

# 利用生命周期评估法评价涂装车间的环境足迹

王思澄 刘苏敏 仇佳俊 王大然 彭松

(北京奔驰汽车有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 简要介绍了生命周期评估法, 并将其应用在汽车涂装工艺, 追踪涂装生产过程中包括碳足迹在内的重要环境足迹, 量化评估汽车涂装过程全生命周期生产活动中各项物料、资源和能源的使用及其产生的排放对生态环境的影响。结果表明, 能源消耗及其产生的排放, 公用动力、面漆和前处理电泳工序, 电网供电对气候变化和化石资源枯竭影响更为显著; 而物料消耗及其产生的排放, 面漆、密封胶及前处理电泳工序, 光伏供电对生态毒性和人体毒性影响更为显著。

**关键词:** 生命周期评估 涂装工艺 环境足迹

中图分类号: U466 文献标志码: B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230280

## Environmental Footprint Evaluation of Painting Workshop with Life Cycle Assessment

Wang Sicheng, Liu Sumin, Qiu Jiajun, Wang Daran, Peng Song

(Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176)

**Abstract:** The life cycle assessment method was briefly introduced and applied to automotive painting process, the important environmental footprints including carbon footprint during painting production process were tracked, the impact of the use of materials, resources and energy as well as generated emissions on the ecological environment during the whole life cycle production activities of automotive painting process were quantitatively evaluated. The results show that energy consumption and generated emissions, utility power, topcoat and pretreatment electrophoresis processes, and grid power supply have more significant impacts on climate change and fossil resource depletion; material consumption and generated emissions, topcoat, sealant and pretreatment electrophoresis processes, and photovoltaic power supply have more significant impact on ecological toxicity and human toxicity.

**Key words:** Life cycle assessment, Painting process, Environmental footprint

### 1 前言

汽车涂装工艺是指将涂料涂覆于经过处理的白车身钣金件表面并烘干成膜的工艺, 主要起到车身防腐和美观的作用。汽车涂装生产过程通常包含前处理电泳、密封胶、面漆、注蜡四大主工序和若干道子工序。由于工艺特性及对生产环境的严苛要求, 使涂装工艺成为汽车制造四大工艺中能源消耗及污染物排放最高的工艺, 因此, 针对

涂装生产过程中对资源和环境的影响进行全面系统性量化评估, 追踪和评价其重要环境足迹, 识别生产过程中的环境改善机会, 对于实现汽车行业绿色低碳与可持续发展具有重要意义。

ISO 14040: 2006《环境管理 生命周期评价 原则与框架》和ISO 14044: 2006《环境管理 生命周期评价 要求与指南》定义的评估环境影响的标准化方法——生命周期评估法(Life Cycle Assessment, LCA)是迄今为止分析产品系统环境因素和影响的

作者简介: 王思澄(1994—), 男, 工程师, 硕士学位, 研究方向为涂装车间的质量管理体系、环境管理体系与能源管理体系。

参考文献引用格式:

王思澄, 刘苏敏, 仇佳俊, 等. 利用生命周期评估法评价涂装车间的环境足迹[J]. 汽车工艺与材料, 2024(5): 43-48.

WANG S C, LIU S M, QIU J J, et al. Environmental Footprint Evaluation of Painting Workshop with Life Cycle Assessment[J]. Automobile Technology & Material, 2024(5): 43-48.

最有价值的方法之一,可用于评估整个生产过程的潜在环境影响(例如资源的使用和排放)<sup>[1]</sup>。本文以某汽车涂装车间为例,通过对整车制造过程中化学品和能源消耗以及环境影响最为显著的涂装工艺进行生命周期评估,追踪其环境足迹,定量评估其全生命周期制造过程中主要物料、能源的使用及其产生的废弃物排放对环境产生的影响。

