



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201904041

中图分类号 X51

文献标识码 A

常天阳, 赵晓, 高秦, 等. 石油加工企业脱硝、除尘工程经济性及超低排放潜力分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2490-2501.

CHANG Tianyang, ZHAO Xiao, GAO Qin, et al. Economics and ultra-low emission potential analysis of denitrification and dust removal projects in petroleum processing industry[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(10): 2490-2501.

石油加工企业脱硝、除尘工程经济性及超低排放潜力分析

常天阳^{1,2}, 赵晓¹, 高秦³, 张光明¹, 马中¹, 常化振^{1,*}

1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872

2. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670

3. 中国石油天然气股份有限公司大庆炼化分公司, 大庆 163411

第一作者: 常天阳(1997—), 女, 本科生。研究方向: 环境管理及成本分析。E-mail: 18678640831@163.com

*通信作者: 常化振(1983—), 男, 博士, 教授。研究方向: 大气污染控制。E-mail: chz@ruc.edu.cn

摘要 基于多家石油加工企业大气污染控制工程案例, 利用层次分析模型对脱硝、除尘工程的经济性进行了评估, 并对未来不同情景下的工程技术成本、效益进行了比较分析。结果表明, 在基准情景下, 采用不同控制技术的石油加工企业经济性评价综合值差别较大。现有控制技术单一的企业, 由于投资成本高或环境效益较低导致经济性下降; 采用多种技术控制污染物排放的企业, 绝对的投资费用较高, 但可带来良好的环境效益, 因而经济性更高。与基准情景相比, 在超低排放情景下, 系统总成本显著增加, 系统总效益显著提升, 但是总效益的增幅与总成本的增幅相差不大。通过研究发现, 石油加工企业推行超低排放, 经济性较高, 技术上也可行。上述研究结果可为石油加工企业推行超低排放提供参考。

关键词 氮氧化物; 颗粒物; 工程经济性; 超低排放; 石油加工

近年来, 我国大气污染形势严峻, 区域性雾霾等污染问题频发。据统计, 2011—2015年, 尽管我国工业废气治理设施逐年增加, 治理设施处理能力有较大提升, 运行费用不断加大, 但工业废气排放总量仍在上升, 工业烟尘排放总量也居高不下^[1]。由此可见, 工业大气污染物排放仍未得到良好的控制, 形势不容乐观。

“十二五”以来, 我国燃煤电厂大气污染物减排取得明显成效, 全行业基本实现了“超低排放”。随着电力行业污染物排放量大幅削减, 钢铁、水泥、石化等非电力行业逐渐成为大气污染治理的重点。钢铁行业已有多种节能减排技术对其大气污染物进行协同控制, 并且相关研究对各项技术的环境属性、经济属性和技术属性^[2]进行了比较和分析。水泥行业为达到更低的排放要求, 也在不断改变单一的末端污染治理, 将废气量的直接减排与间接减排结合, 实行全过程污染控制^[3]。2019年, 我国已正式全面启动钢铁行业超低排放改造, 水泥行业的超低排放也是大势所趋。而石

收稿日期: 2019-04-07; 录用日期: 2019-06-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203900); 国家自然科学基金资助项目(51778619, 21577173)

油加工企业排放大量的氮氧化物、颗粒物等大气污染物, 给我国大气污染治理带来了极大压力。

从国家对石油加工企业污染物排放控制的标准来看, 《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996) 虽然对污染物排放作出了规定, 但未针对石油加工企业的氮氧化物、颗粒物排放限值作出具体要求, 且因制定时间较早, 标准限定的污染物种类和相应限值已跟不上目前环保形势的需要^[4]; 《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570-2015) 对新建和现有企业氮氧化物、颗粒物排放限值作出了具体规定, 即最低限值分别为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 但现有措施仍未能有效降低石油加工行业的大气污染物排放量。

本研究基于多家石油加工企业大气污染控制工程案例, 对石油加工企业现有脱硝、除尘设施减排能力进行了分析, 并建立数学模型对不同减排情景下可能采用的脱硝和除尘技术及经济性进行了深入研究, 以期制定石油加工企业不同阶段减排政策提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 氮氧化物、颗粒物控制技术经济性评估指标体系

层次分析法是一种定性与定量耦合的系统分析方法, 可用于解决处理处置技术在多层次多目标决策系统中的选择问题^[5]。它首先对评价对象依总评价目标(由评价目的而定)进行连续地分解, 得到各层评价目标, 并将最底层确定为衡量目标达到程度的评价指标; 然后, 通过对评价指标的重要程度进行比较, 构造判断矩阵进行量化计算, 并根据计算结果得到关键因素的重要性排序; 最后, 依据一定方法, 基于该评价指标体系对评价对象的总评价目标核算, 得到综合评分, 从而给出评价对象的优劣等级^[6]。

目前, 针对技术经济性评估, 国内外研究者对大气污染控制的成本及效益开展了卓有成效的研究。针对珠江三角洲地区制造业带来的大气污染, STREETS 等^[7]提出, 可以通过比较控制策略的成本和出口产品的价值进行成本及效益分析; 针对我国火电行业绩效提升的措施, WANG 等^[8]调查了 30 个省份 2000—2010 年的成本及效益, 提出其影响因素为技术效率、电力价格等; 也有研究^[9-10]分别对我国 SO_2 、 NO_x 控制技术进行了技术经济分析; 经济合作与发展组织(OECD) 中的国家长期进行环境政策的费用效益分析^[11]; 环境保护部环境规划院在《中国环境经济核算技术指南》中提出了环境成本核算方法和思路^[12], 并已完成了 2004—2014 年我国大气污染防治的费效分析^[13]。因此, 依据成本-效益对比的方法建立氮氧化物、颗粒物控制技术经济性评估指标体系, 最终通过费效比进行经济性评估, 这已成为一种行之有效的方法。经济性评估指标体系如图 1 所示。

