



膜科学与技术

Membrane Science and Technology

ISSN 1007-8924, CN 62-1049/TB

《膜科学与技术》网络首发论文

题目：反渗透膜废弃阶段生命周期评价的研究进展
作者：黄思怡，刘长灏，冯英楠
收稿日期：2024-02-26
网络首发日期：2024-07-03
引用格式：黄思怡，刘长灏，冯英楠. 反渗透膜废弃阶段生命周期评价的研究进展 [J/OL]. 膜科学与技术. <https://link.cnki.net/urlid/62.1049.TB.20240702.1650.008>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

反渗透膜废弃阶段生命周期评价的研究进展

黄思怡, 刘长灏*, 冯英楠

(北京理工大学 化学与化工学院, 北京 102488)

摘要: 反渗透 (RO) 技术被广泛应用于水处理领域, 在海水淡化及废水处理中均发挥着重要作用。随着 RO 技术应用规模日益扩大, 产生了大量的废旧 RO 膜, 大部分被填埋或焚烧处理, 造成环境污染的同时还浪费资源。归纳了当前废旧 RO 膜资源化利用的方式, 包括再利用、再循环和能量回收; 基于生命周期评价 (LCA) 框架对 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究现状进行分析。结果表明, 废旧 RO 膜的资源化利用提高了 RO 脱盐的可持续性, 是建立 RO 膜产业循环经济系统的有效途径。目前, 针对废旧 RO 膜资源化利用的生命周期评价研究仍处于起步阶段, 亟待针对新兴废旧 RO 膜资源化利用技术的生命周期评价、多种废旧 RO 膜资源化利用方式的对比评价等问题展开研究。

关键词: 生命周期评价; 反渗透; 膜; 回收; 循环经济; 可持续性; 环境

中图分类号: X705; TQ 09

doi:

反渗透 (Reverse osmosis, RO) 技术因其操作简单、能耗较低及脱盐高效等特点, 已成为应用最广泛的脱盐技术^[1]。近年来, 全球海水淡化和苦咸水淡化规模不断增长, 预计在 2022—2027 年间将以约 8.1% 的复合年增长率增长^[2]。我国自然资源部在报告中指出, 我国 RO 海水淡化工程逐年增长, 截至 2022 年底, 我国 RO 海水淡化工程已达 153×10^4 t/d, 占总海水淡化工程规模的 64.91%^[3]。此外, RO 膜还被广泛应用于市政和工业废水处理、半导体以及制药工业超纯水制备等领域^[4]。

在 RO 膜水处理过程中, 由于不可避免的膜污染以及膜性能下降等问题, 需要定期更换膜组件。在苦咸水淡化和海水淡化中, RO 膜的平均年替代率为 10%~20%^[5-6]; 在工业废水和三级污水处理中, RO 膜的平均年替代率分别达到 25% 和 33%^[7]。实际 RO 膜的平均寿命在 5~7 年^[8]。因此, 每年都会产生大量的废旧 RO 膜, 并将随着 RO 膜应用规模的不断扩大而持续增长, 预计到 2025 年, 全球每年将产生超过 200 万个废旧 RO 膜^[9]。我国每年产生的 8 英寸 (0.2032 m) 废旧 RO 膜约有 45~65 万个^[4]。废旧 RO 膜主要被送至垃圾填埋场进行填埋处置^[10-11], 这不仅会占用大量土地资源^[1], 产生垃圾渗滤液^[12], 运输过程也会产生大量的温室气体。同时, RO 膜中可拆解回收利用的资源也未能有效利用, 不具有可持续性。由此可见, RO 膜废弃后的处置问题已成为制约膜产业持续发展的重要问题之一。

将 RO 膜的生命周期与循环经济理念有效结合, 构建 RO 膜的循环利用体系, 正受到高度关注^[13]。我国“十四五”工业绿色发展规划强调了促进资源利用循环化以及推动绿色低碳发展的任务^[14]。在这一背景下, 废旧 RO 膜的资源化利用成为 RO 膜废弃阶段进行科学处置的必然选择。目前, 已有许多研究探讨了废旧 RO 膜的资源化利用途径, 如清洗后直接再利用^[15-16]、化学改性后再循环使用^[17-19]以及回收废旧 RO 膜中的可再生材料和能量^[7,20]等。虽然废旧 RO 膜资源化利用已被证明具有技术可行性, 但这些技术的工业化应用仍受到环境影响和成本效益不明确、缺乏相关政策支持等因素制约。因此, 亟待对其开展环境影响研究, 从而为科学制定废旧 RO 膜的管理方案提供参考和理论方法的依据。生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一种被广泛应用于评价产品或生产活动相关环境影响的工具, 其结果对于建立 RO 膜循环利用体系, 实现膜产业的可持续发展具有重要作用。目前, 针对 RO 膜废弃后资源化利用的 LCA 研究正愈发受到关注, 但仍处于起步阶段, 缺乏系统标准的研究框架和流程。本文概述了废旧 RO

收稿日期: 2024-02-26; 修改稿收到日期: 2024-04-23

第一作者简介: 黄思怡 (2001-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为化学工程和产业生态学, E-mail: 409443919@qq.com. *通讯作者: E-mail: changhaoliu@126.com

膜资源化利用方式，系统归纳分析了 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究以及经济效益评价研究现状，并指出未来研究方向与挑战。

1 废旧反渗透膜资源化利用方式现状

目前市面上售卖的 RO 膜中约 90%都是薄膜复合聚酰胺（Thin Film Composite Polyamide, TFC-PA）膜^[21]。TFC-RO 膜通常由多层不同的高分子材料组装而成，即超薄致密的芳香聚酰胺选择层，多孔聚合物支撑层和无纺布支撑层^[22]。RO 膜组件还包括聚丙烯（PP）进料格网、聚酯渗透格网、丙烯晴丁二烯苯乙烯（ABS）制成的膜壳和端盖、玻璃纤维外壳和含有环氧类成分的胶合部件等^[23]。

为实现膜产业的可持续发展，需要基于循环经济理念，将 RO 膜设计制造-使用维护-废弃转变为 RO 膜设计制造-使用维护-再利用-回收利用的过程，如图 1 所示。为此，欧盟在 2008/98/EC 废物指令^[24]及其 2018 年修正案（2018/851 指令）中^[25]根据循环经济理念，建立了基于 4R 原则的废物管理等级体系，分别是减量化（Reduce）、再利用（Reuse）、再循环（Recycle）、再回收（Recovery），对应于该体系的 RO 膜管理等级体系如图 2 所示。其中减量化是指在 RO 膜制造阶段采用绿色设计，采用便于回收和降解的聚合物，如纤维素基^[26]、聚羟基脂肪酸酯^[27]、壳聚糖^[28]等。同时，在 RO 膜使用阶段通过进料预处理和定期检测清洗来预防和缓解污损，从而达到从源头减少污染和节约资源的目的。图中所体现的废旧 RO 膜的资源化利用方式可被具体分为再利用、直接循环利用、间接循环利用和能量回收^[23,29,30]。

