

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.08.001

# 废矿物油再生工艺生命周期评价及其不确定性研究

熊鸿斌, 丁涛

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章基于生命周期评价(life cycle assessment, LCA)法对以 N-甲基吡咯烷酮(N-Methylpyrrolidone, NMP)为溶剂精制再生废矿物油工艺的环境影响进行分析,并与传统的减压蒸馏再生废矿物油工艺进行比较;对 NMP 精制工艺清单数据在正态分布范围内的 LCA 结果进行 Monte Carlo 不确定性分析。结果表明: NMP 精制工艺主要的中点环境影响类别为呼吸系统无机物、全球变暖潜势和不可再生资源,端点影响类别为人类健康,总环境影响相比于传统的减压蒸馏工艺降低 18.74%,说明 NMP 精制工艺对环境更加友好; NMP 精制工艺不确定性分析结果中,多个影响类别的变异系数超过 15%,说明参数的不确定性对 LCA 结果具有不可忽视的影响。LCA 法可以准确识别废矿物油再生工艺的环境影响与贡献水平,并根据不确定性与敏感性分析结果为后续工艺的改进与研究提供环境影响方面的思路与方法。

**关键词:**生命周期评价(LCA);废矿物油;再生工艺;环境影响;不确定性

**中图分类号:**X820.3;X742 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)08-1009-09

## Life cycle assessment of waste mineral oil regeneration process and uncertainty analysis

XIONG Hongbin, DING Tao

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper is based on the life cycle assessment(LCA) method to analyze the environmental impact of the process of waste mineral oil regeneration by solvent refining with N-Methylpyrrolidone(NMP) and to compare this process with the conventional process of waste mineral oil regeneration by reduced-pressure distillation. The results of the LCA are also analyzed for uncertainty in the range of normal distribution for the NMP refining process inventory data. The results indicate that the main midpoint environmental impact categories of the NMP refining process include respiratory inorganic substances, global warming potential and nonrenewable resources, and the endpoint impact category is human health. The total environmental impact of the NMP refining process is 18.74% lower than that of traditional reduced-pressure distillation process, indicating that the NMP refining process is more environmentally friendly. The results of Monte Carlo uncertainty analysis of NMP refining process show that the coefficient of variation of several impact categories exceeds 15%, indicating that the uncertainty of parameters has a non-negligible effect on the LCA evaluation results. The LCA evaluation method can accurately identify the environmental impact and contribution level of the waste mineral oil regeneration process, and provide ideas and methods for subsequent process improvement and research based on the results of the uncertainty and sensitivity analysis.

**Key words:** life cycle assessment(LCA); waste mineral oil; regeneration process; environmental impact; uncertainty

收稿日期:2022-07-19;修回日期:2022-09-29

基金项目:安徽省科技攻关计划重大科技专项资助项目(08010302114)

作者简介:熊鸿斌(1963—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

废矿物油是指由于矿物油中原有的物理化学特性发生改变而不能继续使用的矿物油<sup>[1]</sup>。2013 年我国废矿物油的产生量达到  $624 \times 10^4$  t, 2019 年增加到  $760 \times 10^4$  t<sup>[2]</sup>。废矿物油中含有多种重金属元素、苯系物和多环芳烃等<sup>[3]</sup>, 研究发现, 随意倾倒 1 t 废矿物油会污染 106 t 饮用水, 会对人体健康和生态环境造成严重危害<sup>[4]</sup>, 我国早在 1998 年就将其列入《国家危险废物名录》中编号为 HW08 的危险废物<sup>[5]</sup>。废润滑油是废矿物油中的主要类别之一, 其中可回收为基础油的组分<sup>[6]</sup> 可达到 65%~75%, 具有很高的回收价值, 因此有必要对废矿物油进行再生利用, 以应对不断增长的废油量与能源需求。

目前, 废矿物油再生是以精制为主的, 通过精制技术将其再生为基础油产品, 工业上常用的工艺有物理精制、化学精制和溶剂精制 3 种工艺<sup>[7]</sup>。传统的化学精制工艺是以硫酸-白土工艺为主, 通过硫酸与废油中的非理想组分进行反应将其去除<sup>[8]</sup>; 物理精制工艺通常以蒸馏为主, 如薄膜蒸馏、减压蒸馏等, 不需要另外投加化学试剂等; 溶剂精制工艺使用 N-甲基吡咯烷酮(N-Methylpyrrolidone, NMP)、丙烷和糠醛等溶剂与油品按一定比例混合, 将废油中的非理性组分溶解而保留难容的理想组分, 其精制过程不产生新的污染组分, 具有出油质量好、溶剂可回收等优点, 被逐渐重视起来。

近年来, 国内外对废矿物油再生工艺技术的相关研究较多, 但对废矿物油再生工艺环境影响的研究很少。不同工艺技术在原料和出油质量方面相近, 但是不同的工艺过程以及能耗、物耗和污染物排放等方面的差异会产生不同的环境影响, 有必要从环境角度对废矿物油再生工艺进行可持续的管理。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)法是目前分析环境影响的最有效方法之一, 具有过程清晰简便、整体性和目的性强、结果可靠等优点, 被越来越多地用于废物管理系统中。与其他环境分析方法相比, LCA 法可以系统评估与识别生产过程中的环境变化, 量化消耗和排放对人类健康和自然环境的影响, 从而可根据分析结果有针对性地提出改善环境负荷的策略<sup>[9]</sup>。目前有关废矿物油再生工艺 LCA 研究的报道较少。文献[10]对西班牙某丙烷精制废油工艺进行 LCA 分析, 将全球变暖潜势、酸化和毒性作为影响类别, 结果表明, 每生产 1 t 基础油会产生 363 g CO<sub>2</sub> eq, 与