## 2 生命周期评估

生命周期评估研究从原材料开采到生产、使用,直至废弃处理与回收的整个产品生命周期(即从摇篮到坟墓)的环境因素和潜在影响,通常包括资源利用、人类健康和生态后果<sup>[1]</sup>。在 ISO 14040: 2006 和 ISO 14044: 2006 中规定了生命周期评估的 4 个主要阶段<sup>[1-3]</sup>:

a. 确认目标与范围定义;

b. 生命周期清单分析中建立过程中所有相关的质量流和能量流,其相对应的输入和输出均列入清单<sup>[3]</sup>;

c. 根据从生命周期清单分析中获得的结果进行接下来的生命周期影响评估,根据对环境的影响将所有输入和输出进行分类和计算;

d. 根据研究的目标评估和解释结果确定对人类健康、环境和自然资源的影响,给出结论并提出建议<sup>[4]</sup>。

在生命周期影响评估阶段会将清单分析结果与特定环境影响类别指标相关联,借助包括中点指标(问题导向)和终点指标(损害导向)的表征因子,将产品生命周期中大量具有不同环境相关性的物质流与能量流转化为有限数量的环境影响评分,以量化这些影响并提供生命周期解释说明阶段所需的信息<sup>[5]</sup>。本文使用的 ReCiPe2016 影响评估法共包含 18 个中点指标和 3 个终点指标<sup>[6]</sup>,将生命周期清单数据转化为统一的表征因子。影响类别和表征因子的选择取决于研究的焦点,本文主要聚焦于追踪和评价汽车涂装车间生产过程中包括碳足迹在内的重要环境足迹,故中点影响类别选择了气候变化(Climate Change)、生态毒性(Ecotoxicity)、人体毒性(Human Toxicity)以及化石资源枯竭(Fossil Resource Scarcity),目的是研究涂装车

间生产过程中对人类健康、生态环境以及资源可用性的损害,这也是本文中 LCA 研究选择的终点指标。

气候变化(也称全球变暖,Global Warming)的主要影响途径为:温室气体排放导致辐射强迫能力增强,进而造成全球平均温度升高,最终损害人类健康以及陆地和淡水生态系统<sup>[6]</sup>。由于二氧化碳为导致全球变暖最主要的温室气体,故在 LCA 研究中通常使用全球变暖潜能值(Global Warming Potential, GWP)计算其他温室气体排放影响的相对值<sup>[6]</sup>。气候变化这一影响类别是 ReCiPe2016 影响评估法 18 个中点指标中评价生产过程碳足迹产生的环境影响的重要中点指标。

生态毒性影响类别表征了由人类活动产生的物质所引起的从微观到宏观的生态系统结构和功能方面的有害变化<sup>[3]</sup>。根据废弃物排放的最终去向,生态毒性可分为陆地生态毒性、淡水生态毒性和海洋生态毒性。LCA 研究中通常使用生态毒性潜能值(Ecotoxicity Potential, ETP)计算生态毒性这一环境影响类别的相对值,包含了陆地生态毒性潜能值(Terrestrial Ecotoxicity Potential, TETP)、淡水生态毒性潜能值(Freshwater Ecotoxicity Potential, FETP)及海洋生态毒性潜能值(Marine Ecotoxicity Potential, METP),化学品 1,4-二氯苯(1,4-DCB)在中点指标计算过程中用作参考物质<sup>[6]</sup>。

人体毒性影响类别表征了通过空气、水和食物摄入有毒物质对人类健康造成的负面影响<sup>[3]</sup>。由于存在大量不同的可能导致疾病或疾病组的影响机制,因此 LCA 研究中通常使用人体毒性潜能值(Human Toxicity Potential, HTP)计算人体毒性这一环境影响类别的相对值,包含了致癌和非致癌两类人体毒性潜能值之和,化学品 1,4-二氯苯(1,4-DCB)在中点指标计算过程中用作参考物质<sup>[6]</sup>。

作为重要的能源以及许多重要产品的原料,地球上有限的化石资源日益短缺。化石资源枯竭影响类别表征了对自然资源稀缺性的损害。然而,不同的生产技术或不同的开采地点会影响化石资源的开采成本,因此 LCA 研究中通常使用化石枯竭潜能值(Fossil Depletion Potential, FDP)计算化石资源枯竭这一环境影响类别的相对值<sup>[6]</sup>。

### 3 涂装车间的生命周期评估

#### 3.1 目标与范围定义

本文中生命周期评估研究的目的是通过某涂装车间整体生产过程及各主要工序和单元(前处理电泳、密封胶、面漆、注蜡、公用动力)中主要物料、能源的使用及其产生的废弃物排放追踪其重要环境足迹,分别进行评价和对比,量化评估该涂装车间的生产过程对环境产生的影响。此外,涂装生产过程中使用不同种类电力造成的环境影响差异也会在生命周期解释说明阶段的敏感性分析中进行对比评估。

