



化工进展
Chemical Industry and Engineering Progress
ISSN 1000-6613, CN 11-1954/TQ

《化工进展》网络首发论文

题目: 基于 LCA 的压裂返排液膜集成工艺碳足迹分析和环境影响评价
作者: 徐冰, 张倩, 吴欢欢, 邵光艺, 田淑雯, 柴文明, 张鸣, 姚宏
DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2123
收稿日期: 2023-11-30
网络首发日期: 2024-02-20
引用格式: 徐冰, 张倩, 吴欢欢, 邵光艺, 田淑雯, 柴文明, 张鸣, 姚宏. 基于 LCA 的压裂返排液膜集成工艺碳足迹分析和环境影响评价[J/OL]. 化工进展. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2123>



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。

文章类型：研究开发

DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2123

基于 LCA 的压裂返排液膜集成工艺碳足迹分析和环境影响评价

徐冰¹, 张倩¹, 吴欢欢^{1*}, 邵光艺¹, 田淑雯¹, 柴文明², 张鸣², 姚宏^{1*}

(¹北京交通大学环境学院, 智慧环境联合研究中心, “水中典型污染物控制与水质保障”北京市重点实验室, 智能交通绿色低碳技术教育部工程研究中心, 北京 100044; ²内蒙古理隆水务有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 页岩气从水力压裂开采过程中产生的压裂返排液具有污染物种类复杂, 总溶解性固体和重金属浓度高等特点。我国“双碳”目标的提出促使压裂返排液处理技术亟需低碳减排转型。膜分离技术作为一种节能减排关键低碳技术之一, 可减少工业领域 90% 的能耗。本研究基于“预处理-管式超滤-纳滤-电渗析-反渗透-机械蒸汽再压缩”膜集成工艺处理压裂返排液, 采用全生命周期评价对其物耗、能耗、碳足迹及环境影响评价进行分析, 结果表明: 该集成处理工艺的碳足迹为 86.7 kgCO₂ eq; 对于温室效应影响类别, 预处理、管式超滤膜、机械蒸汽再压缩的碳足迹贡献为 90.7%, 其原因是预处理阶段所投加的大量药剂以及管式超滤膜和机械蒸汽再压缩系统高频率运行所消耗的大量电能。针对温室效应指标及其他典型指标, 其影响因素敏感性大小为: 电力>碳酸钠药剂>氢氧化钠药剂, 因此管式超滤膜和机械蒸汽再压缩系统的合理高效运行可节约电力损耗, 保证该系统的低碳高效运行。本研究明确了预处理、管式超滤、机械蒸汽再压缩单元是压裂返排液处理工艺应重点关注的减污降碳环节。

收稿日期: 2023-11-30; 修改稿日期: 2024-02-04。

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (2023JBMC025); 国家自然科学基金 (22008005)。

第一作者: 徐冰 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境工程。E-mail: 490013696@qq.com

通信作者: 吴欢欢, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为纳滤膜研制及膜法废水处理。E-mail: wuhuanhuan@bjtu.edu.cn
姚宏, 教授, 博士生导师, 研究方向为工业水处理碳减排潜能研究。E-mail: yaohongts@163.com

关键词：压裂返排液；膜；废水；环境；生命周期评价；碳足迹

中图分类号：X741 文献标识码：A

**Carbon footprint analysis and environmental impact assessment of
integrated membrane process for fracturing flowback fluid based on
LCA**

XU Bing¹, ZHANG Qian¹, WU Huanhuan^{1}, SHAO Guangyi¹,
TIAN Shuwen¹, CHAI Wenming², ZHANG Ming², YAO Hong^{1*}*

(¹School of Environment, Beijing Jiaotong University, Research Center of Smart Environment Joint, Beijing Key Laboratory of Aqueous Typical Pollutants Control and Water Quality Safeguard, Engineering Research Center of Clean and Low-carbon Technology for Intelligent Transportation, Ministry of Education, Beijing 100044, China; ²Inner Mongolia Lilong Water Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: The fracturing flowback fluid produced during the hydraulic fracturing process of shale gas has the characteristics of complex composition of pollutants, high concentration of total dissolved solids and heavy metals. The “dual carbon” target has prompted the fracturing flowback fluid treatment industry to urgently transform its carbon emission reduction. Membrane technology, as one of the key low-carbon technologies for energy conservation and emission reduction, has the

potential to reduce industrial energy consumption by up to 90%. This study focused on the integrated membrane process of “pretreatment-tubular ultrafiltration–nanofiltration–electrodialysis–reverse osmosis–mechanical vapor recompression” for treating the fracturing flowback fluid, and conducted a comprehensive life cycle assessment (LCA) and analysis of each treatment process from the perspectives of pollution reduction and carbon reduction. The results revealed that the carbon footprint of the integrated membrane treatment process amounted to 86.7 kgCO₂ eq. In terms of the global warming impact category, the carbon footprint contribution of pretreatment, tubular ultrafiltration membrane and mechanical vapor recompression was 90.7%, which was primarily attributed to reagents utilized in the pretreatment process while substantial electricity consumption was resulted from high-frequency operation of the processes. For the greenhouse effect and other typical indicators, the sensitivity of influencing factors was as follows: electricity > sodium carbonate > sodium hydroxide. Therefore, reasonable and efficient operation of the equipment could save energy loss and ensure low-carbon operation. This study clarified that pretreatment, tubular ultrafiltration and mechanical vapor recompression process were the keys of pollution and carbon reduction that should be focused on for the treatment of fracturing flowback fluid.

Keywords: fracturing flowback fluid; membranes; waste water; environment; LCA (life cycle assessment); carbon footprint

页岩气作为一种典型的非常规天然气，是一种清洁、高效的能源资源。页岩气赋存于富含有机质页岩储层中，需大规模体积压裂改造，才能获得工业气流^[1]。水力压裂被广泛用于提高页岩气产量，即可通过向页岩层中注入固体支撑剂和液体化学添加剂，来增加页岩气的渗透率和采收率^[2]。注入的压裂液和地层原水混合，即为压裂返排液，其具有污染物种类复杂，总溶解性固体和重金属浓度高等特点。压裂返排液若不妥善处理必会带来严重的环境污染及危害。

压裂返排液的处理方法包括物理法，化学法，生物法等^[3]。何伟^[4]采用“混凝沉淀-内电解-氧化-吸附-生物降解”复合工艺处理高浓度 COD 的水基压裂液。结果发现，经处理后其出水 COD 值降至 96 mg/L，达国家一级排放标准。何红梅等^[5]以水基压裂返排液作为研究对象，采用“混凝沉降-微电解-活性炭吸附”预处理结合“生化法”深度处理工艺对其进行处理。结果表明，预处理使其 COD 去除率达 65%左右，经过生化处理后，COD 浓度降至 100 mg/L 以下，出水达国家一级排放标准。但由于压裂返排液中含有高浓度 Cl⁻ (>12000 mg/L)，其生物处理效果显著降低。综上，当下压裂返排液处理模式结合了物理、化学处理法，多为“以能消能”，具有不可持续的特征，且该类处理工艺产生了大量的温室气体，与国家的“双碳”政策相违背。