1) 系统总成本评估的下延指标。2017 年, 《中国能源统计年鉴》^[14] 采用工业废气治理设施运行费, 这些费用包括能源消耗、设备折旧、设备维修、人员工资、管理、药剂及与设施运行有关的其他费用等; 周磊^[15] 采用年均固定成本与变动成本之和计算脱硝成本, 年均固定成本主要为设备折旧、检修费用及催化剂更新费用等, 变动成本主要为工厂的用电消耗和还原剂液氨消耗费等; 王艳等^[16] 将系统总成本费用分为系统年折旧费、系统年运行费和年均利息费。基于以上研究, 将系统年折旧费和系统年维护费单独列出, 与系统年运行费共同构成系统总成本评估的三级指标。各具体指标的计算方法如式(1)~式(4)所示。

2) 对于系统总效益评估的下延指标。王艳

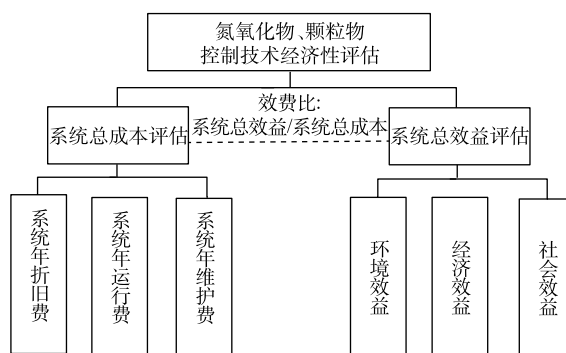


图 1 氮氧化物、颗粒物控制技术经济性评估指标体系

Fig. 1 Economic evaluation index system for control technology of NO_x and PM

等^[16]将系统总收益分为节省排污费收益、副产物销售收益和电价补贴收益；汤民淮等^[17]将效益指标分为环境效益和社会经济效益、运转性能和推广适用性；仇恒东^[18]将效益指标分为环境效益(排放削减情况)和经济效益(燃油消耗情况)；袁颖枝等^[19]将效益分为经济因素、环境因素和社会因素。基于以上研究，将社会效益和经济效益分别计算，与环境效益共同构成系统总效益评估的三级指标。各具体指标的计算如式(5)~式(8)所示。

根据上述指标体系，系统总成本由系统年折旧费用、系统年运行费用和系统年维护费用组成。具体计算见式(1)。

$$T_c = C_d + C_{run} + C_{rep} \quad (1)$$

式中： T_c 为系统总成本，万元； C_d 为系统年折旧费，万元； C_{run} 为系统年运行费，万元； C_{rep} 为系统年维护费，万元。

系统年折旧费用计算参考金侃等^[20]对于燃煤机组烟气污染物超低排放改造的研究，折旧成本主要是指固定资产投资折旧成本。具体计算见式(2)。

$$C_d = I \cdot R_{FAR} / Y_d \quad (2)$$

式中： C_d 为系统年折旧费，万元； I 为系统投资费，万元； R_{FAR} 为固定资产形成率，以95%计^[20]； Y_d 为系统折旧年限，通常定为20年。

参考王艳等^[16]的研究，系统年运行费用包括设备运行的年耗人工费、年耗材费(还原剂、催化剂、压缩空气等费用)、年耗电费和年耗蒸汽费。具体计算见式(3)。系统年维护费用包括设备维护年耗人工费、年耗检修费和配套设施运维费。具体计算见式(4)。

$$C_{run} = C_{wa1} + C_m + C_p + C_s \quad (3)$$

式中： C_{run} 为系统年运行费，万元； C_{wa1} 为设备运行的年耗人工费，万元； C_m 为年耗材费，万元； C_p 为年耗电费，万元； C_s 为年耗蒸汽费，万元。

$$C_{rep} = C_{wa2} + C_{ins} + C_{sup} \quad (4)$$

式中： C_{rep} 为系统年维护费，万元； C_{wa2} 为设备维护的年耗人工费，万元； C_{ins} 为年耗检修费，万元； C_{sup} 为配套设施运维费，万元。

综合上述指标体系，系统总效益由环境效益、经济效益和社会效益组成。具体计算见式(5)。

$$T_p = P_{con} + P_{cha} + P_{out} \quad (5)$$

式中： T_p 为系统总收益，万元； P_{con} 为污染物排放量带来的排污税，万元； P_{cha} 为减排节省的排污税，万元； P_{out} 为企业产值，万元。

环境效益采用污染物排放量带来的环保税衡量。根据2018年1月1日实施的《环境保护税法》规定，国家停止征收排污费，改收环保税，大气污染物应纳税额=污染当量数×适用税额，税额按每当量1.2元计算。

根据统计^[14]，工业氮氧化物排放量指报告期内企业在燃料燃烧和生产工艺过程中排入大气的氮氧化物总质量；工业烟尘排放量指报告期内企业在燃料燃烧和生产工艺过程中排入大气的烟尘的总质量。具体计算见式(6)。

$$P_{con} = \sum_{i,j,k,m} A_{i,j,k} X_{i,j,k,m} F_{EF,j,k,m} (1 - \eta_{i,j,k,m,n} \alpha_{i,j,k,m,n}) \quad (6)$$

式中： P_{con} 为污染物排放量，t； A 为燃料使用量，t； X 为控制技术的活动水平占总活动水平的比例； F_{EF} 为单位原料消耗的污染物排放因子， $g \cdot t^{-1}$ ； η 为控制技术的去除率； α 为控制技术的应用比例； i 为地区； j 为经济部门； k 为燃料类型； m 为技术类型； n 为污染物种类。

经济效益采用节省排污税衡量，计算时可参考王艳等^[16]和金侃等^[20]对于燃煤电厂超低排放烟

气控制技术费效评估的研究。具体计算见式 (7)。

$$P_{cha} = 10^{-9} P_{CP} \cdot T_{DT} \cdot M_{UM} \cdot F_{EF} \cdot \eta \cdot N_{PN} \quad (7)$$