传统的炼油工艺相比更加环保; 文献[11]对运输、转运和精炼方案与运输和精炼方案进行 LCA 评估, 通过 18 个可持续性指标可以清晰分析不同管理方案在环境绩效、社会效应和经济成本之间的差异。

由于 LCA 是围绕研究的清单数据、系统边界和评价体系的选择而展开的, 难免会由于参数不确定性、场景不确定性和模型不确定性最终使 LCA 结果产生不确定性, 而当模型确定后, 不确定性主要来自参数的不确定性<sup>[12]</sup>。许多研究, 包括废矿物油再生工艺的 LCA 研究, 都没有考虑到不确定性对分析结果的影响; 若忽视该影响, 则会降低其可信度, 从而很难得到可靠的结论, 因此量化不确定性以及解决不确定性对 LCA 结果的影响需要给予重视。

本文应用 LCA 法对六安市某企业 NMP 溶剂精制再生废矿物油工艺(简称“NMP 精制工艺”)进行环境影响分析, 识别该工艺在精制废矿物油过程中主要的环境影响类别与参数贡献, 与传统的减压蒸馏工艺进行生命周期环境影响比较; 研究 NMP 精制工艺输入参数对 LCA 结果的不确定性, 并进行参数敏感性分析, 研究主要的贡献赋值对 LCA 结果的量化影响。本文旨在为决策者制定环境友好的可持续性废矿物油处置与管理方案提供 LCA 方面清晰的视角。

## 1 研究方法

LCA 法在对工艺进行评估时, 考虑从原料获取、物耗、能耗、运输、污染物排放等整个从“摇篮”到“坟墓”的过程, 来识别潜在环境影响和贡献来源, 并从区域与全球性可持续发展的角度对工艺进行环境影响评估与比选, 弥补了传统工艺环境影响分析的局限性与片面性, 因而被广泛应用。LCA 法主要评价过程包括确定研究目标和范围、清单分析、影响评价与结果解释。当分析的产品复杂、流程繁琐和数据量较大时, 需要使用 LCA 分析软件来辅助分析, 本文使用目前被国内外广泛接受和使用的 SimaPro 9.0 软件<sup>[13]</sup>。

### 1.1 研究目标和范围

本文采用 LCA 法研究某废矿物油处理企业的处理工艺, 原工艺为传统的减压蒸馏再生废矿物油工艺(简称“减压蒸馏工艺”), 改建后为 NMP 精制工艺, 这 2 种工艺是目前国内使用较多的典型废矿物油再生工艺, 其进料指标相同, 处理后基础油品均达到文献[14]中的标准。本研究主要考

虑工艺运行期内物质输入与输出,未考虑末端固废处理等进一步过程。NMP 精制工艺和减压蒸馏工艺系统边界如图 1 所示。

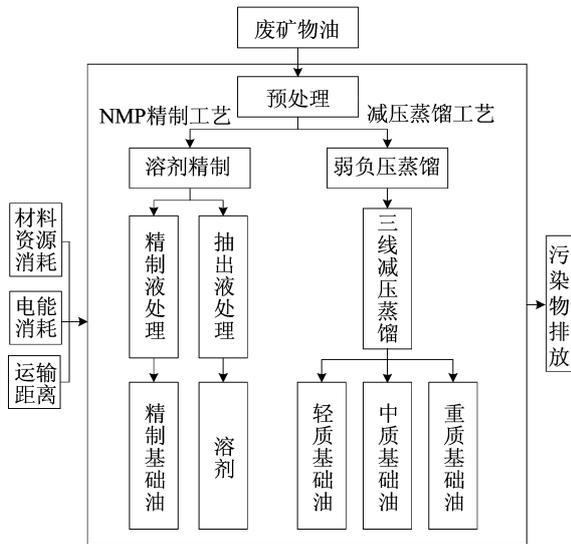


图 1 NMP 精制工艺和减压蒸馏工艺系统边界

1) NMP 精制工艺。从厂外收集的废矿物油运输到厂区,首先经过脱水和常压蒸馏的预处理,然后进入一效蒸发器中下部,NMP 溶剂经泵加压进入二效蒸发器中上部,控制温度在 65~70 °C,原料油与 NMP 溶剂在 2 个塔内逆向接触,NMP 溶剂自上而下萃取出原料油中的芳烃、环烷烃、胶质、沥青质等,与溶剂不溶或难溶的饱和烃从原料油中抽出,塔顶的精制液再经过闪蒸和臭氧汽提后得到成品油,塔底抽出液与汽提后精制液通过 NMP 溶剂回收再用。该工艺相较于蒸馏可以通过萃取很好地去除芳香烃、环烷烃等非理想组分,具有出油质量较高、溶剂可回收、不需要高温环境、能耗低等优点,但该工艺在精制过程中对原料油的质量要求高,且在精制过程中溶剂与原料油的质量比(剂油比)值较高,大量使用具有毒性的 NMP 溶剂会产生环境风险,溶剂的回收率也较低,需要不断优化投加量。

2) 减压蒸馏工艺。回收的废矿物油运输到厂区,首先经过滤器过滤,然后在抽真空的弱负压脱水塔内进行脱水,脱水后的废油进入加热至 395 °C 左右的减压蒸馏塔中进行减压蒸馏,得到塔顶的轻质基础油、中质基础油和塔底的重质基础油。该工艺相较于常压蒸馏可以在较低温度下将不同沸点的油类产品馏出,并可将废油中的沥青质、胶质等与油分离,工艺简单且设备不需要耐高温,但存在温度过高会导致设备结焦、真空环境

不稳定、能耗高、产品质量低等问题,目前多用于对产品质量要求不高的企业,若要提高质量,则需补充精制工艺。

1.2 输入的清单数据

根据系统边界的划定,为方便进行贡献分析,将输入的清单分为工艺污染物排放、运输距离、电能消耗和材料资源消耗 4 组。该企业每天处理近 164 t 的废矿物油,主要来自同城内收集,本文假设用载质量 10 t 的卡车,运输距离为 50 km,材料资源消耗、耗电量与工艺污染物的排放数据来自现场收集、环境影响报告书等。

