

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB2407100)。

and ReCipe 2016 show that the raw material acquisition stage dominates all environmental damage categories, with the most significant impact on marine ecotoxicity. The core causes are the heavy metal emissions during the mining and processing of copper and silicon steel sheets, as well as the organic pollutants released during the synthesis of epoxy resin.

Key words: life cycle assessment; dry-type transformer; carbon footprint; sensitivity analysis; environmental impacts

0 引言

由于工业化的快速发展,温室气体排放已导致全球变暖、海平面上升等一系列环境问题。我国提出的“碳达峰、碳中和”目标^[1-3],为全球应对气候变化提供了重要指引。作为能源生产和消耗大户,电力行业的碳足迹与环境影响量化,以及针对性低碳转型策略的制定,对于提前实现“双碳”目标具有至关重要的意义^[4-5]。

全生命周期评价(life cycle assessment, LCA)已成为量化电力行业碳足迹与环境影响的重要工具^[6-10]。作为电力行业的核心设备,电力装备的LCA研究为推动行业低碳转型提供了关键突破口^[11-14]。周玮等^[15]对分布式风力发电机全生命周期碳排放量进行核算,结果表明其碳排放主要集中在生产运输和建设施工阶段。付鲁军等^[16]对比分析了12 kV SF₆与空气绝缘环网开关设备中断路器原材料获取阶段和制造阶段的碳排放量,结果表明在原材料获取阶段干燥空气绝缘断路器碳排放量高于SF₆绝缘断路器。D F D SOUZA等^[17]建立了电动机LCA模型,定量评估其各个阶段对环境的影响,结果表明使用阶段的影响最显著,占生命周期影响的90%以上。丁讯^[18]利用LCA法明确了大型水平轴风力发电机的环境影响,得到对环境影响突出的指标有不可再生能源消耗、全球气候变暖和空气中无机粉尘排放。以上研究结果为不同电力装备提供了低碳转型思路。

变压器作为电力装备的重要组成部分^[19-20],其LCA研究为电力装备低碳转型技术的发展提供了重要支撑^[21]。张益兵等^[22]基于LCA法建立了非晶油浸式配电变压器生命周期评价模型,计算了其碳足迹结果并使用泰勒级数对结果进行敏感性分析以及不确定性分析,结果表明使用阶段在全生命周期碳足迹占比高达99.45%,并且不确定性较低。WANG Y等^[23]对200 kVA油浸式配电变压器进行碳足迹评价,结果同样表明产品在使用阶段的碳足迹占比远高于其他阶段,并且通过敏感性分析发现硅钢片和变压器油对该变压器碳足迹影响最为显著。

毕子健等^[24]利用LCA法计算了不同容量下10 kV油浸式与干式变压器从资源开采到运输再到用户端之前的碳排放,得到不同类型、不同容量变压器的碳足迹组成,为实现产品的低碳化提供数据参考。综合以上分析,现有的变压器LCA研究主要集中在油浸式变压器碳足迹的量化分析上,目前对干式变压器的LCA研究和环境影响评估仍然较为匮乏,导致变压器低碳设计路径尚未明确。

本研究基于LCA方法,聚焦材料角度,构建额定容量为800 kVA的环氧浇注式干式变压器的碳足迹与环境影响评估模型。通过量化变压器全生命周期各阶段的碳足迹,结合Sobol序列估计方法和基于三角分布的蒙特卡洛模拟方法对碳足迹计算结果进行敏感性分析。同时,采用CML-IA baseline和ReCipe 2016两种环境影响评价方法,明确各生命周期阶段的环境影响。希望研究结果能为新型绿色电力设备的开发和工业应用提供科学依据和参考,推动电力行业实现低碳转型和可持续发展。

1 研究方法

1.1 LCA 框架构建

本文研究的环氧浇注干式变压器的所有数据均来源于供应商。系统核算边界根据LCA方法划分为3个阶段:原材料获取阶段、产品生产阶段以及废弃物处理阶段^[25-27]。每个阶段所涉及的主要资源和工艺流程如图1所示。样品总质量为2 515 kg,额定高压侧电压为10 kV,低压侧电压为0.4 kV,额定容量为800 kVA,额定频率为50 Hz,基准寿命为25年。结合实际情况和系统核算边界,本文建立了各阶段的主要清单数据,分别如表1~3所示。

1.2 碳足迹核算与敏感性分析方法

根据变压器全生命周期系统边界的划分,该变压器碳足迹模型如式(1)所示。

$$E_t = E_y + E_s + E_f \quad (1)$$

式(1)中: E_t 为变压器碳足迹; E_y 为变压器原材料获取阶段碳足迹; E_s 为变压器生产阶段碳足迹; E_f 为变压器废弃物处理阶段碳足迹。碳足迹单位均为kg-CO₂e,表示各个生命周期阶段产生的CO₂总量。

