The total carbon emissions are the sum of the sequestered carbon from raw materials and the carbon from resource inputs. In contrast, regeneration retains most of the sequestered carbon from the raw materials within the regenerated insulating oil. The total carbon emissions are the difference between the carbon from resource inputs and the sequestered carbon from raw materials, resulting in a carbon surplus.

Key words: carbon footprint accounting; insulating oil; full life-cycle; uncertainty analysis; sensitivity analysis

基金资助项目：国家自然科学基金(52177010)；中国电力科学研究院研究开发项目(GY83-22-011)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177010), Research and Development Project of China Electric Power Research Institute (GY83-22-011).

0 引言

随着工业化进程的加速，资源浪费与生态破坏问题日益严峻，践行双碳目标已成为各行业推动绿色低碳发展的议题[1-2]。产品碳足迹核算是企业迈向低碳未来的首要任务，它如同“摸清家底”，为企业制定有效的可持续发展战略与碳减排措施奠定坚实基准[3-4]。具体而言，产品碳足迹核算涉及评估产品在其整个生命周期内，于特定边界内直接或间接向大气排放及从大气中清除的温室气体总量，并统一以二氧化碳当量(CO_2e)为单位进行计算[5-6]。

当前，电力产品领域的碳足迹核算工作主要聚焦于电缆、变压器等成套设备[7-11]，然而，针对这些设备所依赖的上游原材料(如铜、铝、绝缘材料等)的碳足迹核算却显得相对薄弱。设备整体碳足迹的精确评估高度依赖于上游原材料背景数据的准确性和完整性，而实际操作中，常依赖于如 Ecoinvent 等国际数据库或其他数据源作为核算基础，这种做法在一定程度上增加了评估结果的不确定性[12-13]。因此，通过细化核算的颗粒度，即深入至每个关键部件层面，进行独立且详尽的碳足迹分析，可以确保每个部件的碳排放都得到精确且一致的评价，从而提升电力设备整体碳足迹核算的准确性与可靠性。

绝缘油作为变压器、油断路器及充油电缆等核心电力设备的关键绝缘材料，其生命周期内的碳排放对设备整体碳足迹有显著贡献[14]。因此，亟需建立覆盖绝缘油产品从摇篮到坟墓全生命周期的碳排放核算体系，为制定有效的减排策略、优化生产工艺及选用更环保的材料提供坚实的数据基础，从而引领整个行业向低碳、环保、可持续的发展路径迈进。本文基于生命周期评估框架，针对绝缘油产品的独特性和应用特点，界定产品系统边界，确立功能单位与取舍准则，构建了涵盖绝缘油原材料获取、产品加工生产、产品分销存储、产品使用与处置四个阶段的碳足迹计算模型。通过实际案例研究，深入分析各生命周期阶段的碳排放量、占比及其驱动因素，进而提出针对性的碳减排优化策略与建议。

1 绝缘油全生命周期碳足迹评估框架

1.1 评估流程

遵循 ISO 14067 和 ISO 14040 标准，全生命周期框架下绝缘油产品的碳足迹评估流程可概括为 4 大关键步骤[15-16]：目标界定与范围划定、全生命周期清单编制、环境影响评估、以及结果阐释与应用。如图 1 所示为绝缘油产品碳足迹评估流程。

1.2 目标与范围界定

目标与范围界定的核心在于准确确立研究的总体目标，精确划定碳足迹核算系统的边界，明确数据收集的来源与功能单位。

1.2.1 系统边界

系统边界的界定是绝缘油产品碳足迹核算的关键点，它界定了研究需涵盖的具体单元过程。对于直接投入电力设备使用的绝缘油产品，采用全生命周期方式(从摇篮到坟墓)界定系统边界更为全面和准确，即涵盖从原辅材料投入、生产制造、分销存储、使用与处置的所有单元过程[17]。而对于作为中间产品使用的绝缘油，部分生命周期方式(从摇篮到大门，涵盖原辅材料投入和生产制造两个阶段)则更为适用，根据具体应用场景灵活选择边界，以聚焦于关键环节的碳足迹分析。

1.2.2 功能单位

绝缘油产品功能体现为对电气设备的绝缘、散热、灭弧等方面的能力，以保障电气设备安全、稳定、高效运行。依据《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(GB/T 24040—2008)的指导原则，绝缘油产品功能单位可设定为在特定电压等级下，使单位面积电气设备的绝缘、散热和灭弧性能维持规定时长所需的绝缘油用量，以吨为计。

1.2.3 取舍准则

为了减少碳足迹核算过程中因程序复杂性增

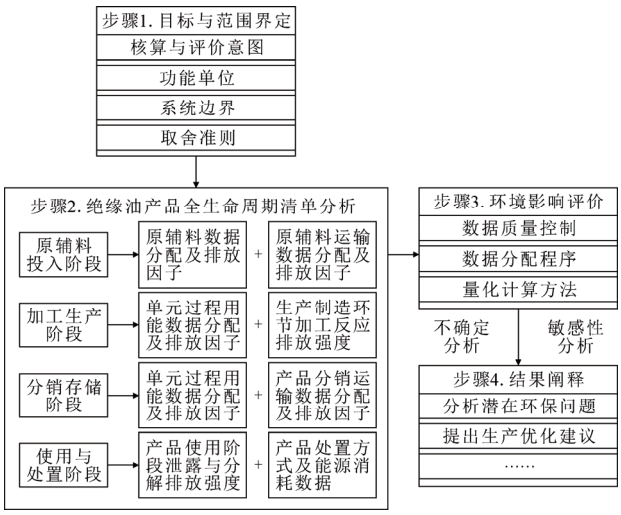


图 1 绝缘油产品碳足迹评估流程

Fig.1 Flowchart of the carbon footprint assessment of insulating oil products

加而导致的资源浪费和效率下降，本文依据 PAS 2050 标准，制定了以下取舍准则：若某一环节的碳排放估测值占比不超过单元过程总碳排放估测值的1%时，则该环节可视为微量排放并予以合理忽略，但所有忽略项总和不超过单元过程总碳排放估测值的 5%，以确保核算结果的准确性不受显著影响。

1.3 生命周期清单分析

生命周期清单详尽记录绝缘油产品生命周期各单元过程所消耗的输入资源与产生的排放输出数据。生命周期清单数据分配遵循 ISO 14067 标准要求的最小化分配、物理关联优先规则[15]。根据生命周期各单元过程的物质流和能量流，建立如图 2 所示的绝缘油产品生命周期排放清单。

