

基于生命周期评价的页岩气开采返排-产出水处理技术选择

苏培兴^{1,2},车智涛^{1,2},张代钧^{1,2*},卢培利^{1,2},丁阿强^{1,2} (1.重庆大学,煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044; 2.重庆大学环境科学系,重庆 400044)

摘要: 为探究页岩气开采废水(即返排-产出水)处理技术对环境生态的影响,针对页岩气开采废水的处理后内部回用以及达标排放两种管理模式,结合生命周期评价的理念,运用 Simapro 分析工具,创建 LCA 模型,对典型处理技术进行清单分析,评估处理技术中的资源、能源消耗和环境负荷,量化分析其对人群健康、生态环境质量和资源方面的影响,建立一种页岩气开采返排-产出水处理技术选择的评价方法.同时,以国内某页岩气田产出水处理工程为例,评估所选用处理技术的潜在环境影响.结果表明,内部回用模式下选用的混凝-絮凝处理技术对环境生态影响最小;达标排放模式下针对有机物去除,选用铁电极的电絮凝技术或曝气生物滤池对环境生态的影响较小.对于较低含盐量的开采废水的脱盐,选用的脱盐技术正渗透对环境的影响比反渗透小,但反渗透的脱盐效果更好.对于较高含盐量开采废水的脱盐,选用的多效蒸发-机械蒸汽再压缩技术对环境生态的影响较小.

关键词: 页岩气; 返排-产出水; 处理技术; 环境影响; 生命周期评价; 生态风险

中图分类号: X37,F124.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)09-4433-11

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220317.001

LCA-assisted selection of shale gas extraction flowback-produced water treatment technologies. SU Pei-xing^{1,2}, CHE Zhi-tao^{1,2}, ZHANG Dai-jun^{1,2*}, LU Pei-li^{1,2}, DING A-qiang^{1,2} (1.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2.Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing, 400044, China). *China Environmental Science*, 2022,42(9): 4433~4443

Abstract: Due to the rapid development of China's shale gas industry in recent years, it is necessary to evaluate impacts of shale gas extraction wastewater treatments on the environment and ecology. According to the two management modes of internal reuse and discharge after the treatment of wastewater from shale gas extraction (i.e. flowback-produced water (FPW) and the idea of life cycle assessment (LCA)), the Simapro tool was used to conduct inventory analysis of typical treatment technologies. Then a case study of a produced water treatment project in a shale gas field in China was designed to evaluate the potential environmental impacts of the selected treatment technology. The results show that the coagulation-flocculation treatment technology used in the internal reuse mode had the least impact on the environment and ecology. For the removal of organic matter in the emission standard mode, the electrocoagulation with iron electrode or biological aerated filter had less impact on the environment and ecology. For desalination of extraction wastewater with low salt content, the ecological environment impact of forward osmosis is lower than that of reverse osmosis, but the desalination effect of reverse osmosis is better. For desalinating salted extraction wastewater, the selected multi-effect evaporation and mechanical vapor recompression technology demonstrated less impact on the environment and ecology.

Key words: shale gas; flowback-produced water; processing technology; environmental impact; life cycle assessment; ecological risk

我国的页岩气资源可采储量巨大,开发利用好页岩气对调整优化我国能源结构和节能减排具有重要作用.但目前我国的页岩气开发过程仍面临着生态环境影响不明确、污染防治技术不规范等问题.页岩气开采过程所产生的返排水与产出水(FPW)统称为页岩气开采废水^[1],包括高浓度的盐、金属、油、油脂和天然有机物,水质复杂,呈现出高悬浮物(TSS)、高化学需氧量(COD)、以及难生物降解等特性.在收集、运输、处理、处置不当的情况下,会对地表及地下水资源造成严重污染^[2].单一技术无法有效处理页岩气废水,需要一系列的技术组合处理方案,工艺复杂、成本高且环境影响不明确^[3-4].因此

了解页岩气开采废水处理过程产生的环境影响,优化页岩气开采废水的处理技术选择,对降低处理技术的环境影响至关重要.近年来,已经有采用 LCA 方法评估页岩气开发环境影响的报道^[5-10],但缺少针对页岩气开采废水处理技术环境影响的 LCA 研究.

本文采用 LCA 方法,基于页岩气开采废水处理技术系统的运行和管理效能,针对页岩气开采废水处理内部回用与达标排放的两种管理策略,量

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1805502);中国工程院咨询研究重大项目(2018-2D-CQ-2)

* 责任作者, 教授, dzhang@cqu.edu.cn

化分析不同处理技术的生态环境影响程度,评估页岩气开采废水处理工艺对人群健康、生态环境以及资源的影响,建立页岩气开采废水管理的评价体系.以国内某页岩气田产出水处理工程为例,分析其所选用处理技术的潜在环境影响,并提出改善对策.研究结果可为优化页岩气开采废水处理技术的选择提供参考.

1 研究方法

目前,LCA 已广泛应用于产品或过程的生态环境协调性评价^[11].LCA 分为 4 个有机组成部分:目的与范围的确定、清单分析、影响评价和生命周期解释^[12].生命周期考虑了与产品寿命相关的所有阶段

的环境特征和潜在影响,包括产品的储存、包装、运输、分销、使用和最终处置.

Simapro 软件基于专业且广泛使用的Ecoinvent数据库,并集成了世界上先进的生命周期评价方法,如 Eco-indicator99、CML1992、Ecopoints97、EPS2000 等.Eco-indicator 99 的核心是根据特定的自然环境系统将数据清单的分析结果划分为不同的环境污染问题,并进行权重分析,得出最终的环境生态指数.环境生态指数不仅可以用以表述某一产品的环境损害相对负荷值,也可以表述某种材料或某个过程的环境影响相对负荷值,从而可以更直观的判断对环境的影响程度.其数据分析过程模型如图 1 所示^[13].

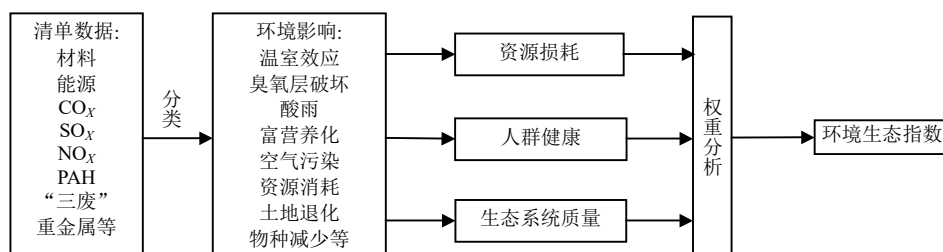


图 1 Eco-indicator 99 数据分析过程模型

Fig.1 Eco-Indicator 99 data analysis process model

本研究采用 Simapro 9.0 版本软件,选用 EcoinventV3.0 数据库以及 Eco-indicator99 作为评价方法^[14],创建 LCA 模型,对清单数据进行分类和量化分析,并依据分析结果,将其转化为相应的环境影响类型,将致癌物质、有机物和无机物归为人群健康影响指标,气候变化、电磁辐射、臭氧层、生态毒性与酸化/富营养化归为生态系统质量影响指标,矿物和化石燃料归为资源损耗指标,然后将特征化的数值进行标准化处理,从人群健康影响、生态系统质量影响、资源损耗 3 个方面进行权重分析,从定性的角度判断对环境的影响程度,最后将定性分析的损害评价,转化为定量的环境生态指数,以获得环境综合影响值^[13,15].