式中： P_{cha} 为控制技术节省排污税，万元； P_{CP} 为治理设备规模，分为 1~5 级； T_{DT} 为设备运行时间，h； M_{UM} 为单位产量原料消耗， $g \cdot t^{-1}$ ； F_{EF} 为单位原料消耗的污染物排放因子， $g \cdot t^{-1}$ ； η 为控制技术的去除率； N_{PN} 为排污税标准， $万元 \cdot t^{-1}$ 。

社会效益采用企业产值衡量，根据统计^[21]，工业销售产值(当年价格)指以货币形式表现的、工业企业在报告期内销售的本企业生产的工业产品或提供工业性劳务价值的总价值量，通过报告期产品的实际销售数量乘以不含增值税的产品实际销售平均单价计算。具体计算见式 (8)。

$$P_{out} = Y \cdot P_{oil} \quad (8)$$

式中： P_{out} 为企业年产值，万元； Y 为年产量，t； P_{oil} 为油价， $万元 \cdot t^{-1}$ 。

1.2 氮氧化物、颗粒物控制技术经济性层次分析模型

本研究采用层次分析法 (AHP)^[5-6] 进行技术经济性分析，将氮氧化物、颗粒物控制技术经济性 P 作为目标层；将系统总成本 A_1 、系统总效益 A_2 作为准则层；准则层下延为指标层，包含系统年折旧费用 B_1 、系统年运行费用 B_2 、系统年维护费用 B_3 、环境效益 B_4 、经济效益 B_5 、社会效益 B_6 。层次分析模型如图 2 所示。

首先，运用 AHP 模型分别计算准则层 A 与指标层 B 各指标的权重。相对重要度采用比较尺度的方法来确定，即两两因素之间进行比较，取 1~9 尺度，尺度 1、3、5、7、9 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的影响等级，尺度 2、4、6、8 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的影响介于上述 2 个相邻等级之间，用 a_{ij} 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果。

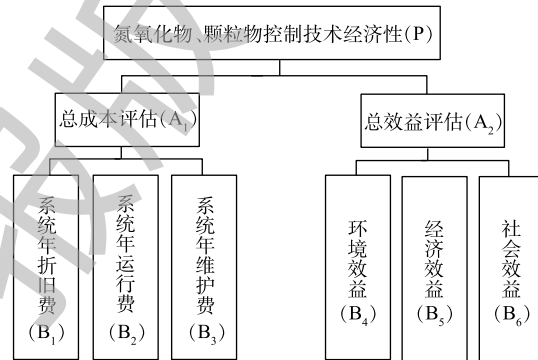


图 2 氮氧化物、颗粒物控制技术经济性层次分析 (AHP) 模型

Fig. 2 Analytic hierarchy process (AHP) model of the economic efficiency of NO_x and PM control technology

结合文献资料和调查问卷数据，确定 B_1 、 B_2 与 B_3 ， B_4 、 B_5 与 B_6 之间的相对重要度，分别构建判断矩阵。指标层 P- $A_{1,2}$ 的判断矩阵为自拟。根据冯淑娟^[22] 和王彩凤等^[23] 的研究，确定系统年折旧费 B_1 相对于系统年维护费 B_3 的影响为 5，系统年运行费 B_2 相对于系统年维护费 B_3 的影响为 2；根据汤民淮等^[17] 的研究，投资费用指数相对于运行费指数的影响为 3，确定系统年折旧费 B_1 相对于系统年运行费 B_2 的影响也为 3。根据已有研究^[6,19]，环境指标相对于经济指标的影响为 2，经济效益指标相对于社会效益指标的影响为 2，即环境指标相对于社会效益指标的影响为 4，构建的判断矩阵如表 1 所示。由于 $R_{CR} < 0.10$ ，即层次总排序结果具有满意一致性。技术经济性评价指标体系的权重值如图 3 所示。

由图 3 可知，年折旧费、年运行费、年维护费在技术经济性评估中权重值分别为 0.291、0.154、0.054；环境效益、经济效益、社会效益在技术经济性评估中权重值分别为 0.278、0.160、0.061。其中，年折旧费用和環境效益的权重值最高，即该指标的重要程度最高。

表 1 AHP 模型判断矩阵

Table 1 Judgement matrix of AHP model

指标层次	判断矩阵
P- $A_{1,2}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
A_1 - $B_{1,2,3}$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$
A_2 - $B_{4,5,6}$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$