1.4 环境影响评价与结果阐释

环境影响评价采用全球变暖潜势(GWP)作为衡量气体对温室效应影响的关键指标，GWP 值越高，表示该气体在相同质量和时间范围内对温室效应的贡献越大。此外，结果阐释则通过碳足迹精准量化，结合敏感性分析和不确定分析，识别并分析绝缘油产品生产过程中潜在的节能环保改进环节。

2 绝缘油碳足迹核算方法

2.1 全生命周期框架下绝缘油碳足迹

绝缘油产品的全生命周期碳足迹通过式(1)进行核算。

$$E_{\mathrm{f}} = E_{\mathrm{m}} + E_{\mathrm{p}} + E_{\mathrm{d}} + E_{\mathrm{c}} \tag{1}$$

式中：E_{f} 为全生命周期碳足迹，kg CO_2e；E_{m} 为原辅料碳足迹，kg CO_2e；E_{p} 为加工生产碳足迹，kg CO_2e；E_{d} 为分销存储碳足迹，kg CO_2e；E_{c} 为使用与处置碳足迹，kg CO_2e。

2.2 原辅料碳足迹

原辅料碳足迹是指原油(或生物油料)、抗氧化剂等添加剂辅料投入绝缘油生产所产生的净碳排放，包括原辅料取得碳足迹和原辅料运输碳足迹两部分。其中，原辅料取得碳足迹是指原辅料开采和生产期间产生的净碳排放量，原辅料运输碳足迹则是指原辅料从生产商运输至绝缘油生产线期间产生的净碳排放量[18]。原辅料碳足迹核算如式(2)所示。

$$E_{\mathrm{m}} = E_{\mathrm{m,ac}} + E_{\mathrm{m,tr}} \tag{2}$$

式中：$E_{\mathrm{m,ac}}$ 为原辅料取得碳足迹，kg CO_2e；$E_{\mathrm{m,tr}}$ 为原辅料运输碳足迹，kg CO_2e。

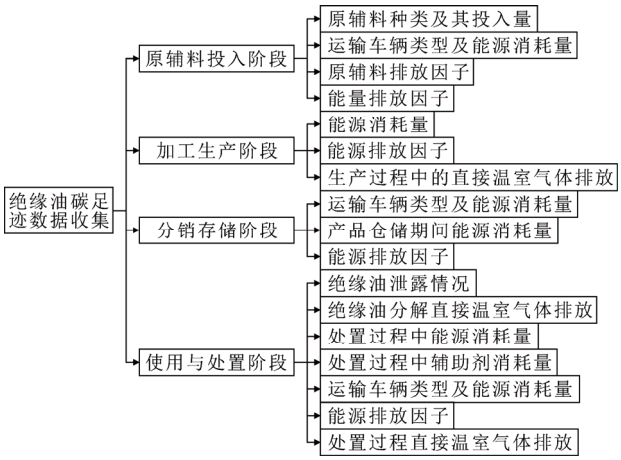


图 2 碳足迹数据收集清单

Fig.2 Carbon footprint data collection inventory

2.2.1 原辅料取得碳足迹

对于原辅料取得碳足迹可采用如式(3)所示的排放因子法进行核算[19]。

$$E_{\mathrm{m,ac}} = \sum_i \left(W_{\mathrm{m},i} F_{\mathrm{m},i} \right) \tag{3}$$

式中：$W_{\mathrm{m},i}$ 为第 i 种原辅料的消耗量，kg；$F_{\mathrm{m},i}$ 为第 i 种原辅料的排放因子。

绝缘油主要有矿物和天然酯两类[20]。其中，矿物绝缘油由原油经分馏、炼制等工艺精制而成；天然酯绝缘油则是由植物油料(如菜籽、大豆等)经压榨、提取及改性技术加工获得。因此，在原辅料排放因子选取时，对于植物油料，应考虑油料生产过程中机械设备耗能、种子化肥和农药生产排放、施用化肥和农药排放、作物秸秆处理排放、油料作物生长期间吸收、土壤固碳、油料运输加工排放以及油料仓储排放等[21]。对于原油、化工原料，应考虑原油开采耗能、开采期间废气燃烧排放、石油化工产品炼制排放、运输与仓储排放等。

2.2.2 原辅料运输碳足迹

考虑当前物流运输情况，绝缘油产品的原辅料主要依靠燃油货车和新能源(电动)货车。两者碳足迹核算方法存在差异，对于燃料动力的燃油货车通常采用如式(4)所示的碳质量平衡法进行核算；对于新能源(电动)货车则采用如式(5)所示的排放因子法进行核算。

$$E_{\mathrm{m,tr}} = \sum_i \left(M_{\mathrm{tr},i} L_{\mathrm{tr},i} C_{\mathrm{tr},i} R_{\mathrm{tr},i} \rho_{\mathrm{tr},i} Y_{\mathrm{tr},i} \omega_{\mathrm{tr},i} \alpha \right) \tag{4}$$

式中：$M_{\mathrm{tr},i}$ 为第 i 种原辅料的运输里程，km；$L_{\mathrm{tr},i}$ 为第 i 种原辅料运输货车所用燃料的平均低位热值，

GJ/t；$C_{\mathrm{tr},i}$ 为燃料的单位热值含碳量，kg/GJ；$R_{\mathrm{tr},i}$ 为燃料的碳氧化率；$\rho_{\mathrm{tr},i}$ 为燃料密度，kg/m^3；$Y_{\mathrm{tr},i}$ 为第 i 种原辅料运输货车的每千米油耗，可通过查读燃油货车自带的计量器具获得，L/km；$\omega_{\mathrm{tr},i}$ 为货车载上第 i 种原辅料的比重，%；α 为碳转化系数，$\alpha = 44/12$。

$$E_{\mathrm{m,tr}} = \sum_i \left(M_{\mathrm{tr},i} F_{\mathrm{elec}} D_{\mathrm{tr},i} \omega_{\mathrm{tr},i} \right) \tag{5}$$