通过 SimaPro 9.0 软件中的 Ecoinvent 3.5 LCA 数据库对输入的参数进行清单分析,主要包括:① 电能的清单数据,选择数据库中的中国高压混合电,其中包含生产 1 kW·h 所需要的火电、水电、风电等综合资源消耗及污染物的排放;② 工艺投加材料资源的生产数据;③ 运输距离,选择 7.5~16.0 t 卡车在公路运输的背景数据。以再生 1 kg 矿物油产品为功能单位,2 种工艺消耗的物质能源清单数据见表 1 所列。

表 1 NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺数据清单

项目	物质类别	NMP 精制工艺	减压蒸馏工艺
材料资源 消耗量/g	片碱	2.406	
	乙酸丁酯	0.034	
	PMA	0.045 3	
	消石灰	0.356	
	活性炭(粉)	0.382	
	尿素	0.245	
	水	0.177	0.566
	天然气		5.7×10 <sup>-6</sup>
电能消耗量/ (kW·h)		0.011 3	0.052 5
	运输距离/ km	50	50
工艺污染物 排放量/g	SO <sub>2</sub>	0.110	0.445
	NO <sub>2</sub>	0.108	
	NO <sub>x</sub>		0.867
	烟(粉)尘	0.019 5	0.032 9
	非甲烷总烃	0.105	0.113
	H <sub>2</sub> S	9.91×10 <sup>-4</sup>	
	NH <sub>3</sub> -N(空气中)	1.39×10 <sup>-3</sup>	
	COD	0.105	0.005 6
	NH <sub>3</sub> -N(水体中)	4.25×10 <sup>-3</sup>	0.001 4
	SS	7.32×10 <sup>-3</sup>	
总磷	4.72×10 <sup>-4</sup>		

注:以再生 1 kg 矿物油产品为功能单位;COD 表示化学需氧量(chemical oxygen demand);SS 表示悬浮物(suspended solids)。

### 1.3 生命周期影响评价体系

在进行 LCA 评价体系选择时,通常需要体系能够涵盖多种环境影响类别,并能够产生用于体现整体 LCA 结果的单一分数<sup>[15]</sup>,本文选用 IMPACT 2002+评价体系对 2 种工艺进行生命周期环境影响分析和不确定性分析,它是结合生态指标法 Eco-indicator 99、CML(Centre of Environmental Science of Leiden University,莱顿大学环境科学中心)和 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change,政府间气候变化专门委员会)3 种评价方法的综合性评价方法,相比之下分析结果更为可靠。

IMPACT 2002+评价体系包含 15 个特定的中点环境影响类别、4 个反映各个中点影响的环境流最终对人类和环境影响的端点指标,以及整体 LCA 结果的单一分数<sup>[16]</sup>。

15 个中点环境影响类别为致癌效应、非致癌效应、呼吸系统无机物、电离辐射、臭氧层耗竭、呼吸系统有机物、水体生态毒性、陆地生态毒性、土地酸化、土地占用、水体酸化、水体富营养化、全球变暖潜势、不可再生资源 and 矿产开采;4 个端点环境损害指标为人类健康、生态系统质量、资源耗竭和气候变化。

### 1.4 不确定性分析

为研究 LCA 结果的稳定性,对 NMP 精制工

艺整体 LCA 结果在符合正态分布内进行 Monte Carlo 分析。Monte Carlo 被广泛用于 LCA 结果的研究中<sup>[17]</sup>,可以模拟各种参数在统一、正态分布或对数正态分布下的变化,而 SimaPro 9.0 软件的 Ecoinvent 3.5 LCA 数据库中所有的数据遵循对数正态分布;在对数正态分布范围内可用的数据较少时可以使用较大的间隔<sup>[18]</sup>,本文参数正态分布间隔选择标准差的平方根为 2 范围。NMP 精制工艺清单分析中输入的运输距离、材料资源消耗、电能消耗和工艺污染物排放等数据决定整个 LCA 分析的结果,为从这些输入的数据参数变化中找寻改善工艺环境负担的最佳策略,建立相同的 LCA 评价情景进行敏感性分析,以确定参数变化时 LCA 分析结果的差异性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NMP 精制工艺生命周期环境影响分析

#### 2.1.1 特征化

特征化是将生命周期清单分析的结果根据不同的当量因子转化为各种环境影响潜值,如呼吸系统无机物是以  $PM_{2.5}$  为当量因子(以  $PM_{2.5}$  eq 表示),将清单中的  $NO_x$ 、粒径小于  $10 \mu m$  的粒子、 $SO_2$  等根据不同的系数转化为以  $PM_{2.5}$  表示的集合。NMP 精制工艺中点环境影响特征化结果见表 2 所列。