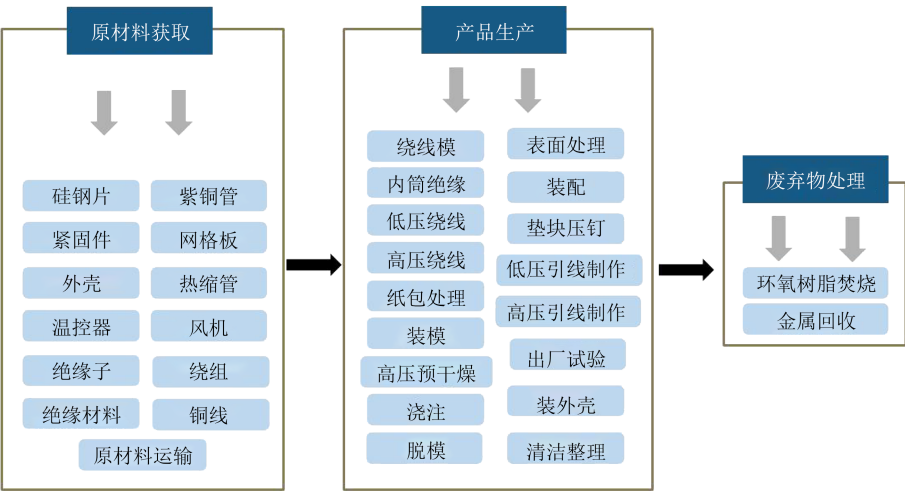


图1 碳足迹核算边界及工艺流程

Fig.1 Carbon footprint accounting boundaries and process flows

表1 原材料获取阶段主要数据清单

Table 1 Key data list of raw material acquisition stage				
物料	消耗量	材料	运输距离 /km	汽车载重 /t
硅钢片	1 360 kg	硅钢	140	10
铜箔(绕组)	575 kg	铜	250	20
铜线	110 kg		150	20
环氧树脂	195 kg	环氧树脂	50	20
紧固件	1 个		930	20
温控器	1 个	铁	150	10
风机	6 个		150	10
外壳	1 个	铝合金	150	10
铜排	8 mm 厚, 1.20 m 长, φ=80 mm	铜	135	10
	5 mm 厚, 1.35 m 长, φ=50 mm		135	10
	1.5 mm 厚, 4 m 长, φ=16 mm		135	10
紫铜管		铜	135	10
热缩管	6 m 长, φ=12 mm	聚烯烃	160	10
网格板	1.2 m 长, 0.6 m 宽	玻璃纤维	430	10

对该干式变压器全生命周期阶段碳足迹进行量化,如式(2)所示。

$$E = \sum_{i=1}^n A_i \times E_i \tag{2}$$

式(2)中: E 为变压器各生命周期阶段碳足迹, kg- CO_2e ; A_i 为第 i 种活动单位消耗量, kg, kWh 或 $\text{t}\cdot\text{km}$; E_i 为第 i 种活动单位的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e/kg}$ 、 $\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ 或 $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$ 。

结合上述数据清单,该干式变压器主要活动单位及其碳排放因子如表 4 所示,数据均来源于 Eco-invent 3 数据库。其中电力碳排放因子选取了中国

表2 产品生产阶段主要数据清单

Table 2 Key data list of product during production stage		
生产阶段	生产装置	耗电量 /(kW·h)
绕线模	烘炉	1 152
内筒绝缘	QC12K-4*2500 剪板机	0.4
低压绕线	RJS-1000 箔绕机	150
低压干燥	烘炉	192
高压绕线	GRS-800 绕线机	36
外包处理	3T 行车	0.55
装模	3T 行车	0.55
高压预干燥	加热炉	840
浇注	浇注罐	255
干燥	加热炉	600
脱模	3T 行车	1.1
表面高低压打磨	打磨机	0.71
装配	3T 行车	1.1
装夹件垫块压钉	3T 行车	0.55
低压引线制作	DMX-303 多工位母线加工机 01B-FF-2000 热风机	0.568 5
高压凸台焊接	01B-FF-2000 热风机	0.041 7
高压引线制作		
电阻测试	直流电阻测试仪	16.667
变压比测试	变比测试仪	2.25
空载损耗	调压器	28.833
高低压耐压	变压器	26.25
负载损耗	调压器	8.333
阻抗电压	Y2-225S-4 三相异步电机	1.5
装外壳	3T 行车	0.55
清洁整理	YE2-132M-4 空压机	0.375

武汉地区的区域电网碳排放因子,以更贴近设备制造过程中的实际电力来源情况;考虑到中国各地原

表3 废弃物处理阶段主要数据清单

Table 3 Key data list for waste disposal stage

阶段名称	操作	质量/kg
废弃物处理阶段	环氧树脂焚烧	195
	铜回收	557.86
	硅钢回收	816

表4 主要活动单位及其对应碳排放因子

Table 4 Major activity units and its carbon emission factors

活动单位	碳排放因子
硅钢/(kgCO ₂ e/kg)	1.647 1
铜/(kgCO ₂ e/kg)	3.900 5
环氧树脂/(kgCO ₂ e/kg)	8.820 5
铝合金/(kgCO ₂ e/kg)	5.128 5
铁/(kgCO ₂ e/kg)	1.442 0
玻璃纤维/(kgCO ₂ e/kg)	2.516 6
电力/(kgCO ₂ e/kWh)	1.088 8
运输/(kgCO ₂ e/(t·km))	0.257 7