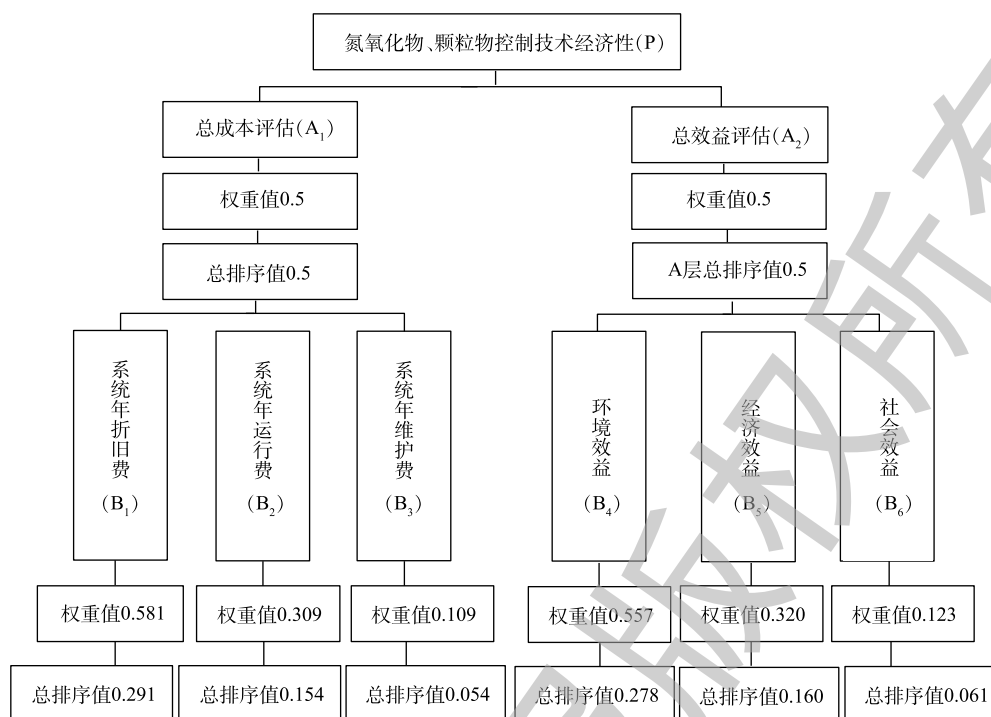


图3 AHP模型各指标权重值

Fig. 3 Weight of various indicators in AHP model

其次,采用评分法^[24]构建分值转换系统,即按百分制对具体指标能满足目标的程度进行打分。参考《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570-2015)^[25]、《关于调整排污费征收标准等有关问题的通知》^[26]和资料^[16,27]制定具体衡量指标和分值转换标准,环境效益 B_4 、经济效益 B_5 、社会效益 B_6 分别由年排放量、节省排污税、年产量衡量。其中,节省排污税标准根据调查问卷制定,参考2019年3月20日京津冀地区油价进行计算^[28]。所有指标均为定量化的指标,评分标准如表2所示。

表2 氮氧化物、颗粒物控制技术经济性评估指标评分标准

Table 2 Rating standard of the economic efficiency of NO_x and PM control technology

等级	(B ₁) NO_x/PM 折旧费/ (10^4 元)	(B ₂) NO_x/PM 运行费/ (10^4 元)	(B ₃) NO_x/PM 维护费/ (10^4 元)	(B ₄)年排放量/t		(B ₅)节省排污税/ (10^4 元)		(B ₆) NO_x/PM 年 产值/(10^4 元)
				NO_x	PM	NO_x	PM	
20	≥ 800	$\geq 2\ 000$	≥ 300	≥ 800	≥ 300	[0, 20)	[0, 20)	[0, 100×10^4)
40	[400, 800)	[1 000, 2 000)	[200, 300)	[480, 800)	[180, 300)	[20, 40)	[20, 40)	[100×10^4 , 200×10^4)
60	[200, 400)	[400, 1 000)	[100, 200)	[160, 480)	[100, 180)	[40, 60)	[40, 60)	[200×10^4 , 300×10^4)
80	[60, 200)	[100, 400)	[50, 100)	[80, 160)	[30, 100)	[60, 80)	[60, 80)	[300×10^4 , 450×10^4)
100	[0, 60)	[0, 100)	[0, 50)	[0, 80)	[0, 30)	≥ 80	≥ 80	$\geq 450 \times 10^4$

1.3 不同情景下氮氧化物、颗粒物控制方案成本、效益比较

利用情景分析法^[29]建立无控情景、基准情景和超低排放情景。通过调研已出台的石化行业污染物排放控制政策,参考电力行业《燃煤电厂超低排放烟气治理工程技术规范》(HJ 2053-2018)^[30]中关于氮氧化物、颗粒物排放浓度限值的规定,即在基准氧含量6%条件下,烟尘、 NO_x

排放浓度分别不高于 $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (标准状况下), 建立石化行业 PM、 NO_x 排放控制情景, 分析各个情景下的污染物控制成本和效益(如表 3 所示)。

表 3 氮氧化物、颗粒物排放控制情景

Table 3 Control scenarios for NO_x and PM emissions

情景	详细情况描述
无控情景	2007年以前, 缺乏针对石化行业的全国性污染物控制相关政策, 因此, 根据2007年北京市《炼油与石油化学工业大气污染物排放标准》的规定, 氮氧化物、颗粒物排放限值分别为 $300 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $120 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
基准情景(BAU)	2015年, 首次发布行业性污染物控制政策《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570-2015), 据此规定, 新建企业和现有企业氮氧化物、颗粒物排放限值分别为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
超低排放情景	在上述政策的技术上制定更加严格的标准, 氮氧化物、颗粒物排放限值分别为 $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 并采用相应达到要求的控制技术

1.4 数据来源

通过中国研究数据服务平台(CNRDS)和《中国能源统计年鉴》^[14]进行数据调研, 2011—2016年, 河北省、山东省的柴油、汽油生产量较高且基本呈上升趋势; 河北省、山东省的氮氧化物、颗粒物排放量较高(如图 4 和图 5 所示)。因此, 本研究将河北省、山东省的石油加工企业作为调研对象, 并于 2018年 2月—2019年 3月先后对其进行实地调研, 收集相应的工程案例, 获取系统投资费用、运行费用、维护费用等各类成本参数以及污染物排放量、节省排污税和具有经济价值的产品产量, 评估该工程产生的效益。

2 结果与分析

2.1 基准情景下氮氧化物、颗粒物控制技术经济性

基准情景即《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570-2015)规定(氮氧化物、颗粒物排放限值分别为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)下氮氧化物、颗粒物的排放及控制情况。通过数据调研, 获取石油加工企业 4 种脱硝技术类型(选择性催化还原技术、选择性非催化还原技术、低氮燃烧技术、臭氧氧化技术)和 3 种除尘技术类型(旋风除尘、湿式除尘、布袋除尘)的系统基本参数(见表 4), 并结合式(1)~式(8)对相关指标进行计算。其中, 臭氧氧化工艺不考虑臭氧泄漏等二次污染问题。根据数据调研结果, 发现仅有石油加工企业 1、2、3 的氮氧化物控制技术情况和石油加工企业 4、5 的颗粒物控制技术情况数据完整。因此, 本研究以这 5 个数据全面的石油加工企业为例, 依据控制技术经济性评估指标评分标准(如表 2 所示), 对关键指标进行评分, 并得出各指标得分值。典型石油加工企业氮氧化物、颗粒物经济性评估指标评分统计结果如表 5 所示。