特征因子使用特征模型计算,并将其转换为对影响类别指标的影响.其计算公式如下^[15]:

$$CF=FF \cdot XF \cdot EF \quad (1)$$

式中:CF 表示特征因子;FF 表示归趋因子;XF 表示受纳环境中敏感目标暴露的暴露因子;FF 表示暴露对目标影响的影响因子(effect factor)的乘积.

在 Eco-indicator 99 评估方法中采用端点加权法评估,LCA 在 3 个定义的端点(人群健康、生态系统质量和资源)之间进行加权.该方法获得的权重因子如下:生态系统质量分配权重因子为 40%,人群健康分配的权重因子为 40%、资源损耗分配的权重因子为 20%,计算公式如下^[15-16]:

$$I = \sum_{\text{impact}} \sum_{\text{Endpoint}} \sum_X \left(\frac{\text{Inv}(X) \times CF^{\text{Impact}}(\text{Endpoint}, X)}{NV(\text{Endpoint})} \times WF(\text{Endpoint}) \right) \quad (2)$$

式中: I 表示环境生态指数,Inv(X)表示清单数据, $CF^{\text{Impact}}(\text{Endpoint}, X)$ 表示影响类别(impact)中端点(Endpoint)物质 X 的端点特征因子,NV(Endpoint)表示端点的标准化参考值,WF(Endpoint)表示端点的权重因子.

1.1 目标与范围确定

本研究依据 FPW 的处理需求以及已有知识确定了各自的备选技术,并比选出了内部回用和达标排放两种管理模式不同阶段的最佳处理单元技术.内部回用模式下的备选处理技术包括混凝-絮

凝、化学沉淀、溶气气浮法、超滤与介质过滤. 沉砂后的 FPW 经过油水分离, 利用混凝-絮凝、化学沉淀和溶气气浮法等方式去除 FPW 中的悬浮物(SS)、油和脂(OG)、胶体与部分有机物; 过滤阶段采用介质过滤或超滤等方式. 达标排放模式下选用的有机物处理技术包括电-Fenton 法、电絮凝、臭氧氧化、曝气生物滤池与膜生物反应器. 脱盐处理技术包括正渗透和反渗透、单效蒸发-机械蒸汽再压缩技术(SEE-MVR)和多效蒸发-机械蒸汽再压缩(MEE-MVR)(图 2). 同时, 内部回用模式下的备选处理技术也可作为达标排放模式下预处理备选技术.

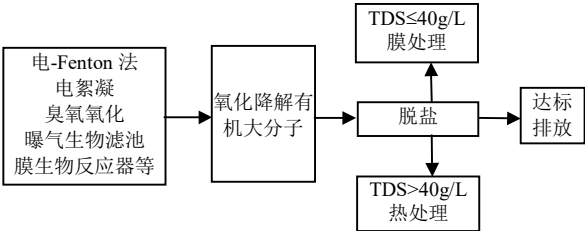


图 2 达标排放型处理工艺流程
Fig.2 Up to standard emission treatment process

研究表明,在污水处理中电力消耗和化学品消耗对大多数影响类别指标结果的环境负荷贡献率高达 90%,证实了环境影响主要来源于电力消耗和化学品消耗^[17].因此,这里选择的FPW处理的系统边界包括淡水消耗、原材料、能源和化学品的使用、废水处理设施以及污泥和盐水等废弃物的最终处置,并以处理 1m³ 的 FPW 为功能单位,研究每处理 1m³ 的 FPW 所造成的环境影响(图 3).

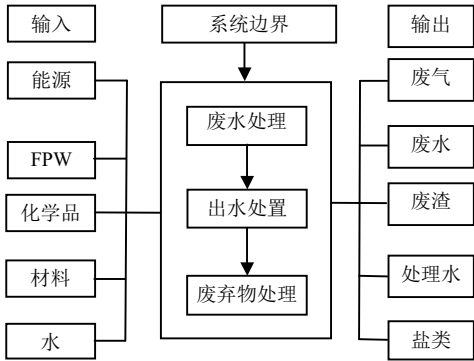


图 3 页岩气开采废水处理系统边界
Fig.3 Boundary of shale gas extraction wastewater treatment system

1.2 清单分析

研究初期建立了完善的 FPW 国内外水质数据库.在此基础上,将 FPW 的最终用途划为内部回用和达标排放两大类,再根据需去除的目标污染物,在同一用途内进行平行比较.在内部回用中,主要考虑对进水中的悬浮物进行处理,因此将比较的重心放在出水 SS 浓度上(表 1~5);达标排放中有有机物的处理主要比较了出水 COD 浓度(表 6~10),脱盐的处理主要比较了出水 TDS 浓度(表 11~12),而其余的水质指标对最终结果的影响较小.

当页岩气 FPW 的总溶解固体(TDS)<20g/L 时,多用于经处理后内部回用,主要作为所在页岩气田配制压裂液的用水,内部回用型处理工艺主要去除目标是油脂、悬浮物、细菌等,具备节省水资源、环境污染小、处理成本低等优势^[18].wang 等^[19]探索了铝基和铁基混凝剂对 FPW 的处理效能,Fe₂(SO₄)₃ 的最佳投加剂量为 50mg/L,处理后 FPW 中 SS 浓度可降至 18mg/L.Kim^[20]等运用溶气气浮法处理页岩气 FPW,在最佳条件下,FPW 中 SS 浓度可降至 5.1mg/L,去除废水中 SS 的效果较好.Butkovskyi^[21]等梳理了典型溶气气浮法的能耗.沉淀是大部分废水处理前的预处理步骤,已有研究将化学沉淀应用于 FPW 处理^[19,22].介质过滤能有效去除废水总有机碳(TOC),不需要进行废水预处理,不受废水 TDS 浓度的影响^[23],其清单数据参考了重庆某页岩气产出水处理的实际工程数据.超滤可以去除废水中大部分颗粒物和悬浮固体,Guo 等^[24]采用超滤处理四川威远页岩气 FPW,处理后 SS 浓度可降至 4.4mg/L.根据文献中的单元技术最佳处理效果,将其能耗整理为清单数据(表 1~5).