随着“双碳”目标的提出以及节能减排技术的推进，在返排液达标外排处理基础上，膜分离技术常被用于返排液资源化利用及其零排放处理^[6-8]。彭良梅等^[7]采用“预处理-超滤(UF)-海水淡化反渗透(SWRO)-螺旋管式反渗透(DTRO)-机械蒸汽再压缩系统(MVR)”集成工艺处理压裂返排液。结果发现，膜集成系统对污染物有着良好的拦截分离作用，浓水通过机械蒸汽再压缩循环蒸发结晶，实现资源合理化利用^[8]。此外，将上述典型的“混凝-微电解-氧化-吸附-生物处理”传统处理工艺与“预处理-超滤-反渗透-机械蒸汽再压缩”现代工艺的碳排放类型及其占比进行对比分析^[7,9]。结果如图 1 所示，传统工艺其碳排放强度约为 539.67 kgCO₂/m³，其中电耗碳排放占比 1.3%，物耗碳排放占比 98.7%^[9] (图 1(a))。现代工艺碳排放强度约为 64.946 kgCO₂/m³，其中电耗碳排放占比 42%，物耗碳排放占比 58%^[7] (图 1(b))。现代工艺碳排放强度相较于传统工艺降低约 87.9%。同时，对比分析了上述传统与现代工艺去除单位 COD 碳排放量，结果由图 2 所示。发现去除单位 COD 碳排放量由传统工艺 0.06866 kgCO₂ 下降到现代工艺 0.02054 kgCO₂，其碳排放大幅度降低，初步推断现代膜集成工艺有助于碳中和目标的实现，同时也减少了二次污染物的产生，有助于实现压裂返排液的高效、低碳、绿色处理。

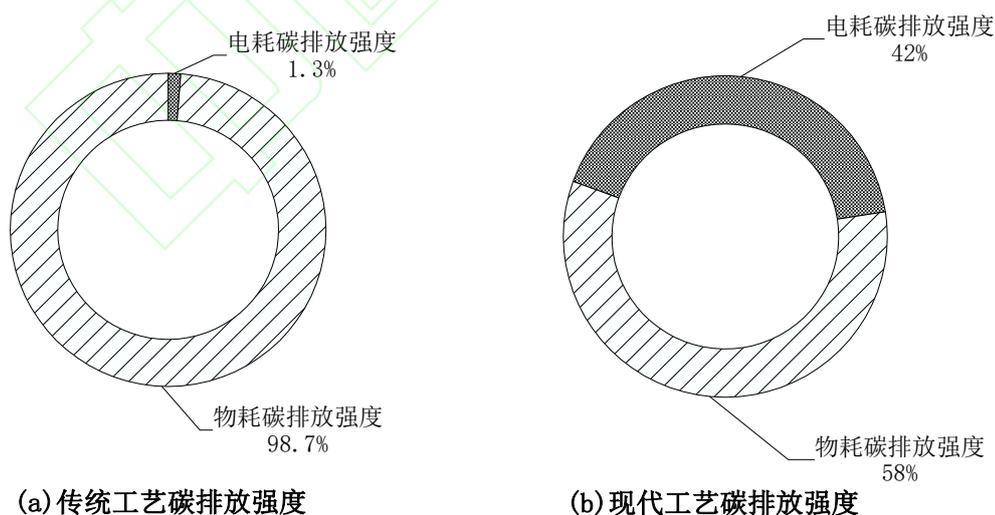


图 1 工艺碳排放强度

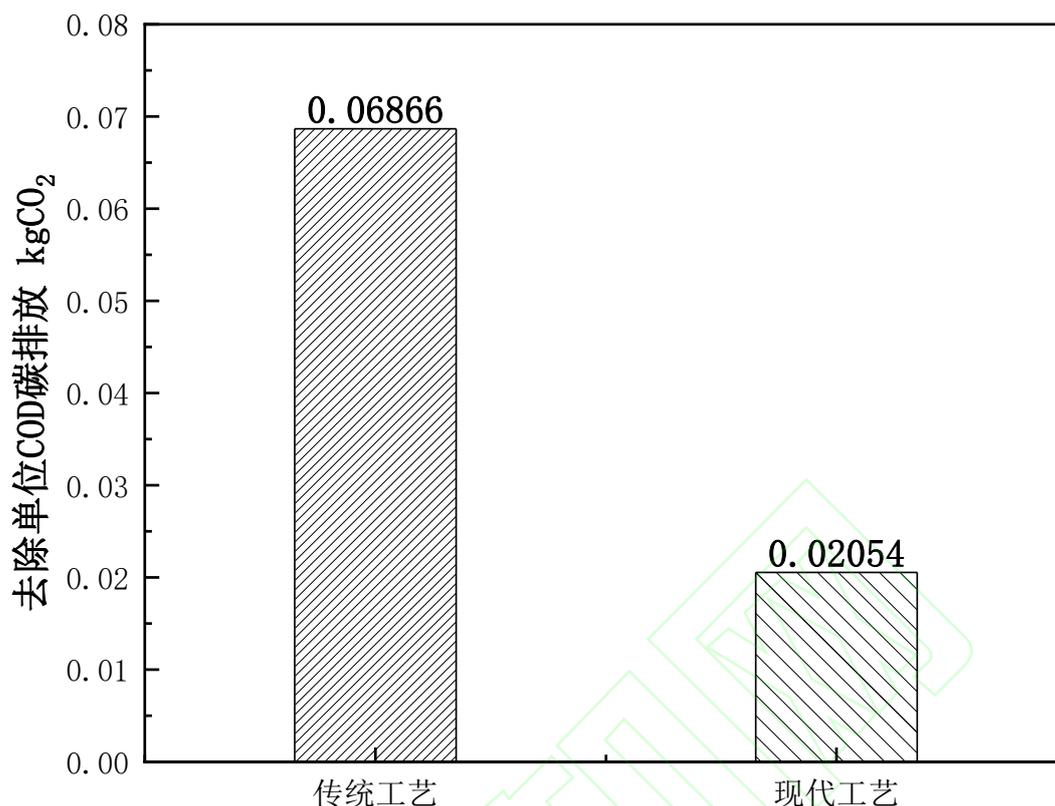


图2 传统与现代工艺去除单位 COD 碳排放量

综上，通常采用集成工艺对压裂返排液进行处理，而该集成工艺复杂且其环境影响不明确。因此，有必要分析压裂返排液集成处理工艺过程产生的环境影响，其有利于低碳、绿色处理技术的选择，对降低集成工艺的环境影响至关重要。生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）已广泛应用于石化、煤化工、电力等行业废水中环境影响评价与碳排放核算分析，而并未建立适合于压裂返排液处理的模型和数据库，缺乏相应的环境影响与碳排放分析。因此，本研究以国内某页岩气田产出水为例，基于现有“预处理-管式超滤（Tubular-Ultrafiltration）-纳滤（Nanofiltration）-电渗析（Electrodialysis）-反渗透（Reverse Osmosis）-机械蒸汽再压缩（Mechanical Vapor Recompression）”中试集成工艺，采用 LCA 方法分析其处理压裂返排液的实际运行情况，解析不同操作单元对环境的影响程度，识别和量化减轻环境负荷的关键，从而为相关企业提供低碳、绿色工艺改进的依据。