材料生产差异相对较小,且部分国内数据缺乏公开可靠来源,因此其他材料碳排放因子采用了 Ecoinvent 3 中代表全球平均或中国通用情境的碳排放因子。

本文首先对所有资源消耗量进行+10%的浮动,以评估各输入参数波动对总碳排放量的影响,并筛选出影响较大的关键资源。进一步采用两种典型的蒙特卡洛模拟方法进行敏感性分析:一是基于三角分布的传统随机采样方法,二是基于 Sobol 序列的准随机采样方法。Sobol 序列方法是一种基于方差分解的全局敏感性分析方法,通过蒙特卡洛抽样计算敏感性分析系数,区分各个参数的贡献及其交互作用,从而得出全局敏感性指标($f(x)$)。设 $f(x)$ 可积,且 x_i 在 $[0,1]$ 服从均匀分布, $f(x)$ 的表达式如式(3)所示^[28-31]。

$$f(x) = f(x_1, \dots, x_i) \quad (3)$$

总方差 D 可以分解为各个参数及其相互作用的组合,如式(4)所示。

$$D = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j < k} D_{ijk} + \dots + D_{12\dots m} \quad (4)$$

式(4)中: D_i 是由第 i 个参数 x_i 引起的方差; D_{ij} 是由参数 x_i 和 x_j 之间的相互作用引起的方差; D_{ijk} 是3个参数共同作用时的交互贡献; $D_{12\dots m}$ 是所有参数全域耦合的交互贡献。

结果评价指标包括一阶敏感性指数 S_i 和总敏感性指数 S_{Ti} , 分别如式(5)和式(6)所示。

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (5)$$

$$S_{Ti} = 1 - \frac{D_{\sim i}}{D} \quad (6)$$

式(5)~(6)中: S_i 为参数 x_i 单独作用的敏感度; S_{Ti} 为参数 x_i 单独及其与其他参数相互作用的敏感度; $D_{\sim i}$ 为除参数 x_i 外其他参数引起的方差。

针对前期筛选出的关键资源参数,本文在两种不同的敏感性分析方法中分别设定了参数的分布形式与波动范围:在三角分布中,假设各敏感参数的消耗量服从三角分布,其最小值为基准值的90%,最大值为基准值的110%,而最可能值即为基准消耗量。在基于 Sobol 序列的全局敏感性分析中,则假设所有敏感参数在基准值的 $\pm 10\%$ 区间内服从均匀分布,并通过准随机采样全面探索输入空间,从而获得更稳健的全局敏感性指标。

1.3 环境影响评估方法

为了全面反映变压器在全生命周期各阶段对环境的影响程度,本研究选择国际上广泛应用的 CML-IA baseline 与 ReCiPe 2016 评价方法对变压器各阶段的环境影响进行评估^[32-33]。CML-IA baseline 方法主要考虑的中点环境影响评价指标包括全球变暖潜势、酸化潜势、人类毒性潜势、非生物资源枯竭潜势、光化学臭氧生成潜势、臭氧层耗竭潜势、淡水生态毒性潜势、陆地生态毒性潜势、海水生态毒性潜势以及富营养化潜势,共10种指标。这些指标能够从不同维度全面评估产品生命周期内对环境的潜在负面影响。ReCiPe 2016 方法在 CML 模型的基础上进行了扩展,除了涵盖 CML 中的中点影响类型外,还将影响类型拓展至18种,并且增加了终点类型的评估,包括生态系统损耗、人体健康和资源耗竭等三大类终点影响。

2 结果分析

2.1 碳足迹与敏感性结果分析

对该环氧浇注干式变压器全生命周期碳足迹的量化结果进行分析,各阶段的碳排放量分布如表5所示,该产品碳足迹为8 996.25 kgCO₂e。从表5可以看出,原材料获取阶段对于干式变压器碳足迹的贡献最大,碳排放量达到7 186.51 kgCO₂e。这一阶段的碳排放主要来源于铜、硅钢片以及环氧树脂3种关键材料的使用,其碳足迹的分布及占比见表6。从表6具体来看,铜的碳排放量占比为42.87%,硅

表5 环氧浇注干式变压器碳足迹分布

Table 5 Carbon footprint distribution of epoxy cast dry-type transformers

生命周期阶段	碳排放量/kgCO ₂ e	占比/%
原材料获取	7 186.51	79.89
产品生产	3 609.72	40.12
废弃物处理	-1 799.98	-20.01

表6 原材料获取阶段碳足迹分布

Table 6 Carbon footprint distribution of raw material acquisition stage

类别	碳排放量/kgCO ₂ e	占比/%
硅钢片	2240.06	31.17
铜(绕组)	2242.79	31.21
铜(引线)	429.06	5.97
环氧树脂	1720.00	23.93
紧固件	7.21	0.10
铜排1	371.00	5.16
铜排2	26.66	0.37
紫铜管	11.72	0.16
网格版	9.74	0.14
铝合金外壳	30.20	0.42
原材料运输	97.93	1.36

钢片为31.17%，而环氧树脂为23.93%。铜的消耗量在所有原材料中仅次于硅钢片，铜的碳排放主要源自矿石冶炼和电解精炼过程，这一过程需要大量电力和化石燃料，因此其碳排放量较高。硅钢片的使用量在变压器中远高于其他材料，导致硅钢片的碳排放量占比较大。虽然环氧树脂的使用量远低于铜和硅钢片，但环氧树脂是石油基化工产品，其原料含碳量较高，因此环氧树脂的碳排放量虽然较少，但单体材料的碳排放较为显著。

在产品生产阶段，所有工序产生的碳排放量都来源于消耗的电能，表2已经给出产品生产阶段各工序设计的设备耗电量，各工序的碳足迹分布及占比如表7所示。从表7可以看出，绕线模、高压预干燥、干燥、浇注、低压干燥以及低压绕线对该阶段碳排放贡献占比较高，分别为34.75%、25.34%、18.10%、7.69%、5.79%以及4.52%，其余18个工序加起来对该阶段的碳排放贡献仅有3.81%。