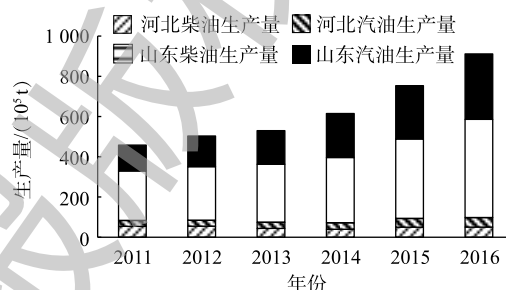


图 4 2011—2016年河北省、山东省柴油和汽油生产量

Fig. 4 Production of diesel and gasoline in Hebei province and Shandong province from 2011 to 2016

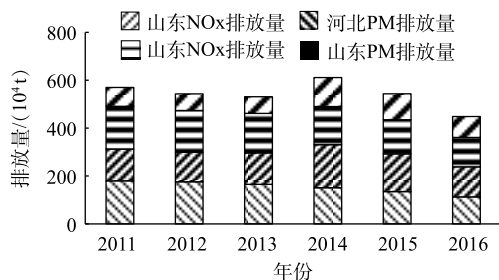


图 5 2011—2016年河北省、山东省氮氧化物和颗粒物排放量

Fig. 5 Emissions of NO_x and PM from Hebei province and Shandong province from 2011 to 2016

表4 河北省、山东省部分石油加工企业氮氧化物、颗粒物控制技术
Table 4 Control technology of NO_x, PM in some petroleum processing enterprises of Hebei province and Shandong province, China

企业编号	污染物	控制技术	投资费/ (10 ⁴ 元)	折旧费/ (10 ⁴ 元)	运行费/ (10 ⁴ 元)	维护费/ (10 ⁴ 元)	年排放量/t	年减排量/t	排放浓度/ (mg·m ⁻³)	节省排污税/ (10 ⁴ 元)	年产量/ (10 ⁴ t)	年产值/ (10 ⁴ 元)
1	NO _x	SCR	3 850	182.9	537	120	256	256	80	32.3	220	156
	PM	旋风除尘	—	—	—	—	—	—	—	—		
2	NO _x	SCR	16 000	760	850	220	514	300	60	75.8	560	375
	PM	湿式除尘	—	—	—	—	—	—	—	—		
3	NO _x	SCR+SNCR+LNB	4 000	190	270	110	77	670	120	40	320	212
	PM	湿式除尘	—	—	—	—	—	—	—	—		
4	NO _x	SCR	—	—	—	—	—	—	—	—	390	254.8
	PM	旋风除尘+布袋除尘+湿式除尘	3 900	185.3	1,900	280	40	780	90	50		
5	PM	湿式除尘	1 039	51.9	396	183	100	56	40	42	350	236
	PM	布袋除尘	424	20.1	—	25	—	46	—	—		
6	NO _x	臭氧氧化	1 280	60.8	423	137	—	—	—	—	—	—
	PM	湿式除尘	980	46.6	384	—	—	—	—	—		
7	NO _x	LNB	490	23.2	234	82	—	—	—	—	—	—
	PM	湿式除尘	—	—	—	—	—	—	—	—		

注：—表示企业未提供相关数据。

根据氮氧化物、颗粒物控制技术经济性评估指标体系，采用综合加权模型^[24]分别计算系统总成本、系统总效益的综合归一化值，根据上文中的各指标权重值对各准则层进行加权，得出氮氧化物、颗粒物控制技术经济性评估综合归一化值，结果如表6和表7所示。计算方法见式(9)。

$$E_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_{ij} \quad (9)$$

式中： E_j 为各调查案例经济性评估综合归一化值； W_i 为各指标权重值； X_{ij} 为指标打分值； n 为评估指标序号， $n=[1,6]$ 。

运用式(9)对研究对象内的氮氧化物、颗粒物控制技术经济性评估指标体系中准则层(系统总成本、系统总效益)分别计算归一化值，并通过加权，计算出经济性评价综合值(如表8所示)。最后，采用5个区间来界定经济性评价等级，区间量度值范围为[0, 100]，如表9所示。典型石油加工企业经济性评价等级结果如表10所示。

由表8可知，费效比较高的为石油加工企业1和企业5，系统总成本约为系统总效益的1.4~1.5倍；由表5和表6可知，石油加工企业1经济性评价综合值较低的原因主要是运行费用和维护费用较高；由表5和表7可知，石油加工企业5经济性评价综合值较低的原因主要是年排放量较多、节省排污税较少。费效比较低的为石油加工企业2、4，其中石油加工企业2的经济性评价

表5 典型石油加工企业氮氧化物和颗粒物经济性评估指标评分

Table 5 Score of the economic evaluation index of NO_x and PM in typical petroleum processing enterprises

污染物	案例	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
氮氧化物	石油加工企业1	80	60	60	60	40	40
	石油加工企业2	40	60	40	40	80	80
	石油加工企业3	80	80	60	100	60	60
颗粒物	石油加工企业4	80	40	40	80	60	60
	石油加工企业5	100	80	60	60	60	60

表 6 典型石油加工企业氮氧化物经济性评估指标
综合归一化值结果

Table 6 Synthesis and normalization results of the economic evaluation index of NO_x in typical petroleum processing enterprises

层次	石油加工企业1	石油加工企业2	石油加工企业3	权重(W_i)
B ₁	23.250	11.625	23.250	0.291
B ₂	9.274	9.274	12.366	0.154
B ₃	3.287	2.191	3.287	0.054
B ₄	16.714	11.142	27.857	0.278
B ₅	6.404	12.809	9.607	0.160
B ₆	2.452	4.904	3.678	0.061