表 1 混凝-絮凝清单 ^[19] (功能单位:m ³ 处理水)				
Table 1 List of coagulation-flocculation ^[19] (Functional unit: m ³ treated water)				
混凝剂	输入或输出	参数	数量	单位
铝基混凝剂	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		Al ₂ (SO ₄) ₃	0.25	kg/m ³ 处理水
	输出	SS	29	g/m ³ 处理水
		处理水	1	m ³ /m ³ 处理水
铁基混凝剂	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		Fe ₂ (SO ₄) ₃	0.05	kg/m ³ 处理水
	输出	SS	18	g/m ³ 处理水
		处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 2 溶气气浮法清单^[20-21](功能单位:m³处理水)
Table 2 List of dissolved air float^[20-21](Function unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	1.1	kW·h/m ³ 处理水
	铬钢	2.125×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
输出	SS	5.1	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 3 化学沉淀清单^[19,22](功能单位:m³处理水)
Table 3 List of chemical precipitation^[19,22](Functional unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	8.599×10 ⁻³	kW·h/m ³ 处理水
	铬钢	8.799×10 ⁻⁴	kg/m ³ 处理水
	混凝土	9.999×10 ⁻⁶	m ³ /m ³ 处理水
	NaOH	1	kg/m ³ 处理水
	Na ₂ CO ₃	2	kg/m ³ 处理水
输出	SS	20	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 4 介质过滤清单(功能单位:m³处理水)
Table 4 List of media filtration (functional unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	0.12	kW·h/m ³ 处理水
	金刚砂	0.017	g/m ³ 处理水
	无烟煤	0.009	kg/m ³ 处理水
	活性炭	0.026	kg/m ³ 处理水
输出	SS	6	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

注:清单数据参考了重庆涪陵页岩气田产出水收集及处理系统建设项目环境影响报告书。

表 5 超滤清单^[24](功能单位:m³处理水)
Table 5 List of ultrafiltration^[24](Functional unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	2.1	kW·h/m ³ 处理水
	铬钢	2.432×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	UF 膜	1.4×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
输出	SS	4.4	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

达标排放型处理工艺是对内部回用型处理出水做进一步处理,包括去除有机物和脱盐 2 个阶段,

去除有机物可有利于后续脱盐处理.Fenton 氧化目前已运用于涪陵页岩气田南川区块返排水的处理中,研究表明电-Fenton 法的 COD 去除率显著高于 Fenton 法,在最佳处理条件下,电-Fenton 法处理涪陵焦石坝页岩气 FPW,出水 COD 降至 71.3mg/L^[25].除此之外,臭氧氧化目前已作为涪陵页岩气田焦石坝区块 FPW 处理技术的核心^[26],其处理 FPW 的最佳臭氧用量为 0.3g/L^[21].臭氧氧化处理城市废水的耗电量约为 0.27kW·h/m³ 处理水^[27],利用臭氧氧化膜脱盐处理煤化工废水,出水 COD 浓度约为 60mg/L^[28].电絮凝可用于处理大部分有机、无机污染物以及部分重金属,FPW 中高盐分导致的高导电性有利于降低电絮凝的成本,同时其直流电场促使油滴的电凝结也有利于去除油和脂^[29-31]. Zhang 等^[32]研究了电絮凝对四川页岩气钻井废水预处理的效果,João 等^[33]也探究了电絮凝处理废水的效能,并对比了铝电极和铁电极的能耗及处理效果,表明电絮凝与传统有机物去除工艺相比,能耗更低,且 COD 去除效果较好;曝气生物滤池处理能力强、效果好,具有去除 TSS、COD、脱氮除磷的作用,可以去除 FPW 中的大部分有机污染物^[34].吴敏等^[35]对普通生物滤池处理工艺的生命周期能耗进行了总结.Daniel 等^[36]利用曝气生物滤池处理 FPW,COD 去除率约为 80%.膜生物反应器对污染物的去除率一般高于常规活性污泥处理系统,对石油化工废水中多种多环芳烃(包括萘和菲)的去除效果较好^[37-39].Ioannou-Ttofa 等^[40]对膜生物反应器处理过程进行了生命周期评价,定量分析了膜生物反应器处理废水的能耗.Ortiz 等与 Foley 等^[41-42]综述了膜生物反应器的污染物排放清单.根据文献中出现的能源消耗、化学品消耗和耗材,将其整理为清单数据(表 6~10).

表 6 电-Fenton 法清单^[25](功能单位:m³处理水)
Table 6 List of electro-Fenton process^[25](Function unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	4	kW·h/m ³ 处理水
	H ₂ O ₂	14.4	g/m ³ 处理水
	FeSO ₄	2.55	kg/m ³ 处理水
输出	COD	71.3	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 7 臭氧氧化清单^[21,27-28](功能单位:m³ 处理水)

Table 7 List of ozone oxidation^[21,27-28](Functional unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	0.27	kW·h/m ³ 处理水
	臭氧	0.3	kg/m ³ 处理水
输出	COD	60	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 8 电絮凝清单^[32-33](功能单位:m³ 处理水)

Table 8 List of electrical flocculation^[32-33](Functional unit: m³ treated water)

电极材料	输入或输出	参数	数量	单位
铝电极	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		电能	5.358	kW·h/m ³ 处理水
		Al	1.292	kg/m ³ 处理水
	输出	COD	140.5	g/m ³ 处理水
		处理水	1	m ³ /m ³ 处理水
铁电极	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		电能	2.489	kWh/m ³ 处理水
		Fe	3.772	kg/m ³ 处理水
	输出	COD	121.8	g/m ³ 处理水
		处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 9 曝气生物滤池清单^[35,41](功能单位:m³ 处理水)

Table 9 List of biological aerated filter^[35,41](Function unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	4	kW·h/m ³ 处理水
	水泥	0.147	kg/m ³ 处理水
	铬钢	2.106×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	活性炭	0.032	kg/m ³ 处理水
输出	COD	100	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

FPW 处理的难点在于脱盐,并且脱盐的难度和成本随着 TDS 浓度的增加而增加.当 TDS 浓度处于 20~40g/L 时膜处理技术更适合进行脱盐^[43].Mcginnis 等^[44]的研究给出了正渗透的能耗及处理效果.Raluy 等^[45]对反渗透(RO)的能耗进行了清单分析,结果表明当反渗透工艺所耗功率约为 2kW·h/m³ 处理水时,能在达到处理效果的同时,污染物排放最少;当 TDS 浓度>40g/L 时宜选用热处理技术代替膜处理技术进行脱盐^[46].Onishi 等^[47]针对单效蒸发-机械蒸汽再压缩技术(SEE-MVR)和多效蒸发-机械蒸汽再压缩(MEE-MVR)的能耗做了分析,Caballero 等^[48]统计热处理清单数据.通过整理 FPW 脱盐单元

技术的清单分析数据(表 11~12).