1 研究方法与工具

1.1 研究目标

本次中试实验接收来自于内蒙古自治区鄂尔多斯市某页岩气田开采产生的压裂返排液。本研究的评价目标是对压裂返排液处理单元进行环境影响分析，收集其生命周期中的污染物排放和资源消耗情况，分析得出各处理单元的能耗、碳排放和环境影响，判断其改善的潜力，推动压裂返排液的低碳、绿色处理技术的发展。

1.2 功能单元及假设

本研究以页岩气开采过程中产生的压裂返排液作为研究对象。选择利用该膜集成工艺终端 1000kg 的压裂返排液作为本研究环境影响对象的功能单位。不予考虑不同地区的地质条件，压裂液的配方，压裂技术的实施等多种因素影响，以及各种运输、加工设备和厂房建设的能耗和人力消耗。

1.3 系统边界

本研究采用 LCA 方法处理压裂返排液的系统边界的 6 个处理单元如图 3 所示，具体包括：

预处理系统：在曝气反应沉淀池中使用“双碱法”降低原水硬度。具体操作：先加入液碱调节废水的 pH 使其呈碱性，再加入工业纯碱去除溶液中钙镁离子，保证后续膜工艺的顺利运行，降低膜工艺的污染风险 [10]。

管式超滤（TR-UF）处理系统：超滤膜的处理水质范围广、抗污能力强、不易附着污染物，主要用于去除压裂返排液中浊度（SS）、微生物和部分 COD。本研究选取材料为聚偏二氟乙烯（PVDF）的膜组件，结合物理化学清洗方法以及陶瓷颗粒清洗技术，提高超滤膜的通量恢复率 [11]，保证膜组件的高效运行。

纳滤（NF）系统：工业型纳滤膜主要用于去除废水中的小分子 COD、天然有机物等，同时截留大部分二价盐，将可利用物质从废水中分离出来，进行回收再利用。

电渗析（ED）系统：膜组件通过电渗析的离子迁移作用，将纳滤膜产水进一步脱盐处理。电渗析膜同样可以对离子杂质进行截留，使得产水端产出纯净水。

反渗透（RO）系统：进一步浓缩电渗析产水中的一价盐、小分子有机物等，只能允许水分子通过，使得系统最终产水达到排放标准。

蒸汽机械再压缩技术（MVR）：MVR 利用自身产生的二次蒸汽能量，对纳滤膜、电渗析膜的浓盐水进行蒸发浓缩结晶，得到纯度 95% 以上的硫酸钠、氯化钠结晶盐，同时产生冷凝水（回流至反渗透膜进行二次处理），实现了资源的合理化利用，减少二次污染物的产生 [12]。

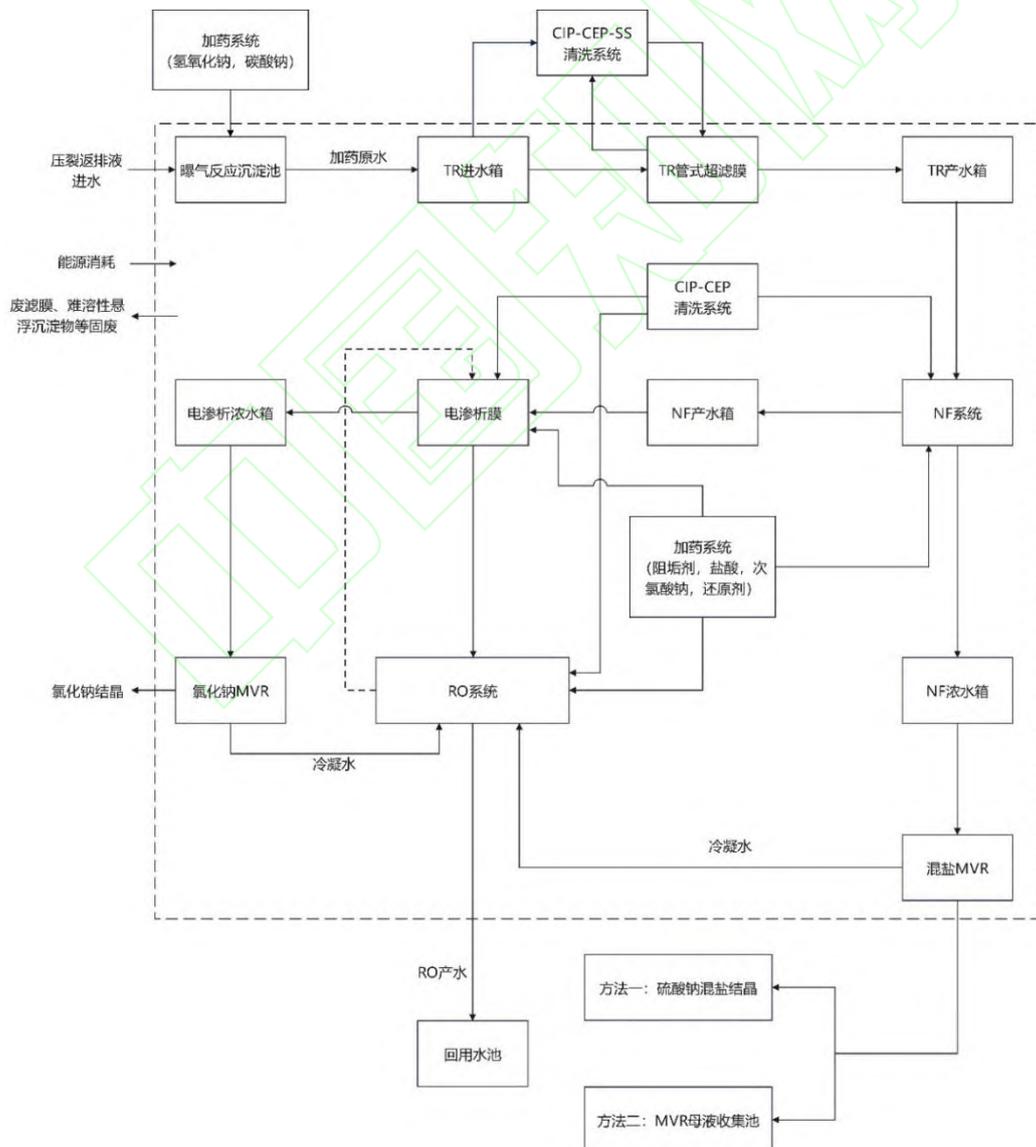


图 3 压裂返排液处理工艺系统边界

1.4 生命周期数据清单

本研究使用的清单数据来源于中试实验结果。选择处理单位为 1000 kg 的压裂返排液为例，计算并分析其物耗、能耗及碳排放量。生命周期清单如表 1 所示，具有较高的数据质量指标（data quality indicator, DQI），部分电耗数据来源于相关行业参考文献。

