

工业行业超低排放改造费用效益分析（CBA）技术手册

（Version 1.0 版）

生态环境部环境规划院

国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室

2021年9月

目 录

前 言.....	1
1 基本概念和术语.....	3
1.1 超低排放.....	3
1.2 燃煤电厂超低排放标准.....	3
1.3 钢铁行业超低排放标准.....	3
1.4 费用效益评估.....	4
2 评估目标、范围和基本原则.....	4
2.1 评估目标.....	4
2.2 评估原则.....	4
2.3 适用范围.....	5
3 评估框架和技术路线.....	5
4 评估准备.....	6
4.1 明确评估对象.....	6
4.2 开展政策解读.....	6
4.3 广泛收集资料.....	6
4.4 确定不同情景.....	6
5 评估内容和方法.....	7
5.1 费用效益识别.....	7
5.2 费用评估方法.....	7
5.3 效益评估方法.....	8
5.3.1 污染物减排效益.....	8
5.3.2 环境质量提升效益.....	8
5.3.3 环境健康效益.....	9
5.3.4 碳协同减排效益.....	11
5.4 费用与效益比较分析.....	11
5.5 经济社会影响评估.....	12
6 综合评估分析.....	12
6.1 不确定性分析.....	12
6.2 综合分析与建议.....	13

前 言

超低排放，指排污企业在生产运行、末端治理等过程中，采用多种污染物高效协同脱除集成系统技术，使其大气污染物排放浓度在相关行业污染物一般排放标准（如《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223-2011）、《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》（GB 28662-2012）等）基础上再大幅下降。2015年3月，十二届全国人大三次会议《政府工作报告》明确要求“推动燃煤电厂超低排放改造”，2015年12月，国务院常务会议决定，在2020年之前对燃煤电厂全面实施超低排放和节能改造。“超低排放”的理念正式在我国工业行业大气污染治理中开始推广和实施。

2015年12月，原环境保护部、国家发展和改革委员会和国家能源局联合印发了《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》（环发〔2015〕164号）。提出到2020年，全国所有具备改造条件的燃煤电厂力争实现超低排放改造，在基准氧含量6%条件下，烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于10、35、50mg/m³，到2020年，现役燃煤发电机组改造后平均供电煤耗低于310克/千瓦时。继火电行业实行超低排放改造后，2019年生态环境部、国家发展和改革委员会、工业和信息化部、财政部和交通运输部联合发布了《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（环大气〔2019〕35号），对钢铁生产各工序的超低排放限值进行了规定，并提出到2025年底前重点区域钢铁企业超低排放改造基本完成、全国力争80%以上产能完成改造的目标。经过大力开展火电和钢铁行业的超低排放改造，据统计，截至2020年底，全国煤电行业完成超低排放改造装机容量达9.5亿千瓦，占煤电总装机容量的89%；钢铁行业229家企业约6.2亿吨粗钢产能正在实施超低排放改造。

在推进重点工业行业超低排放的过程中，政府和企业投入了大量资金用于升级生产设备和增建污染治理设施，大气污染物排放量得到大幅降低，由此带来了一系列的环境效益和经济效益，并对上下游相关行业带来了一定的拉动和促进。为评估超低排放措施的实施效果，需要从费用和效益角度进行深入分析，对这项政策的实施绩效进行全面研判，以在下一阶段中调整优化其他工业行业的超低排放管控措施。

在生态环境部与能源基金会支持下，生态环境部环境规划院国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室承担了《建立中国环境政策的费用效益评估机制》项目，开展了技术方法、案例应用和制度机制研究。本技术手册明确了工业行业超低排放政策的费用效益评估相关基本概念，构建了工业行业超低排放费用效益评估的技术框架，提出了费用效益评估的主要流程和方法。本技术手册适用于国家、各地方以及有关部门开展工业行业超低排放政策制定或实施的费用效益（经济社会影响）评估工作。