式中：F_{elec} 为电力排放因子；$D_{\mathrm{tr},i}$ 为第 i 种原辅料运输货车每公里的电耗，kWh/km。

2.3 加工生产碳足迹

加工生产碳足迹是指生产功能单位绝缘油产品所产生的净碳排放，如式(6)所示，包括生产制造期间能源投入碳足迹和加工过程碳足迹两部分。

$$E_{\mathrm{p}} = E_{\mathrm{p,en}} + E_{\mathrm{p,re}} \tag{6}$$

式中：$E_{\mathrm{p,en}}$ 为生产期间能源投入碳足迹，kg CO_2e；$E_{\mathrm{p,re}}$ 为加工过程碳足迹，kg CO_2e。

2.3.1 能源投入碳足迹

生产期间能源投入碳足迹是指绝缘油产品生产过程消耗燃料和电力等能源所产生的净碳排放，其值等于燃料投入碳足迹 $E_{\mathrm{en,fuel}}$ 与电力投入碳足迹 $E_{\mathrm{en,elec}}$ 之和。

燃料燃烧直接碳排放与外购电力间接碳排放分别按式(7)和式(8)计算。

$$E_{\mathrm{en,fuel}} = \sum_j \left(W_{\mathrm{p},j} L_{\mathrm{p},j} C_{\mathrm{p},j} R_{\mathrm{p},j} \alpha \right) \tag{7}$$

$$E_{\mathrm{en,elec}} = P_{\mathrm{en}} F_{\mathrm{elec}} \tag{8}$$

式中：$W_{\mathrm{p},j}$ 为第 j 种燃料的消耗量，t(或 Nm^3，Nm^3 为标准立方米)；$L_{\mathrm{p},j}$ 为燃料的平均低位热值，GJ/t(或 GJ/Nm^3)；$C_{\mathrm{p},j}$ 为燃料的单位热值含碳量，kg/GJ；$R_{\mathrm{p},j}$ 为燃料的碳氧化率；P_{en} 为生产加工期间消耗的电量，kWh。

2.3.2 加工过程碳足迹

加工过程碳足迹是指绝缘油加工期间因除杂精炼、脱气脱水脱臭等过程排放温室气体所产生的碳足迹[22]。如图 3 所示为天然酯绝缘油的生产流程。

由于加工阶段各单元过程活动数据无法直接获得，因此，采用实测法，通过污染物排放监控设备(如二氧化碳排放连续监测系统 CEMS)测量排放加工过程废气排放量，来间接核算碳足迹[19]。

根据污染物排放自动监控设备测得的废气流量、成分等相关参数，再利用式(9)即可计算加工过程碳足迹。

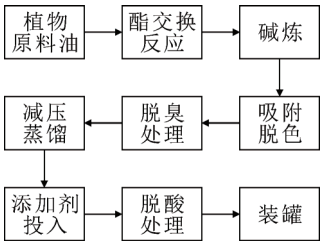


图 3 天然酯绝缘油生产流程

Fig.3 Production process of natural ester insulating oil

$$E_{\mathrm{p,re}} = \sum_q \left(Q_{\mathrm{re}} \rho_{\mathrm{re}} t_{\mathrm{re}} \eta_{\mathrm{re},q} G_{\mathrm{re},q} \right) \tag{9}$$

式中：Q_{re} 为加工过程废气排放流量，Nm^3/h；ρ_{re} 为废气密度，kg/m^3；t_{re} 为废气排放时长，h；$\eta_{\mathrm{re},q}$ 为废气中第 q 种温室气体的体积分数；$G_{\mathrm{re},q}$ 为温室气体的百年时间尺度全球增温潜势值。

2.4 分销存储碳足迹

分销存储碳足迹 E_{d} 是指从绝缘油产品下线到投入电力设备期间所产生的净碳排放量，包括分销运输碳足迹和仓储耗能碳足迹。其中，分销运输碳足迹是指绝缘油产品从生产线运输至注入电力设备期间产生的净碳排放，运输所采用的燃油货车或新能源(电动)货车的碳足迹可参考式(4)和式(5)计算；仓储耗能碳足迹则是指绝缘油产品从生产线至电力设备装配现场期间各环节仓储以及绝缘油产品注入电力设备期间消耗能源产生的净碳排放，绝缘油产品仓储期间消耗的能源主要为外购电力，因此可参考式(8)计算其碳足迹。

2.5 使用与处置碳足迹

使用与处置碳足迹是指绝缘油产品投入电力设备至焚烧或再生处理期间向大气直接排放温室气体所产生的等效碳排放，包括产品使用碳足迹、处置耗能碳足迹、处置运输碳足迹和处置排放碳足迹。使用与处置碳足迹按式(10)计算。

$$E_{\mathrm{c}} = E_{\mathrm{c,use}} + E_{\mathrm{c,en}} + E_{\mathrm{c,tr}} + E_{\mathrm{c,ex}} \tag{10}$$

式中：$E_{\mathrm{c,use}}$ 为产品使用碳足迹，kg CO_2e；$E_{\mathrm{c,en}}$ 为处置耗能碳足迹，kg CO_2e；$E_{\mathrm{c,tr}}$ 为处置运输碳足迹，kg CO_2e；$E_{\mathrm{c,ex}}$ 为处置排放碳足迹，kg CO_2e。

2.5.1 产品使用碳足迹

产品使用碳足迹是指绝缘油产品使用期间因泄露和分解等因素所直接导致的温室气体排放[23]。在电力设备正常运行或轻微异常状态下，绝缘油可能会分解产生温室气体，但通常这些气体的体积分数往往极低，维持在 10^{-6} 的范围内[24,25]。基于 PAS

2050 标准的指导原则及本文建立的取舍准则，此时，由绝缘油分解引起的温室气体排放通常可忽略不计，无需纳入核算范围。

当电力设备遭遇较强故障时，绝缘油分解反应显著增强，产生的温室气体量将不再处于可忽略不计的范畴，此时产品使用碳足迹按式(11)进行计算。

$$E_{\mathrm{c,use}}=\sum_{q}\left(X_{\mathrm{use}}\rho_{\mathrm{use},q}\eta_{\mathrm{use},q}G_{\mathrm{use},q}\right) \tag{11}$$

式中：X_{use}为绝缘油分解排放的废气量，$\mathrm{Nm^3}$；$\rho_{\mathrm{use},q}$为绝缘油分解排放的废气中第q种温室气体的密度，$\mathrm{kg/m^3}$；$\eta_{\mathrm{use},q}$为第q种温室气体的体积分数；$G_{\mathrm{use},q}$为温室气体的百年时间尺度全球增温潜势值。