表 10 膜生物反应器清单^[40](功能单位:m³ 处理水)

Table 10 List of membrane bioreactor^[40](Function unit: m³ to treat water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	5.36	kW·h/m ³ 处理水
	铬钢	1.096×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
	铸铁	1.278×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	聚乙烯	4.109×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	NaClO	2.568×10 ⁻⁴	kg/m ³ 处理水
输出	CO ₂	0.77	kg/m ³ 处理水
	烟尘(dust)	0.72	g/m ³ 处理水
	NO _x	1.4	g/m ³ 处理水
	SO _x	2.79	g/m ³ 处理水
	处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 11 正渗透和反渗透清单^[44-45](功能单位:m³ 处理水)

Table 11 List of forward osmosis and reverse osmosis^[44-45](Functional unit: m³ treated water)

工艺	输入或输出	参数	数量	单位
正渗透	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		电能	1.08	kW·h/m ³ 处理水
		膜材料	4.3×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
	输出	TDS	300	g/m ³ 处理水
		处理水	1	m ³ /m ³ 处理水
反渗透	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		电能	2	kW·h/m ³ 处理水
		膜材料	4.3×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
	输出	TDS	120	g/m ³ 处理水
		处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

表 12 SEE-MVR 和 MEE-MVR^[47-48]清单(功能单位:m³ 处理水)

Table 12 List of SEE-MVR and MEE-MVR^[47-48](Function unit: m³ treated water)

工艺	输入或输出	参数	数量	单位
SEE-MVR	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		电能	51.496	kW·h/m ³ 处理水
		总镍	4.585×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
		铬钢	5.047×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	输出	TDS	170	g/m ³ 处理水
		结晶盐	93.064	kg/m ³ 处理水
MEE-MVR	输入	FPW	1	m ³ /m ³ 处理水
		电能	29.188	kW·h/m ³ 处理水
		总镍	3.212×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
		铬钢	1.385×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	输出	TDS	170	g/m ³ 处理水
		结晶盐	93.064	kg/m ³ 处理水
		处理水	1	m ³ /m ³ 处理水

2 结果与讨论

2.1 内部回用环境影响评估

利用 Simapro 软件,得到内部回用各种单元技术的环境影响.如图 4 所示,对人群健康、生态系统质量和资源损耗影响的单元技术排序为:化学沉淀>溶气气浮法>铝基混凝剂>铁基混凝剂,过滤阶段的单元技术影响程度为超滤>介质过滤.选用的内部回用单元技术的环境影响的排序均为:人群健康影响>资源损耗>生态系统质量影响.

化学沉淀对人群健康、生态系统、资源损耗的影响程度均最大,生态指数分别为 7×10^{-4} 、 5.39×10^{-5} 和 5×10^{-4} ;混凝-絮凝阶段采用铁基混凝剂对人群健康、生态系统、资源损耗的影响程度均最小,环境生态指数分别为 2.89×10^{-6} 、 3.27×10^{-7} 和 1.12×10^{-6} ;采用铝基混凝剂的混凝-絮凝对环境的影响程度也相对较小.

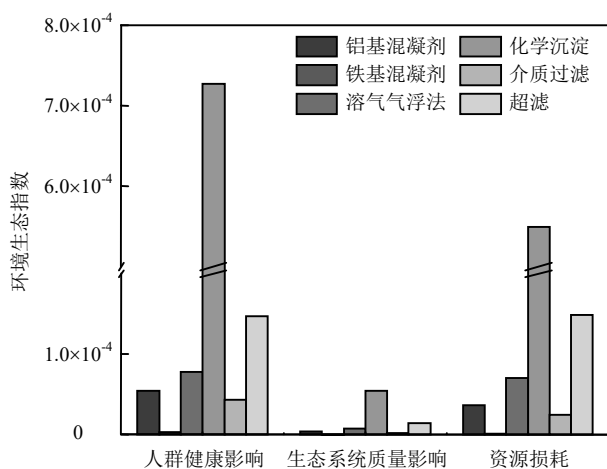


图 4 内部回用型单元处理技术的环境影响分析结果

Fig.4 Environmental impact analysis results of internal recycling unit processing technology

2.2 达标排放环境影响评估

如图 5 所示,铝电极电絮凝对所有参数指标的影响均最大,因此对环境的影响程度最大,其人群健康影响、生态系统质量影响和资源损耗的环境生态指数分别为 4.9×10^{-3} 、 3×10^{-4} 和 1.9×10^{-3} ;曝气生物滤池对人群健康影响最小,环境生态指数为 3×10^{-4} ;铁电极电絮凝对生态系统质量与资源损耗的影响程度最小,环境生态指数分别为 2.09×10^{-5} 和 2×10^{-4} ;达标排放去除有机物阶段的单元处理技术对生态环

境的影响程度均为:人群健康影响>资源损耗>生态系统影响.

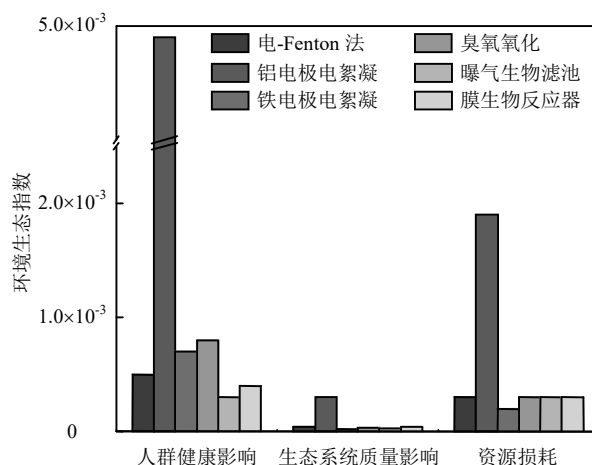


图 5 达标排放单元处理技术的环境影响分析结果

Fig.5 Environmental impact analysis results of standard discharge unit treatment technology

进一步对达标排放脱盐阶段中膜脱盐处理技术进行分析,探究对生态环境影响较大的工艺,如图 6 所示,反渗透对人群健康、生态系统质量和资源损耗上的影响程度均大于正渗透,其环境生态指数分别为 2×10^{-4} 、 1.22×10^{-5} 和 2.5×10^{-4} ;正渗透对人群健康、生态系统、资源损耗的影响的环境生态指数分别为 1×10^{-4} 、 7.43×10^{-6} 和 1.5×10^{-4} .选用的达标排放膜处理脱盐技术对生态环境的影响程度均为:资源损耗>人群健康影响>生态系统质量影响.

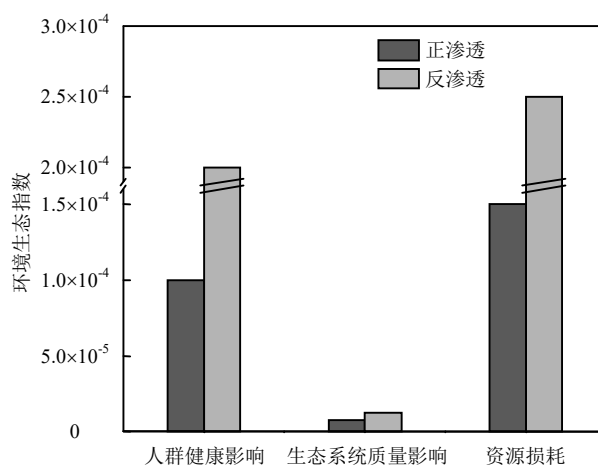


图 6 达标排放膜脱盐处理技术环境影响的分析结果

Fig.6 Analysis results of environmental impact of membrane desalination treatment technology up to standard

进一步对达标排放热处理脱盐技术进行生命周期评价,如图 7 所示, SEE-MVR 在人群健康、生态系统质量和资源损耗上的环境生态指数分别为 3.6×10^{-3} , 3×10^{-4} 和 3.2×10^{-3} ,均大于 MEE-MVR. MEE-MVR 对人群健康、生态系统、资源损耗的影响程度均较小,环境生态指数分别为 2×10^{-3} , 2×10^{-4} 和 1.8×10^{-3} .选用的达标排放热处理脱盐技术对生态环境的影响程度均为:人群健康影响>资源损耗>生态系统影响.