废弃物处理阶段中环氧树脂均采用焚烧处理，会额外产生碳排放，而铜与硅钢片可以回收利用进而减少碳排放，因此废弃物处理阶段在产品全生命周期碳足迹的贡献为-1 799.98 kgCO₂e。由此可见，使用高回收率的铜、高效硅钢片以及可降解循环利

表7 产品生产阶段碳足迹分布

Table 7 Carbon footprint distribution of product production stage

生产过程	碳排放量/kgCO ₂ e	占比/%	生产过程	碳排放量/kgCO ₂ e	占比/%
绕线模	1254.30	34.75	装配	1.20	—
内筒绝缘	0.44	—	装夹件垫块	0.60	—
低压绕线	163.32	4.52	压钉	0.62	—
低压干燥	209.05	5.79	低压引线制作	0.05	—
高压绕线	39.20	1.10	高压引线制作	0.05	—
外包处理	0.60	—	电阻测试	18.15	0.50
装模	0.60	0	变压比测试	2.45	0.10
高压预干燥	914.59	25.34	空载损耗	31.39	0.90
浇注	277.64	7.69	高低压耐压	28.58	0.80
干燥	653.28	18.10	负载损耗	9.07	0.30
脱模	1.20	—	阻抗电压	1.63	—
表面处理	0.77	—	装外壳	0.60	—
(高低压打磨)			清洁整理	0.41	—

用的环氧树脂，并优化材料用量以及能源结构，可以有效减少变压器的碳足迹。

为了筛选出关键材料对产品碳足迹的影响程度，本研究对主要消耗品的用量进行了+10%的浮动，并计算了相应的碳排放变化量及灵敏度，具体数据见表8。

表8 主要材料碳排放量灵敏度

Table 8 Sensitivity of carbon emissions from major materials

消耗品	碳排放变化量/kgCO ₂ e	灵敏度/%
硅钢片	89.602	0.996
铜	54.399	0.611
环氧树脂	343.999	3.866
铝合金	37.099	0.417
铁	0.721	0.008
玻璃纤维	3.024	0.034
原材料运输	9.810	0.110
电力	360.973	4.057

从表8可以看出，硅钢片、铜、环氧树脂、铝合金以及电力消耗对变压器碳足迹的灵敏度较高，其中电力消耗对碳足迹的变化最为敏感，灵敏度达到4.057%。尽管硅钢片和铜在全生命周期阶段的碳足迹贡献率高于环氧树脂，但考虑到这两种材料在废弃物处理阶段能够通过回收利用显著降低碳排放，而环氧树脂则在废弃物处理阶段完全通过焚烧

方式处置,这一过程反而会产生额外的碳排放。因此环氧树脂的碳足迹灵敏度较硅钢和铜更为显著。

为全面评估材料消耗的不确定性对产品碳排放的影响,利用基于三角分布与Sobol序列两种典型的蒙特卡洛模拟方法进行敏感性分析,结果如图2所示。从图2(a)和2(b)可以明显看出,Sobol序列方法中样本数据分布与标准正态分布基本吻合,并且95%的置信区间分布在8 436.538 8~9 556.572 5 kgCO₂e,平均值为8 996.141 7 kgCO₂e,说明计算结

果能很好地反映实际碳足迹。对比图2(b)和2(d)两种模拟结果可以看出,Sobol序列方法得出的95%置信区间显著宽于三角分布的8 691.92~9 311.68 kgCO₂e,意味着Sobol序列方法具备更充分的不确定性表达能力。此外,Sobol序列方法可以进一步计算关键资源的敏感性指数,如图2(c)所示,其中环氧树脂和电力消耗的一阶敏感性指数分别为0.460和0.499,显著高于其他材料,进一步证明二者对变压器碳足迹的影响最为显著,与前述分析结果一致。