1 基本概念和术语

1.1 超低排放

超低排放，指排污企业在生产运行、末端治理等过程中，采用多种污染物高效协同脱除集成系统技术，使其大气污染物排放浓度在相关行业污染物一般排放标准基础上再大幅下降。目前我国实行超低排放标准的行业主要包括燃煤发电和钢铁。

1.2 燃煤电厂超低排放标准

根据《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》（环发〔2015〕164号），燃煤电厂超低排放标准为在基准含氧量 6%条件下，烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于 10、35、50mg/m³。

1.3 钢铁行业超低排放标准

根据《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（环大气〔2019〕35号），钢铁行业各工序的超低排放标准如下表所示。

表 1-1 钢铁行业超低排放指标限值

生产工序	生产设施	基准含氧量 (%)	污染物 (单位: mg/m ³)		
			颗粒物	二氧化硫	氮氧化物
烧结(球团)	烧结机机头 球团竖炉	16	10	35	50
	链篦机回转窑 带式球团焙烧机	18	10	35	50
	烧结机机尾 其他生产设备	-	10	-	-
炼焦	焦炉烟囱	8	10	30	150
	装煤、推焦	-	10	-	-
	干法熄焦	-	10	50	-
炼铁	热风炉	-	10	50	200
	高炉出铁场、高炉矿槽	-	10	-	-
炼钢	铁水预处理、转炉（二次烟气）、电炉、石灰窑、白云石窑	-	10	-	-
轧钢	热处理炉	8	10	50	200

自备电 厂	燃气锅炉	3	5	35	50
	燃煤锅炉	6	10	35	50
	燃气轮机组	15	5	35	50
	燃油锅炉	3	10	35	50

1.4 费用效益评估

费用效益评估是指对某事物或活动过程所（可能）产生的费用和收益进行的综合性评估和分析。根据评估对象的发生阶段，可以分为事前、事中和事后费用效益评估。工业行业超低排放政策费用效益评估是对工业行业超低排放政策制定或实施后对经济社会发展和生态环境影响所产生的费用及效益进行科学、系统的计算研判。

2 评估目标、范围和基本原则

2.1 评估目标

工业行业超低排放费用效益评估的目的，在于通过评估工业行业实施超低排放标准可能造成的经济、社会和生态环境影响大小，准确把握政策的实施效果，为火电、钢铁、水泥等重点工业行业开展超低排放提供优化调整依据。

2.2 评估原则

（1）整体性原则。对工业行业超低排放政策要从社会经济整体角度分析效益和费用，凡政策实施可带来的生态环境、经济和社会正贡献，如污染减排、空气质量改善、健康效益、产业结构优化、GDP 增加、就业增加、税收增加等，均计为效益。凡带来的经济支出或占用社会资源均计为费用。费用和效益都需要考虑由该政策实施引起的整体系统性影响。

（2）持续性原则。环境政策对污染物降低产生的健康等效益将有数年的延续性，因此对工业行业超低排放政策进行费用效益评估时，不能简单的以当年全部支出和当年取得的效益进行评价，还要考虑政策生态环境和经济社会的延续影响，进行折旧或折现计算。

（3）数据可得性原则。评估要综合考虑大气环境监测数据、主要大气污染

物排放数据、成本数据、环境健康等必要数据的可获取性，明确评估范围、方法、数据来源，确保工业行业超低排放政策的费用效益评估过程和结果的科学性、规范性和可靠性。

2.3 适用范围

本手册明确了工业行业超低排放政策的费用效益评估技术路线图和技术方法，适用于指导各地区开展工业行业（如火电、钢铁等）超低排放政策的费用效益评估工作。

3 评估框架和技术路线

工业行业超低排放政策的费用效益评估一般要经过评估准备、实施评估和结论分析三个步骤，具体包括政策解读与资料收集、确定基准年和目标年、费用效益识别、费用分析、效益分析、费用效益比较、经济影响分析、不确定性分析、结论与建议等方面。