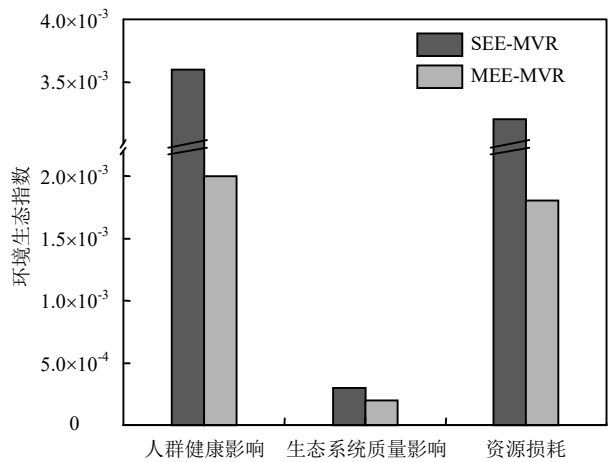


图 7 达标排放热处理技术环境影响的分析结果
Fig.7 Analysis results of environmental impact of heat treatment technology for up-to-standard discharge

2.3 处理技术的选择

已有研究表明,铁基混凝剂用氯作为氧化剂对 FPW 浊度的去除率达到 98%^[49],铝基混凝剂对 FPW 浊度的最大去除率为 96.8%^[50],介质过滤对低浓度油和脂的去除率可达到 90%左右^[23],因此,混凝-絮

凝阶段推荐铁基混凝剂或铝基混凝剂,过滤阶段的内部回用型单元技术推荐选用介质过滤.化学沉淀对环境影响较大应尽量减少或避免.溶气气浮法、微滤/超滤等可作为备选方案.

在 FPW 达标排放处理有机物时,可以尽量减少或避免铝电极电絮凝的使用,以减少对生态环境的影响.曝气生物滤池与铁电极电絮凝均是值得推荐的处理技术.除此之外,其它工艺也可以根据实际情况作为备选方案.膜处理脱盐技术中,正渗透的环境影响显然低于反渗透.热处理脱盐技术中,SEE-MVR 的环境影响几乎是 MEE-MVR 两倍,两者都能达到较好的脱盐效果^[47],因此推荐采用 MEE-MVR 作为热处理的脱盐技术.

对环境生态影响程度最小的组合工艺为内部回用选用“混凝-絮凝-溶气气浮法-介质过滤”,达标排放阶段有机物去除技术优先选用铁电极电絮凝,其次可将电-Fenton 法、臭氧氧化以及曝气生物滤池作为有机物处理技术备选方案;脱盐阶段 TDS 浓度处于 20~40g/L,宜选用正渗透.虽然正渗透膜技术的低能耗、高效率的优点正越来越得到学术界和工业界的重视,但反渗透工艺是一种广泛用于高纯工业用水制备和海水淡化等的脱盐技术,也在压裂返排液脱盐处理中得到了商业化应用^[51],对 FPW 的脱盐效果更佳^[45],当 TDS 浓度>40g/L,热处理阶段宜选用 MEE-MVR 进行脱盐.

两种管理模式不同阶段下的各单元技术适宜处理的物质如表 13 所示,根据不同的目标污染物,采取针对性的处理技术,从环境生态影响角度出发,推荐最佳单元处理技术.

表 13 各单元技术不同阶段适宜处理的物质及推荐工艺

Table 13 Substances suitable for treatment at different stages of each unit technology and recommended processes

项目	名称	污染物举例	水质指标	比选工艺	推荐工艺
内部回用	悬浮物	砂;结垢物;细菌	总悬浮固体;浊度	①混凝-絮凝;②溶气气浮法③介质过滤;	①②③
	悬浮有机物	油;油脂;胶体;细菌	油脂;TOC;COD;BOD ₅	④超滤;⑤化学沉淀	
达标排放	溶解有机物	苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯等);酚类;有机酸	BTEX;VOC;特殊化学添加剂	①曝气生物滤池②膜生物反应器;③电-Fenton 法;④铁电极电絮凝;⑤臭氧氧化;⑥铝电极电絮凝	①②③④⑤
	溶解多价离子	典型的(Ca,Mg,Fe,Sr,Ba);硫酸盐;天然放射性物质	硬度;特殊金属离子(Fe,Sr,Ba);特定阴离子(硫酸盐,硝酸盐)	膜处理:①反渗透;②正渗透;	②④
	溶解单价离子	典型的(Na,K,Cl,Br,I,NH ⁴⁺)	特殊离子(Na,Cl,Br);氨氮	热处理: ③SEE-MVR;④MEE-MVR	

2.4 案例分析

以涪陵某页岩气田产出水处理工程为例进行

生命周期评价,评估其处理技术的环境影响.其产出水水质具有中高含盐、中高有机浓度、低可生化性、

重金属元素含量低的特点,COD、氨氮、含盐量、氯离子平均含量分别为 2356、86.27、26500 和 14000mg/L,重金属、硫酸根、钙镁离子含量均较低,水质较复杂.收集及处理系统采用“预处理(水质调节、混凝沉淀、两级芬顿氧化、电解氧化、多介质过滤等)+双膜减量化(超滤、反渗透)+MVR 蒸发结晶”处理技术,将其划分为预处理、膜脱盐处理和热处理 3 个阶段.页岩气田产出水以处理 1m³ 的 FPW 为功能单位.页岩气产出水相关协同处理技术系统边界包括操作每个单元工艺所需的材料和能量,从人群健康、生态系统质量和资源损耗的影响 3 个方面进行评估.根据系统边界以及 FPW 处理技术的实际情况,本研究忽略产出水处理过程中的损失、设备占地和质量小于产品质量 1%的化学品的环境影响.页岩气田产出水处理技术的环境影响主要取决于淡水消耗、原材料、能源和化学品的使用、废水处理设施以及污泥和盐水等废弃物的最终处置,所建立的技术路线及物质消耗清单分析数据(表 14~16)来自涪陵页岩气田产出水收集与处理系统可行性研究报告.

表 14 预处理清单(功能单位:m³ 处理水)
Table 14 List of pretreatment (Functional unit: m³ treated water)

工艺	输入或输出	参数	数量	单位
预处理	输入	产出水	1	m ³ /m ³ 处理水
		电能	9.396	kW·h/m ³ 处理水
		玻璃钢	2.876×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
		混凝剂 (聚合氯化铝)	0.4	kg/m ³ 处理水
		絮凝剂 (聚丙烯酰胺)	5×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
		盐酸	1.2	kg/m ³ 处理水
		双氧水	6	kg/m ³ 处理水
		FeSO ₄ ·7H ₂ O	1	kg/m ³ 处理水
		NaOH	0.4	kg/m ³ 处理水
		Na ₂ CO ₃	0.7	kg/m ³ 处理水
		NaClO	4	kg/m ³ 处理水
		金刚砂	1.7×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
		无烟煤	9×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
		活性炭	2.6×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
	输出	H ₂ S	5.136×10 ⁻⁶	kg/m ³ 处理水
		NH ₃	3.767×10 ⁻⁵	kg/m ³ 处理水
		剩余污泥	9.6875	kg/m ³ 处理水
		预处理出水	1	m ³ /m ³ 处理水

注:产出水、剩余污泥、预处理出水均为重庆涪陵页岩气田产出水收集及处理系统建设项目环境影响报告书具体数据,自行输入 Simapro 软件.