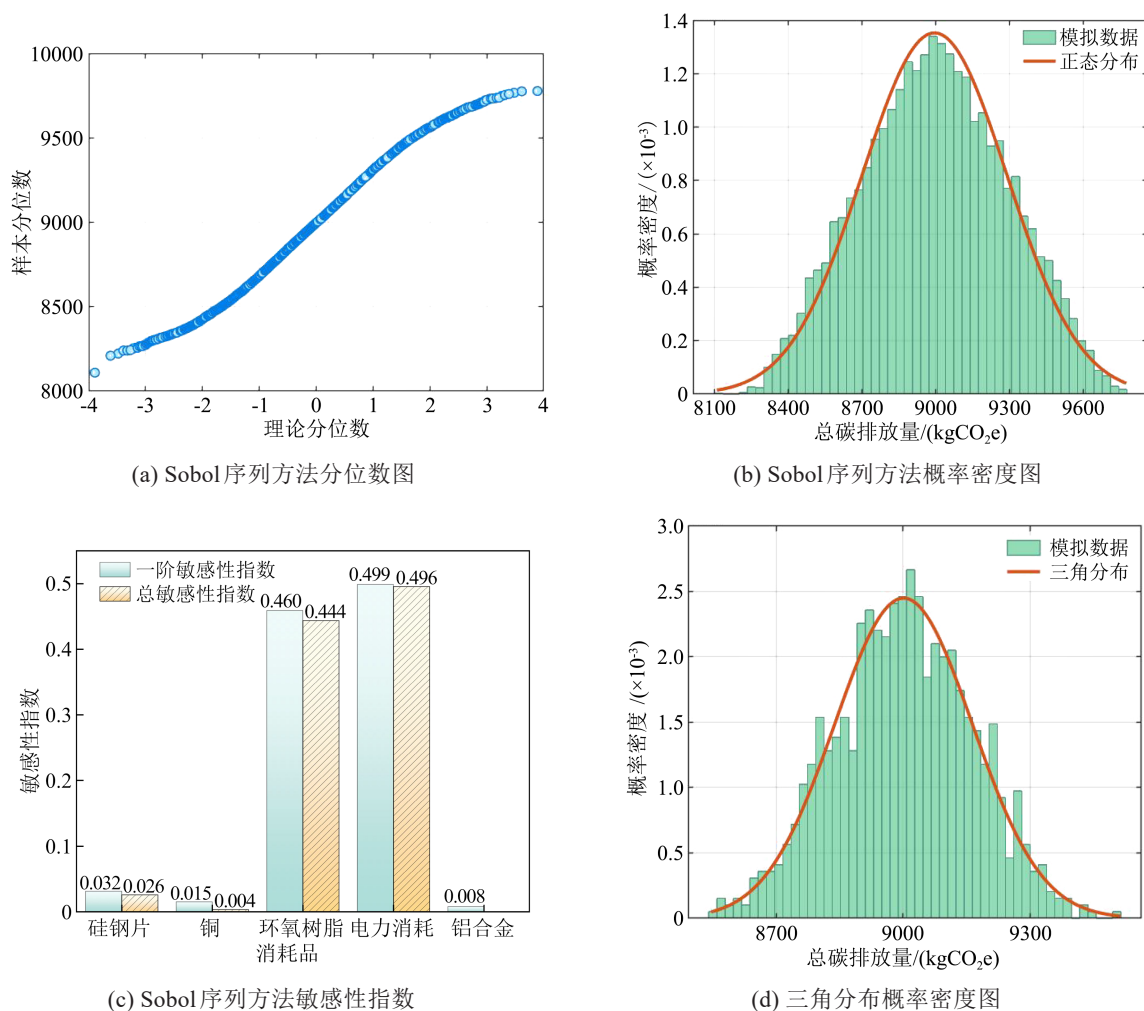


图2 敏感性分析结果

Fig.2 Sensitivity analysis results

现有研究中,文献[20]仅能评估参数对结果的影响,并未考虑参数之间的影响,文献[21]中的单一三角分布仅输出概率区间。而本文构建的三角分布+Sobol序列模拟体系中,前者实现基础不确定性表征,后者不仅覆盖更宽的波动范围,还能通过一阶敏感性指数量化参数交互影响,解决传统方法的

局限性。

2.2 环境影响评估结果

利用CML-IA baseline方法对该干式变压器各类环境影响指数进行量化计算后,得到的特征化结果展示了各生命周期阶段在不同环境影响类别上的固有特征。对这些特征化结果进行标准化处理,

从而进一步分析和比较各阶段在不同环境影响类别中的影响程度与参数大小。特征化与标准化结果分别见表9和图3(a)。

表9 CML-IA baseline 特征化结果

Table 9 CML-IA baseline characterization results

影响类别	原材料获取	产品生产	废弃物处理
非生物矿产资源消耗/kgSbeq	1.31	0.0019	-1.03
非生物化石能源消耗/MJ	8.2×10 ⁴	3.12×10 ⁴	-1.05×10 ⁴
全球变暖影响/kgCO ₂ e	7.13×10 ³	3.53×10 ³	-1.85×10 ³
臭氧层破坏/kgCFC-11eq	0.000 3	2.62×10 ⁻⁵	-0.0002
人体毒性/kg1,4-DBeq	1.1×10 ⁵	1.25×10 ³	-8.58×10 ⁴
淡水生态毒性/kg1,4-DBeq	5.29×10 ⁴	1.4×10 ³	-3.99×10 ⁴
海水生态毒性/kg1,4-DBeq	1.4×10 ⁸	5.69×10 ⁶	-1.1×10 ⁸
陆地生态毒性/kg1,4-DBeq	158	13.2	-113
光化学臭氧/kgC ₂ H ₄ eq	11.6	0.59	-8.45
酸化/kgSO ₂ eq	272	15.8	-206
水体富营养化/kgNeq	194	3.6	-151