表 2 NMP 精制工艺中点影响类别特征化结果

影响类别	单位	工艺污染物排放	材料资源消耗	运输距离	电能消耗
致癌效应(Y1)	kg $C_2H_3Cl$ eq	0	$9.03E-04$	$7.80E-05$	$8.68E-05$
非致癌效应(Y2)	kg $C_2H_3Cl$ eq	$3.73E-07$	$4.51E-04$	$2.70E-04$	$2.84E-04$
呼吸系统无机物(Y3)	kg $PM_{2.5}$ eq	$2.57E-05$	$2.75E-05$	$1.15E-05$	$1.27E-05$
电离辐射(Y4)	Bq C-14 eq	0	$2.51E-01$	$6.10E-02$	$2.04E-02$
臭氧层耗竭(Y5)	kg CFC-11 eq	0	$4.16E-09$	$1.89E-09$	$8.45E-11$
呼吸系统有机物(Y6)	kg $C_2H_4$ eq	$6.31E-05$	$9.76E-06$	$4.96E-06$	$4.48E-07$
水体生态毒性(Y7)	kg TEG water	$5.44E-06$	2.90	1.22	3.20
陆地生态毒性(Y8)	kg TEG soil	$1.37E-05$	$6.54E-01$	$7.71E-01$	$6.74E-01$
土地酸化(Y9)	kg $SO_2$ eq	$7.25E-04$	$3.96E-04$	$1.98E-04$	$2.10E-04$
土地占用(Y10)	$m^2$ org. arable	0	$2.79E-04$	$5.72E-04$	$1.11E-04$
水体酸化(Y11)	kg $SO_2$ eq	$2.01E-04$	$1.20E-04$	$4.15E-05$	$5.48E-05$
水体富营养化(Y12)	kg $PO_4^{3-}$ P-lim	$3.77E-06$	$6.86E-06$	$2.14E-06$	$8.28E-07$
全球变暖潜势(Y13)	kg $CO_2$ eq	0	$2.27E-02$	$1.13E-02$	$1.03E-02$
不可再生资源(Y14)	MJ primary	0	$5.09E-01$	$1.81E-01$	$1.11E-01$
矿产开采(Y15)	MJ surplus	0	$1.15E-03$	$2.48E-04$	$2.97E-05$

注: eq 表示选择相应的物质作为当量因子; CFC-11 为一氟三氯甲烷; TEG 表示三甘醇(triethylene glycol); water 表示水体; soil 表示陆地; org. arable 表示有机耕地(organic arable); MJ 表示能源总量; P-lim 表示磷作为水体富营养化最相关化合物(P-limited); MJ primary 表示初级不可再生能源总量; MJ surplus 表示开采矿产资源所需的额外能源。下同。

由表 2 可知,工艺污染物排放虽然只对 8 个类别具有影响,但在具有影响的类别中所占比例都较大,其中对呼吸系统有机物、土地和水体酸化的影响为主要贡献者,占比分别为 80.63%、47.44%、48.18%;运输距离的环境影响主要体现在土地占用方面,占比为 59.46%;材料资源消耗在致癌风险、全球变暖潜势和不可再生资源等 9 个方面为主要贡献者,均达到 50%以上;电能消耗的影响主要在陆地和水生生态毒性方面,占比分别为 43.71%、32.14%。

### 2.1.2 标准化

由于各个环境影响指标之间单位不统一,无法比较哪个环境影响最高以及清单数据对工艺环境影响的贡献程度,将 15 个中点影响类别指标根据不同的基准值转化为同一单位进行标准化比较(以分数 Pt 表示),从而更直观地看出各指标的影响程度。NMP 精制工艺中点环境影响类别标准化结果如图 2 所示。

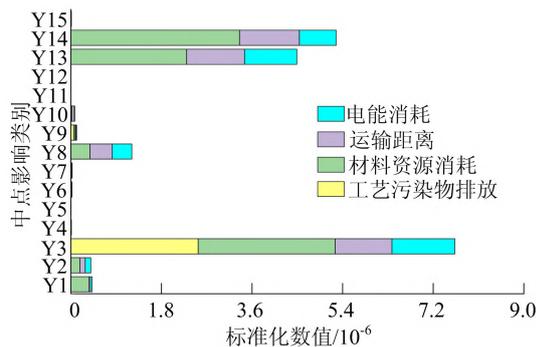


图 2 NMP 精制工艺中点环境影响标准化结果

从图 2 可以看出,NMP 精制工艺主要的中点环境影响类别为呼吸系统无机物、全球变暖潜势和不可再生资源。从清单角度分析造成呼吸系统无机物数值较高的原因,主要是工艺排放的污染物、电能消耗和化学试剂生产释放的  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  等造成的,其中工艺污染物排放和材料资源消耗为主要影响,占比分别为 36.44%、39.07%;全球变暖潜势的影响主要是材料资源消耗释放的  $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$  等,同时由于我国电力大部分来自火电,化石燃料使用过多从而导致  $CO_2$  等温室气体的排放量较大<sup>[19]</sup>;材料资源生产与电能生产中消耗的天然气和煤炭资源是造成不可再生资源影响较高的主要原因;另外,土地占用的占比不高,但考虑提高土地利用率和大规模生产时,其影响会扩大。根据企业建设数据得知,改建为 NMP 工艺后扩大产能,使废矿物油储存面积从  $800 m^2$

扩大到  $4990 m^2$ ,土地占用量增大,需要考虑从优化运输距离和收集频率等方面降低运输带来的土地占用问题;同时对于大面积的危险废物储存,在厂区选址时要关注其带来的环境风险、人体健康风险等问题。

### 2.1.3 环境损害影响与单一分数

IMPACT 2002+评价体系将 15 个中点环境影响归类为 4 个端点环境损害影响,即人类健康、生态系统质量、气候变化和资源耗竭;单一分数是所有影响类别标准化的加和,是工艺整体的 LCA 结果。NMP 精制工艺端点环境损害评价与单一分数结果见表 3 所列。由表 3 可知,4 组清单数据的端点环境损害及单一分数总量分别为:人类健康 ( $8.48E-06$ ) Pt;生态系统质量 ( $1.43E-06$ ) Pt;气候变化 ( $4.48E-06$ ) Pt;资源耗竭 ( $5.27E-06$ ) Pt;单一分数 ( $1.97E-05$ ) Pt。

表 3 NMP 精制工艺端点环境损害评价与单一分数 单位:Pt

影响类别	工艺污染物排放	材料资源消耗	运输距离	电能消耗
人类健康	$2.55E-06$	$3.26E-06$	$1.27E-06$	$1.40E-06$
生态系统质量	$5.51E-08$	$4.40E-07$	$5.10E-07$	$4.26E-07$
气候变化	0	$2.30E-06$	$1.15E-06$	$1.04E-06$
资源耗竭	0	$3.35E-06$	$1.19E-06$	$7.31E-07$
单一分数	$2.61E-06$	$9.35E-06$	$4.12E-06$	$3.60E-06$