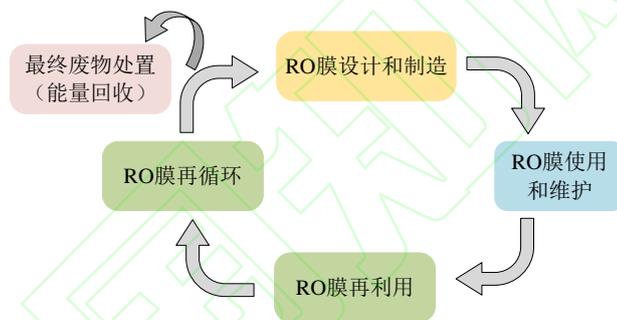


图 1 RO 膜循环经济示意图^[10]

Fig. 1 Circular economy in RO membrane^[10]

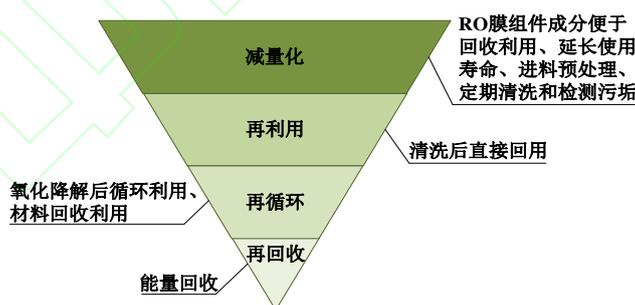


图 2 基于 4R 原则的 RO 膜废物管理等级体系

Fig. 2 Waste management hierarchy based on the 4R principle

1.1 再利用

再利用是指在不破坏废旧 RO 膜的结构以及选择层的前提下，通过物理或化学清洗去除大部分表面污染，从而进行再利用^[23]。Zheng 等^[31]通过紫外照射模拟 RO 膜的老化过程，发现老化后的 RO 膜呈现类似纳滤（Nanofiltration, NF）膜和超滤（Ultrafiltration, UF）膜的性能。这表明，废旧的 RO 膜可以在清洗去除污染后进行重复利用。

废旧 RO 膜的表面污染主要包括无机污染、有机污染、胶体污染和生物污染^[32]。由于膜污染物的多样性，需要根据膜材料结构特征、污染物特性以及清洗液的排放条件和造成的影响等信息建立适宜的清洗方案，废旧 RO 膜污染清洗基本采用化学清洗^[33]，有时与物理清洗结合能够进一步提高清洗的效率^[34]。表 1 给出了废旧 RO 膜表面污染常用的化学清洗方案^[16,33,35]。

表 1 废旧 RO 膜常用化学清洗方案

Table 1 Regular chemical cleaning methods for end-of-life RO membranes

污染类型	化学清洗方案	常用化学清洗剂
无机污染	碱、酸、表面活性剂、螯合剂	氢氧化钠、三聚磷酸钠、氢氧化铵、盐酸、柠檬酸、磷酸、十二烷基硫酸钠、乙二胺四乙酸
	碱、酸、表面活性剂	氢氧化钠、盐酸、十二烷基硫酸钠
有机污染	碱、酸、表面活性剂、螯合剂	氢氧化钠、十二烷基硫酸钠、乙二胺四乙酸
生物污染	碱、酸、杀菌剂、表面活性剂、螯合剂	氢氧化钠、柠檬酸、酶、亚硫酸氢钠、十二烷基硫酸钠、乙二胺四乙酸

辛海^[34]通过实验发现，清洗废旧 RO 膜的效果随着柠檬酸的浸泡时间增加而增加，同时，将超声和清洗剂结合共同清洗可以提高清洗效率。西班牙的 Life-Remembrance 项目^[36]中提出了一种常规的废旧 RO 膜清洗方案，即先使用碱性清洗剂（如 NaOH、磷酸盐、表面活性剂和螯合剂的混合物），之后使用酸性清洗剂（如 HCl 或 H₃PO₄）来清除表面污垢，如图 3 所示。清洗后的膜盐截留率会降低，纯水通量会增加，可以用于生活污水处理^[37]和垃圾渗滤液处理^[38]等过程。

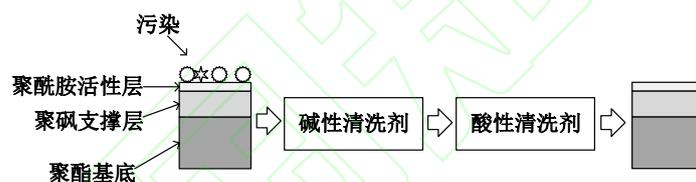


图 3 废旧 RO 膜化学清洗流程示意图

Fig. 3 Chemical cleaning process diagram of end-of-life RO membranes

1.2 再循环

再循环是将废旧 RO 膜进行加工，转化成其他产品或材料进行使用。对于常用的螺旋卷式 RO 膜，根据回收膜是否保留其原有的螺旋卷式结构，可以分为直接循环利用和间接循环利用两种类型^[13,23]。

1.2.1 直接循环利用

直接循环利用是在保留原有螺旋卷式结构的基础上，通过氧化剂部分或完全降解废旧 RO 膜的 PA 选择层，获得具有 NF 或 UF 等性能的多孔再生膜使用，如图 4 所示。黄延平等^[39]分析了氧化处理后的再生膜性能，研究发现，氧化后的废旧 RO 膜能够用于实际生产且具有一定的稳定性。García-Pacheco 等^[40]采用了 8 英寸的螺旋卷式 RO 膜，分别用 NaClO（游离氯质量分数 0.124%）、丙酮（质量分数 1%）或 *N*-甲基-2-吡咯烷酮（质量分数 1%）去除膜的 PA 层，结果发现利用 NaClO 溶液能够显著提高再生膜的透水性能。冯向东等^[41]用 NaClO、过硫酸钾、壳聚糖季铵盐作为氧化剂处理废旧 RO 膜，结果表明，NaClO 是最经济有效的氧化剂，氧化后的 RO 膜能够有效截留小分子有机物且具有良好的分离性能稳定性。Coutinho de Paula 等^[42]通过实验研究发现，NaClO 水浴比 KMnO₄ 水浴具有更高的物理和化学稳定性，并且可重复利用次数更多，更适用于工业应用，可以在一定程度上减少废水的产生。

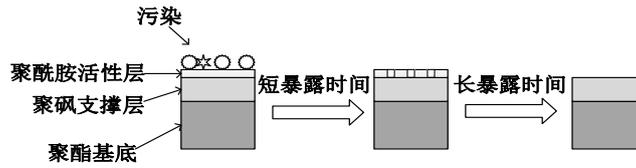


图 4 废旧 RO 膜氧化降解流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of oxidative degradation process of end-of-life RO membranes