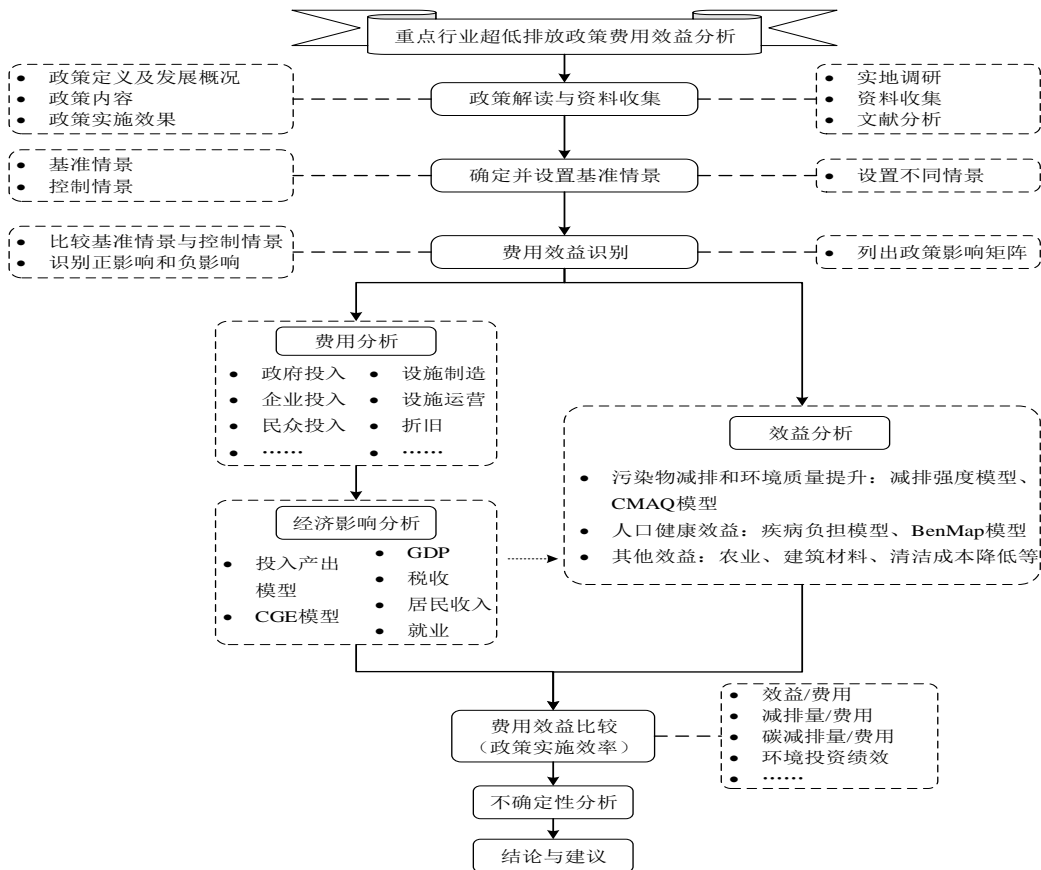


图 3-1 工业行业超低排放政策费用效益评估技术路线

4 评估准备

4.1 明确评估对象

选定特定行业的超低排放政策作为评估对象，明确评估的区域范围、时间跨度和企业范围。

4.2 开展政策解读

对涉及的工业行业超低排放政策进行政策解读和梳理分析，包括超低排放标准适用范围、推广率目标、实施范围、考核目标、技术要求、改造责任归属、管理考核机制等。

4.3 广泛收集资料

收集工业行业超低排放政策实施的相关信息，包括涉及的各类行业企业、社会、环境等要素信息，如行业产能、行业治污水平现状、行业产品需求量、超低排放设施投资、工序减污潜力、设施运行费用、政府补贴和优惠额度、区域 GDP、人口、上下游行业关联等。可采用查询资料法、实地调查法、个案法、调研问卷等，不同方法交叉使用，相互配合，务求所获得信息具有广泛性、系统性和准确性。