1) NMP 精制工艺主要的环境损害在人类健康方面,占整体影响的 43.12%;从 2.1.2 节中点环境影响标准化结果分析可知,对人类健康影响过高的中点环境影响类别是呼吸系统无机物,其中包括  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  等物质。

2) 资源耗竭、气候变化,生态系统质量影响最低。其中资源耗竭的影响较高,占比为 26.80%,表明该工艺对化石能源具有一定的依赖性;气候变化影响是由全球变暖潜势构成的,其贡献来源与 2.1.2 节所述一致;生态系统质量影响主要是由于电能生产与运输中能源消耗过程释放重金属元素铝和锌,对水体和陆地生态毒性造成影响,从而最终影响生态系统质量。

## 2.2 NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺 LCA 比较

### 2.2.1 特征化与标准化对比

应用 IMPACT 2002+评价体系对 NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺清单分析结果进行特征化和标准化对比,分析 2 种工艺环境影响差异,结果见表 4 所列。

表 4 NMP 精制工艺和减压蒸馏工艺特征化对比

影响类别	单位	NMP 精制工艺	减压蒸馏工艺
致癌效应	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	1.07E-03	4.76E-04
非致癌效应	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	1.01E-03	1.51E-03
呼吸系统无机物	kg PM <sub>2.5</sub> eq	7.73E-05	1.07E-04
电离辐射	Bq C-14 eq	3.32E-01	1.73E-01
臭氧层耗竭	kg CFC-11 eq	6.13E-09	2.30E-09
呼吸系统有机物	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	7.83E-05	4.13E-05
水体生态毒性	kg TEG water	7.32	15.81
陆地生态毒性	kg TEG soil	2.10	3.83
土地酸化	kg SO <sub>2</sub> eq	1.53E-03	1.60E-03
土地占用	m <sup>2</sup> org. arable	9.62E-04	8.87E-04
水体酸化	kg SO <sub>2</sub> eq	4.17E-04	7.39E-04
水体富营养化	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> P-lim	1.36E-05	5.23E-06
全球变暖潜势	kg CO <sub>2</sub> eq	4.44E-02	5.82E-02
不可再生资源	MJ primary	8.00E-01	6.83E-01
矿产开采	MJ surplus	1.42E-03	3.30E-04

从表 4 可以看出,NMP 精制工艺在致癌效应、电离辐射、臭氧层耗竭等 7 个中点影响类别高于减压蒸馏工艺,在非致癌风险、呼吸系统无机物、全球变暖潜势等 8 个中点影响类别表现出更好的环境绩效。由于部分中点影响类别在 2 种工艺环境影响中均表现较低,通过标准化对 2 种工艺的中点影响类别进行进一步分析,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,2 种工艺主要的中点影响类别均是呼吸系统无机物、全球变暖潜势和不可

再生资源。减压蒸馏工艺运行的温度通常在 395 °C 左右,NO<sub>x</sub> 的生成和释放量较大,从而导致其呼吸系统无机物的影响高于 NMP 精制工艺;对于全球变暖潜势的影响,减压蒸馏工艺较高,表明该工艺对化石燃料的依赖程度相较于 NMP 精制工艺更高;而 NMP 精制工艺在材料资源消耗、电能消耗和运输距离方面的 LCA 背景数据中包含较多化石能源,因此其不可再生资源消耗高于减压蒸馏工艺。

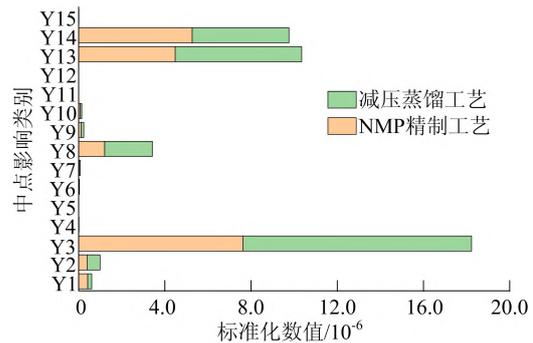


图 3 NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺中点影响标准化对比

2.2.2 环境损害与单一分数

NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺 4 个端点环境损害的贡献物质对比如图 4 所示。NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺 2 种工艺端点损害与单一分数对比见表 5 所列。