García-Pacheco 等^[43]通过实验确定了利用 NaClO 将废旧 RO 膜转化到 NF 膜和 UF 膜的边界条件, 即当游离氯暴露剂量为质量分数 $0.1\% \cdot h$ 时, PA 层开始被降解, 当达到质量分数 $0.62\% \cdot h$ 时实现到 NF 膜的转化, 达到质量分数 $3\% \cdot h$ 时实现到 UF 膜的转化。这项研究为 RO 膜转化为 NF、UF 膜的氧化剂用量提供了参考。Morón-López 等^[44]将氧化后的膜应用于膜生物反应器中以去除微囊藻毒素, 该技术适用于处理地表水或富含营养物质的再生水^[45], 拓展了废旧 RO 膜循环利用的领域。Contreras-Martinez 等^[46]通过使用 NaClO 溶液以及界面聚合技术将废旧 RO 膜转化为正渗透 (Forward Osmosis, FO) 膜并应用于 FO 水处理过程, 所制膜展现出与相同条件下使用的商业膜相当或更优的性能。这证明了将废旧 RO 膜循环用于 FO 过程的可行性, 这种方式也有利于提高膜技术的可持续性。

1.2.2 间接循环利用

间接循环利用就是将废旧 RO 膜进行拆解, 通过机械或化学的方法将膜组件的各部分材料进行提取和回收^[23]。机械回收是将材料通过分拣、粉碎、熔融、挤出等过程加工成新产品^[22]; 化学回收通常是通过不同工艺下的降解实现的^[47]。这类工艺可以将聚合物转化为单体或其他副产物, 转化成的副产物可以用于生产化学品和燃料等^[48]。Souza dos Passos 等^[20]在碱性环境下对 ABS 进行亚临界水热液化, 最终得到由低聚物组成的油品。Liang 等^[49]发现, RO 膜组件在 600°C 下热解可以产生油 (质量分数 28%)、不凝性气体 (质量分数 17%) 和半焦 (质量分数 22%), 其中油和不凝性气体可以用作燃料和化工原料, 半焦是合成碳点的良好碳前驱体, 碳点在光催化、光电子学等方面有很高的应用潜力。Guclu 等^[50]在实验室中用 *N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF) 成功分离了聚酰胺、聚砜和聚酯, 结果得到了高纯度的聚砜和聚酯, 这为废旧 RO 膜膜的循环利用提供了更多的选择性。由于 PP 有高强度、耐热性和耐化学性, 通常在回收之后被用于容器和包装中^[51]。RO 膜组件中的 PET 渗透格网和 ABS 端盖、膜壳也可以被回收, 其中聚酯常被回收用于制造饮料容器^[23]。对于玻璃纤维来说, 通常的处理方式是进行焚烧和填埋^[52], 但也可以通过物理-机械回收方法将其转化为热固性材料^[53]。

1.3 能量回收

根据欧盟提出的废物管理等级, 固体废物热能的回收是废旧产品资源化利用的途径之一^[23]。国际能源署在《2023 年世界能源展望》^[54]中指出, 目前全球面临能源短缺问题, 而对于能源的需求仍处于高水平。因此, 实现能源回收利用势在必行。对废弃物进行热能回收, 不仅可以减少废弃物的体积, 还能推进能源回收利用^[13]。工业上常用的固体废弃物能量回收技术包括焚烧、热解和气化^[55]。Prince 等^[56]对分离后的废旧 RO 组件进行了热重分析, 结果表明在 900°C 以上燃烧, RO 膜组件的质量减少了 93%。Lawler 等^[57]将废旧 RO 膜部分氧化生成合成气, 合成气燃烧后将热能转化成电能, 实现了能量回收。Pontié 等^[7]通过热解将废旧 RO 膜片和 PP 进料格网转化为替代燃料, 结果表明, 热解过程可以使废物质量减少 48.5%, 同时 1t RO 组件可以生产 154 kg 的液态烃等液体燃料和 14.5 m^3 的气体燃料。热解和气化提供了与焚烧相似的电力生产能力, 同时避免了大量二噁英和呋喃等有毒有害物质的排放^[58]。

综上所述, 再利用方式操作简单且已有较为规范标准的清洗方案进行参考, 但是这种方法对于废旧 RO 膜的性能有较高要求。相较于再利用, 直接循环利用对废旧 RO 膜的性能要求较低, 而且得到的多孔再生膜应用范围较广, 但是该方法转化过程中通常涉及到额外的化学处理步骤, 会对环境造成潜在影响。间接循环利用可以回收废旧 RO 膜中可利用的材料, 但剩余部分仍难以回收实现充分利用。能量回收可以减少废物体积和回收能源, 但往往会产生大量排放, 从而造成环境影响。因此, 再利用和直接循环利用

通常被认为是较有前景的替代填埋的处置方式。

2 反渗透膜废弃阶段的生命周期评价

生命周期评价是目前广泛使用的环境管理工具，通过量化研究能量和资源的利用以及向空气、水和土壤的环境排放，来评估某一过程所造成的环境影响，是产品设计、生产工艺改进、环境政策制定和废弃物管理等的首选工具^[59]。根据 ISO 14040/14044 定义，LCA 框架被分为目的和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四个部分^[60-61]。LCA 的结果可为相关政策的制定和循环体系的建立提供科学依据。图 5 为 RO 膜废弃阶段的生命周期评价框架。表 2 归纳总结了目前反渗透膜废弃阶段生命周期评价研究的相关内容。在现有研究中，有研究初步分析对比了多种废旧 RO 膜处置方式的环境影响^[57,62]，有研究主要评估了一种新兴废旧 RO 膜间接循环利用的环境影响^[63]；还有部分研究在环境影响评估的基础上，从经济方面评估了废旧 RO 膜直接循环利用的效益^[9,64]。

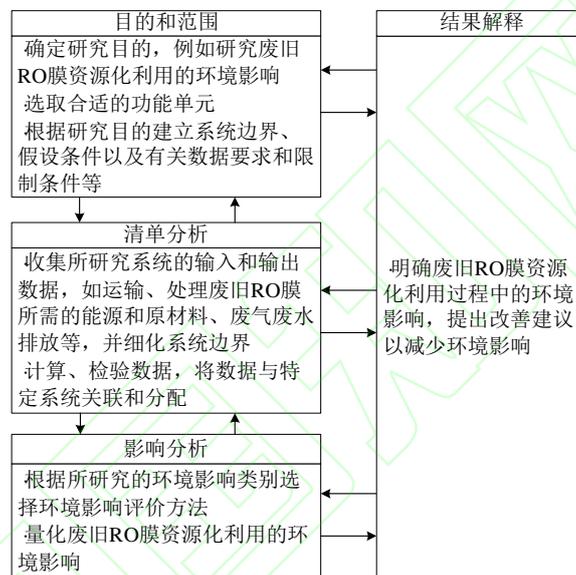


图 5 RO 膜废弃阶段的生命周期评价框架

Fig.5 Framework of life cycle assessment of RO membrane at abandonment stage

表 2 RO 膜废弃阶段生命周期评价研究

Table 2 Life cycle assessment of RO membrane at abandonment stage

年份	处置场景	功能单元	系统边界	数据库	软件	生命周期影响评价方法	环境影响类别	重要参数	文献
2012	填埋, 焚烧, 再利用, 回收组件, 能量回收	1 个 8 英寸 RO 膜 (37 m ²)	运输, 处置, 可利用资源生产	Ecoinvent AusLCI	-	-	-	-	[62]
2015	填埋, 焚烧, 气化, 电弧炉炼钢, 回收材料, 再利用, 转化为 UF 膜利用	1 个 8 英寸 RO 膜 (37 m ²)	运输, 处置, 可利用资源生产	Ecoinvent AusLCI	Simapro v8	ReCiPe- midpoint	2, 15	膜重复使用寿命、 运输距离	[57]