表 7 典型石油加工企业颗粒物经济性评估指标
合归一化值结果

Table 7 Synthesis and normalization results of the economic evaluation index of PM in typical petroleum processing enterprises

层次	石油加工企业4	石油加工企业5	权重(W_i)
B ₁	23.250	29.063	0.291
B ₂	6.183	12.366	0.154
B ₃	2.192	3.287	0.054
B ₄	22.286	16.714	0.278
B ₅	9.607	9.607	0.160
B ₆	3.678	3.678	0.061

表 8 典型石油加工企业经济性评价综合值

Table 8 Comprehensive value of economic evaluation index of typical petroleum processing enterprises

污染物	案例	总成本值	总效益值	费效比	经济性评价综合值
氮氧化物	石油加工企业1	35.812	25.571	1.401	61.384
	石油加工企业2	23.092	28.857	0.801	51.948
	石油加工企业3	38.904	41.143	0.946	80.047
颗粒物	石油加工企业4	31.625	35.571	0.889	67.196
	石油加工企业5	44.716	29.999	1.491	74.716

表 9 经济性评价等级

Table 9 Rating of economic evaluation

评价等级	标准化值
极差	[0, 20)
差	[20, 40)
中等	[40, 60)
良好	[60, 80)
优	[80, 100]

表 10 典型石油加工企业经济性评价等级结果

Table 10 Rating of economic evaluation of typical petroleum processing enterprises

污染物	案例	评价等级
氮氧化物	石油加工企业1	良好
	石油加工企业2	中等
	石油加工企业3	优
颗粒物	石油加工企业4	良好
	石油加工企业5	良好

综合值最低；由表 5 和表 6 可知，石油加工企业 2 的产业规模最大，投资费用过高，但年排放量却没有相应减少；由表 5 和表 7 可知，石油加工企业 4 采用旋风除尘、布袋除尘、湿式除尘多种技术控制颗粒物排放，带来的运行费用和维护费用较高，而节省排污税较少，企业产值较低，因而经济性评价综合值较低。石油加工企业 3 的费效比接近 1，说明成本投入和效益产出较为平均；由表 5 可知，由于采用 SCR、SNCR、LNB 多种技术控制氮氧化物排放，石油加工企业投资费用的绝对数量并不低，但是相应地可带来良好的环境效益，年排放量很低，节省排污税较多，因而经济性评价综合值最高。由表 10 的经济性评价等级结果可知，石油加工企业 3 的经济性评价结果为“优”，等级最高；石油加工企业 1、4、5 的经济性评价结果为“良好”，等级仅次于石油加工企业 3；石油加工企业 2 的经济性评价结果为“中等”，等级最低。

综合上述结果，石油加工企业的总成本和总效益难以达到均衡，总成本值较高的石油加工企

业难以形成较高的总效益值，而总效益值较高的石油加工企业往往也是总成本值较低的企业，这是因为污染物的控制成本相对过高。此外，采用多种技术进行污染物控制的石油加工企业3、4，经济性评价综合值反而相对较高，等级结果并没有低于采用单一技术的石油加工企业1、2、5，这说明在下一步推行超低排放的过程中，采用多种技术叠加的方式，不论从技术性的角度还是经济性的角度，都是具备可行性的。

2.2 超低排放情景下氮氧化物、颗粒物控制技术经济性

以2019年为基准年，基准情景下氮氧化物、颗粒物的排放限值参照《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570-2015)^[25]的规定，即对新建和现有企业氮氧化物、颗粒物排放最低限值分别为 $80 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。氮氧化物排放控制技术主要有臭氧氧化、SCR(选择性催化还原技术)、SNCR(选择性非催化还原技术)和LNB(低氮燃烧技术)；颗粒物排放控制技术主要有旋风除尘技术、FF(布袋除尘技术)和湿式除尘技术。

超低排放情景以2019年为基准年进行趋势外延，氮氧化物、颗粒物排放限值分别为 $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。石油加工企业的超低排放改造路线参考国内燃煤电厂已有的方案。根据《燃煤电厂超低排放烟气治理工程技术规范》(HJ 2053-2018)^[30]和相关资料^[31-33]，超低排放技术改造路线通常采用多种技术叠加的方式进行多种污染物的协同控制。因此，假定未来年所使用的技术与基准年相同，超低排放情景下模拟石油加工企业的技术路线及改造方案如下：氮氧化物控制采用臭氧氧化+LNB(低氮燃烧技术)+SCR(选择性催化还原技术)；颗粒物控制采用旋风除尘技术+FF(布袋除尘技术)+湿式除尘技术。

根据系统成本评估指标(系统投资费用、运行费用、维护费用)和系统效益评估指标(年减排量、排放浓度、节省排污税)对改造前后石油加工企业的技术经济性进行评估，数据仍然采用表4中实际石油加工企业运行数据，成本参数和效益参数由相同规模的石油加工企业相关参数叠加所得。基准情景与超低排放情景的技术经济性对比结果如图6~图9所示。

如图6和图8所示，在超低排放情景下，石油加工企业氮氧化物、颗粒物控制系统总成本约为改造之前的1.5~2.0倍，其中，改造之后的系统投资成本、运行成本约为改造之前的1.5~2.0倍，维护成本则增幅较小。如图7和图9所示，超低排放情景下，石油加工企业氮氧化物、颗粒物控制系统总效益显著提升，年减排率由改造前的50%提升至改造后的87%，年排污税由改造前的14.6%提升至改造后的55.6%，污染物排放浓度约为改造之前的0.2~0.5倍。根据已有的燃煤电厂超低排放改造前、后成本变化^[34]，改造前、后氮氧化物控制单位成本分别为 $9872 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $14092 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ ，改造前、后颗粒物控制单位成本分别为 $55 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $117 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ ，改造之后的成本约为改造之前的1.4~2.0倍，与模拟石油加工企业超低排放技术改造的成本变化基本吻合。