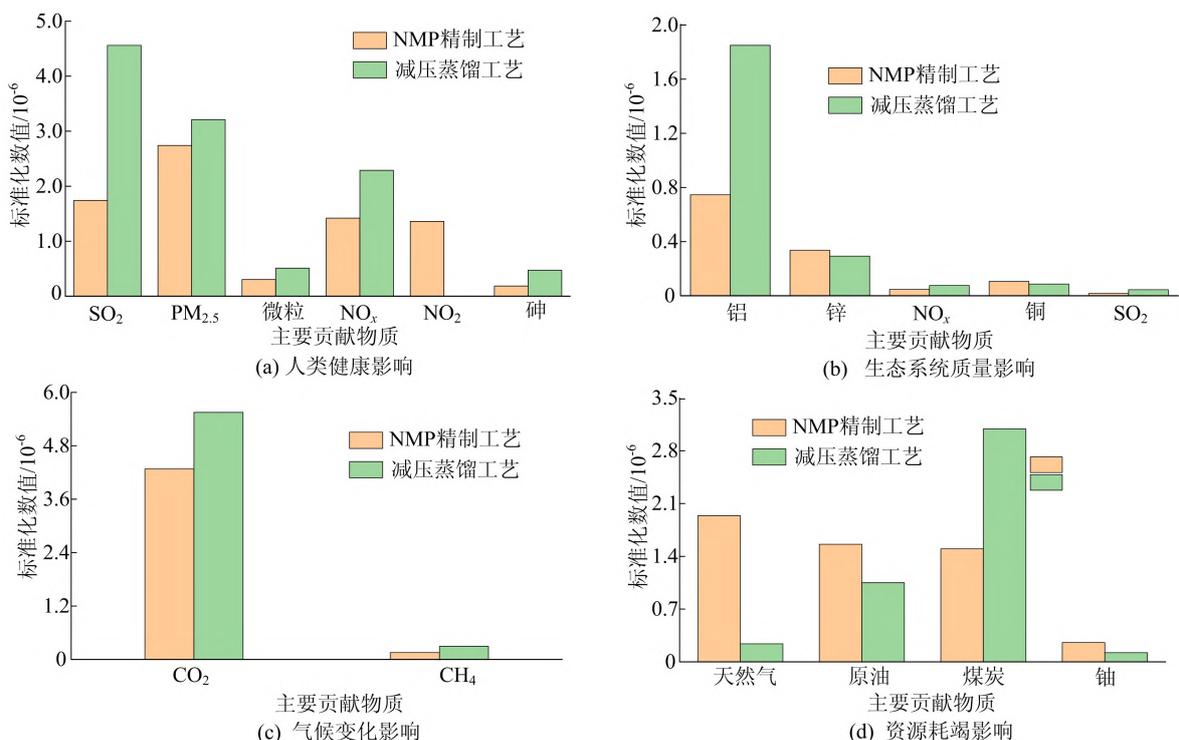


图 4 NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺 4 个端点环境损害的贡献物质对比

图 4 中,对 2 种工艺在 4 个端点环境损害影响类别中主要污染成分的贡献进行分析时,截取水平选择 1%,而贡献小于 1%的物质被认为是对各个过程具有很低的影响而可忽略<sup>[20]</sup>。图 4 中的物质是各个端点环境损害影响的最主要贡献来源,本文从清单角度的分析以这些贡献物质为基础,分析 2 种工艺造成环境影响的主要差异。

表 5 2 种工艺端点损害与单一分数对比 单位:Pt

影响类别	NMP 精制工艺	减压蒸馏工艺
人类健康	8.48E-06	1.14E-05
生态系统质量	1.43E-06	2.46E-06
气候变化	4.48E-06	5.87E-06
资源耗竭	5.27E-06	4.50E-06
单一分数	1.97E-05	2.42E-05

1) 在人类健康影响的主要贡献物质类别中,由于多个中点环境影响类别的累积,NMP 精制工艺比减压蒸馏工艺降低 25.45%;由图 4a 可知,影响人类健康的主要污染成分为 SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 NO<sub>x</sub>,而减压蒸馏工艺排放的 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 较多,导致该工艺的结果影响高于 NMP 精制工艺。

2) 在生态系统质量和气候变化方面,NMP 精制工艺同样表现出友好性,相较于减压蒸馏工艺分别降低 41.81%、23.68%;由图 4b、图 4c 可知,由于减压蒸馏工艺需要维持高温的操作条件,其大量电源消耗是导致该工艺铝和温室气体排放

较高的主要原因。

3) 对于矿产开采和不可再生资源构成的资源耗竭类别,由图 4d 可知,天然气、煤炭和原油等化石能源的较多使用,是造成 NMP 精制工艺的影响高于减压蒸馏工艺 17.32%的主要原因。

4) 通过对环境损害影响标准化加和,得到 2 种工艺整体的 LCA 结果单一分数,NMP 精制工艺为 (1.97E-05) Pt,减压蒸馏工艺为 (2.42E-05) Pt。由此可见,NMP 精制工艺在环境影响负荷方面相较于减压蒸馏工艺有较好的表现,总体降低 18.74%。

## 2.3 不确定性与敏感性分析

### 2.3.1 NMP 精制工艺不确定性分析

为了量化和分析判断由于不确定性输入数据的变化导致的 LCA 结果差异,对 NMP 精制工艺每类参数在各自的对数正态分布范围内进行 5 000 次符合概率统计的 Monte Carlo 分析,并在整个系统边界内传播,最终得到在 95%的置信区间内各个影响类别的标准差(standard deviation, SD)、变异系数(coefficient of variation, CV)和最大值,其中变异系数通常分为轻度变异(CV 小于 15%)、中度变异(CV 为 15%~36%)和高度变异(CV 大于 36%)3 个等级<sup>[21]</sup>。

计算过程在 SimaPro 9.0 软件中进行,分析结果见表 6 所列。

表 6 NMP 精制工艺中点影响类别特征化、端点环境损害评价和单一分数 Monte Carlo 模拟结果

影响类别	单位	SD	CV/%	2.50%	97.50%
水体酸化	kg SO <sub>2</sub> eq	6.08E-05	14.56	3.12E-04	5.48E-04
水体生态毒性	kg TEG water	1.42	19.48	4.99	10.46
水体富营养化	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> P-lim	2.21E-06	16.26	9.85E-06	1.86E-05
致癌效应	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	2.41E-04	22.50	6.90E-04	1.63E-03
全球变暖潜势	kg CO <sub>2</sub> eq	8.05E-03	18.15	3.08E-02	6.20E-02
电离辐射	Bq C-14 eq	6.56E-02	19.74	2.23E-01	4.82E-01
土地占用	m <sup>2</sup> org. arable	2.20E-04	22.88	6.11E-04	1.47E-03
矿产开采	MJ surplus	3.06E-04	21.46	9.32E-04	2.14E-03
非致癌效应	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	1.82E-04	18.10	6.96E-04	1.40E-03
不可再生资源	MJ primary	1.52E-01	19.03	5.50E-01	1.14
臭氧层耗竭	kg CFC-11 eq	1.20E-09	19.50	4.13E-09	8.82E-09
呼吸系统无机物	kg PM <sub>2.5</sub> eq	1.09E-05	14.15	5.85E-05	1.01E-04
呼吸系统有机物	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	2.28E-05	29.25	4.47E-05	1.33E-04
土地酸化	kg SO <sub>2</sub> eq	2.58E-04	16.89	1.10E-03	2.12E-03
陆地生态毒性	kg TEG soil	3.99E-01	19.02	1.43	2.99
气候变化	kg CO <sub>2</sub> eq	8.05E-03	18.15	3.08E-02	6.20E-02
生态系统质量	PDF · m <sup>2</sup> · a	3.58E-03	18.26	1.36E-02	2.76E-02
人类健康	DALY	8.62E-09	14.31	4.54E-08	7.92E-08
资源耗竭	MJ	1.53E-01	19.03	5.51E-01	1.15
单一分数	Pt	3.16E-06	16.04	1.44E-05	2.66E-05