然而，电力设备遭遇严重故障时，绝缘油会因高温电弧而燃烧，并将其材料固存碳彻底释放至空气中，此时，产品使用碳足迹按式(12)进行计算。

$$E_{\mathrm{c,use}}=W_{\mathrm{des}}F_{\mathrm{m}} \tag{12}$$

式中：W_{des}为绝缘油焚烧量，kg；F_{m}为原辅材料对应的生命周期温室气体(CO_2e)排放因子(只包含废弃、焚烧等最终处置，不包含材料的再制造过程)。

2.5.2 处置耗能与运输碳足迹

处置耗能碳足迹是指绝缘油产品从电力设备抽出至最终处置期间各环节消耗能源所产生的碳足迹，其碳排放计算方法参考式(7)和式(8)。

处置运输碳足迹则是指绝缘油产品从电力设备抽出至最终处置期间各环节运输产生的碳足迹，运输所采用的燃油货车或新能源(电动)货车的碳足迹参考式(4)和式(5)计算。

2.5.3 处置排放碳足迹

处置排放碳足迹是指通过再生处理或焚烧等方式处置绝缘油产品所产生的净碳排放。

当采用再生处理方式最终处置绝缘油产品时，则首先需采用油泵将绝缘油从电力设备中抽取出来，燃后运送至专门的再生工厂进行处置，通过化学与物理方法清除油品中有害化学成分处理使其性能恢复或接近原始值[26-27]。再生处置期间存在运输、再生添加剂与电力能源投入产生的间接碳排放，以及再生处置过程产生的直接碳排放。再生处置排放碳足迹可按式(13)计算。

$$E_{\mathrm{c,ex}}=\sum_{x}\left(W_{\mathrm{ad},x}F_{\mathrm{ad},x}\right)+\sum_{y}\left(Q_{\mathrm{rse}}\rho_{\mathrm{rse}}t_{\mathrm{rse}}\eta_{\mathrm{rse},y}G_{\mathrm{rse},y}\right) \tag{13}$$

式中：$W_{\mathrm{ad},x}$为绝缘油再生处理使用的第x种再生添加剂的量，kg；$F_{\mathrm{ad},x}$为再生添加剂的排放因子；Q_{rse}为再生处理废气排放体积流量，$\mathrm{Nm^3/h}$；ρ_{rse}为废气密度，$\mathrm{kg/m^3}$；t_{rse}为再生处理时长，h；$\eta_{\mathrm{rse},y}$为再生处理排放的废气中第y种温室气体体积分数；$G_{\mathrm{rse},y}$温室气体的百年时间尺度全球增温潜势值。

当采用焚烧处理方式最终处置绝缘油产品时，绝缘油产生的直接碳排放计算方式与绝缘油因高温电弧导致燃烧一致。

3 实例及分析

3.1 基础数据收集

本文基于全生命周期方式系统边界对某企业生产的天然酯绝缘油和矿物绝缘油进行碳足迹核算。核算中排放因子和燃料热值等背景数据来源于中国生命周期基础数据库(CLCD)、Ecoinvent 数据库、标准指南、国内外文献等渠道，原辅料清单明细、各单元过程生产数据等现场数据来源于企业生产报告报表。

3.2 碳足迹核算

3.2.1 原辅料碳足迹核算

该公司生产的天然酯绝缘油由菜籽油添加1.7%质量分数的 BHT 抗氧化剂、金属钝化剂等辅料炼制而成。而矿物绝缘油则由原油添加0.3%~0.5%质量分数的 T501 抗氧化剂等辅料炼制而成。鉴于辅料的添加量极少，且其预估的碳足排放量远低于 1%，根据数据的取舍准则，这些辅料的取得碳足迹在核算时忽略不计。在原料取得碳足迹的核算过程中，对于菜籽油，不仅考虑了油菜籽种植过程中的碳吸收，还考虑了种植与收割阶段的碳排放，综合得出菜籽油的排放因子为−1 621.31 kg CO_2e/t[28]。而对于矿物绝缘油所使用的原油，其排放因子则取 509.81 $kgCO_2e/t$。

运输工具选用以柴油为动力的油罐车和货车，相关数据来源于企业的生产报表，如表 1 所示。核算期间所采用的柴油，柴油的平均低位热值取 42.652 GJ/t，单位热值含碳量取 20.2 kgC/GJ，碳氧化率取 0.98。

根据式(2)—式(5)，计算出原辅料投入阶段天然酯绝缘油和矿物绝缘油的碳排放量分别为−1 582.69 $kgCO_2e$ 和 530.32 $kgCO_2e$。

3.2.2 加工生产碳足迹核算

生产 1 t 天然酯绝缘油平均需消耗 23 方天然气和 85 度电，而生产 1 t 矿物绝缘油则需消耗 20 方天然气和 70 度电。生产过程中废气排放情况由企业自行安装的 CEMS 系统测得。根据式(6)—式(9)，计

表 1 原辅料运输数据清单(以功能单位绝缘油计)

Table 1 Raw materials transportation data list (in functional unit insulation oil)

类型	原辅料名称	用量/kg	运输方式	运输里程/km	油耗/(L·(100 km)$^{-1}$)
天然酯绝缘油	菜籽油	983.0	20 吨油罐车	280	28.7
	抗氧化剂	7.5	8 吨货车	570	17.1
	金属钝化剂	6.0	8 吨货车	1070	18.4
	其他添加剂	3.5	8 吨货车	820	17.9
矿物绝缘油	原油	997.0	20 吨油罐车	620	27.3
	抗氧化剂	3.0	8 吨货车	570	18.2

算出天然酯绝缘油和矿物绝缘油在生产制造阶段的碳排放量分别为 239.55 kg CO_2e 和 186.89 kg CO_2e。

3.2.3 分销存储碳足迹核算

该公司产品主要销往特变电工、正泰等变压器生产产家。根据公司销售情况，绝缘油采用中型油罐车从生产企业运输至电力设备装配现场。假设分销运输里程总和为 1 000 km，存储期间消耗的电量为 50 kWh。根据式(4)和式(8)，计算出绝缘油分销存储此期间产生的碳排放量为 57.37 kg CO_2e。