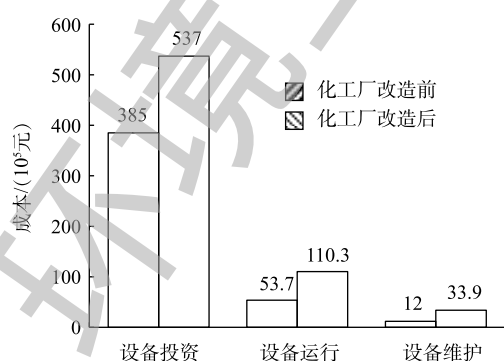


图6 氮氧化物超低排放控制成本

Fig. 6 Costs of ultra-low emission control for NO_x

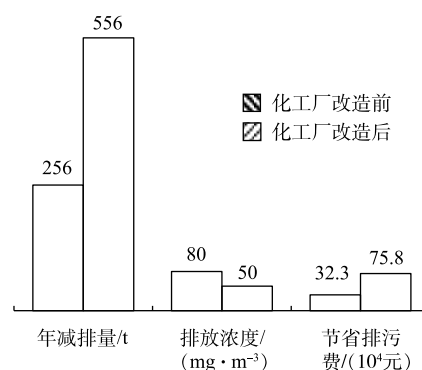


图7 氮氧化物超低排放控制效益

Fig. 7 Benefit of ultra-low emission control for NO_x

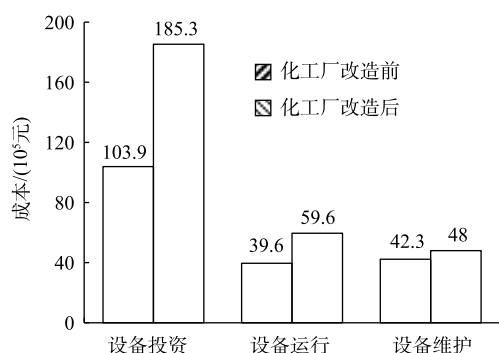


图 8 颗粒物超低排放控制成本

Fig. 8 Costs of ultra-low emission control for PM

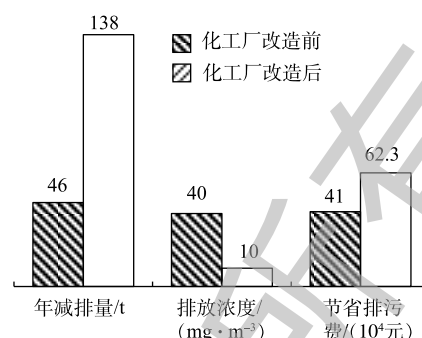


图 9 颗粒物超低排放控制效益

Fig. 9 Benefit of ultra-low emission control for PM

本研究所采用的层次分析法存在一定的局限性。第一，在确定指标 $B_1 \sim B_6$ 之间的相对重要程度时，在现有文献当中难以找到完全一致的参考指标；第二，层次分析模型可容纳的指标有限，如果研究需要更多的衡量指标，判断矩阵不易达到一致性，难以进行调整；第三，不同学者对于指标之间的重要度判断不同，易存在主观性。

3 结论与建议

1) 利用层次分析法对大气污染控制技术的经济性进行评估，年折旧费和环境效益的重要程度最高，权重值分别为 0.291、0.278。通过评分法构建的分值转换系统对实际石油加工企业进行评估，得到各石油加工企业经济性评估等级，可以直观地比较各个企业的情况。

2) 基于多家石油加工企业工程案例，发现在基准情景下，采用不同控制技术的石油加工企业经济性评价综合值差别较大。采用单一控制技术的企业由于投资成本过高或环境效益较低而造成经济性下降；采用多种技术控制污染物排放的企业，投资费用的绝对数量较高，但是可带来良好的环境效益，年减排率由改造前的 50% 提升至改造后的 87%，年排污税由改造前的 14.6% 提升至改造后的 55.6%，污染物排放浓度约为改造之前的 0.2~0.5 倍。年排放量很低，节省排污税较多，因而经济性较高。

3) 在不同排放情景下，石油加工企业的成本和效益相差较大。与基准情景相比，在超低排放情景下，系统总成本显著增加，系统总效益显著提升，但总效益的增幅与总成本的增幅相差不大，如若下一步推行石油加工企业超低排放政策，还应加大对企业的扶持力度，否则过高的成本将会抑制企业实施超低排放技术的动力。

4) 及时调查和总结典型企业经验，促进超低排放控制技术和污染物检测技术的发展。结合我国不同区域环境特征、经济发展需求及企业生产状况，对采用不同控制技术的企业开展基于系统成本、系统效益的评估，相应提出技术可行、经济性高的超低排放最佳技术改造路线及设备安装要求；与此同时，推进行业污染物低浓度监测方法及标准技术的落实，构建稳定可靠的监测网络，确保监测数据的有效性。

5) 政府综合运用经济、法律等手段，鼓励引导相关企业积极落实减排措施，加快超低排放政策推行。在经济方面，可以提供贷款或者财政补贴以缓解企业在改造初期成本过高的问题，同时通过调整排污税和实行油价补贴以加大对企业实行超低排放的支持力度，从而提升企业采纳改造技术的积极性；在法律方面，正式出台具有统一性、强制性的石油加工企业超低排放标准，对企业氮氧化物、颗粒物等污染物的排放限值作出具体要求。

6) 加强监督管理，促使企业承担相应责任、落实相关政策。以相关法律法规为依据，加强对石油加工企业大气污染治理项目环境影响评价、验收环境执法等过程的管理；对于污染物排放不