2019	PS BWRO 转化为 NF、UF 膜 SWRO 转化为 NF、UF 膜 AS BWRO 转化为 NF、UF 膜 SWRO 转化为 NF、UF 膜	1 个 8 英 寸 废 旧 TFC RO 膜 (37 m ²)	转化, 废水 处理, 再生 膜生产	Ecoinvent	OpenLCA 1.6.3	ILCD- midpoint	1-16	再生膜的 最小使用 寿命、使 用寿命比	[64]
2021	BWRO 转化为 NF 膜 BWRO 转化为 UF 膜 BWRO 和 SWRO 转化为 NF 膜	1 个 8 英 寸 废 旧 RO 膜(37 m ²)	收集, 表 征, 运输, 转化	Ecoinvent	OpenLCA 1.10	ILCD- midpoint	2, 4, 6, 13, 15	使用寿命 比	[9]
2022	BWRO 转化为 FO 膜 回收 PP、PET、 ABS	37 m ² 的 废 旧 BWRO 膜	收集, 运 输, 转化, 材料回收, 材料和膜 生产	Ecoinvent	OpenLCA 1.10	ILCD- midpoint, ILCD- endpoint	1-19	-	[63]

注: PS-被动浸泡; AS-主动循环; BWRO-苦咸水淡化反渗透膜; SWRO-海水淡化反渗透膜; 1-酸化; 2-全球变暖; 3-淡水富营养化; 4-海水富营养化; 5-人体毒性, 致癌; 6-人体毒性, 非致癌; 7-电离辐射, 生态系统; 8-电离辐射, 人体健康; 9-陆地生态毒性; 10-淡水生态毒性; 11-臭氧消耗; 12-光化学臭氧生产, 人体健康; 13-颗粒物/呼吸性无机物; 14-土地使用; 15-矿物、化石和可再生能源消耗; 16-水资源消耗; 17-生态系统; 18-人体健康; 19-总资源消耗。

2.1 目的和范围

目的和范围的确定是 LCA 的基础, 直接影响到评价的过程和最终的结论。在这一阶段需要明确开展 LCA 的目的、确定研究的系统边界和功能单元等^[59]。Lawler 等^[57]对比研究了多种废旧 RO 膜处置方式的生命周期环境影响, 选取了 1 个标准的 8 英寸薄膜复合 RO 膜作为 LCA 研究的功能单元。Senán-Salinas 等^[9,64]对比研究了将废旧 RO 膜转化为 NF 膜和 UF 膜再使用的环境影响和经济效益, 将 1 个标准的 8 英寸薄膜复合 RO 膜作为功能单元。Senán-Salinas 等^[63]研究了废旧 RO 膜转化为正渗透膜并回收其中的塑料组件的环境影响, 选取的功能单元为一个 8 英寸的苦咸水淡化 RO 膜。

系统边界的建立应根据研究的目的来确定。废旧 RO 膜处置阶段 LCA 的系统边界通常包括上游阶段 (电力生产, 原材料开采和生产, 机械、建筑及车辆建设)、处置阶段 (运输, 废旧 RO 膜处置, 废弃物处理, 环境排放, 可利用资源和电力回收) 以及通过可利用资源和电力生产抵消环境负荷。因此, 可以建立一般的 RO 膜废弃阶段的 LCA 系统边界, 如图 6 所示。

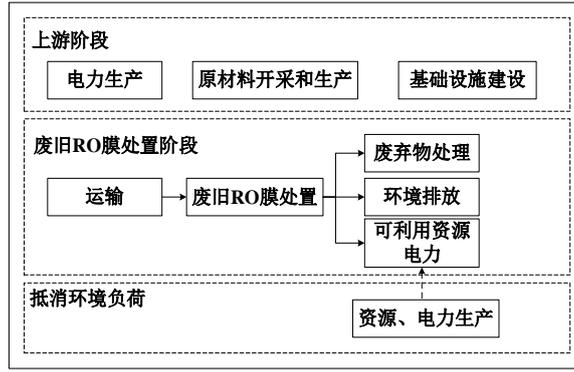


图 6 RO 膜废弃阶段 LCA 系统边界

Fig. 6 LCA system boundary of RO membrane at abandonment stage

2.2 清单分析

生命周期清单分析是进行数据收集整理，将所研究系统有关输入和输出量化的过程^[59]。RO 膜废弃阶段中主要输入清单包括废旧 RO 膜的运输、处理废旧 RO 膜所需的能源以及原材料的投入，输出清单包括过程中产生的可利用材料、电力、废气、废水和固体废弃物的排放。

在清单分析中，运输距离和再生膜的使用寿命是可能会影响评价结果的参数。有学者研究了运输距离对环境评价的影响。其中，Lawler 等^[57]研究发现，运输距离的长短对处置情景的环境评价结果有较大的影响，特别是对于再利用、直接循环利用和电弧炉炼钢这三种情景。相比于填埋、焚烧和气化，再利用、直接循环利用和电弧炉炼钢情景中运输过程有着更高的 CO₂ 排放占比。

在再生膜使用寿命 (SL) 方面，Lawler 等^[57]研究发现，当再利用的膜使用寿命超过 11 个月以及转化成 UF 膜的膜使用寿命超过 1.4 年的时候，再利用和直接循环利用这两种情景都比填埋有更高的环境效益。由于膜使用寿命的长短取决于多种因素，目前还无法进行标准化的检验，为了估计商业膜和再生膜的使用寿命，Senán-Salinas 等^[63]定义了两个新的指标：再生膜的最短使用寿命 (MSL) 和使用寿命比率 (SLR)，如式(1)-(3)所示。MSL 是用再生膜替代商业膜时更有利于环境所需的最短使用寿命的估计值。研究结果表明，将废旧苦咸水淡化 RO 膜转化为 NF 和 UF 膜以及废旧海水淡化 RO 膜转化为 NF 膜的情况下，再生膜的使用寿命长于商业膜的 1/14 时，这种资源化利用方式仍对环境有益。

$$Impact_{recycling} = Impact_{new} \cdot \left(\frac{SL_{recycled}}{SL_{new}} \cdot \frac{A_{recycled}}{A_{new}} \cdot \frac{L_{recycled}}{L_{new}} \right) \quad (1)$$

$$SLR = \frac{SL_{recycled}}{SL_{new}} = \frac{Impact_{recycling}}{Impact_{new} \cdot \left(\frac{A_{recycled}}{A_{new}} \cdot \frac{L_{recycled}}{L_{new}} \right)} \quad (2)$$

$$MSL_{recycled} = SL_{new} \cdot SLR = SL_{new} \cdot \frac{Impact_{recycling}}{Impact_{new} \cdot \left(\frac{A_{recycled}}{A_{new}} \cdot \frac{L_{recycled}}{L_{new}} \right)} \quad (3)$$