表 1 1000kg 压裂返排液处理工艺流程的生命周期清单

处理环节	类别	单位	数量
预处理	氢氧化钠	kg	1.05
	碳酸钠	kg	10
	次氯酸钠	kg	0.33
管式超滤	原水	kg	1000
	电能	kWh	30
纳滤	管式超滤膜产水	kg	1000
	电能	kWh	5.13
电渗析	纳滤膜产水	kg	940
	电能	kWh	2.2
反渗透	电渗析膜产水	kg	688.33
	冷凝水	kg	275
	电能	kWh	1.25
机械蒸汽再压缩	纳滤膜浓水	kg	60
	电渗析膜浓水	kg	251.67
	电能	kWh	34.9

1.5 生命周期影响评价（LCIA）

ISO、SEATC、EPA 等都将生命周期影响评价视为“三步走”模型，即分类、特征化、标准化^[13]。分类是将清单中的输入和输出数据分成不同的环境影响类型。由于 SimaPro 操作简单、数据量丰富、分级储存清晰等特点，本研究选择 SimaPro9.4 软件，对压裂返排液处理工艺进行环境影响分析。为了更准确评估压裂返排液处理周期污染物排放对环境的影响，本研究背景数据来源于 Ecoinvent3.8、ELCD 等数据库，选取 Recipe 2016 Midpoint 环境影响评估方法，并分析生命周期排放污染物对于环境的 18 种影响，具体为温室效应、平流层臭氧消耗、电离辐射、臭氧人体损害、细颗粒物形成、臭氧陆地生态系统损害、陆地系统酸化、淡水富营养化、海洋富营养化、陆地系统毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性、人体致癌毒性、人体非致癌毒性、土地占用、矿产资源稀缺、化石资源稀缺、水消耗。

2 结果讨论

2.1 碳足迹分析

产品碳足迹是指衡量某个产品在其生命周期各阶段的温室气体排放量总和。碳足迹的计算结果为产品从原材料到工厂大门生命周期内各种温室气体排放量的总和，用二氧化碳当量（CO₂ eq）表示，计算公式如下^[14]：

$$CF = \sum_{i=1, j=1}^n P_i \cdot Q_{ij} \cdot GWP_j \quad (1)$$

式中：CF 为碳足迹，P_i 为活动数据，Q_{ij} 为排放因子，GWP_j 为全球变暖潜势值。

首先，对“预处理-管式超滤-纳滤-电渗析-反渗透-机械蒸汽再压缩”集成工艺处理压裂返排液的碳足迹进行分析，结果如图 4 所示。处理 1000 kg 压裂返排液产生的碳足迹为 86.7 kg CO₂ eq，其中预处理阶段、TR-UF、NF、ED、RO、MVR 分别为 17.48 kg CO₂ eq、28.26 kg CO₂ eq、4.84 kg CO₂ eq、2.07 kg CO₂ eq、1.17 kg CO₂ eq、32.88 kg CO₂ eq。预处理过程中，大量投加的化学药剂使其碳足迹占整体工艺的 20.2%；TR-UF 膜处理过程中，高频率长时间运行消耗了大量电能，使其碳足迹占整体工艺的 32.6%；NF、ED、RO 等其他膜技术同样消耗电能，但是其运行时间以及频率相对较低，碳足迹占整体工艺的 9.3%；MVR 系统的自动化程度高，其碳足迹占整体工艺的 37.9%。从整体工艺角度来看，直接消耗电力等能源产生的碳足迹占据较大部分。我国电网较高的排放因子是碳足迹贡献的主要因素。

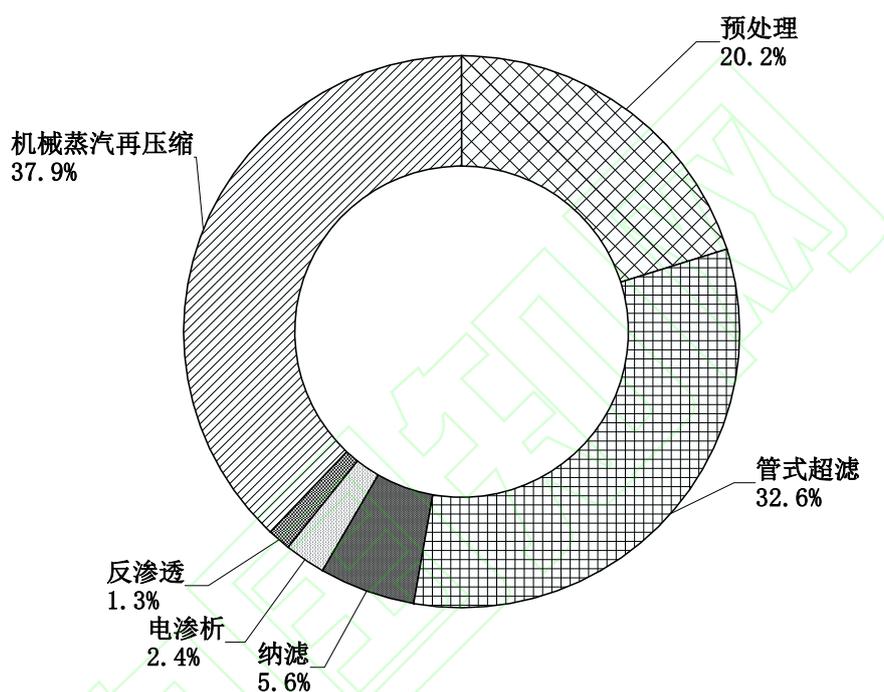


图 4 各个处理技术的碳足迹占比

2.2 环境影响评价

2.2.1 特征化结果

根据 Recipe 2016 Midpoint 的特征化评价方法，本研究利用 SimaPro 软件分析了环境影响评价，计算的特征化结果如表 2 所示。该结果表明，对环境影响贡献较大的为人体非致癌毒性、温室效应、陆地生态毒性、化石资源消耗、海洋生态毒性、淡水生态毒性，该六种环境影响类别占据总体环境影响较大比例，因此选取该六种环境影响类别进行过程贡献分析。假设每一种影响类型的总值为 100%，通过每一个生命周期阶段在每个影响类型中所占的比例，可计算每个阶段对每种影响类型贡献率的相对大小。结果如图 5 所示，在该集成处理工艺中，曝气预处理和机械蒸汽再压缩阶段对整体环境影响贡献最大，其次为管式超滤阶段，纳滤、电渗析、反渗透对环境影响贡献较小。根据现有处理工艺实际运行情况，对于温室效应指标，预处理阶段使用“双碱法”投加药剂降低硬度，大量药剂的投加会造成等比例的温室气体产生，加剧温室效应；管式超滤膜系统以及机械蒸汽再压缩系统高频率、长时间的运行会造成用电量增加，国内大部分地区的电能供应来源于煤炭燃烧火力发电，加剧温室效应^[15]。对于人体非致癌毒性和陆地生态毒性影响类别，主要原因是压裂返排液的高 COD、重金属、浮油等污染物特性，经过预处理和管式超滤膜处理后，污染物含量大幅度下降^[16]，后续处理的废水及结晶盐对人体毒性相对减小。药剂的大量投加、管式超滤膜以及机