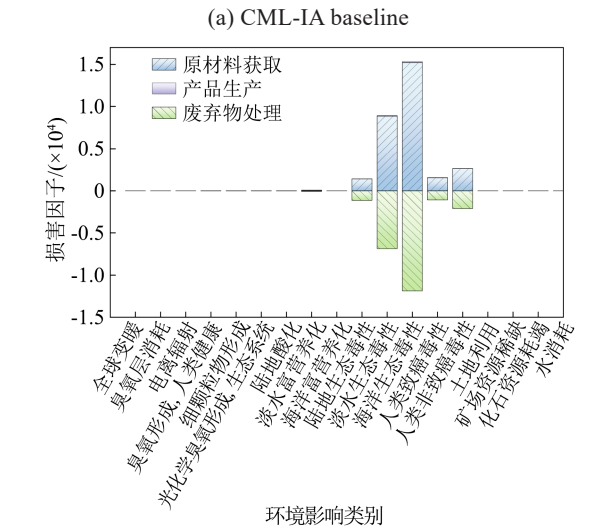
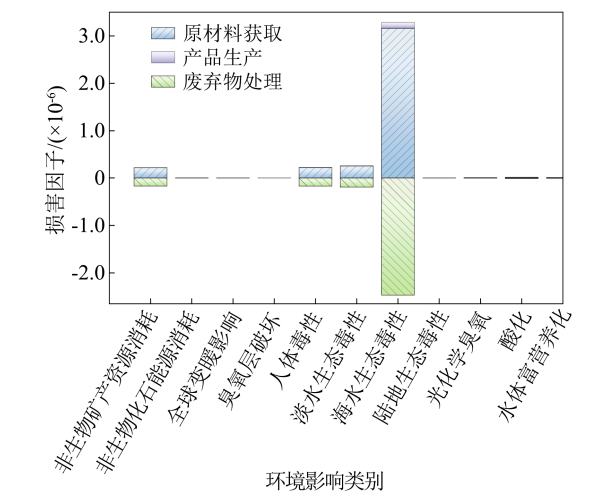


图3 不同评价方法标准化结果

Fig.3 Standardized results of different evaluation methods

从表9和图3(a)可以看出，原材料获取阶段在11个环境影响类别中均占据最高的比例，且在非生物矿产资源消耗、人体毒性潜值、淡水生态毒性潜值以及海水生态毒性潜值等环境影响指标上表现出较大的影响。这主要是由于原材料获取阶段的碳排放贡献大部分来自于铜、硅钢片以及环氧树脂的使用，其中铜和硅钢片的生产涉及多个环节，导致大量能源、水资源和土地资源的消耗，并伴随砷等重金属的排放，这些物质通过空气、水和土壤进入环境。此外，金属材料在海水环境下腐蚀并释放金属离子，可能对海洋生物造成影响^[34-35]；环氧树脂在合成过程中会释放卤代烃、苯系物等有害物质，直接威胁从业人员和周围居民的健康。

ReCipe 2016 中点法特征化与标准化结果分别如表10与图3(b)所示，结果同样表明原材料获取阶段对各个环境影响类别有着最高的贡献，其中陆地生态毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性、人类致癌毒性以及人类非致癌毒性的影响较大。海洋生态毒性的影响明显高于其他部分，与上述分析相似，是由于金属材料在海水环境下易发生腐蚀并产生金属离子，进而间接或直接地影响海洋环境。淡水生态毒性较高的原因是铜、硅钢片、环氧树脂的生

表10 ReCipe 2016 中点特征化结果

Table 10 ReCipe 2016 midpoint characterization results

影响类别	原材料获取	产品生产	废弃物处理
全球变暖/kgCO ₂ e	7.36×10 ³	3.64×10 ³	-1.81×10 ³
臭氧层消耗/kgCFC11eq	0.0076	0.000 8	-0.005 8
电离辐射/kBqCo-60eq	281	57.2	-198
臭氧形成，人类健康/kgNO _x eq	40.3	10.1	-24.7
细颗粒物形成/kgPM2.5eq	80.9	5.62	-61.1
光化学臭氧形成，生态系统/kgNO _x eq	41.2	10.1	-25.3
陆地酸化/kgSO ₂ eq	227	12.6	-173
淡水富营养化/kgPeq	59.8	0.719	-47.3
海洋富营养化/kgNeq	3.29	0.0445	-2.62
陆地生态毒性/kg1,4-DCB	1.47×10 ⁶	3.26×10 ³	-1.17×10 ⁶
淡水生态毒性/kg1,4-DCB	1.09×10 ⁴	115	-8.43×10 ³
海洋生态毒性/kg1,4-DCB	1.57×10 ⁴	147	-1.22×10 ⁴
人类致癌毒性/kg1,4-DCB	4.29×10 ³	112	-2.97×10 ³
人类非致癌毒性/kg1,4-DCB	3.93×10 ⁵	1.15×10 ³	-3.12×10 ⁵
土地利用/m ² a crop eq	320	44.3	-242
矿场资源稀缺/kgCueq	947	1.96	-723
化石资源耗竭/kgCueq	1.87×10 ³	708	-283
水消耗/m ³	134	8.99	22

产过程中会有大量工业废水直接排入淡水系统,并且环氧树脂合成的有机污染物会严重影响淡水环境。表 11 展示了 ReCipe 2016 终点法特征化结果,将环境损害类别分成人体健康、生态系统损耗、资源损耗。从表 11 可以看出,原材料获取阶段同样在 3 种影响类别中有着最大的占比,这也与铜、硅钢片以及环氧树脂的使用有关。以上分析均表明,需要优化金属材料的使用率与回收率,并且使用可降解循环利用的环氧树脂,以有效减弱对环境的影响。

表 11 ReCipe 2016 终点影响结果

Table 11 ReCipe 2016 endpoint impact results			
损害类别	原材料获取	产品生产	废弃物处理
人类健康	0.162	0.007 58	-0.121
生态系统损耗	0.000 145	1.53×10^{-5}	-9.97×10^{-5}
资源损耗	707	70.9	-152

现有研究常分割碳足迹与环境影响^[16],且材料的碳贡献模糊^[21]。而本文既量化铜、硅钢片和环氧树脂的碳占比,又关联回收的减排效应,结合两种评价方法明确环境影响机制,为制造端提供精准优化依据。