式中， $Impact_{recycling/new}$ 为生产一个再生膜/新商业膜的影响； $SL_{recycled/new}$ 为再生膜/商业膜使用寿命，单位为年； $A_{recycled/new}$ 为再生膜/商业膜的活性膜表面积，单位为 m²； $L_{recycled/new}$ 为再生膜/商业膜渗透性，单位为 $l \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot MPa^{-1}$ 。

目前很多新兴废旧 RO 膜资源化利用技术仍处于实验室规模阶段，由于实验室规模下的试剂用量以及实验设备都与工业规模下的不同，因此，仅依靠实验室规模下的清单数据进行研究会产生一定偏差。Piccinno 等^[65]提出了一种放大的框架以实现从实验室到工业化的 LCA 研究，即 (1) 建立实验室方案，该方案应记录实验室规模所涉及的所有步骤和数量的信息，这些信息可以通过实验室实验、出版物或专利文件中直接获取；(2) 根据 (1) 中的信息，设计工厂流程图，流程图应包括所有涉及的步骤以及规模、

反应器、仪器和主要设备,该文章中提供了用于设计基于放大的工厂流程图的指南;(3)对每个单独的过程步骤按照该框架程序进行放大;(4)关联和合并所有工艺步骤的输入输出数据;(5)运用获得的数据结果进行 LCA 研究,但这一框架仍需进一步的优化和扩展。

2.3 反渗透膜废弃阶段的环境影响评价

生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)是将环境影响定性定量的过程,一般分为分类、特征化和评价三个阶段^[59]。表 2 给出了目前 RO 膜废弃阶段 LCA 研究中所选的 LCIA 方法以及环境影响类别。由于 LCIA 方法覆盖范围不同以及表征模型多样,选择不同的 LCIA 方法可能会得到不同的结果。Zhou 等^[66]选取通用的 CML2 方法以及美国特定的 TRACI 方法,以研究不同的 LCIA 方法对环境评价结果的影响,结果表明,不同的 LCIA 方法在全球变暖和臭氧损耗等大尺度问题上影响较小,在酸化、富营养化、光化学氧化、人体健康和生态毒性等方面的影响可能较大。因此,应尽可能选择区域特定的 LCIA 方法,如果没有开发对应地区的方法,可以选择通用的 LCIA 方法,例如 CML 2001^[67]、ILCD^[68]、ReCiPe 2016^[69]等。CML 2001 是从中点(midpoint)层次展开,以问题为导向的方法,关注污染物排放对环境造成的潜在影响,以污染物当量表征环境影响^[70],包含人体毒性、酸化、非生物资源消耗等环境影响类别。同时,该模型对水体影响划分较细,包括淡水/海洋水体生态毒性、淡水/海洋沉积物生态毒性以及富营养化,但并未考虑水资源消耗问题^[71]。ILCD 是针对欧洲地区的 LCIA 方法,通过比较评估不同 LCIA 方法,根据定义的标准编制中点和终点(endpoint)的每个影响类别的推荐方法列表^[72,73],提出气候变化、酸化、富营养化、水资源耗竭等环境影响类别的建议。ReCiPe 2016 可以分别从中点和终点层次展开,终点层次以损害评估为主,关注污染物排放对生态环境、人体健康和资源造成的损伤^[70]。相比于 CML 2001 和 ILCD,ReCiPe 2016 包含了更多的中点影响类别,包括全球变暖、水资源消耗等 18 种类别,终点损害类别包括人体健康损害、生态系统损害以及资源耗竭。

Lawler 等^[57]对比研究了 7 种废旧 RO 膜的处置方式,采用了 ReCiPe-midpoint 方法,其影响类别指标直接来源于清单结果,然后选择通过全球变暖和化石燃料损耗这两个环境影响类别进行详细分析。结果表明,再利用情景的环境效益最高,转化为 UF 膜循环使用情景由于涉及到化学氧化的过程,其环境效益次之。同时,回收每千克的 PET 和 PP 能分别避免 0.93 和 1.25 kg 的 CO₂ 当量影响,接近于澳大利亚回收 PET 和 PP 效益的平均值。焚烧、气化以及电弧炉炼钢都可以通过回收能量以生产电力或焦炭炼钢来减少环境影响。因此,上述方式都有比填埋更高的环境效益,可以作为填埋的替代处置方式。Senán-Salinas 等^[64]对比研究了废旧 RO 膜转化为 UF 和 NF 膜的情景,以及主动循环转化(AS)和被动浸泡转化(PS)两种处理方式产生的差异,采用了 ILCD-midpoint 法,并利用聚类分析将 16 种环境影响类别进行分类,能够识别特定环境问题。结果表明,PS 是最环保的方式,且在 PS 的情况下将废旧 RO 膜转化为 NF、UF 膜均有良好的环境效益。Senán-Salinas 等^[9]结合地理信息系统评估了废旧 RO 膜直接循环利用的环境潜力,研究结果表明,与生产新膜相比,直接循环利用废旧 RO 膜具有巨大的环境潜力,循环利用每个膜组件可以避免 98.5~199 kg 的 CO₂ 当量影响。Senán-Salinas 等^[63]研究了一种新兴的间接循环利用方式的环境潜力,采用 ILCD-midpoint 和 ILCD-endpoint 进行分析。研究结果表明,除了电离辐射和淡水富营养化以外,其他中点和终点影响类别都显示出该方法具有良好的环境效益,但是从全球变暖来看,这种间接循环利用策略的环境效益低于直接循环利用。由上述研究可以发现,已有 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究针对多种废旧 RO 膜的处置方式以及单一资源化利用技术的环境影响评价进行了初步研究,其中仅有的资源化利用技术对比研究是在澳大利亚的背景下进行的,目前尚未见有关于我国废旧 RO 膜资源化利用 LCA 研究的报道。

2.4 反渗透膜废弃阶段的经济效益评价

为更加系统地评估废旧 RO 膜资源化利用方式,完善 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究,可在环境影响评价分析的基础上,进一步考虑经济成本,注重环境与经济的权衡。成本效益分析法是评估资源化利用技术经济可行性的有效工具^[74],能够量化整个过程的成本和效益,通过比较分析以确定最优方案。其中,生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)常用于分析成本效益。LCC 是一种基于生命周期理论,对研究对象生