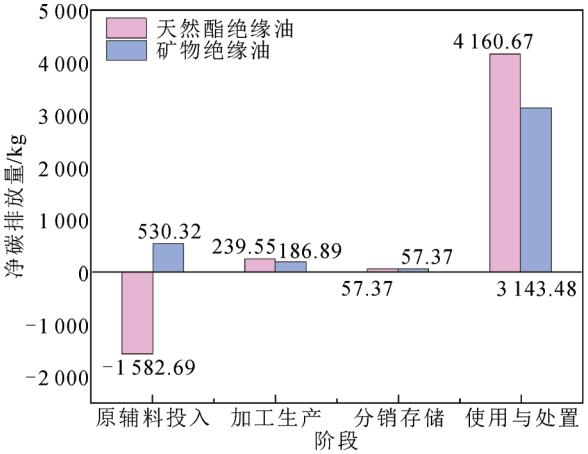
3.2.4 使用与处置碳足迹核算

在实际使用过程中，由于电力设备处于正常运行状态，绝缘油产生的碳排放可忽略不计。然而，绝缘油燃烧处置或者当电力设备遭受严重故障时，天然酯绝缘油和矿物绝缘油燃烧殆尽产生的碳排放量分别为 4 160.67 kg CO_2e 和 3 143.48 kg CO_2e。核算中绝缘油的原材料菜籽油和原油的从产品至燃烧处置的排放因子分别取 4 141.17 kg CO_2e/t 和 3 123.98 kg CO_2e/t。

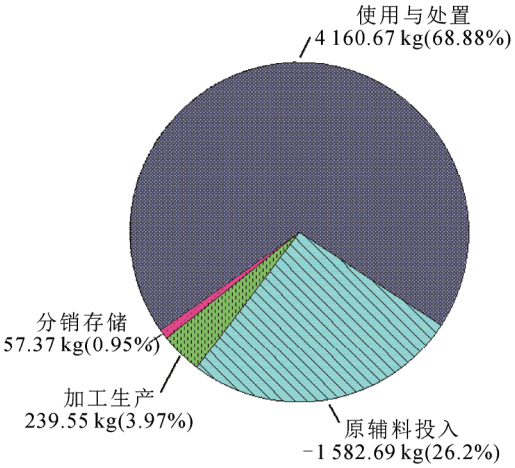
3.2.5 绝缘油碳足迹核算结果阐释

结合绝缘油碳排放清单和碳足迹核算结果，对天然酯绝缘油与矿物绝缘油在原辅料投入、加工生产、分销存储和使用与处置阶段的碳排放进行比较，得到燃烧处置方式下绝缘油全生命周期碳排放分布如图 4 所示。

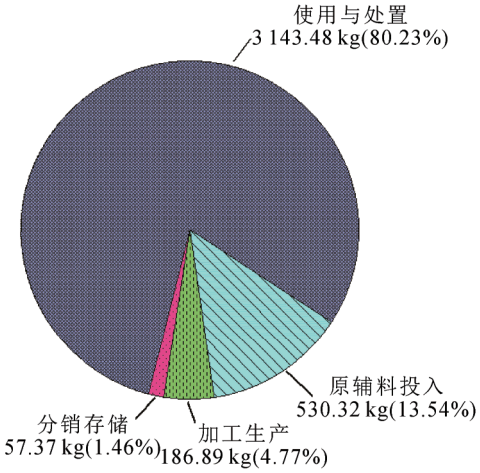
由图 4 可见，燃烧处置方式下，天然酯绝缘油在全生命周期内的碳总排放量为 2 874.90 kg CO_2e，得益于油料作物生长过程中的固碳作用，其原辅料投入阶段呈负碳排放，碳排放量为−1 582.69 kg CO_2e，而在使用与处置阶段，原辅料中固存的碳被彻底释放至大气中，使得碳排放增至 4 160.67 kg CO_2e。相比之下，矿物绝缘油全生命周期碳总排放量为 3 918.06 kg CO_2e，其中，原辅料投入和使用与处置



(a) 天然酯绝缘油和矿物绝缘油碳各阶段碳排放量



(b) 天然酯绝缘油各阶段汤排放占比



(c) 矿物绝缘油各阶段碳排放占比

图 4 燃烧处置方式下绝缘油碳足迹分析

Fig.4 Carbon footprint analysis of insulating oil under combustion disposal scenario

阶段分别占比 13.54%和 80.23%。结果表明，天然酯绝缘油在碳减排上显著优于矿物绝缘油，每吨可减少 1 043.16 kg CO_2e 排放。因此，在满足设备性

能需求的前提下，推荐优先选用天然酯绝缘油作为其绝缘介质，并结合低碳生产技术、优化燃烧效率以及推广再生利用或环保处置方法，以有效减少全生命周期碳排放，推进绝缘油绿色环保策略。

当采用再生方式对绝缘油进行回收处置时，每进行再生处理 1 吨绝缘油需要投入约 2.5 kg 抗氧化剂、1 kg 抗乳化剂、0.5 kg 抗静电剂及其他少剂量添加剂，根据数据的取舍准则，这些添加剂的碳足迹在核算时可忽略不计。处置期间，污染物排放水平由气体连续监测系统实测获得，根据企业自行测算，再生处置 1 吨绝缘油产品产生的碳排放量约 75.20 kg CO_2e。表 2 为采用再生处置方式下天然酯绝缘油和矿物绝缘油的生命周期过程排放结果。

根据表 2 的数据分析，当采用再生处理技术处置绝缘油时，天然酯绝缘油和矿物绝缘油在全生命周期内的总碳排放量分别为−1 210.57 kg CO_2e 和 849.78 kg CO_2e。与燃烧处置方式相比，再生处置方式显著减少了绝缘油的全生命周期碳排放，具体表现为天然酯绝缘油减少了 4 085.47 kg CO_2e，而矿物绝缘油则减少了 3 068.28 kg CO_2e。这是因为燃烧处置方式下，原料存储的碳经过燃烧殆尽后，又排放回大气中，形成了原料碳的投入产出循环，此状态下，在绝缘油生命周期其他单元过程投入资源所产生的碳排放，均被视为正向碳投入，总碳排放量等于原料中固存的碳与资源投入所产生的碳之和，绝缘油系统整体的碳排放量增加。然而，在再生处置方式下，绝缘油中的绝大部分原料固存碳会被保留在再生绝缘油中，此时系统的碳排放量表现为资源投入所产生的碳与原料中固存碳之差，绝缘油系统的碳排放量减少，甚至还能实现碳产出。具体来说，对于矿物绝缘油而言，虽然仍表现为碳排放，但排放量已大大降低；而对于天然酯绝缘油，则出现了碳吸收的现象，形成了碳产出。如图 5 所示为绝缘油燃烧和再生处置的碳投入产出循环路径。