本研究中的涂装车间生产过程被分解成一系列连续的需要物质和能源输入的单元过程,如图1

所示。图1中所示的LCA边界内的所有对象,包括每个单元过程中主要物料和能源的使用以及排放和废弃处理都被纳入本次LCA研究的范围。根据ISO 14044: 2006建议的取舍规则,由于对环境影响作用较小,主要物料和能源之外的次要物料和能源消耗可忽略不计,故不纳入本次LCA研究的范围;此外,除污水由厂区污水站处理达标后排放以外,涂装生产过程中产生的其他各项危险废弃物均由专门的危废处理企业进行转运和无害化处理,属于本LCA研究系统边界外的要素,故不纳入研究范围。作为整车制造产业链中的增值过程之一,本文选择了从门到门(Gate-to-Gate)的研究方法对涂装车身生产制造过程进行LCA研究,功能单元为单台涂装车身。

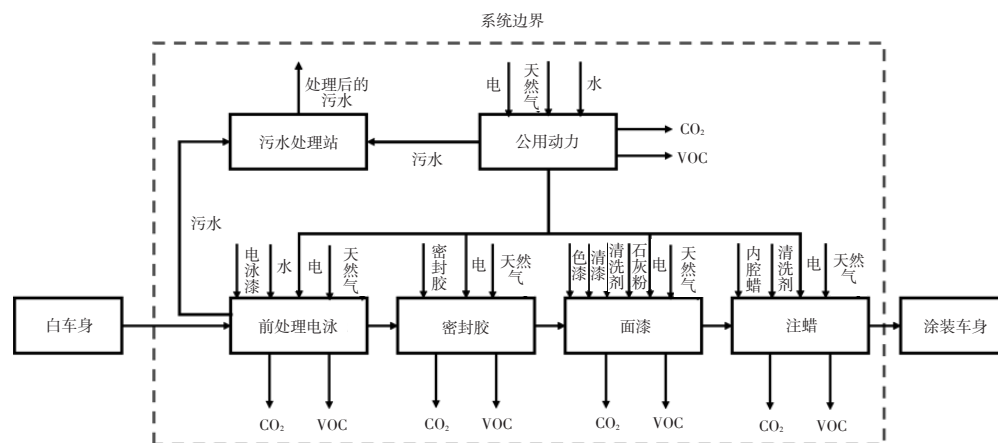


图1 涂装车间生产过程LCA范围及边界

#### 3.2 清单分析

在生命周期清单分析中,为了将LCA研究归一化并作为标准基础,选择1辆涂装车身作为整个涂装生产的功能单元,清单分析中的所有物料与能源消耗及排放数据均来自该涂装车间的实际生产过程。本研究使用的软件工具为SimaPro 9.0,软件数据基于瑞士Ecoinvent数据库及欧洲生命周期文献数据库(European Life Cycle Database, ELCD)。涂装车间单台涂装车身生产过程中的物质流、能量流与排放流的汇总如表1和表2所示,包含每种物质流、能量流及排放流在软件数据库中相对应的数据来源。由于该研究在中国进行,基于软件数据库中数据的实际情况,物料与能源消耗及排放数据的范围选择了中国(CN)、除欧洲外的世界范围(RoW)或全球范围

(GLO)。

#### 3.3 影响评估

根据ReCiPe2016影响评估法<sup>[6]</sup>,基于LCA研究范围内的过程产生影响最显著的环境类别,选择相应的中点指标和终点指标来评估涂装车间生产过程对环境产生的影响。在本研究中,使用“ReCiPe 2016 Midpoint (H)”模型分别计算以下过程的气候变化、生态毒性、人体毒性以及化石资源枯竭的数值:

- 使用电网供电的涂装车间生产过程;
- 涂装车间生产过程中的主要物料消耗和能源消耗及其分别对应的排放过程;
- 涂装车间各主要工序和单元;
- 使用光伏发电的涂装车间生产过程。