注:PDF 表示物种潜在消失部分(potentially disappeared fraction);DALY 表示伤残调整生命年(disability-adjusted life years);2.5%、97.5%表示 95%置信区间的两端,表示较低或较高置信水平下的最值。

1) 从 CV 看,大多数影响类别的 CV 都超过 15%,其中致癌效应、土地占用、矿产开采和呼吸系统有机物的 CV 超过 20%,表明这些影响类别的变化对 LCA 结果具有较大的影响。

2) 从某一影响类别最好或最差情况即上下限看,在 95%置信区间下,NMP 精制工艺再生 1 kg 矿物油产品时,资源耗竭的影响在  $(5.51E-01) \sim 1.15 \text{ MJ primary}$  之间,最好和最差值相差 1 倍以上;全球变暖潜势的影响范围在  $(3.08E-02) \sim (6.20E-02) \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$  之间,同样相差 1 倍以上;整体 LCA 结果的单一分数范围在  $(1.44E-05) \sim (2.66E-05) \text{ Pt}$  之间,上下限相差 84.72%。

Monte Carlo 分析结果反映了 LCA 清单输入的数据对 LCA 结果的影响,一般认为输入参数的不确定性对整个 LCA 结果的影响是有限的,但是进一步研究是有必要的,在工艺实际 LCA 分析中,不能只关注各个确定的 LCA 输出数据,还需要注意工艺参数不确定性带来的影响与波动以及对不确定性来源的识别与解决。

### 2.3.2 敏感性分析

敏感性分析是为了识别 LCA 评价过程中主要的贡献来源,并通过数据的变化来体现其对 LCA 结果不确定性的影响。本文通过对输入的清单数据进行范围赋值,分析参数的变化是如何影响 LCA 结果的。NMP 精制工艺输入的清单数据在  $\pm 30\%$  范围下,端点环境损害和单一分数与原 LCA 结果相比,敏感性分析结果见表 7 所列。

表 7 端点环境损害与单一分数敏感性分析结果 %

影响类别	工艺污染物排放	材料资源消耗	运输距离	电能消耗
人类健康	$\pm 9.03$	$\pm 11.54$	$\pm 4.50$	$\pm 4.94$
生态系统质量	$\pm 1.15$	$\pm 9.23$	$\pm 10.69$	$\pm 8.93$
气候变化	0	$\pm 15.36$	$\pm 7.66$	$\pm 6.97$
资源耗竭	0	$\pm 19.08$	$\pm 6.76$	$\pm 4.16$
单一分数	$\pm 3.98$	$\pm 14.26$	$\pm 6.28$	$\pm 5.48$

从 LCA 单一分数看,材料资源消耗的波动范围最大达到  $\pm 14.26\%$ ,说明对于 NMP 精制工艺,主要的不确定性来自材料资源消耗,通过提高材料资源数据的质量来降低整体 LCA 结果不确定性的效果最好,同时减少化学试剂尤其是 NMP 溶剂的投加量,对改善整体环境负荷较好,但由于溶剂的投加配比难以改变,同时 NMP 溶剂回收率低,为了降低 NMP 溶剂使用带来的环境负荷,

需要考虑提高回收率,或研究使用相应的助溶剂,通过优化试剂的整体投加结构来实现;运输距离和电能消耗的敏感性变化较低,说明这 2 个数据的参数变化对整体 LCA 结果影响较小,从 NMP 精制工艺端点环境损害影响分析结果可知,它们的环境贡献体现在生态系统质量方面,而生态系统质量在整个工艺的环境影响负荷中占比较小,因此这 2 个参数的敏感性变化较低;最低不确定性贡献来自工艺污染物排放,作为工艺实际的污染输出,从中点环境影响分析结果可知,其人类健康影响的主要贡献来源于呼吸系统无机物,占比为 33.2%,因此主要的敏感性变化体现在人类健康方面。综上所述,通过敏感性分析,得到 NMP 精制工艺消耗的物质能源清单 4 组数据不确定性贡献从大到小依次为材料资源消耗、运输距离、电能消耗、工艺污染物排放。

另外,参数敏感性分析是基于参数变化区间对 LCA 结果的影响变化,可以进一步从参数角度分析对于降低工艺整体或者某一环境损害有效的方面。例如,六安市在“十四五”生态环境保护规划中指出,要优化运输距离、降低  $\text{PM}_{2.5}$  排放、加强生态环境治理、优化能源结构等<sup>[22]</sup>,结合环境影响贡献与敏感性分析可知,可以通过优化运输距离来降低运输带来的铝、锌和铜等释放对陆地生态毒性的影响,从而最终降低对生态系统质量的影响;同时从上述敏感性分析结果可知,使用节能设备降低电能消耗,从而降低生态系统质量影响也是较好的选择; $\text{PM}_{2.5}$  的排放主要来源于材料资源中 NMP 溶剂的背景数据,因此可以通过提升资源利用率、使用助溶剂等降低 NMP 溶剂的使用量,减少  $\text{PM}_{2.5}$  释放,从而减轻对人类健康的影响。