械蒸汽再压缩系统的持续运行、曝气絮凝产生的污泥等均对周围环境造成一定影响。综上，在响应国家“双碳”政策下，控制设备高效运行，药剂合理投加是压裂返排液处理技术节能降碳的必要措施。

表 2 LCA 环境影响特征化分析结果

影响类别	预处理	管式超滤	纳滤	电渗析	反渗透	机械蒸汽再压缩
温室效应/kg CO ₂ eq	35.60000	31.30000	5.37000	2.30000	1.31000	53.40000
平流层臭氧消耗/kg CFC ₁₁ eq	0	0	0	0	0	0.00001
电离辐射/kBq Co-60 eq	0.90000	0.47800	0.08190	0.03510	0.01990	0.58300
臭氧人体损害/kg NO _x eq	0.03940	0.08690	0.01490	0.00640	0.00360	0.10400
细颗粒物生成/kg PM _{2.5} eq	0.02990	0.04770	0.00820	0.00350	0.00200	0.05670
臭氧陆地生态毒性/kg NO _x eq	0.04050	0.08710	0.01490	0.00640	0.00360	0.10400
陆地酸化/kg SO ₂ eq	0.07370	0.10700	0.01820	0.00780	0.00440	0.12600
淡水富营养化/kg P eq	0.00920	0.00580	0.00100	0.00040	0.00020	0.05640
海洋富营养化/kg N eq	0.00900	0.00040	0.00010	0	0	0.01930
陆地生态毒性/kg 1,4-DCB	59.20000	17.10000	2.94000	1.26000	0.71700	21.10000
淡水生态毒性/kg 1,4-DCB	0.72400	0.30500	0.05300	0.02260	0.01320	10.30000
海洋生态毒性/kg 1,4-DCB	0.96500	0.42300	0.07340	0.03130	0.01820	13.50000
人体致癌毒性/kg 1,4-DCB	0.87400	0.95300	0.16300	0.07000	0.03980	1.48000
人体非致癌毒性/kg 1,4-DCB	15.50000	13.90000	2.39000	1.02000	0.58500	229.00000
土地占用/m ² a crop eq	0.52400	0.36500	0.06250	0.02680	0.01520	0.45500
矿产资源消耗/kg Cu eq	0.02340	0.00940	0.00160	0.00070	0.00040	0.01190
化石资源消耗/kg oil eq	9.19000	6.09000	1.04000	0.44700	0.25300	7.25000
水稀缺/m ³	0.26000	0.07750	0.01330	0.00570	0.00320	0.09740

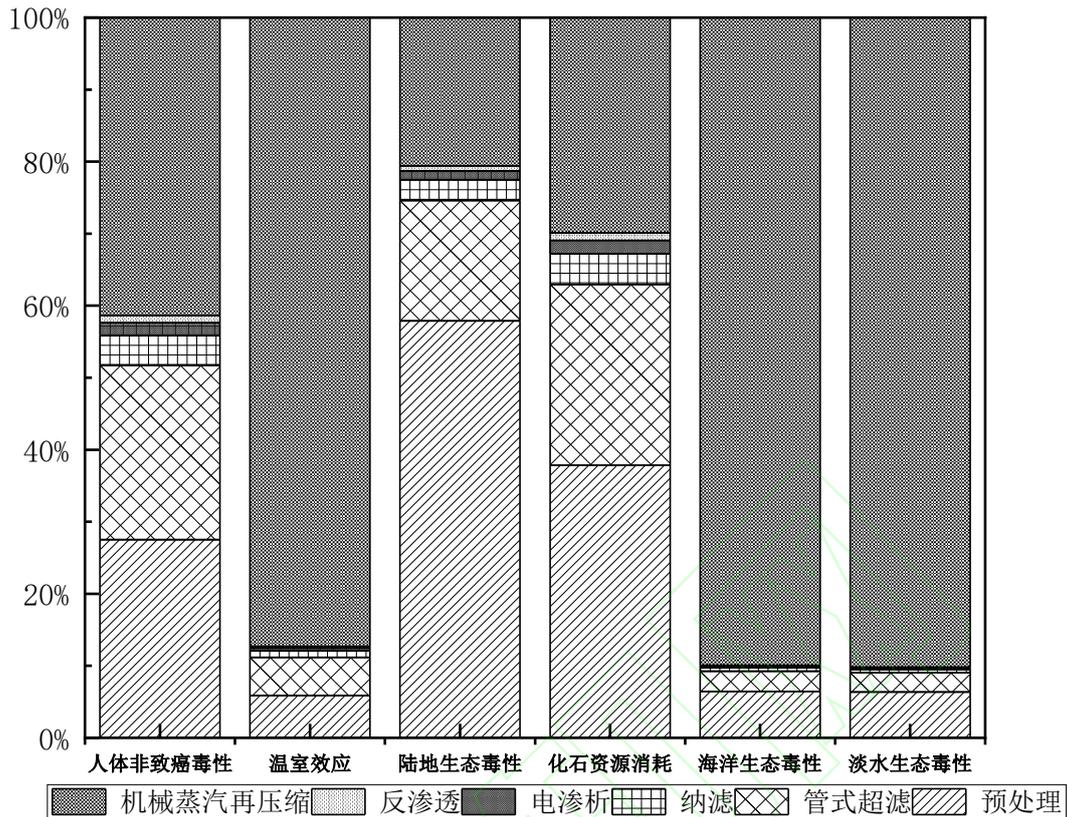


图 5 中间点特征化结果

2.2.2 标准化结果

标准化是一种去量纲的方法，以便不同指标之间的相互比较。标准化可以更好地识别该产品或系统的主要环境影响类型^[17]。该集成工艺的环境影响标准化总值结果如表 3 所示，温室效应为 0.01403、化石资源消耗为 0.02459、淡水富营养化为 0.03592、海洋生态毒性为 0.04605、淡水生态毒性为 0.05833、人体致癌毒性为 0.31206。图 6 所示为膜集成工艺各个阶段的标准化结果，返排液处理过程各阶段的环境影响总值大小：预处理>机械蒸汽再压缩>管式超滤>纳滤>电渗析>反渗透。标准化结果显示，人体致癌毒性影响较高，主要是由于本研究将机械蒸汽再压缩系统产生的大量结晶盐视为一般固废进行专门化处理，而实际应用过程中可以进行二次利用，减少固体废物的产生，同时压裂剂中含有多种复杂的化学组分，如高浓度的有机物、重金属物质等，均易造成较高水平的人体致癌风险。因此，压裂返排液的处理过程需要严格监控，防止其泄漏到环境中造成严重危害。淡水生态毒性、海洋生态毒性、淡水富营养化的标准化结果显示，其实际影响效果随着集成工艺深度处理，污染物浓度及毒性逐渐减小，导致反渗透膜系统产水中污染物含量接近为零。化石资源消耗主要集中在预处理过程中药剂的投加、机械蒸汽再压缩过程中固体废物的直接处理。本研究关注的温室效应影响类别在实际运行情况下，占据比例较小，满足膜集成现代工艺的低碳运行理念。此外，本研究分析比较了该膜集成工艺处理压裂返排液各环节对总体环境影响贡献（图 7）。预处理、管式超滤、纳滤、电渗析、反渗透、机械蒸汽再压缩分别占据总体环境影响 33%、27%、5%、2%、1%、32%。其作为处理压裂返排液现代处理工艺，具有碳排放低的运行特点，但仍需持续关注预处理阶段的药剂投加和系统的能源消耗，即可改进该工艺进一步低碳运行。