命周期的经济成本和资本投入进行分析的方法^[75], 是公认且应用广泛的经济评估工具^[60,76]。

Coutinho de Paula 等^[77]对废旧 RO 膜直接循环利用过程进行了成本分析, 并与新膜的市场成本进行对比, 研究表明, 使用化学转化方式对废旧 RO 膜进行循环利用具有良好的经济收益, 可节约 98.9% 的资金。Morón-López 等^[11]将废旧 RO 膜作为可选择性去除微囊藻素的生物膜固定化载体, 根据实验室规模的结果做了放大设计, 通过计算资本性支出和运营支出的成本对放大后的系统进行经济性评估。研究表明, 这种方法和传统处理方法 (臭氧、颗粒活性炭、紫外线辐射) 以及传统的膜过滤方法 (RO 或 NF/RO) 相比成本更低。Senán-Salinas 等^[64]采用成本效果分析方法对废旧 RO 膜直接循环转化为 NF 膜和 UF 膜过程进行经济效益评估, 分析比较了在 PS 和 AS 情况下转化的成本差异, 结果表明, PS 的成本 (29.9~41.53 €/组件) 均小于 AS (54.5~73.35 €/组件)。Moreira 等^[78]比较了再生超滤膜 (UFR) 和浸没式超滤膜 (UFs) 以及加压式超滤膜 (UFp) 的成本效益, 通过计算资本性和运营成本, 利用净现值和收益率进行评估。研究表明, UFR 的成本 (0.623 \$/m³) 均低于 UFs (0.688 \$/m³) 和 UFp (0.627 \$/m³) 的成本。同时, UFR 的收益率 (45.66%) 也均高于 UFs (21.3%) 和 UFp (32.42%)。

在现有经济效益评估的研究中, 基本都计算了废旧 RO 膜资源化利用过程的经济成本, 即资本性 (设备建造购买、场地租赁等) 和运营支出 (维护、劳动力、能源使用、折旧成本等), 再通过收益率等指标进行评估。在生命周期成本分析中, 既包括内部成本 (经济成本), 也包括外部成本 (环境负荷带来的成本)。然而, 现有的研究尚未计算废旧 RO 膜资源化利用过程的外部成本, 忽略了环境负荷所带来的潜在经济成本, 这会导致不能更为系统的揭示最终的收益结果。

3 研究趋势展望

3.1 新兴废旧反渗透膜资源化利用技术的生命周期评价

近年来, 新兴的废旧 RO 膜资源化利用技术研究仅在实验室规模下验证了技术可行性, 对该类技术开展 LCA 研究, 能够通过识别过程的环境影响来为技术的优化提供方向。然而, 该类技术的实验数据有限且缺乏工业化放大经验。因此, 如何基于实验数据和生命周期思想, 利用化工过程建模、数值模拟以及机器学习等方法对新兴废旧 RO 膜资源化利用技术进行 LCA 研究还有待进一步研究。

3.2 废旧反渗透膜资源化利用方式的对比评价以及多维度的系统评价

目前废旧 RO 膜资源化利用方式不断发展, 但缺乏较为系统和标准的废旧 RO 膜管理方案。因此, 应对多种废旧 RO 膜资源化利用方式进行对比评价, 以便为建立更完善的废旧 RO 膜管理方案提供依据。此外, 单一的环境或经济维度的评价难以系统的揭示废旧 RO 膜资源化利用的工业化应用前景。现有 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究大都侧重于环境维度的评估, 经济维度评估不完善且缺乏社会维度评估。社会生命周期评价 (SLCA) 是一种新兴的评估产品或过程潜在的积极、消极的社会影响的方法^[79-80], 可将其用于社会效益的评价之中以建立多维度的 RO 膜废弃阶段的系统评价体系。

3.3 中国背景下废旧反渗透膜资源化利用方式的生命周期评价

现有的 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究基本都是基于国外的背景数据开展, 关于中国背景下 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究存在一定的空白。最主要的原因是缺乏统一完整、适用于中国国情的数据库和影响评价模型^[81], 这也是目前开展各领域 LCA 研究的共性问题。随着“双碳”目标的提出, 废弃物的循环利用正成为研究热点, 对 RO 膜废弃阶段开展本土化的 LCA 研究亟待进行。

3.4 废旧反渗透膜资源化利用方式的动态生命周期评价

废旧 RO 膜资源化利用会受到地区的废物管理政策、处置设施等因素影响, 其对环境造成的影响会随着时间和空间的改变而变化。在构建传统的静态清单分析基础上, 可以结合地理信息技术^[82]以及区域统计数据实现 LCA 的区域化, 从而达到进行动态生命周期评价的目的。动态的生命周期评价可以反映不同地区的废旧 RO 膜管理方案的环境影响以及预测废旧 RO 膜资源化利用的发展状况, 对建立符合地区情况的废旧 RO 膜管理政策具有指导意义。

4 结语

为提高 RO 膜的可持续性,亟需建立废旧 RO 膜的循环利用体系。迄今为止,已研究的废旧 RO 膜资源化利用方式可以分为再利用、直接循环利用、间接循环利用和能量回收,这些方式均已证明具有技术可行性。为验证工业应用可行性,还应进一步考虑其环境潜力和经济竞争力。已有废旧 RO 膜资源化利用的 LCA 研究主要集中于再利用和循环利用,并表明再利用和循环利用均具有良好的环境效益;同时还评估了运输距离和膜使用寿命对结果的影响。RO 膜废弃阶段的经济效益评价主要通过计算内部成本,即资本性和运营支出来评估,尚缺少对外部环境负荷带来的经济成本的考虑。今后,对废旧 RO 膜废弃阶段的 LCA 研究需要纳入更多的新兴资源化利用技术并进行多维度系统评价的对比分析。此外,还需建立统一完整、本土化数据库和评价模型,以评估中国背景下废旧 RO 膜资源化利用方式带来的环境影响,以及通过建立相关的动态 LCA 评价模型以便于开展更系统深入的研究。

参考文献:

- [1] Coutinho de Paula E, Amaral M C S. Extending the life-cycle of reverse osmosis membranes: A review[J]. *Waste Management & Research*, 2017, 35(5):456-470.
- [2] BCC Publishing. *Seawater and Brackish Water Desalination*[R]. BCC Research: Wellesley, MA, USA, 2022.
- [3] 自然资源部海洋战略规划与经济司. 2022 年全国海水利用报告[R]. 北京: 自然资源部, 2023.
- [4] 祝文哲, 陈逸琛, 代丹阳, 等. 基于专家调查的我国旧 RO 膜回收利用及废弃膜处置市场研究[J]. *膜科学与技术*, 2022, 42(3):180-186.
- [5] 代丹阳, 陈逸琛, 祝文哲, 等. 废旧反渗透膜循环再利用研究现状与进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(4):2290-2297.
- [6] Greenlee L F, Lawler D F, Freeman B D, et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges[J]. *Water Research*, 2009, 43(9):2317-2348.
- [7] Pontié M, Awad S, Tazerout M, et al. Recycling and energy recovery solutions of end-of-life reverse osmosis (RO) membrane materials: a sustainable approach[J]. *Desalination*, 2017, 423:30-40.
- [8] Ziolkowska J R. Is desalination affordable? – Regional cost and price analysis[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29:1385-1397.
- [9] Senán-Salinas J, Blanco A, García-Pacheco R, et al. Prospective life cycle assessment and economic analysis of direct recycling of end-of-life reverse osmosis membranes based on geographic information systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282:124400.
- [10] Landaburu-Aguirre J, García-Pacheco R, Molina S, et al. Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination[J]. *Desalination*, 2016, 393:16-30.
- [11] Morón-López J, Nieto-Reyes L, Senán-Salinas J, et al. Recycled desalination membranes as a support material for biofilm development: A new approach for microcystin removal during water treatment[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 647:785-793.
- [12] Yang Z, Lü F, Zhang H, et al. Is incineration the terminator of plastics and microplastics?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401:123429.
- [13] Lejarazu-Larrañaga A, Landaburu-Aguirre J, Senán-Salinas J, et al. Thin film composite polyamide reverse osmosis membrane technology towards a circular economy[J]. *Membranes*, 2022, 12(9):864.
- [14] 工业和信息化部. “十四五”工业绿色发展规划[EB/OL]. [2023-12-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content_5655701.htm.
- [15] Ould Mohamedou E, Penate Suarez D B, Vince F, et al. New lives for old reverse osmosis (RO) membranes[J]. *Desalination*, 2010, 253:62-70.
- [16] 江海. 反渗透膜元件的清洗与再应用[D]. 天津: 天津城市建设学院, 2008.

- [17] García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, Terrero-Rodríguez P, et al. Validation of recycled membranes for treating brackish water at pilot scale[J]. *Desalination*, 2018, 433:199-208.
- [18] Moradi M R, Pihlajamäki A, Hesampour M, et al. End-of-life RO membranes recycling: Reuse as NF membranes by polyelectrolyte layer-by-layer deposition[J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 584:300-308.
- [19] Khoo Y S, Lau W J, Hasan S W, et al. New approach of recycling end-of-life reverse osmosis membranes via sonication for microfiltration process[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(6):106731.
- [20] Souza Dos Passos J, Glasius M, Biller P. Screening of common synthetic polymers for depolymerization by subcritical hydrothermal liquefaction[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 139:371-379.
- [21] Lu X L, Elimelech M. Fabrication of desalination membranes by interfacial polymerization: history, current efforts, and future directions[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(11):6290-6307.
- [22] Ng Z C, Lau W J, Matsuura T, et al. Thin film nanocomposite RO membranes: Review on fabrication techniques and impacts of nanofiller characteristics on membrane properties[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 165:81-105.
- [23] García-Pacheco R, Lawler W, Landaburu-Aguirre J, et al. End-of-Life membranes: challenges and opportunities[A]. In: *Comprehensive Membrane Science and Engineering*[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2017:293-310.
- [24] European Commission (EC). Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives[J]. *Official Journal of the European Union*, 2008, L-312:3-30.
- [25] European Commission (EC). Directive 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on Waste Framework[J]. *Official Journal of the European Union*, 2018, L-150:109-140.
- [26] Prézélys F, Chabni D, Barna L, et al. A metrics-based approach to preparing sustainable membranes: application to ultrafiltration[J]. *Green Chemistry*, 2019, 21(16):4457-4469.
- [27] Tomietto P, Loulergue P, Paugam L, et al. Biobased polyhydroxyalkanoate (PHA) membranes: Structure/performance relationship[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 252:117419.
- [28] Urbina L, Guaresti O, Requies J, et al. Design of reusable novel membranes based on bacterial cellulose and chitosan for the filtration of copper in wastewaters[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 193:362-372.
- [29] Matin A, Laoui T, Falath W, et al. Fouling control in reverse osmosis for water desalination & reuse: Current practices & emerging environment-friendly technologies[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 765:142721.
- [30] Moreira V R, Lebron Y A R, Santos L V S, et al. Low-cost recycled end-of-life reverse osmosis membranes for water treatment at the point-of-use[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362:132495.
- [31] Zheng X, Chen Y C, Zheng L B, et al. Recycling of aged RO membranes as NF/UF membranes: Biosafety evaluation and aging process[J]. *Desalination*, 2022, 538:115845.
- [32] Contreras-Martínez J, Sanmartino J A, Khayet M, et al. Reuse and recycling of end-of-life reverse osmosis membranes[A]. In: *Advancement in Polymer-Based Membranes for Water Remediation*[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2022: 381-417.
- [33] 贾东. 反渗透膜污染类型分析及清洗方案制定的研究[J]. *煤炭与化工*, 2022, 45(12):149-152.
- [34] 辛海. 废弃聚酰胺反渗透膜的清洗和氧化降级研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [35] 覃浩律. 废弃卷式聚酰胺反渗透膜元件的再生及运行性能研究[D]. 湖南: 长沙理工大学, 2015.
- [36] FuturEnviro. Life + Remembrance: End-of-life recovery of reverse osmosis membranes[EB/OL]. [2023-10-25]. <https://futureenviro.es/liferemembrance-membranas-de-osmosis-inversa/>.
- [37] Giraldo Mejía H F, Toledo-Alarcón J, Rodríguez B, et al. Direct recycling of discarded reverse osmosis membranes for domestic wastewater treatment with a focus on water reuse[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 184:473-487.
- [38] Awaleh M O, Ahmed M M, Soubaneh Y D, et al. Wastewater reclamation using discarded reverse osmosis membranes for reuse in irrigation in Djibouti, an arid country[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(6):1362-1369.
- [39] 黄延平, 靖大为, 王文凤. 氧化改性型纳滤膜元件性能的稳定性分析[J]. *工业水处理*, 2015, 35(1):29-31.