表 15 膜脱盐处理清单(功能单位:m³ 处理水)
Table 15 List of membrane desalination treatment (functional unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	预处理出水	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	6.04	kW·h/m ³ 处理水
	玻璃钢	4.845×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	UF 膜	4.3×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
	RO 膜	4.3×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
输出	膜脱盐处理出水	1	m ³ /m ³ 处理水

注:预处理出水、膜脱盐处理出水均为根据项目可研报告具体数据,自行输入 Simapro 软件.

表 16 热处理清单(功能单位:m³ 处理水)
Table 16 List of heat treatment (functional unit: m³ treated water)

输入或输出	参数	数量	单位
输入	膜脱盐处理出水	1	m ³ /m ³ 处理水
	电能	40.494	kW·h/m ³ 处理水
	页岩气	4.61	m ³ /m ³ 处理水
	总镍	3.212×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
	铬钢	1.385×10 ⁻³	kg/m ³ 处理水
输出	盐尘	4.9×10 ⁻²	kg/m ³ 处理水
	结晶盐	24.6	kg/m ³ 处理水
	TSP	8.298×10 ⁻⁵	kg/m ³ 处理水
	NO _x	3.688×10 ⁻⁴	kg/m ³ 处理水
	SO ₂	1.106×10 ⁻⁴	kg/m ³ 处理水
	处理出水	1	m ³ /m ³ 处理水

注:膜脱盐处理出水、页岩气、处理出水均为根据项目可研报告具体数据.

2.4.1 预处理生命周期环境影响评估 根据预处理清单数据的分析结果(表 14),采用 simapro 软件对页岩气田产出水处理技术进行特征化,挑选其中影响最大的 6 个因素的参数,进一步对特征化结果进行分析,如图 8a 所示,次氯酸钠对人群健康影响程度较大,环境生态指数为 2.6×10⁻³;过氧化氢对生态系统质量与资源损耗的影响较大,环境生态指数分别为 2.3×10⁻⁴ 和 1.7×10⁻³;相比而言,氢氧化钠对三者之间的影响较小.预处理阶段清单指标对生态环境的影响程度均为:人群健康影响>资源损耗>生态系统质量影响.

2.4.2 膜处理生命周期环境影响评估 如图 8b 所示,双膜处理技术消耗的电能对人群健康、生态系统质量与资源损耗的影响程度均最大,环境生态指数分别为 4.2×10⁻⁴, 3.36×10⁻⁵ 和 4×10⁻⁴,是膜脱盐处理对生态环境影响的主要因素.设备所采用的材质玻

玻璃钢以及膜材料尼龙 66(聚酰胺 66)、聚乙烯的影响程度较小;对人群健康、生态系统与资源损耗的影响程度均为电能>尼龙 66>聚乙烯>玻璃钢。除电能外,膜脱盐处理中其他指标对生态环境的影响程度均为:资源损耗>人群健康影响>生态系统质量影响。

2.4.3 热处理生命周期环境影响评估 热处理系统包括 3 个部分:MVR 蒸发结晶系统、盐浆脱水干燥系统与母液蒸发结晶系统,且 MVR 的耗电量较大。如图 8c 所示,热处理系统消耗的电能是对生态环境影响的主要因素,其人群健康影响、生态系统质量影响和资源损耗的环境生态指数分别为 2.7×10^{-3} , 2×10^{-4} 和 2.5×10^{-3} 。对人群健康的影响程度为:电能>镍>页岩气>铬钢;对生态系统质量、资源损耗的影响程度均为电能>镍>铬钢>页岩气。热处理阶段各清

单指标对生态环境的影响程度均为:人群健康影响>资源损耗>生态系统质量影响。

2.4.4 产出水处理工程生命周期环境影响评估 如图 8d 所示,根据涪陵页岩气田产出水处理工程的生命周期评价预处理结果可得预处理对人群健康、生态系统质量和资源损耗的影响程度均最大,是涪陵页岩气田产出水处理工程对生态环境影响的主要因素,环境生态指数分别为 5.6×10^{-3} , 5×10^{-4} 和 3.8×10^{-3} 。对人群健康、生态系统质量和资源损耗的影响程度均为:预处理>热处理>深度处理。膜脱盐处理对人群健康、生态系统质量、资源损耗的影响程度均最小,环境生态指数分别为 4×10^{-4} , 3.53×10^{-5} 和 5×10^{-4} 。页岩气田产出水处理工程对生态环境的影响程度为:人群健康影响>资源损耗>生态系统影响。