3 结论

本文基于 LCA 方法,聚焦于材料角度建立了环氧浇注干式变压器的碳足迹与环境影响评估模型,量化了变压器全生命周期各阶段以及主要材料的碳足迹,并利用蒙特卡洛模拟方法评估了变压器碳足迹的不确定性,最后基于 CML-IA baseline 与 ReCipe 2016 两种评价方法,对不同生命周期阶段的环境影响程度进行了综合评估,主要结论如下:

(1)该变压器全生命周期总碳足迹为 8 996.25 kgCO₂e;原材料获取阶段是核心贡献源,达到 7 186.51 kgCO₂e,铜、硅钢片、环氧树脂为关键碳源;产品生产阶段碳排放均由消耗的电能产生,为 3 609.72 kgCO₂e;废弃物处理阶段因铜、硅钢片回收呈-1 799.98 kgCO₂e 的负碳排放。

(2)Sobol 序列法与三角分布所得结果均贴合实际,但 Sobol 法序列不确定性表达更充分,且明确环氧树脂、电力消耗的一阶敏感性指数分别为 0.460、0.499,是碳足迹关键影响变量,与前期灵敏度分析结论一致。

(3)CML-IA baseline 与 ReCiPe 2016 验证结果表明,原材料获取阶段主导所有环境损害,其影响

源于铜、硅钢片生产时的资源消耗与重金属排放,以及环氧树脂合成的有机污染物释放。

参考文献 References

- [1] 孙蒙,李长云,邢振方,等.碳中和目标下中国碳排放关键影响因素分析及情景预测[J].高电压技术,2023,49(9):4011-4021.
SUN Meng, LI Changyun, XING Zhenfang, et al. Analysis of key influencing factors and scenario prediction of China's carbon emission under carbon neutrality[J]. High Voltage Engineering, 2023,49(9):4011-4021.
- [2] SUN L L, CUI H J, GE Q S. Will China achieve its 2060 carbon neutral commitment from the provincial perspective?[J]. Advances in Climate Change Research,2022,13(2):169-178.
- [3] 高启慧,秦圆圆,梁媚聪,等.IPCC 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议[J].环境保护,2023,51(9):84-86.
GAO Qihui, QIN Yuanyuan, LIANG Meicong, et al. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 synthesis report[J]. Environmental Protection,2023,51(9):84-86.
- [4] 朱法华,徐静馨.双碳背景下中国与主要发达国家电力低碳转型比较[J].电力科技与环保,2024,40(6):561-571.
ZHU Fahua, XU Jingxin. Comparison of low-carbon transformation in electricity between China and major developed countries under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection,2024,40(6):561-571.
- [5] 马露露,赵昌文,蒋金荷.基于系统动力学的中国电力行业低碳发展路径[J].北京大学学报(自然科学版),2025,61(2):343-357.
MA Lulu, ZHAO Changwen, JIANG Jinhe. Low carbon development path of China's power sector based on system dynamics[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2025,61(2):343-357.
- [6] 柳君波,徐向阳,李思雯.中国电力行业的全周期碳足迹[J].中国人口·资源与环境,2022,32(1):31-41.
LIU Junbo, XU Xiangyang, LI Siwen. Lifecycle carbon foot-print analysis of China's power industry[J]. China Population, Resources and Environment,2022,32(1):31-41.
- [7] 夏德建,任玉珑,史乐峰.中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J].统计研究,2010,27(8):82-89.
XIA Dejian, REN Yulong, SHI Lefeng. Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain[J]. Statistical Research,2010,27(8):82-89.
- [8] 李雨晨.长江上游大中型水利水电工程全生命周期碳足迹核算[D].重庆:重庆交通大学,2022.
LI Yuchen. Carbon footprint accounting of the life cycle of large and medium-sized hydropower projects in the upper Yangtze river [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2022.
- [9] 李哲,王常殿.从水库温室气体研究到水电碳足迹评价:方法及进展[J].水利学报,2022,53(2):139-153.
LI Zhe, WANG Changdian. From reservoir greenhouse gas emissions to hydropower carbon footprint: methodology and advances [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(2):139-153.