能满足排放要求的企业,可以利用税费政策对其进行惩罚,促进企业转变观念,主动承担落实减排责任。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国环境统计年鉴: 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 刘胜强, 毛显强, 胡涛, 等. 中国钢铁行业大气污染与温室气体协同控制路径研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(7): 168-174.
- [3] 王红梅, 刘宇, 王凡, 等. 我国水泥工业废气量减排与污染物减排潜力分析[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(3): 241-246.
- [4] 刘晋东. 炼油厂氮氧化物系统性减排措施研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [5] 张寅. 基于层次分析法和模糊综合评价法的拖拉机新产品开发项目的风险评价运用[J]. *项目管理技术*, 2017, 15(7): 107-112.
- [6] 潘文, 王鹤立. 层次分析法在污染场地修复技术优选中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(S2): 322-326.
- [7] STREETS D G, YU C, BERGIN M H, et al. Modeling study of air pollution due to the manufacture of export goods in China's Pearl River Delta[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(7): 2099-2107.
- [8] WANG Y S, XIE B C, SHANG L F, et al. Measures to improve the performance of China's thermal power industry in view of cost efficiency[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1078-1086.
- [9] 张彩庆. 电厂湿法烟气脱硫系统对环境质量改善及经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [10] 黄东. 火电行业氮氧化物控制技术经济分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [11] 董战峰, 王军锋, 璩爱玉, 等. OECD国家环境政策费用效益分析实践经验及启示[J]. *环境保护*, 2017, 45(1): 93-98.
- [12] 於方, 王金南, 曹东, 等. 中国环境经济核算技术指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [13] 彭菲, 於方, 马国霞. 2004—2014年我国大气污染防治的费效分析[C]//环境保护部环境规划院. 中国环境科学学会环境经济学会2016年学术年会论文集, 2016: 100-112.
- [14] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴: 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [15] 周磊. 燃煤电厂脱硝改造成本分析与补偿电价机制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [16] 王艳, 程轲, 易鹏. 超低排放背景下燃煤电厂烟气控制技术费效评估[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(3): 331-335.
- [17] 汤民淮, 蔡俊雄. 利用层次分析计算污染治理设施评价指标权重[J]. *环境科学与技术*, 1997, 16(1): 27-30.
- [18] 仇恒东. 多层次尾气控制策略成本效益评价体系与方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [19] 袁颖枝, 朱云, 杨再东, 等. 家具行业挥发性有机物治理成本及排污权交易价格估算[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(12): 4807-4814.
- [20] 金侃, 张军, 郑成航, 等. 百万燃煤机组烟气污染物超低排放改造费效评估[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2): 1061-1068.
- [21] 国家统计局工业统计司. 中国工业统计年鉴: 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [22] 冯淑娟. 工业锅炉脱硝技术经济分析及模糊综合评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [23] 王彩凤, 魏凤. 石化企业低碳经济绩效综合评价分析: 以中石化为例[J]. *财会通讯*, 2015(6): 120-122.
- [24] 任春燕. 基于层次分析法的纸坊沟流域农业生态经济系统效益评价[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 214-217.
- [25] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 石油炼制工业污染物排放标准: GB 31570-2015[S]. 北京: 中国环境科学出版

社, 2016.

- [26] 国家发展改革委, 财政部, 环境保护部. 关于调整排污费征收标准等有关问题的通知[J]. *绿色财会*, 2014(10): 37-38.
- [27] 刘通浩. 中国电力行业NO_x排放控制成本效益分析[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [28] 成品油价格网. 中国汽油价格柴油价格[EB/OL]. [2019-03-20]. <http://oil.usd-cny.com>.
- [29] 宗亚楠, 张强, 洪朝鹏, 等. 北京市燃煤源排放控制措施的污染物减排效益评估[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(10): 1645-1652.
- [30] 中华人民共和国生态环境部. 燃煤电厂超低排放烟气治理工程技术规范: HJ 2053-2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [31] 赵东阳, 靳雅娜, 张世秋. 燃煤电厂污染减排成本有效性分析及超低排放政策讨论[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2841-2848.
- [32] 石睿, 王佩华, 杨倩, 等. 燃煤电厂“超低排放”成本效益分析[J]. *环境影响评价*, 2015, 37(4): 5-8.
- [33] 徐灏, 尹旭军. 大型燃煤电厂超低排放改造技术经济性分析[J]. *上海节能*, 2018(2): 130-135.
- [34] 帅伟, 李立, 崔志敏, 等. 基于实测的超低排放燃煤电厂主要大气污染物排放特征与减排效益分析[J]. *中国电力*, 2015, 48(11): 131-137.

(本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

Economics and ultra-low emission potential analysis of denitrification and dust removal projects in petroleum processing industry

CHANG Tianyang^{1,2}, ZHAO Xiao¹, GAO Qin³, ZHANG Guangming¹, MA Zhong¹, CHANG Huazhen^{1*}

1. School of Environment & Natural Resource, Renmin University of China, Beijing 100872, China

2. Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China

3. Daqing Refining and Chemical Company, PetroChina Co. Ltd., Daqing 163411, China

*Corresponding author, E-mail: 18678640831@163.com E-mail: chz@ruc.edu.cn

Abstract Based on the data of air pollution control projects from several petroleum processing enterprises, a model was constructed by using analytic hierarchy process to evaluate the economy of DeNO_x and dust removal projects. The costs and benefits of control technologies under different scenario were compared and analyzed. Under the baseline scenario, the results showed that the comprehensive value of economic evaluation varied significantly from different control technologies in petroleum processing enterprises. Due to the high investment costs or low environmental benefits of petroleum processing enterprises using a single technology, their economy declined. For the petroleum processing enterprises using multiple technologies, their economic evaluation value was relatively high because of their relative higher environmental benefits than their high investment costs. Compared with the baseline scenario, the total costs and benefits increased significantly under the ultra-low emission scenario, but their growths were close. As a result, it will be technically feasible and high economic value for petroleum processing enterprises to implement ultra-low emission measure, which can provide the theoretical advice to implement the ultra-low emission measures in petroleum processing enterprises.

Keywords nitrogen oxide; particulate matter; engineering economy; ultra-low emission; petroleum processing