- [40] García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, Molina S, et al. Transformation of end-of-life RO membranes into NF and UF membranes: evaluation of membrane performance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 495:305-315.
- [41] 冯向东, 黄旻旻, 吴雅琴, 等. 废弃反渗透膜改性再生及其性能研究[J]. *工业用水与废水*, 2022, 53(5):57-62.
- [42] Coutinho de Paula E, Gomes J C L, Amaral M C S. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes by oxidative treatment: a technical evaluation[J]. *Water Science and Technology*, 2017, 76(3):605-622.
- [43] García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, Lejarazu-Larrañaga A, et al. Free chlorine exposure dose (ppm·h) and its impact on RO membranes ageing and recycling potential[J]. *Desalination*, 2019, 457:133-143.
- [44] Morón-López J, Nieto-Reyes L, Aguado S, et al. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes for membrane biofilms reactors (MBfRs). Effect of chlorination on the membrane surface and gas permeability[J]. *Chemosphere*, 2019, 231:103-112.
- [45] Morón-López J, Molina S. Optimization of Recycled-Membrane Biofilm Reactor (R-MBfR) as a sustainable biological treatment for microcystins removal[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2020, 153:107422.
- [46] Contreras-Martínez J, García-Payo C, Arribas P, et al. Recycled reverse osmosis membranes for forward osmosis technology[J]. *Desalination*, 2021, 519:115312.
- [47] Ragaert K, Delva L, Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste[J]. *Waste Management*, 2017, 69:24-58.
- [48] Dios Caputto M D, Navarro R, Valentín J L, et al. Chemical upcycling of poly(ethylene terephthalate) waste: Moving to a circular model[J]. *Journal of Polymer Science*, 2022, 60(24):3269-3283.
- [49] Liang L L, Veksha A, Mohamed Amrad M, et al. Upcycling of exhausted reverse osmosis membranes into value-added pyrolysis products and carbon dots[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419:126472.
- [50] Guclu S, Kizildag N, Dizman B, et al. Solvent-based recovery of high purity polysulfone and polyester from end-of-life reverse osmosis membranes[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2022, 31:e00358.
- [51] Meran C, Ozturk O, Yuksel M. Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene[J]. *Materials & Design*, 2018, 29(3):701-705.
- [52] Cunliffe A M, Jones N, Williams P T. Recycling of fibre-reinforced polymeric waste by pyrolysis: thermo-gravimetric and bench-scale investigations[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, 70:315-338.
- [53] García D, Vegas I, Cacho I. Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 64:293-300.
- [54] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2023[EB/OL]. [2023-11-15]. <https://origin.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- [55] Antelava A, Damilos S, Hafeez S, et al. Plastic solid waste (PSW) in the context of life cycle assessment (LCA) and sustainable management[J]. *Environmental Management*, 2019, 64(2):230-244.
- [56] Prince C, Cran M, LeCleche P, et al. Reuse and recycling of used desalination membranes[A]. In *Proceedings of the OzWater'11*[C]. Adelaide, Australia, 2011.
- [57] Lawler W, Alvarez-Gaitan J, Leslie G, et al. Comparative life cycle assessment of end-of-life options for reverse osmosis membranes[J]. *Desalination*, 2015, 357:45-54.
- [58] Satiada M A, Calderon A. Comparative analysis of existing waste-to-energy reference plants for municipal solid waste[J]. *Cleaner Environmental Systems*, 2021, 3:100063.
- [59] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [60] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework[S]. Switzerland: ISO, 2006.
- [61] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines[S]. Switzerland: ISO, 2006.
- [62] Lawler W, Bradford-Hartke Z, Cran M J, et al. Towards new opportunities for reuse, recycling and disposal of used reverse

- osmosis membranes[J]. *Desalination*, 2012, 299:103-112.
- [63] Senán-Salinas J, Landaburu-Aguirre J, Contreras-Martinez J, et al. Life cycle assessment application for emerging membrane recycling technologies: from reverse osmosis into forward osmosis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 179:106075.
- [64] Senán-Salinas J, García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, et al. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes: comparative LCA and cost-effectiveness analysis at pilot scale[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 150:104423.
- [65] Piccinno F, Hischier R, Seeger S, et al. From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135:1085-1097.
- [66] Zhou J, Chang V W C, Fane A G. Environmental life cycle assessment of reverse osmosis desalination: The influence of different life cycle impact assessment methods on the characterization results[J]. *Desalination*, 2011, 283:227-236.
- [67] Guinée J B. Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2001, 7(5):311- 313.
- [68] European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability. International reference life cycle data system (ILCD) handbook: General guide for life cycle assessment detailed guidance[M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- [69] 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.
- [70] 谢明辉, 满贺诚, 段华波, 等. 生命周期影响评价方法及本地化研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6):2148-2156.
- [71] 马道天. 我国水足迹量化模型构建与应用研究[D]. 山东: 山东大学, 2020.
- [72] Owsianiak M, Laurent A, Bjørn A, et al. IMPACT 2002+, ReCiPe 2008 and ILCD's recommended practice for characterization modelling in life cycle impact assessment: a case study-based comparison[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(5):1007-1021.
- [73] 许安琪. 办公建筑冷热源全生命周期环境影响评价[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [74] Li J, Shao J L, Yao X L, et al. Life cycle analysis of the economic costs and environmental benefits of photovoltaic module waste recycling in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196:107027.
- [75] Cui L, Ba K M, Li F Q, et al. Life cycle assessment of ultra-low treatment for steel industry sintering flue gas emissions[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 725:138292.
- [76] Qiao L, Tang Y Z, Li Y, et al. Life cycle assessment of three typical recycled products from construction and demolition waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376:134139.
- [77] Coutinho de Paula E, Santos Amaral M C. Environmental and economic evaluation of end-of-life reverse osmosis membranes recycling by means of chemical conversion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194:85-93.
- [78] Moreira V R, Lebron Y A R, Coutinho de Paula E, et al. Recycled reverse osmosis membrane combined with pre-oxidation for improved arsenic removal from high turbidity waters and retrofit of conventional drinking water treatment process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321:127859.
- [79] Holger S, Jan K, Petra Z, et al. The social footprint of hydrogen production - A social life cycle assessment (S-LCA) of alkaline water electrolysis[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105:3038-3044.
- [80] Benoît-Norris C, Vickery-Niederman G, Valdivia S, et al. Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(7):682-690.
- [81] 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.
- [82] 田亚峻, 邓业林, 张岳玲, 等. 生命周期评价的发展新方向: 基于 GIS 的生命周期评价[J]. *化工学报*, 2016, 67(6):2195-2201.

Research Progress on Life Cycle Assessment of End-of-Life Reverse Osmosis Membrane

HUANG Siyi, LIU Changhao, FENG Yingnan

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

Abstract: Reverse osmosis (RO) technology is widely used in the field of water treatment, and plays an important role in desalination and wastewater treatment. While the scale of RO technology is expanding, a large number of end-of-life RO membranes are generated, most of which are disposed of in landfills or incinerated, causing environmental pollution and wasting resources at the same time. The current methods of managing end-of-life RO membranes, including reuse, recycling and energy recovery, were outlined according to the waste management hierarchy. And the current life cycle assessment (LCA) research on the abandonment stage of RO membranes was analyzed based on the LCA framework. The results indicate that the management of end-of-life RO membranes improves the sustainability of RO desalination, is an effective alternative to landfill, and is an effective way to introduce circular economy into RO membranes. Currently, the LCA for the management of end-of-life RO membranes is still in its infancy. It is urgent to carry out the life cycle assessment of emerging end-of-life RO membranes management technology, as well as the comparative life cycle assessment of the management of end-of-life RO membranes.

Keywords: life cycle assessment; reverse osmosis; membrane; recovery; circular economy; sustainability; environment