- [10] NIAN V. Change impact analysis on the life cycle carbon emissions of energy systems-the nuclear example[J]. *Applied Energy*,2015,143:437-450.
- [11] 熊华文. 减污降碳协同增效的能源转型路径研究[J]. *环境保护*,2022,50(1):35-40.
XIONG Huawen. The study on energy transformation path of achieving synergizing the reduction of pollution and carbon emissions[J]. *Environmental Protection*,2022,50(1):35-40.
- [12] 刘亚东,陈思,丛子涵,等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. *高电压技术*,2021,47(5):1539-1554.
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry [J]. *High Voltage Engineering*,2021,47(5):1539-1554.
- [13] 杨鸣,黄琳榆,孙金昊,等. 变压器类装备电磁暂态模型构建技术综述[J]. *高电压技术*,2025,51(1):1-20.
YANG Ming, HUANG Linyu, SUN Jinhao, et al. Review of transformer modeling technologies for electromagnetic transient analysis[J]. *High Voltage Engineering*,2025,51(1):1-20.
- [14] 李庆民,于万水,赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. *高电压技术*,2021,47(9):3047-3060.
LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the "peak CO₂ emissions and carbon neutrality" policy[J]. *High Voltage Engineering*,2021,47(9):3047-3060.
- [15] 周玮,潘峰,吴秀山. 分布式风电并网的全生命周期碳核算研究与分析[J]. *价值工程*,2024,43(3):28-30.
ZHOU Wei, PAN Feng, WU Xiushan. Research and analysis on full life cycle carbon accounting for distributed wind power grid connection[J]. *Value Engineering*,2024,43(3):28-30.
- [16] 付鲁军,骆虎,贾一凡,等. 12 kV 气体绝缘断路器柜在原材料获取阶段和制造阶段碳排放计算与对比分析[J]. *高压电器*,2023, 59(4):17-23.
FU Lujun, LUO Hu, JIA Yifan, et al. Carbon emission calculation and comparative analysis of 12 kV gas insulated circuit breaker cabinet in raw material acquisition and manufacturing stage[J]. *High Voltage Apparatus*,2023,59(4):17-23.
- [17] SOUZA D F D, SLIVA P P F D, SAUER I L, et al. Life cycle assessment of electric motors - a systematic literature review[J]. *Journal of Cleaner Production*,2024,456:1421366.
- [18] 丁迅. 水平轴风力发电机生命周期环境影响评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2021.
DING Xun. Life cycle environmental impact assessment of horizontal axis wind turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [19] 钱艺华,邓婷,蔡玉婷,等. 酯类绝缘液再填充矿物油变压器研究综述[J]. *绝缘材料*,2025,58(8):28-41.
QIAN Yihua, DENG Ting, CAI Yuting, et al. A review on retrofitting mineral oil transformers with ester-based insulating liquids[J]. *Insulating Materials*,2025,58(8):28-41.
- [20] 王远,唐桢馥,牛飞宇,等. 220 kV 天然酯变压器绕组温度分布三维仿真计算分析[J]. *绝缘材料*,2025,58(8):50-56.
WANG Yuan, TANG Zhenfu, NIU Feiyu, et al. 3D simulation calculation and analysis of winding temperature distribution in a 220 kV natural ester transformer[J]. *Insulating Materials*,2025,58(8):50-56.
- [21] 张德光,贾代发. 变压器金属件表面涂装工艺优化研究[J]. *世界有色金属*,2017(20):232-233.
ZHANG Deguang, JIA Daifa. Study on surface coating process optimization of transformer metal parts[J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(20): 232-233.
- [22] 张益兵,朱朝勇,武美辰,等. 基于全生命周期评价的变压器碳足迹研究与分析[J]. *高压电器*,2024,60(11):57-67.
ZHANG Yibing, ZHU Chaoyong, WU Meichen, et al. Research and analysis of carbon footprint of transformer based on full life cycle assessment[J]. *High Voltage Apparatus*,2024,60(11):57-67.
- [23] WANG Y P, ZHANG H Y, ZHOU E B, et al. Carbon footprint analysis of distribution network transformers based on life cycle assessment[J]. *Energies*,2025,18(3):600.
- [24] 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.
- [25] CANSINO J M, ROMÁN R, ORDÓEZ M. Main drivers of changes in CO₂ emissions in the spanish economy: a structural decomposition analysis[J]. *Energy Policy*,2016(89):150-159.
- [26] JOSHI S. Product environmental life-cycle assessment using input-output techniques[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 1999, 3 (23):95-120.
- [27] LI Xiaojuan, XIE Wanjuan, XU Le, et al. Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM[J]. *Energy and Buildings*,2022,266:112136.
- [28] CUKIER R I, FORTUIN C M, SHULER K E, et al. Study of the sensitivity of the coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients: I. Theory[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1973,59(8):3873-3878.
- [29] ARCHER G E B, SALTELLI A, SOBOL I M. Sensitivity measures, ANOVA-like techniques and the use of bootstrap[J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 1997, 58(2): 99-120.
- [30] MOHAMMADPOUR A, RAJABI S, BELL M, et al. Seasonal variations of potentially toxic elements (PTEs) in drinking water and health risk assessment via Monte Carlo simulation and Sobol sensitivity analysis in southern Iran's largest city[J]. *Applied Water Science*,2023(13):237.
- [31] SOBOL I M. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models[J]. *Mathematical Modeling & Computational Experiment*, 1993(1):407-414.
- [32] BŁAŻEJOWSKA R M, JEZIERSKI D. Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*,2024,29(10):1799-1817.
- [33] HUIJBREGTS J A M, STEINMANN N J Z, ELSHOUT F M P,

- et al. Correction to: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, 25(8): 1635-1635.
- [34] 张成. 紫铜在有机酸环境中的腐蚀行为及规律研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- ZHANG Cheng. Corrosion behavior and law of copper in organic acid environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.
- [35] 张绪振, 褚宏宪, 孔令号, 等. 莱州湾表层海水重金属分布特征及生态环境评价[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 25-34.
- ZHANG Xuzhen, CHU Hongxian, KONG Linghao, et al. Distribution and ecological environment assessment of heavy metals in surface seawater of Laizhou Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 25-34.
-
- 收稿日期: 2025-07-13; 修回日期: 2025-08-25。
- 作者简介:
- 田双双(1989-), 女(汉族), 山东泰安人, 副教授, 主要从事气体绝缘设备在线检测与故障诊断以及环保型绝缘气体应用技术的研究;
- 通信作者: 张晓星(1972-), 男(汉族), 湖北潜江人, 教授, 主要从事气体绝缘设备在线检测与故障诊断以及环保型绝缘气体应用技术的研究。