表 3 LCA 环境影响标准化结果

影响类别	预处理	管式超滤	纳滤	电渗析	反渗透	机械蒸汽再压缩	总值
------	-----	------	----	-----	-----	---------	----

温室效应	0.00445	0.00391	0.00067	0.00029	0.00016	0.00455	0.01403
平流层臭氧消耗	0.00020	0.00011	0.00002	0.00001	0	0.00013	0.00047
电离辐射	0.00187	0.00100	0.00017	0.00007	0.00004	0.00116	0.00431
臭氧人体损害	0.00192	0.00422	0.00072	0.00031	0.00018	0.00491	0.01226
细颗粒物生成	0.00117	0.00187	0.00032	0.00014	0.00008	0.00217	0.00575
臭氧陆地生态毒性	0.00228	0.00490	0.00084	0.00036	0.00020	0.00570	0.01428
陆地酸化	0.00180	0.00260	0.00045	0.00019	0.00011	0.00302	0.00817
淡水富营养化	0.01420	0.00888	0.00152	0.00065	0.00037	0.01030	0.03592
海洋富营养化	0.00196	0.00008	0.00001	0.00001	0	0.00009	0.00215
陆地生态毒性	0.00389	0.00113	0.00019	0.00008	0.00005	0.00131	0.00665
淡水生态毒性	0.02870	0.01210	0.00211	0.00090	0.00052	0.01400	0.05833
海洋生态毒性	0.02220	0.00972	0.00169	0.00072	0.00042	0.01130	0.04605
人体致癌毒性	0.08490	0.09260	0.01590	0.00680	0.00386	0.10800	0.31206
人体非致癌毒性	0.00050	0.00044	0.00008	0.00003	0.00002	0.00052	0.00159
土地占用	0.00008	0.00006	0.00001	0	0	0.00007	0.00022
矿产资源消耗	0	0	0	0	0	0	0
化石资源消耗	0.00937	0.00621	0.00106	0.00046	0.00026	0.00723	0.02459
水稀缺	0.00098	0.00029	0.00005	0.00002	0.00001	0.00034	0.00169

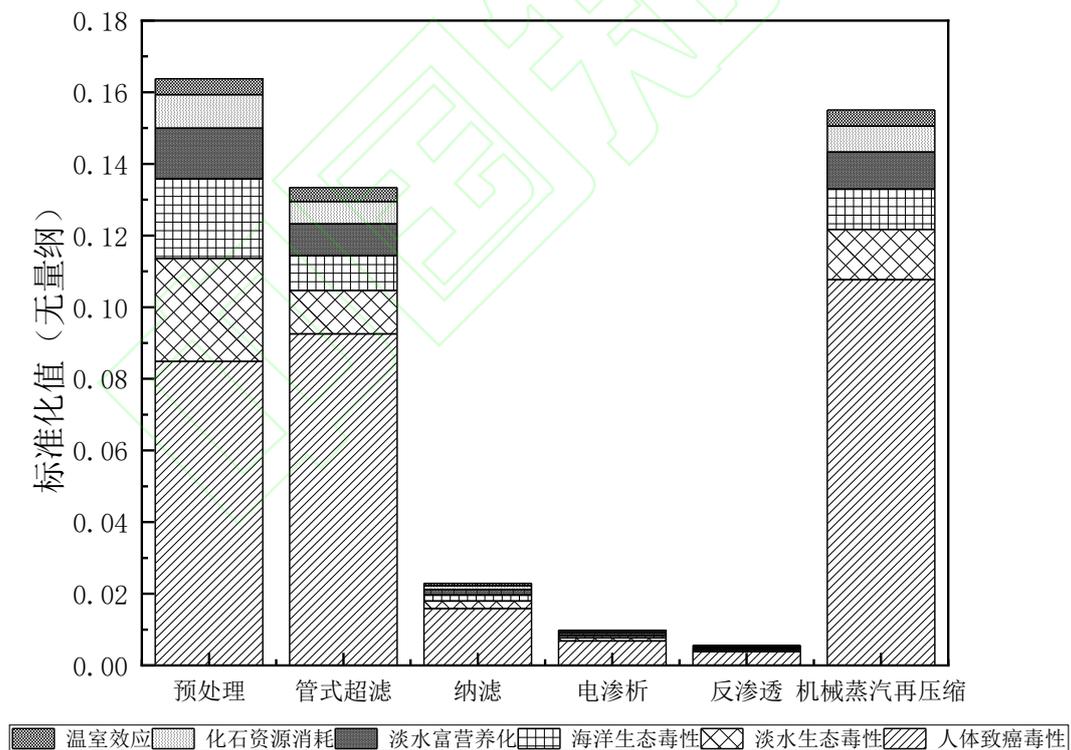


图6 处理各阶段标准化结果

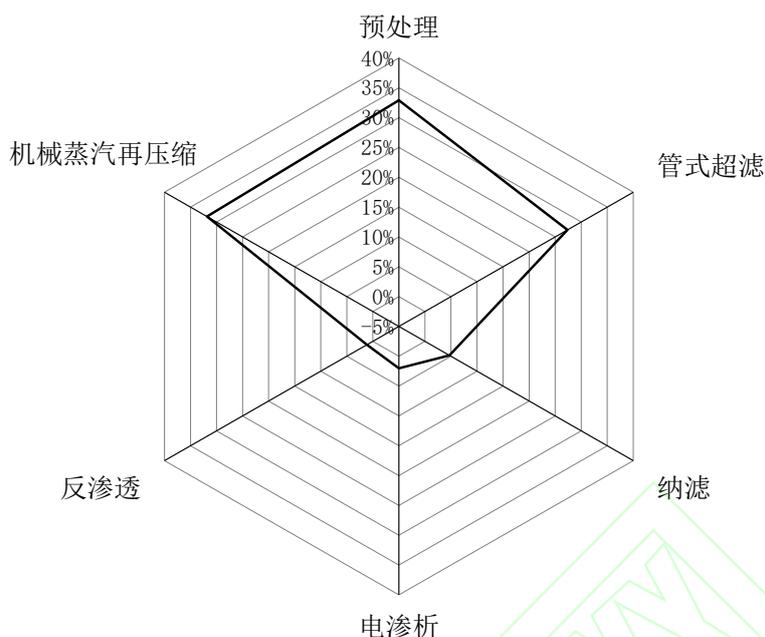


图7 各处理环节对总体环境影响的贡献

2.2.3 敏感性分析

敏感性分析是用来衡量生命周期影响结果、特征化模型等因素的改变对于指示结果的影响程度，也可用于检验计算步骤的调整对生命周期影响评价简述的影响程度，具体见公式^[18]：

$$E_{ij} = \frac{\Delta A_i}{\Delta F_j} \quad (2)$$

式中： ΔF_j 表示输入变量第j种因子的变化幅度，本研究中取 $\pm 10\%$ ； ΔA_i 表示在第j种因子变化幅度下，对应的第i种环境影响指标的变化情况； E_{ij} 表示输入变量的敏感性系数。