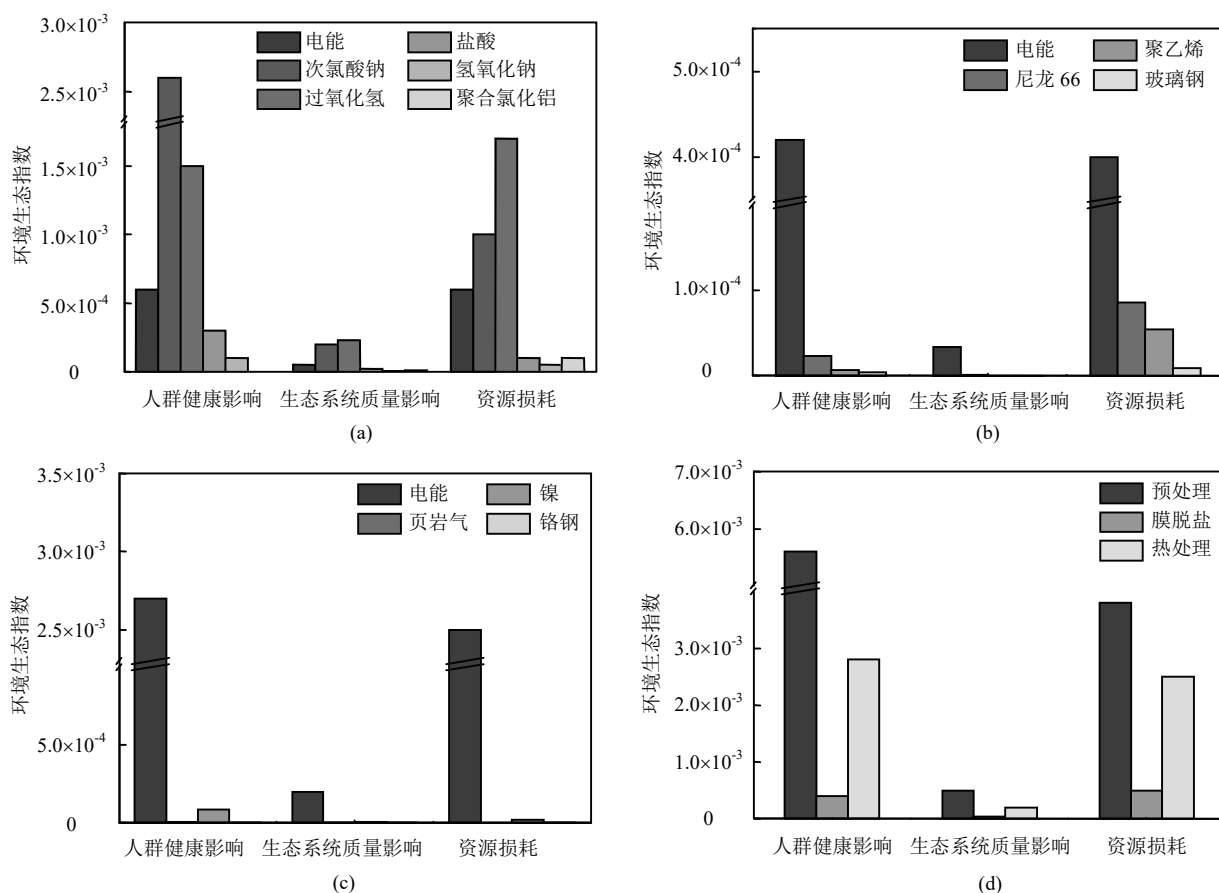


图 8 涪陵页岩气田产出水不同阶段处理工程环境影响的分析结果

Fig.8 Analysis results of engineering environmental impact of different stages of water produced in Fuling shale gas field

综上所述在预处理阶段中“两级 Fenton+NaClO”氧化处理产出水阶段对生态环境影响较大,其主要影响因素是化学品次氯酸钠和过氧化氢的投加,但氢氧化钠的危害性相对较小;热处理阶段对

生态环境产生主要影响的是电能,对生态环境影响远超过预处理和膜脱盐处理阶段。同时电能也是膜脱盐处理阶段对生态环境产生影响的主要因素。电能的主要使用是双膜系统泵的能耗。膜脱盐处理阶

段对生态环境产生影响的则是反渗透膜和超滤膜,膜材料的更换会带来一定的生态环境影响,并且反渗透膜材料的生态环境影响高于超滤膜材料.相比于预处理与热处理阶段,膜脱盐处理的生态环境影响较小.

3 结论

3.1 内部回用模式下,推荐采用以铁基混凝剂的混凝-絮凝为主,并辅以介质过滤,尽量减少或避免化学沉淀的使用.当 FPW 中 OG 浓度高(>50mg/L)时,采用混凝-絮凝与溶气气浮法联用处理效果更佳.

3.2 达标排放模式下,优先推荐“混凝-絮凝-有机物的去除-膜处理”组合工艺.其中,有机物的去除推荐采用铁电极电絮凝.当 FPW 的 TDS 浓度超过 40000mg/L,推荐采用 MEE-MVR 脱盐代替膜处理脱盐.

3.3 通过案例分析揭示了页岩气开采废水处理过程中的环境影响,并提出了减缓策略.在混凝阶段由铝基混凝剂改用为铁基混凝剂;澄清软化阶段严格监控 NaOH 与 Na_2CO_3 的用量;膜脱盐处理阶段合理化控制超滤的用电量;热处理阶段推荐采用 MEE-MVR.并为实际的工程应用中页岩气 FPW 的管理及处理技术选择提供思路与方法.

参考文献:

- [1] Butkovskiy A, Bruning H, Kools S A, et al. Organic Pollutants in Shale Gas Flowback and Produced Waters: Identification, Potential Ecological Impact, and Implications for Treatment Strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017,51(9):4740-4754.
- [2] Sun Y, Wang D, Tsang D, et al. A critical review of risks, characteristics, and treatment strategies for potentially toxic elements in wastewater from shale gas extraction [J]. *Environment International*, 2019,125:452-469.
- [3] 卢培利,邱 哲,张代钧,等.页岩气开采返排废水有机污染物研究进展与展望 [J]. *化工进展*, 2018,37(3):1161-1166.
Lu P L, Qiu Z, Zhang D J, et al. Research progress and prospect on the organic pollutants in flowback wastewater from shale gas extraction [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018,37(3):1161-1166.
- [4] 吴青芸,郑 猛,胡云霞.页岩气开采的水污染问题及其综合治理技术 [J]. *科技导报*, 2014,32(13):74-83.
Wu Q Y, Zheng M, Hu Y X, et al. Shale Gas Produced Water Contamination and Its Comprehensive Treatment [J]. *Science & Technology Review*, 2014,32(13):74-83.
- [5] José A C, Juan A L, Natalia Q, et al. Environmental and Economic Water Management in Shale Gas Extraction [J]. *Sustainability*, 2020,12:4.
- [6] Wang J L, Liu M M, Benjamin C M, et al. Environmental impacts of shale gas development in China: A hybrid life cycle analysis [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017,120:38-45.
- [7] Wilkins R F, Menefee A H, Clarens A F. Environmental Life Cycle Analysis of Water and CO₂-Based Fracturing Fluids Used in Unconventional Gas Production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(23):13134-13141.
- [8] Ma G, Geza M, Cath T Y, et al. iDST: An integrated decision support tool for treatment and beneficial use of non-traditional water supplies - Part II. Marcellus and Barnett Shale case studies [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018,25:258-268.
- [9] Wang Y, Tavakkoli S, Khanna V, et al. Life Cycle Impact and Benefit Trade-Offs of a Produced Water and Abandoned Mine Drainage Cotreatment Process [J]. *Environmental science & technology*, 2018, 52(23):13995-14005.
- [10] 谭 茜.基于生命周期分析的页岩气开采废水治理方案的综合评价 [D]. 重庆:重庆大学, 2017.
Tan Q, The Comprehensive Evaluation of Schemes for Treatment and Disposal of Shale gas Wastewater Based on Life Cycle Analysis [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [11] 徐 艳,张培栋.基于 SimaPro 利用废弃餐饮油脂炼制生物柴油的生命周期环境影响评价 [J]. *可再生能源*, 2013,31(6):79-84.
Xu Y, Zhang P D. The environmental impact assessment of life cycle of biodiesel from food waste oil based on SimaPro software [J]. *Renewable Energy Resources*, 2013,31(6):79-84.
- [12] ISO 14040-2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework [S].
- [13] 邓南圣,王小兵.生命周期评价 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
Deng N S, Wang X B. Life Cycle Impact Assessment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [14] Herrmann I T, Moltesen A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - a comparative assessment of SimaPro and GaBi [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015,86:163-169.
- [15] Michael Z H, Mark A J. Life Cycle Impact Assessment [M]. Netherlands: Springer, 2015.
- [16] Mark G K, Spriensma R. The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment Methodology Report [R]. Amersfoort, Netherlands: PRé Consultants, 1999.
- [17] Rashid S S, Liu Y Q, Zhang C. Upgrading a large and centralised municipal wastewater treatment plant with sequencing batch reactor technology for integrated nutrient removal and phosphorus recovery: Environmental and economic life cycle performance [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,749.
- [18] 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 Z L, Chen Y, Liu M. Research progress in treatment technology for shale gas wastewater [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020,39(11):4589-4599.
- [19] Wang M C, Wang M W, Chen D, et al. Evaluation of pre-treatment techniques for shale gas produced water to facilitate subsequent treatment stages [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019,7:1.
- [20] Kim J Y, Kim J, Lim J H, et al. Cold-cathode X-ray irradiation pre-treatment for fouling control of reverse osmosis (RO) in shale gas produced water (SGPW) treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019,374:49-58.
- [21] Butkovskiy A, Faber A, Wang Y, et al. Removal of organic compounds from shale gas flowback water [J]. *Water Research*, 2018,