对表 2 进一步观察发现，对于矿物绝缘油而言，其全生命周期碳排放的构成发生了显著变化：原辅料投入阶段的碳排放占比上升至 62.41%，成为主要贡献者，而使用与处置阶段的碳排放占比则大幅下降至 8.85%。结果表明，再生处置技术对于促进绝缘油在全生命周期内的环保发展具有极为显著和积极的推动作用。

表 2 再生处置方式下绝缘油生命周期过程碳排放结果

Table 2 Emission results of insulating oil in the recycling disposal model

阶段	碳排放量(CO_2e)/kg	
	天然酯绝缘油	矿物绝缘油
原辅料投入	−1 582.69	530.32
加工生产	239.55	186.89
分销存储	57.37	57.37
使用与处置	75.20	75.20
合计	−1 210.57	849.78

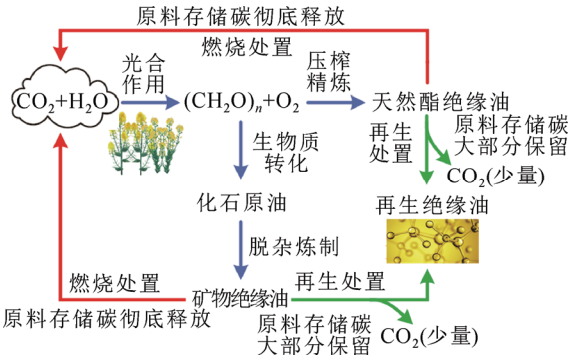


图 5 绝缘油燃烧和再生处置的碳投入产出循环路径

Fig.5 Carbon cycle pathways for combustion disposal and regeneration disposal of insulating oil

3.2.6 不确定度分析

不确定度分析旨在评估因数据的估计误差或无法预期的变动对碳足迹核算结果所产生的影响[29-30]。本文采用了一种基于数据质量指标(DQI)和蒙特卡洛模拟的不确定度分析方法。首先，从统计代表性、时间代表性、数据来源、地理代表性、技术代表性等方面对数据进行 0 至 5 的评分，构建 DQI 评分矩阵。然后，利用式(14)计算向量元素的期望值在质量指标范围中所占的百分比，实现数据质量指标值分配[31]。DQI 值越接近 5，表明数据的不确定性越低，数据质量越佳。

$$\beta=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}q_i-1}{4}\times100\% \tag{14}$$

式中：β 为向量元素的期望值在质量指标范围中所占的百分比；q_i 为评分矩阵中第 i 个元素的值，$1\le q_i\le5$；n 为评分矩阵中的元素总量。

最后，采用正态分布的蒙特卡洛模拟[32]，对单一活动水平数据取值范围的统计分布状态进行设置，并基于误差传递原理及单一排放源碳足迹评价方法，推导出不确定度计算式，如式(15)所示。而碳足迹整体不确定度则是由单个碳排放源的碳排放

量及不确定度相叠加，如式(16)所示。

$$U_i=\sqrt{U_{\mathrm{a},i}^2+U_{\mathrm{f},i}^2} \tag{15}$$

式中：U_i为碳排放源i的碳排放结果的不确定度；$U_{\mathrm{a},i}$为碳排放源i活动水平数据的不确定度；$U_{\mathrm{f},i}$为碳排放源i活动水平碳排放系数的不确定度。

$$U=\frac{\left(\sum(U_iS_i)\right)^2}{\left(\sum S_i\right)^2} \tag{16}$$

式中：U为碳足迹核算整体不确定度；S_i为碳排放源i的总排放量。

本文对绝缘油碳足迹评价中收集的数据进行分析，确定其DQI评分矩阵，获得矿物绝缘油因原料与能源消耗所产生的不确定度如表3所示。

从表3可以看出，矿物绝缘油碳足迹核算的整体不确定度为4.38%，其中，原料碳排放系数是不确定度主要来源，其造成的单一排放结果不确定度为23.35%，而原料和能源消耗量造成的不确定度均小于1‰，这是因为碳排放系数取自数据库数据，原料与能源数据来自生产厂家。因此，为了降低碳足迹核算中的不确定度，建议采用更契合实际工况的数据库信息，并加强对生产过程中每一步骤的原料和能源消耗的跟踪与监控。

3.2.7 敏感度分析

敏感度分析是一种定量评估不确定因素变化对目标影响程度的方法，本文采用单因素敏感度分析法来研究绝缘油碳足迹的关键影响因素[33]。具体来说，首先，减少绝缘油生产过程中某个单元过程的活动数据的10%，比如减少运输过程中的燃油消耗、降低加工生产能源消耗或提高二氧化碳回收，然后计算总碳排放量的相应减少率，减少率计算值即为该因素的敏感度系数，如式(17)所示。敏感度系数越高，表明因素对最终评价结果影响越显著。

$$\gamma_i=\frac{\left|\left(E_{\mathrm{or}}-E_{\mathrm{sen},i}\right)/E_{\mathrm{or}}\right|}{10\%} \tag{17}$$

式中：γ_i为第i个活动数据的敏感度系数；E_{or}为实际活动数据下的绝缘油全生命周期碳足迹，kg CO_2e；$E_{\mathrm{sen},i}$为减小第i个活动数据10%后的绝缘油全生命周期碳足迹，kg CO_2e。

表4为矿物绝缘油全生命周期中主要单元过程变化对其碳足迹影响的敏感程度。

从表4可以看出，绝缘油碳足迹评价结果对加工生产阶段产生的碳排放最为敏感，当生产过程排放废气量减少10%时，其全生命周期碳足迹减少量达12.53 kg CO_2e，敏感度系数为0.147 5；当能源投入减少10%时，敏感度系数为0.072 4。这表明，在绝缘油的生产过程中，加工生产环节对碳排放的影响尤为显著。因此，为了有效降低碳排放，可以在生产过程中采用更先进的技术，例如使用清洁能源替代传统能源、实施二氧化碳的捕集和利用技术等。