表4 不同因子变动 $\pm 10\%$ 下的敏感性系数

指标	人体致 癌毒性	温室效 应	化石资源 消耗	淡水富营 养化	海洋生态 毒性	淡水生态毒 性
因子	敏感性系数 $ E_{ij} $					
电力	0.652	0.592	0.615	0.193	0.069	0.065
碳酸钠	0.215	0.099	0.132	0.06	0.062	0.062
氢氧化钠	0.026	0.011	0.014	0.01	0.006	0.065

由表4可知，电力是主要的温室效应驱动因素，其敏感性系数为0.592，表现为敏感，其次为碳酸钠等药剂，敏感性系数为0.099，表现为低敏感，因此电力是低碳化压裂返排液处理工艺的关键因素。同时电力对于人体致癌毒性的敏感性系数为0.652，表现为非常敏感，主要原因是由于国内大部分地区通过煤炭燃烧等火力发电来提供能源，也使得电力对化石资源消耗的敏感性系数达到0.615，表现为非常敏感，能源的大量使用会造成煤炭大量燃烧，产生尘埃、烟雾、有毒气体等对人体造成损害^[19]。电力对水体污染敏感性较低，表现为低敏感或不敏感。氢氧化钠药剂的使用对各类环境影响类别的敏感性系数，均表现为低敏感或是不敏感，其环境影响较小。碳酸钠药剂对于人体致癌毒性的敏感性系数为0.215，表现为敏感，工业纯碱的大量使用会对人类造成皮肤和呼吸道刺激，长期接触也可引起炎症等^[20]。本研究选取的清单输入变量包

括电力消耗、碳酸钠原料、氢氧化钠原料，模拟变化正负 10%分析其环境影响，结果如图 8 所示。电力消耗量的变化对环境影响的增减起到主导作用，与归一化分析结果一致。工业碳酸钠的用量对环境影响的贡献高于氢氧化钠用量，在工艺改进过程中可以考虑减少工业碳酸钠的使用量或者替换原材料。综上所述，替代“双碱法”预处理降低硬度的技术（例如电化学软化技术，离子交换软化法等）和替换燃料提供能源技术（清洁能源发电技术，风力水力发电等）能够减少压裂返排液处理过程中的潜在环境影响^[21]。

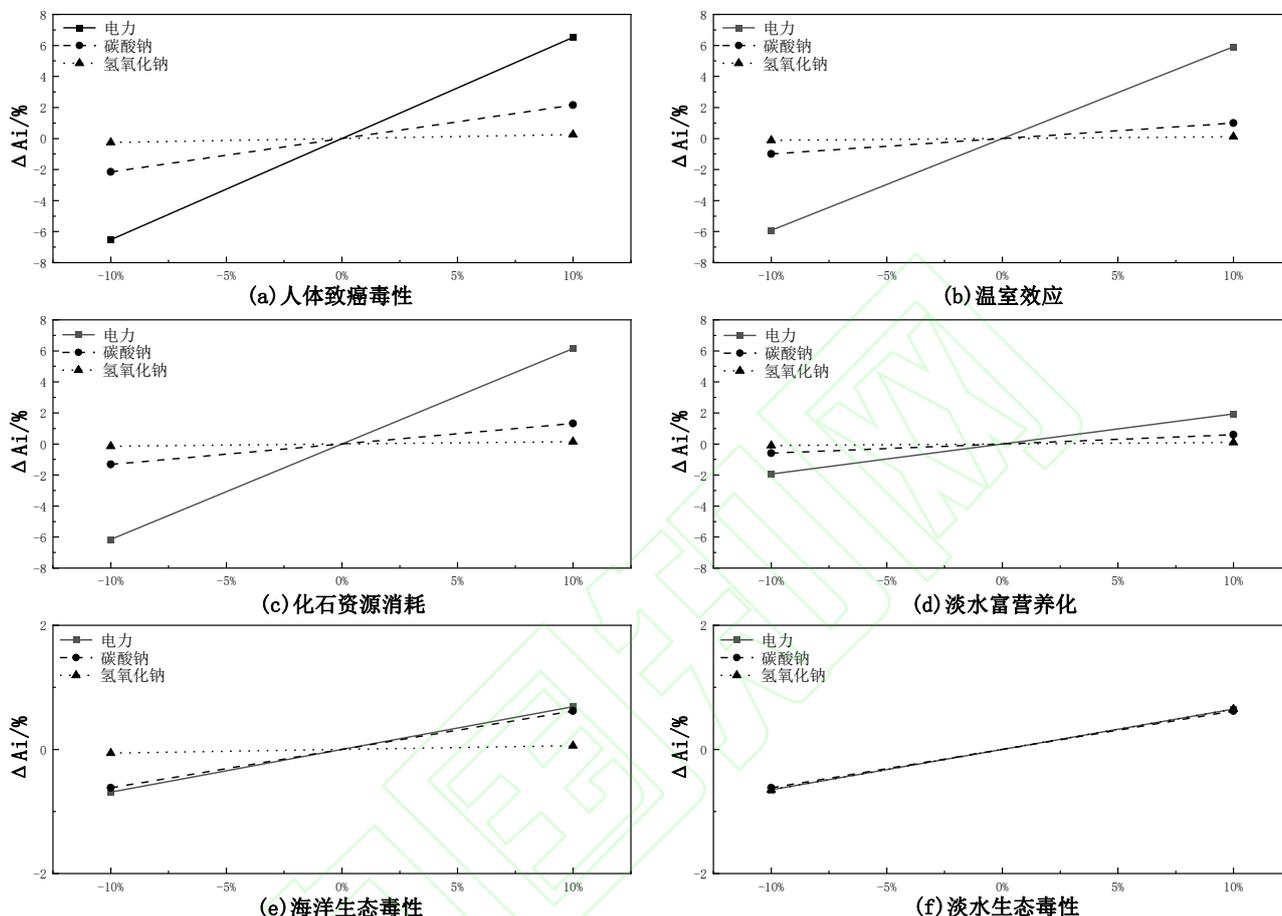


图 8 压裂返排液处理过程关键因素敏感性分析结果

3 结论

本研究基于“预处理-管式超滤-纳滤-电渗析-反渗透-机械蒸汽再压缩”膜集成工艺处理压裂返排液，采用 LCA 验证了该工艺的低碳运行情况，并分析了该处理工艺的碳足迹和环境影响，明确了各环节的减污降碳关键。主要结论如下：

(1) 压裂返排液处理工艺碳足迹为 86.7kgCO₂ eq，根据碳足迹贡献比例的情况，该工艺的温室气体排放主要来自药剂投加和能源消耗产生的间接碳排放。工艺过程直接产生的碳排放相对较少，实际的药剂投加量和能源输入与碳排放密切相关。