进而分别对这些过程造成的环境影响进行评

估和对比。值得说明的是,上述使用光伏发电的涂装车间生产过程是为了对比涂装生产过程中使用不同电力来源产生的环境影响,假设光伏发电(数据来源:Electricity, Low Voltage {CN}| Electricity Production, Photovoltaic, 3 kW Slanted-Roof Installa-

tion, Single-Si, Panel, Mounted | Cut-Off, U)为涂装生产过程中唯一的电能输入,进而对整个LCA研究进行重新建模、计算和评估。基于上述不同过程生产单台涂装车身的各项环境影响评估结果如表3和表4所示。

表1 涂装车间单台涂装车身生产过程中输入的物质流与能量流

涂装车间	物质/能量流	值	软件数据库中的数据来源
前处理 电泳	电泳漆质量/kg	7.0	Electrostatic paint {GLO}  market for   Cut-off, U
	水的质量/t	2.0	Water, deionised, from tap water, at user {RoW}  market for water, deionised, from tap water, at user   Cut-off, U
	电能/kW·h	40.05	Electricity, medium voltage {CN}  market for   Cut-off, U
	天然气体积/m <sup>3</sup>	3.19	Natural gas, high pressure {RoW}  market for   Cut-off, U
密封胶	密封胶质量/kg	13.0	Polyvinylchloride resin (B-PVC), bulk polymerisation, production mix, at plant RER
	电能/kW·h	10.64	Electricity, medium voltage {CN}  market for   Cut-off, U
	天然气体积/m <sup>3</sup>	3.25	Natural gas, high pressure {RoW}  market for   Cut-off, U
面漆	色漆质量/kg	5.0	Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {RoW}  market for alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state   Cut-off, U
	清漆质量/kg	1.5	Alkyd paint, white, without water, in 60% solution state {RoW}  market for alkyd paint, white, without water, in 60% solution state   Cut-off, U
	清洗剂质量/kg	2.0	Solvent for paint {GLO}  market for solvent for paint   Cut-off, U
	石灰粉质量/kg	10.0	Quicklime, milled, loose {RoW}  market for quicklime, milled, loose   Cut-off, U
	电能/kW·h	43.16	Electricity, medium voltage {CN}  market for   Cut-off, U
	天然气体积/m <sup>3</sup>	10.94	Natural gas, high pressure {RoW}  market for   Cut-off, U
注蜡	内腔蜡质量/kg	1.8	Wax, lost-wax casting {GLO}  market for   Cut-off, U
	清洗剂质量/kg	0.2	Solvent for paint {GLO}  market for solvent for paint   Cut-off, U
	电能/kW·h	2.77	Electricity, medium voltage {CN}  market for   Cut-off, U
	天然气体积/m <sup>3</sup>	0.33	Natural gas, high pressure {RoW}  market for   Cut-off, U
公用动力	水的质量/t	0.5	Water, deionised, from tap water, at user {RoW}  market for water, deionised, from tap water, at user   Cut-off, U
	电能/kW·h	139.08	Electricity, medium voltage {CN}  market for   Cut-off, U
	天然气体积/m <sup>3</sup>	7.80	Natural gas, high pressure {RoW}  market for   Cut-off, U

### 3.4 解释说明

本节将根据 ISO 14040: 2006 和 ISO 14044: 2006 定义的规则对第 3.2 节和 3.3 节中的数据进行分析,并对影响评估的结果进行对比和解释,此外,在敏感性分析中将涂装生产过程中使用不同电力来源所产生的环境影响进行比较。本章节研究目的是核实清单分析和影响评估的可靠性,对不同过程和要素产生的环境影响进行直观对比分析,进而识别涂装生产过程中的环境改善机会。

#### 3.4.1 涂装车间整体生产过程产生的环境影响

基于表3的数据,单台涂装车身在涂装车间整体生产过程中产生的环境影响对比如图2所示。

从图2中可以看出,单台涂装车身在涂装车间整体生产过程中,能源消耗及其产生的废弃物排放对GWP和FDP的贡献要高于物料消耗及其产生的废弃物排放,而对ETP和HTP的贡献则要低于物料消耗及其产生的废弃物排放。此外,使用电网供电的涂装车间生产过程对GWP和FDP的贡献要高于使用光伏发电的涂装车间,而对ETP和HTP的贡献则要低于使用光伏发电的涂装车间。目前中国以火力发电为主,在发电过程中会消耗大量化石能源(如煤炭、石油和天然气)并产生大量温室气体(如CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和CO);此外,在涂装车间生产过程中几乎所有的CO<sub>2</sub>排放均来自各工序的