表3 不确定度分析结果

Table 3 Results of the uncertainty analysis

项目	原料消耗量	原料排放系数	运输油耗	电力消耗	电力排放系数	天然气消耗量	天然气排放系数
统计代表性 q_1	4	3	2	3	5	5	5
时间代表性 q_2	5	5	5	5	5	4	5
数据来源 q_3	5	4	5	5	4	5	5
地理代表性 q_4	5	4	5	5	4	5	4
技术代表性 q_5	5	3	5	5	4	5	5
质量值百分数/%	95	70	85	90	85	95	95
数据质量指标	4.5	3.5	4	4.5	4	4.5	4.5
单个投入不确定度/%	1.99×10^{-6}	23.35	0.04	0.08	0.02	0.05	8.48×10^{-3}
单一排放结果不确定度/%	23.35	23.35	23.35	0.09	0.09	0.05	0.05
单一碳排放量/kgCO_2e	530.32	530.32	530.32	25.7	25.7	35.86	35.86
整体不确定度/%	4.38						

表4 敏感性分析结果

Table 4 Results of the sensitivity analysis

单元过程及活动数据	实际活动数据下的碳足迹/kg CO_2e	减小活动数据10%后的碳足迹/kg CO_2e	敏感度系数
1-原辅料阶段(运输油耗减少10%)	849.78	847.57	0.0259
2-加工生产阶段(能源投入减少10%)	849.78	843.62	0.0724
2-加工生产阶段(生产废气排放减少10%)	849.78	837.25	0.1475
3-分销存储阶段(能源投入减少10%)	849.78	847.94	0.0216
3-分销存储阶段(运输油耗减少10%)	849.78	845.88	0.0459
4-再生处置阶段(处置废气排放减少10%)	849.78	842.26	0.0884

4 结论

1）采取燃烧方式对绝缘油进行处置时，天然酯绝缘油全生命周期产生的净碳排放量为2 874.90 kg CO_2e，低于矿物绝缘油的3 918.06 kg CO_2e，且因其原料作物能吸收大气中的CO_2，使得在原辅料投入阶段呈现出独特的负净碳排放特性，因此，在

满足电力设备绝缘性能需求的前提下，推荐优先选择天然酯绝缘油作为其绝缘介质，但若必须选用矿物绝缘油，则应强化低碳生产技术、优化燃烧效率，从而精准实施绝缘油绿色环保策略。

2）当采用再生技术处置绝缘油时，天然酯绝缘油和矿物绝缘油在全生命周期内的总碳排放量分别为−1 210.57 kg CO_2e(表现为碳吸收)和 849.78 kg CO_2e。与燃烧处置方式相比，再生处置方式使天然酯绝缘油和矿物绝缘油分别减排了 4 085.47 kgCO_2e 和 3 068.28 kg CO_2e，而且生命周期碳排放结构变化显著，对于矿物绝缘油，原辅料投入碳排放占比由 13.54%上升至 62.41%，成为主导，而使用与处置碳排放占比则从 80.23%大幅下降至 8.85%，结果表明，推广再生利用或环保处置技术对绝缘油全生命周期环保发展具有显著推动作用。

3）矿物绝缘油碳足迹核算的整体不确定度为 4.38%，主要源于数据取自外部数据库的原料碳排放系数(单一排放结果不确定度达 23.35%)，而数据可从生产厂家获取的原料和能源消耗量的不确定度极低(<1‰)，因此，为了降低碳足迹核算中的数据不确定性，建议采用更契合实际工况的数据库信息，并加强对生产全程资源消耗的精确跟踪。

4）绝缘油碳足迹评价结果对加工生产阶段产生的碳排放最为敏感，生产废气减排 10%可导致绝缘油全生命周期碳足迹减少 12.53 kg CO_2e，敏感度系数为 0.1475，而当能源投入减少 10%时，碳排放减少 6.16 kg CO_2e，敏感度系数为 0.072 4，因此，优化生产环节、采用先进技术如清洁能源替代和碳捕集技术，是降低绝缘油碳排放的关键。

参考文献 References

[1] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[2] 周远翔，陈健宁，张 灵，等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.

[3] LIANG M X, LIU L Z, LIANG W G, et al. Intelligentization helps the green and energy-saving transformation of power industry-evidence from substation engineering in China[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 8698.

[4] 刘含笑，吴黎明，林青阳，等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J]. 化工进展，2023，42(5)：2201-2218.
LIU Hanxiao, WU Liming, LIN Qingyang, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(5): 2201-2218.

[5] WIEDMANN T, MINX J. A definition of ‘carbon footprint’[M]. New York, USA: Nova Science Publishers, 2008: 1-9.

[6] DING N, GUO P T, XI Y H, et al. Low-carbon development in power systems based on carbon emission analysis models: a comprehensive review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 65: 103774.

[7] 毕子健，刘泽其，许远超，等. 基于全生命周期评价的变压器碳足迹模型研究[J]. 环境技术，2023，41(2)：108-113.
BI Zijian, LIU Zeqi, XU Yuanchao, et al. Research on carbon footprint model of transformer based on life cycle assessment[J]. Environmental Technology, 2023, 41(2): 108-113.

[8] 胡永焕，陈之浩，洪芳华，等. 低碳化视域下电力电缆碳足迹评估方法研究[J]. 环境科学与管理，2024，49(4)：190-194.
HU Yonghuan, CHEN Zhihao, HONG Fanghua, et al. Carbon footprint assessment method of power cable from low carbonization perspective[J]. Environmental Science and Management, 2024, 49(4): 190-194.

[9] ZHANG Y F, ZHAN Y P, HUI B J, et al. Carbon footprint analysis of 220kV flame retardant XLPE insulated power cables[C]//2023 6th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy(CEEGE). Grimstad, Norway: IEEE, 2023: 275-280.

[10] CHEN X M, OU Y T. Carbon emission accounting for power transmission and transformation equipment: an extended life cycle approach[J]. Energy Reports, 2023, 10: 1369-1378.

[11] 上海添唯认证技术有限公司. 正泰电气股份有限公司高能效变压器产品碳足迹核查报告(2022 年度)[R]. 上海：上海添唯认证技术有限公司，2023.
TILVA. Carbon footprint assessment report of high-efficiency transformers products by Chint (2022)[R]. Shanghai, China: TILVA, 2023.