(2) 压裂返排液处理工艺过程对各指标的环境影响中，贡献者主要来自于预处理阶段、管式超滤膜处理阶段、机械蒸汽再压缩阶段。由于药剂投加、单位能源消耗、一般固废的产生等导致环境影响增大，而间接碳排放造成的实际温室效应影响相对较小。从敏感性分析中可以得知，针对温室效应指标及其他典型指标，其影响因素敏感性大小为：电力>碳酸钠药剂>氢氧化钠药剂。综上，膜设备的合理高效运行能够节约电力的损耗，保证系统的低碳高效运行。

参考文献

- [1] 董沅武, 荣家洛, 李晓煜, 等. 碳中和愿景下页岩气压裂返排液处理技术思考[J]. 油田化学, 2023, 40(3): 534-542, 570.
DONG Yuanwu, RONG Jialuo, LI Xiaoyu, et al. Thinking on shale gas fracturing flowback fluid treatment technology under carbon neutral vision[J]. Oilfield Chemistry, 2023, 40(3): 534-542, 570.
- [2] 于志龙, 陈滢, 刘敏. 页岩气废水处理技术研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(11): 4589-4599.
YU Zhilong, CHEN Ying, LIU Min. Research progress in treatment technology for shale gas wastewater[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(11): 4589-4599.
- [3] 成浩. 油田压裂返排液处理工艺的有关探讨[J]. 清洗世界, 2023, 39(6): 72-74.
CHENG Hao. Discussion on treatment technology of fracturing flowback fluid in oilfield[J]. Cleaning World, 2023, 39(6): 72-74.
- [4] 何伟. 复合法在处理压裂返排液时的最佳工艺流程[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(1): 80-81.
HE Wei. Optimum technological process of compound method in treating fracturing flowback fluid[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 34(1): 80-81.
- [5] 何红梅. 生物法处理压裂返排液的实验研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2004.
HE Hongmei. Experimental Study on Biological Treatment of Fracturing Flowback Fluid[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004.
- [6] 张赫, 李小可, 熊颖, 等. 基于水凝胶界面光蒸发的压裂返排液脱盐降污处理[J]. 化工进展, 2023, 42(2): 1073-1079.
ZHANG He, LI Xiaoke, XIONG Ying, et al. Desalination and pollution treatment of fracturing flow-back fluid based on interfacial solar evaporation of hydrogel[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(2): 1073-1079.
- [7] 彭良梅, 罗成. 全膜法在页岩气压裂返排液处理中的应用[J]. 四川化工, 2022, 25(4): 24-27, 35.
PENG Liangmei, LUO Cheng. Application of total membrane method in shale gas fracturing flowback water treatment[J]. Sichuan Chemical Industry, 2022, 25(4): 24-27, 35.
- [8] 林超. 电渗析在压裂返排液废水处理中的应用研究[J]. 环境科学导刊, 2023, 42(5): 53-57, 62.
LIN Chao. Research on the application of electro dialysis in the treatment of fracturing backflow fluid wastewater[J]. Environmental Science Survey, 2023, 42(5): 53-57, 62.
- [9] 万里平. 探井残余压裂液无害化处理实验研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2002.
WAN Liping. Experimental study on harmless treatment of residual fracturing fluid in exploration wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2002.
- [10] 史元腾, 王小强, 寇光辉, 等. 反渗透浓盐水双碱法除硬与除硅工艺研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(12): 110-112, 117.
SHI Yuanpeng, WANG Xiaoqiang, KOU Guanghui, et al. The treatment of silica and hardness by double-alkali method for reverse osmosis high-salinity water[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(12): 110-112, 117.
- [11] 王强. 管式超滤膜处理油田污水试验[J]. 石油石化节能, 2014, 4(6): 5-7.
WANG Qiang. Experimental study on treatment of oilfield wastewater by tubular ultrafiltration membrane[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2014, 4(6): 5-7.
- [12] 邹元新, 邓强, 项拓, 等. 反渗透—纳滤组合与 MVR 技术结合提纯工业盐工艺研究[J]. 盐科学与化工, 2023, 52(9): 1-3.
ZOU Yuanxin, DENG Qiang, XIANG Tuo, et al. Research on industrial salt purification process combined with reverse osmosis, nanofiltration device and MVR technology[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2023, 52(9): 1-3.
- [13] 杨瑞锦. 基于 SimaPro 的水泥产品生命周期评价及“减碳”建议[J]. 四川水泥, 2023(9): 4-7.
YANG Ruijin. Life cycle assessment of cement products based on SimaPro and suggestions on “carbon reduction” [J]. Sichuan Cement, 2023(9): 4-7.
- [14] 孙杰, 董强, 张笛, 等. 基于 LCA 的废锂电池典型回收再生工艺碳足迹分析和环境影响评价[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 1254-1259, 1263.
SUN Jie, DONG Qiang, ZHANG Di, et al. Carbon footprint analysis and environmental impact assessment of typical recycling process of waste lithium batteries based on LCA[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 1254-1259, 1263.

- [15] 赵兵, 景杰. “碳达峰、碳中和”目标下火力发电行业的转型与发展[J]. 节能与环保, 2021(5): 32-33.
ZJIAQ Bing, JING Jie. Transformation and development of thermal power industry under the goal of “carbon peaking and carbon neutralization”[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2021(5): 32-33.
- [16] 贺美, 陈文杰, 田磊, 等. 页岩气压裂返排液的水生生态毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(2): 108-119.
HE Mei, CHEN Wenjie, TIAN Lei, et al. Study on the aquatic ecological toxicity of shale gas fracturing fluids[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(2): 108-119.
- [17] 李玉红, 廖学品, 王安, 等. 基于 LCA 方法对毛皮加工过程的环境影响评价[J]. 皮革科学与工程, 2020, 30(2): 6-11.
LI Yuhong, LIAO Xuepin, WANG An, et al. The environmental impact assessment of fur making process using LCA methodology[J]. Leather Science and Engineering, 2020, 30(2): 6-11.
- [18] 陶源, 刘伟军. 大型公共建筑工程 LCA 模型下的碳排放敏感性分析[J]. 中国建筑金属结构, 2022(9): 12-14.
TAO Yuan, LIU Weijun. Sensitivity analysis of carbon emission under LCA model of large public building projects[J]. China Construction Metal Structure, 2022(9): 12-14.
- [19] 丁宁. 煤炭中造成大气污染有害元素的分析[J]. 中国标准化, 2018(18): 163-164.
DING Ning. Analysis of harmful elements causing air pollution in coal[J]. China Standardization, 2018(18): 163-164.
- [20] 王玮, 程虎, 张放, 等. 某纯碱生产企业职业病危害因素现状调查与评价[J]. 中国辐射卫生, 2014, 23(3): 258-261.
WANG Wei, CHENG Hu, ZHANG Fang, et al. Investigation on present status of occupational hazard factors in a soda ash plant[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2014, 23(3): 258-261.
- [21] 张亚峰, 安路阳, 王宇楠, 等. 水中硬度去除方法研究进展[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(12): 54-63.
ZHANG Yafeng, AN Luyang, WANG Yunan, et al. Research progress of hardness removal methods in water[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017(12): 54-63.