烘房、公用动力设施(如供风单元中的燃烧器)以及环保治理设施(如喷漆室废气净化处理装置(KPR)中的焚烧炉)天然气燃烧,因此,涂装车间整体生产过程中能源消耗及其产生的排放对GWP和FDP的贡献要更高。而在涂装生产中大量化学品(如油漆、清洗剂、密封胶、内腔蜡等),在其生产和使用过程中产生的有害物质会排放到生态环境中进而被人体吸收,因此,涂装车间整体生产过程中物料消耗及产生的排放对ETP和HTP的贡献更

高。光伏发电作为以太阳光为能量来源的可再生清洁能源,一旦投入使用,其运行不会产生温室气体。然而,在太阳能电池板的生产过程中大量使用了氢氟酸、硝酸、三氯氧磷及异丙醇等化学品,同时伴随着废水排放(氟离子、COD、总氮等)及废气排放(氮氧化物、氟化氢、氯化氢等)<sup>[7]</sup>。因此,相对于使用电网供电的涂装车间,使用光伏发电的涂装车间对GWP和FDP的贡献更低,而对ETP和HTP的贡献更高。

表2 涂装车间单台涂装车身生产过程中输出的排放流

涂装车间	排放流	值	软件数据库中的数据来源
前处理电泳	二氧化碳质量/kg	6.01	Carbon dioxide
	非甲烷总烃质量/kg	0.10	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
	污水体积/m <sup>3</sup>	2.0	Waste water/m <sup>3</sup>
	经处理后的污水体积/m <sup>3</sup>	2.0	Wastewater, average {RoW}  treatment of, capacity 1E9l/year   Cut-off, U
密封胶	二氧化碳质量/kg	6.13	Carbon dioxide
	非甲烷总烃质量/kg	0.10	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
面漆	二氧化碳质量/kg	20.62	Carbon dioxide
	非甲烷总烃质量/kg	0.20	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
注蜡	二氧化碳质量/kg	0.62	Carbon dioxide
	非甲烷总烃质量/kg	0.03	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
公用动力	二氧化碳质量/kg	14.70	Carbon dioxide
	非甲烷总烃质量/kg	0.10	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
	污水体积/m <sup>3</sup>	0.5	Waste water/m <sup>3</sup>
	经处理后的污水体积/m <sup>3</sup>	0.5	Wastewater, average {RoW}  treatment of, capacity 1E9l/year   Cut-off, U

表3 涂装车间整体生产过程的环境影响评估结果

中点指标	涂装车间	物料消耗	能源消耗	涂装车间(光伏)
GWP/kg CO <sub>2</sub> e	417.0	117.0	301.0	194.0
ETP/kg 1,4-DCBe	357.0	204.3	151.7	744.7
HTP/kg 1,4-DCBe	344.0	282.8	61.8	366.0
FDP/kg oil e	108.0	40.4	67.8	68.7

表4 涂装车间生产过程中各主要工序和单元的环境影响评估结果

中点指标	前处理电泳	密封胶	面漆	注蜡	公用动力
GWP/kg CO <sub>2</sub> e	82.7	40.4	126.0	5.2	163.0
ETP/kg 1,4-DCBe	108.8	9.1	140.6	6.5	92.0
HTP/kg 1,4-DCBe	45.7	210.8	47.7	2.3	38.0
FDP/kg oil e	23.8	15.8	31.7	3.3	33.8