[12] ZHANG X B, GERADA D, XU Z Y, et al. A review of carbon emissions from electrical machine materials[J]. Electronics, 2024, 13(9): 1714.

[13] 高文芳，崔天傲，赵新宁，等. 锂离子电池全生命周期碳足迹评价研究进展[J]. 化工进展，2024，43(12)：6983-6994.
GAO Wenfang, CUI Tianao, ZHAO Xinning, et al. Critical review on life cycle carbon footprint assessment of lithium-ion battery[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(12): 6983-6994.

[14] LI C Y, YANG Y, XU G Q, et al. Insulating materials for realising carbon neutrality: opportunities, remaining issues and challenges[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 610-632.

[15] ISO. Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification: ISO 14067: 2018[S]. New York, USA: International Organization for Standardization, 2018.

[16] ISO. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework: ISO 14040: 2006[S]. New York, USA: International Organization for Standardization, 2006.

[17] MATTHEWS H S, HENDRICKSON C T, WEBER C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5839-5842.

[18] CHEN J, WANG W, SUN W Y, et al. Tapping into the potential CO2 emission reduction of a crude oil transportation system from carbon footprint perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 413: 137409.

[19] 涂倩倩，沈鹏飞，刘鸣燕，等. 城镇污水处理厂碳排放核算方法及特征[J]. 净水技术，2024，43(6)：52-62.

TU Qianqian, SHEN Pengfei, LIU Mingyan, et al. Estimation methodology and characteristics of carbon emissions in urban WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 52-62.

[20] 任　佳，符雪鹏，王　巍，等. 天然酯绝缘油的发展历程、性能及展望[J]. 摩擦学学报，2020，40(1)：135-142.
REN Jia, FU Xuepeng, WANG Wei, et al. Development, performance and prospect of natural ester insulating oil[J]. Tribology, 2020, 40(1): 135-142.

[21] 张　丹. 中国粮食作物碳足迹及减排对策分析[D]. 北京：中国农业大学，2017：4-8.
ZHANG Dan. Carbon footprint and low carbon strategy for grain production in China[D]. Beijing, China: China Agricultural University, 2017: 4-8.

[22] 邓小聘，李松江，胡　婷，等. 变压器用植物绝缘油的研究进展[J]. 绝缘材料，2019，52(11)：25-30.
DENG Xiaopin, LI Songjiang, HU Ting, et al. Research progress of vegetable insulating oil for transformer[J]. Insulating Materials, 2019, 52(11): 25-30.

[23] 相晨萌，周　溱，李　剑，等. 基于分子动力学模拟的植物绝缘油过热分解产气特性[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3595-3603.
XIANG Chenmeng, ZHOU Quan, LI Jian, et al. Gas production characteristics of vegetable insulating oils under thermal decomposition based on molecular dynamic simulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3595-3603.

[24] 刘宏领，田克强，李继攀，等. 天然酯绝缘油中溶解气体研究现状[J]. 绝缘材料，2022，55(1)：12-18.
LIU Hongling, TIAN Keqiang, LI Jipan, et al. Research status of dissolved gases in natural ester insulating oil[J]. Insulating Materials, 2022, 55(1): 12-18.

[25] 徐　晴，郝　建，叶文郁，等. 三元混合绝缘油热裂解过程与产气特性[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1026-1037.
XU Qing, HAO Jian, YE Wenyu, et al. Microscopic mechanism of thermal cracking and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1026-1037.

[26] 李小燕，王亚南，秦艳辉，等. 基于化学/物理法的变压器绝缘油吸附剂回收循环技术[J]. 粘接，2024，51(2)：100-103.
LI Xiaoyan, WANG Yanan, QIN Yanhui, et al. Recycling technology of transformer insulating oil adsorbent based on chemical/physical method[J]. Adhesion, 2024, 51(2): 100-103.

[27] 张志勇，王慧敏，陈媛媛，等. 新型硅铝矿物吸附剂用于废变压器油再生处理[J]. 化工进展，2020，39(10)：4297-4304.
ZHANG Zhiyong, WANG Huimin, CHEN Yuanyuan, et al. Regeneration treatment application in waste transformer oil with a new type of silicon aluminum mineral adsorbent[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(10): 4297-4304.

[28] 王　健，常　青，田秉晖，等. 油菜籽制生物柴油生命周期的化学污染物排放风险评价[J]. 生物质化学工程，2013，47(3)：17-22.
WANG Jian, CHANG Qing, TIAN Binghui, et al. Life cycle assessment of chemical pollutant discharge risk for biodiesel made from rapeseed[J]. Biomass Chemical Engineering, 2013, 47(3): 17-22.

[29] XIANG D, XU F, SAH R K, et al. Carbon footprint accounting method based on dynamic allocation of multi-level carbon data from manufacturing organizations to products[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 467: 142865.

[30] 黄　娜，王洪涛，范辞冬，等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报，2012，32(6)：1529-1536.
HUANG Na, WANG Hongtao, FAN Cidong, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(6): 1529-1536.

[31] 莫　华，张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价[J]. 环境科学研究，2003，16(5)：55-58.
MO Hua, ZHANG Tianzhu. Data quality assessment of life cycle inventory analysis[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(5): 55-58.

[32] 马　骏. 建筑物化阶段 CO_2 排放及其不确定性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文)，2022，44(6)：209-218.
MA Jun. Analysis of CO_2 emissions and uncertainties in the embodied stage of buildings[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 209-218.

[33] 陈　莎，李燚佩，曹　磊，等. 产品碳足迹评价中不确定度与敏感度相结合的数据质量分析[J]. 中国环境科学，2014，34(4)：1067-1072.
CHEN Sha, LI Yipei, CAO Lei, et al. Data quality analysis with combination uncertainty and sensitivity for carbon footprint assessment of products[J]. China Environmental Science, 2014, 34(4): 1067-1072.



廖正海(通信作者)
1994—，男，博士，高工
主要从事电网环境保护技术、电磁环境与噪声监测方面的研究工作
E-mail: liaozhenghai@epri.sgcc.com.cn

LIAO Zhenghai
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期　2024-09-25　修回日期　2025-01-10　　编辑　曹昭君