- 138:47-55.
- [22] Carrero-Parreño A, Viviani C, Onishi, et al. Optimal Pretreatment System of Flowback Water from Shale Gas Production [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017,56(15):4386-4398.
- [23] Igundu E T, Chen G Z. Produced water treatment technologies [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2014,9(3):157-177.
- [24] Guo C, Chang H, Liu B, et al. A combined ultrafiltration - reverse osmosis process for external reuse of Weiyuan shale gas flowback and produced water [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018,4(7):942-955.
- [25] 林雯杰,王 菁,孟宣宇,等.电-Fenton 法处理页岩气压裂返排液 [J]. *环境工程学报*, 2017,11(2):857-861.
Lin W J, Wang Q, Meng X Y, et al. Treatment of shale gas fracturing flowback fluid by electro-Fenton process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017,11(2):857-861.
- [26] 胡德高.涪陵页岩气田开发建设水污染防控探索与实践 [J]. *工业用水与废水*, 2017,48(4):39-43.
Hu D G. Exploration and practice of water pollution control during development and construction of Fuling shale gas field [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2017,48(4):39-43.
- [27] Munoz I, Rodriguez A, Rosal R, et al. Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment A focus on toxicity-related impacts [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(4):1245-1256.
- [28] 张志伟.臭氧氧化深度处理煤化工废水的应用研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
Zhang Z W. The Research and application of ozonation for the advanced treatment of coal chemical wastewater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [29] Dina T M, Muftah H E, Mustafa N, et al. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017,186(1):24-41.
- [30] Esmailirad N, Carlson K, Ozbek P O. Influence of softening sequencing on electrocoagulation treatment of produced water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015,283:271-729.
- [31] Shan Z, Guohe H, Guanhui C, et al. Hardness, COD and turbidity removals from produced water by electrocoagulation pretreatment prior to Reverse Osmosis membranes [J]. *Desalination*, 2014,344:454-462.
- [32] Zhang H, Luo Z, Zhang X F, et al. Electro-flocculation pretreatment experiments of shale gas drilling wastewater [J]. *Natural Gas Industry B*, 2020,7(4):309-316.
- [33] João P P B R, Alexandre T P. Electroflocculation for the treatment of wastewater from dairy food industry: scale-up of a laboratory reactor to full-scale plant [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2019,21(5):1155-1163.
- [34] 张 杰,曹相生,孟雪征.曝气生物滤池的研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2002,18(8):26-29.
Zhang J, Cao X S, Meng X Z. Research progress of biological aerated filter [J]. *China Water & Wastewater*, 2002,18(8):26-29.
- [35] 吴 敏,杨 健.普通生物滤池处理工艺的生命周期能耗分析 [J]. *中国给水排水*, 2001,17(6):69-72.
Wu M, Yang J. Life cycle energy consumption analysis of common biological filter treatment process [J]. *China Water & Wastewater*, 2001,17(6):69-72.
- [36] Daniel E F, Stephanie M R, Zackary L J, et al. Biologically active filtration for fracturing flowback and produced water treatment [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2017,18:29-40.
- [37] Mozo I, Stricot M, Lesage N, et al. Fate of hazardous aromatic substances in membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2011,45(15): 4551-4561.
- [38] Zolfaghari M, Drogui P, Seyhi B, et al. Occurrence, fate and effects of Di (2-ethylhexyl) phthalate in wastewater treatment plants: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2014,194:281-293.
- [39] Zilverentant A, van Nieuwkerk A, Vance I, et al. Produced water report: Pilot-scale membrane bioreactor treats produced water [J]. *World Oil*, 2009,230(8):79-82.
- [40] Ioannou-Ttofa L, Foteinis S, Chatzisyseon E, et al. The environmental footprint of a membrane bioreactor treatment process through Life Cycle Analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,568:306-318.
- [41] Foley J, de Haas D, Hartley K, et al. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2009,44(5):1654-1666.
- [42] Ortiz M, Raluy R G, Erra L. Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town [J]. *Desalination*, 2007,204(1-3):121-131.
- [43] Guarnone M, Rossi F, Negri E, et al. An unconventional mindset for shale gas surface facilities [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2012,6:14-23.
- [44] McGinnis R L, Hancock N T, Nowosielski-Slepawron M S, et al. Pilot demonstration of the NH_3/CO_2 forward osmosis desalination process on high salinity brines [J]. *Desalination*, 2013,312(3):67-74.
- [45] Raluy G, Serra L, Uche J. Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies [J]. *Energy*, 2006,31(13):2361-2372.
- [46] 陈翱翔,张代钧,卢培利,等.页岩气开发废水污染控制技术与环境监管研究 [J]. *环境科学与管理*, 2016,41(10):72-77.
Chen A X, Zhang D J, Lu P L, et al. Shale Gas Wastewater Pollution Control Technology and Environmental Regulatory Measures [J]. *Environmental Science and Management*, 2016,41(10):72-77.
- [47] Onishi V C, Carrero-Parreño A, Reyes-Labarta J A, et al. Desalination of shale gas produced water: A rigorous design approach for zero-liquid discharge evaporation systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,140(3): 1399-1414.
- [48] Caballero J A, Labarta J A, Quirante N, et al. Environmental and Economic Water Management in Shale Gas Extraction [J]. *Sustainability*, 2020,12:4.
- [49] Nadella M, Sharma R, Chellam S. Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric coagulant for reuse in hydraulic fracturing: Temperature effects on aggregation and high-rate sedimentation [J]. *Water Research*, 2020,170.
- [50] Yonghyeon L, Mingcan C, Jongbok C, et al. Demonstration and evaluation of potential configuration options for shale-wastewater treatment plant by combining several unit processes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,232(20):867-876.
- [51] 刘文士,廖仕孟,向启贵,等.美国页岩气压裂返排液处理技术现状及启示 [J]. *天然气工业*, 2013,33(12):158-162.
Liu W S, Liao S M, Xiang Q G, et al. Status quo of fracturing flowback fluids treatment technologies of US shale gas wells and its enlightenment for China [J]. *Natural Gas Industry*, 2013,33(12): 158-162.

作者简介: 苏培兴(1996-),男,浙江温州人,重庆大学硕士研究生,主要研究方向水污染控制与资源化。