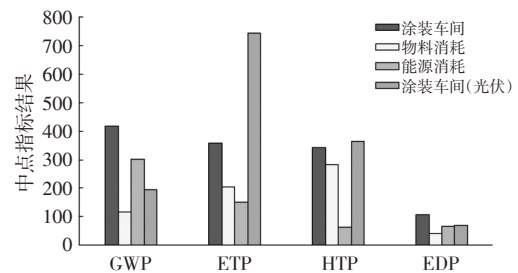


图2 涂装车间整体生产过程的环境影响评估结果对比

### 3.4.2 涂装车间各工序和单元产生的环境影响

基于表4的数据,单台涂装车身在涂装车间生产过程中各主要工序和单元产生的环境影响如图3所示。从图3中可以看出,单台涂装车身在涂装生产各主要工序和单元中:公用动力对GWP和FDP的贡献最大,然后依次是面漆、前处理电泳、密封胶和注蜡;面漆工序对ETP的贡献最高,然后依次是前处理电泳、公用动力、密封胶和注蜡;密

密封胶工序对 HTP 贡献最高,然后依次是面漆、前处理电泳、公用动力和注蜡。从表 1 和表 2 的数据中可以看出,公用动力(如制冷站和供风单元等)、面漆(含喷漆室、面漆烘房及 KPR)以及前处理电泳(含前处理槽、电泳槽及电泳烘房)工序在生产过程中消耗的电能、天然气以及排放的 CO<sub>2</sub> 最多,因而对 GWP 和 FDP 的贡献最高。而面漆、密封胶及前处理电泳工序因在生产过程中使用大量化学品(如油漆、清洗剂、密封胶等)以及产生非甲烷总烃(VOC)和废水并排放到生态环境中,因而对 ETP 和 HTP 的贡献更显著。

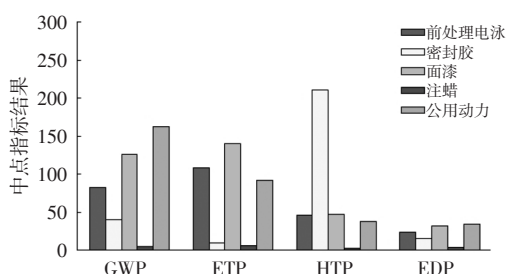


图3 涂装车间生产过程中各主要工序和单元的环境影响评估结果对比

#### 4 结束语

本文通过生命周期评估法,追踪了整车涂装生产过程中主要物料、能源的使用及其产生的排放所形成的包括碳足迹在内的重要环境足迹,利用全球变暖潜能值、生态毒性潜能值、人体毒性潜能值及化石枯竭潜能值定量评估了单台涂装车身在涂装车间生产过程中对环境产生的影响。从本文的 LCA 研究中可以得出:在涂装生产过程中能源消耗及其产生的排放对气候变化和化石资源枯竭的影响更为显著,而物料消耗及其产生的排放对生态毒性和人体毒性的影响更为显著;在涂装生产各主要工序和单元中,公用动力、面漆和前处理电泳工序对气候变化和化石资源枯竭的影响最为显著,而面漆、密封胶及前处理电泳工序对生态毒性和人体毒性的影响最为显著;此外,如果涂装

生产过程中使用的电能完全来源于光伏发电,则相比于传统电网供电,对气候变化和化石资源枯竭的影响更低,对生态毒性和人体毒性的影响更显著。因此,在涂装生产过程中,为减少对气候变化和化石资源枯竭产生的影响,应控制电能及天然气的消耗,尤其是用电量和天然气耗量占比较大的工艺过程。此外,应大力推广可再生能源,以减少电能消耗和其他能源需求过程对环境产生的影响。为减少对生态毒性和人体毒性产生的影响,应控制对环境影响较大的原料(如油漆、清洗剂、密封胶等)的用量以及替代为更环保绿色的原料。

#### 参考文献:

- [1] Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework: ISO 14040: 2006[S/OL]. [2023-08-22]. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- [2] Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines: ISO 14044: 2006[S/OL]. [2023-08-22]. <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- [3] KLÖPFER W, GRAHL B. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21: 1063-1066.
- [4] FINKBEINER M, INABA A, TAN R, et al. The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 80-85.
- [5] HAUSCHILD M Z, HUIJBREGTS M A J. Introducing Life Cycle Impact Assessment[M]. Springer, 2015: 1-16.
- [6] HUIJBREGTS M A J, STEINMANN Z J N, ELSHOUT P M F, et al. ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(2): 138-147.
- [7] 瞿露,付宏祥,汪诚文,等.我国太阳能电池板生产中的环境污染问题[J].环境工程,2013,31(1):398-400+628.