## 3 结 论

1) 本文使用 LCA 体系对 NMP 溶剂再生废矿物油工艺进行评价,识别主要环境影响类别、贡献来源,从生命周期环境影响优劣方面与传统的减压蒸馏工艺进行对比,并对 NMP 精制工艺进行 LCA 不确定性与敏感性分析,研究参数变化对生命周期结果的不确定性影响及贡献水平,整个评价流程和结果清晰简洁,可行性较好。

2) 对 NMP 精制工艺 LCA 评价结果表明,该工艺主要的中点环境影响类别为呼吸系统无机物、全球变暖潜势和不可再生资源;主要的端点损害类别为对人类健康的影响,占工艺总体影响的

43.12%,这是由过多的  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  物质释放造成的,同时资源耗竭影响较高,说明该工艺对化石能源具有一定的依赖性。材料资源消耗造成的影响是环境影响贡献的主要来源,为主要改进方向。与减压蒸馏工艺的 LCA 结果相比,NMP 精制工艺整体的环境影响降低 18.74%,主要体现在生态系统质量影响方面降低 41.81%,说明 NMP 精制工艺与减压蒸馏工艺相比,具有更好的环境友好性。

3) 对 NMP 精制工艺输入参数进行 Monte Carlo 不确定性研究,结果表明,多数影响类别的变异系数超过 15%,参数的不确定性对 LCA 结果具有不可忽视的影响;进一步的敏感性分析得出,参数不确定性情况下,选择一个理想的环境管理方向不是一个确定性的过程,例如当关注降低人类健康的影响时,不单是降低材料资源使用量方面,提高工艺污染防治效果也可以达到较好效果。

4) 本文采用 LCA 法研究废矿物油再生工艺的环境影响,在进一步的 LCA 研究中可以对工艺建造期、末端废弃物处置等数据进行收集分析,并关注输入数据的不确定性对 LCA 结果的影响,从而构建更加具体和系统的废矿物油再生工艺 LCA 评价体系。

### [参 考 文 献]

- [1] 国家危险废物名录(2021年版)[J]. 中华人民共和国国务院公报,2021(4):18-46.
- [2] 王秀腾,蒋文博,赵巍,等.我国废矿物油回收和再生利用行业的问题及标准化新趋势[J]. 资源再生,2020(5):29-32.
- [3] KANOKKANTAPONG V, KIATKITTIPONG W, PAN-YAPINYOPOL B, et al. Used lubricating oil management options based on life cycle thinking[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 53:294-299.
- [4] OSMAN D I, ATTIA S K, TAMAN A R. Recycling of used engine oil by different solvent[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2017, 27(2):221-225.
- [5] 国家危险废物名录[J]. 中国食品卫生杂志,1999(4):24.
- [6] ELFADEL M, KHOURY R. Strategies for vehicle waste-oil management: a case study[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 33:75-91.
- [7] KHEIREDDINE H A, EL-HALWAGI M M, ELBASHIR N O. A property-integration approach to solvent screening and conceptual design of solvent-extraction systems for recycling used lubricating oils[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2013, 15(1):35-44.
- [8] IZZA H, ABDESSALAM S B, BOUIDA M, et al. Recycling of used motor oil as an alternative method for production feedstock for the conversion processes[J]. Petroleum Science and Technology, 2018, 36(19):1511-1515.
- [9] MURESAN M, CORMOS C C, AGACHI P S. Comparative life cycle analysis for gasification-based hydrogen production systems[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6(1):18782-18790.
- [10] BOTAS J A, MORENO J, ESPADA J J, et al. Recycling of used lubricating oil: evaluation of environmental and energy performance by LCA[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 125:315-323.
- [11] ANTÓNIO T M Z, FLORISBAL D A C, LIE U C M, et al. Application of life cycle sustainability assessment to used lubricant oil management in South Brazilian Region[J]. Sustainability, 2021, 13(24):13583-13583.
- [12] IGOS E, BENETTO E, MEYER R, et al. How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(4):794-807.
- [13] 刘航驿,颜蓓蓓,林法伟,等.生命周期视角下 2 种餐厨垃圾资源化处理方案的对比分析[J]. 环境工程, 2021, 39(9):169-175.
- [14] 中国石油天然气集团公司石油产品销售及润滑剂专业标准化技术委员会. 通用润滑油基础油: Q/SY 44—2009[S]. 北京:石油工业出版社,2009:8-14.
- [15] MIMOSO A F, CARVALHO A, MENDES A N, et al. Roadmap for Environmental Impact Retrofit in chemical processes through the application of Life Cycle Assessment methods[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 90:128-141.
- [16] 潘媛,张华,朱硕,等.基于 IMPACT 2002+的机械加工过程资源环境影响评价方法研究[J]. 现代制造工程,2019(3):17-23,37.
- [17] QIN Y, SUH S. Method to decompose uncertainties in LCA results into contributing factors[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2021, 26(5):977-988.
- [18] MAURICE B, FRISCHKNECHT R, COELHO-SCHWIRTZ V, et al. Uncertainty analysis in life cycle inventory: application to the production of electricity with French coal power plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2000, 8:95-108.
- [19] 唐韬. 大力构建氢能社会是实现碳中和的重要手段[J]. 中国市场, 2022(6):12-13.
- [20] ABUSOGLU A, OZAHİ E, KUTLAR A I, et al. Life cycle assessment(LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:1684-1692.
- [21] 陈宝剑. 基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属生态风险评估与健康风险评估研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [22] 六安市人民政府办公室关于印发六安市“十四五”生态环境保护规划的通知[EB/OL]. (2022-03-04)[2022-09-01]. <https://www.luan.gov.cn/public/6608171/9901072.html>.

(责任编辑 张淑艳)