4.4 确定不同情景

情景方案主要包括不实施超低排放情景(基准情景)和实施超低排放情景(控制情景)两种。对基准情景的描述应尽可能详细，并解释情景设定背后的不确定性和假设条，一般可根据该政策实施前的污染物排放情况、环境质量状况、行业生产污染控制技术水平等作为基础，假设保持不变，并假设在政策实施期间没有进一步实施对相关污染物的控制措施。对控制情景的描述同样需要尽可能详尽，为比较基准情景和控制情景，分析超低排放标准实施后各要素的变化情况提供支持。

5 评估内容和方法

5.1 费用效益识别

工业行业超低排放政策的实施将对政府、企业、民众都将产生影响，需要通过比较政策实施对不同利益相关者的影响，并列出超低排放政策实施的费用效益影响矩阵。

表 5-1 工业行业超低排放政策的费用效益影响矩阵

利益相关者	效益	费用
政府	➤ 环境质量提升带来的考核成绩提高	➤ 增加补贴支出 ➤ 增加管理成本
企业	➤ 补贴收入 ➤ 达标排放带来的限产豁免	➤ 新增超低排放污染物控制设施投资和运行成本 ➤ 传统污染物控制设施升级改造成本
民众	➤ 健康效益（过早死亡和患病概率降低） ➤ 幸福感增加	-

费用评估范围包括：新增超低排放污染物控制设施投资和运行成本、传统污染物控制设施升级改造成本，以及政府对执行超低排放的企业进行补贴成本等。

效益评估范围包括：超低排放实施后可能产生的各类生态环境效益、健康效益，包括污染物减排、环境质量改善、环境健康效益、经济产出带动等方面。此外，超低排放带来的能耗增加，可能产生负的碳协同减排效益。

5.2 费用评估方法

超低排放政策实施的费用采用单位成本系数法，如下式所示：

$$\begin{cases} C_{iv} = A_{iv} \cdot cf_{iv} \cdot \frac{Year_{use}}{Year_{op}} \\ C_{op} = A_{op} \cdot cf_{op} \cdot Year_{use} \end{cases}$$

式中：

C_{iv} 为工业行业各项治理设施投资费用，亿元；

A_{iv} 新建治理设施的产能，亿吨；

cf_{iv} 为超低排放改造单位投资成本，元/吨产品；

$Year_{use}$ 为实际使用年限，年；

$Year_{op}$ 为设备使用寿命，年；

C_{op} 为工业行业各项治理设施运行费用，亿元；

A_{op} 为治理设施的实际产量，亿吨；

cf_{op} 为治理设施的单位运行成本，元/吨产品。

5.3 效益评估方法

5.3.1 污染物减排效益

针对工业行业超低排放的污染物减排量采用排放强度法，特征颗粒物包括二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）和颗粒物（PM），核算方法如下式所示：

$$E_j = A_{op} \cdot D_j$$

式中：

E_j 为工业行业超低排放改造排放污染物的量，j=SO₂、NO_x 和 PM；

A_{op} 为新建治理设施的工业行业实际产量（万吨）；

D_j 为超低排放改造后比改造前单位产量减少的污染物排放量。

5.3.2 环境质量提升效益

对于城市或区域空气质量改善目前普遍采用是第三代空气质量模型系统 Models-3/CMAQ 进行环境效益模拟分析。Models-3/CMAQ 是一个综合的空气质量模型系统，其将整个大气作为研究对象，在各个空间尺度上详尽模拟所有大气物理和化学过程。模型系统通过输入的地形、气象和污染物数据，模拟污染物在大气中的迁移、扩散、转化过程，给出浓度的时空分布。

Models-3/CMAQ 由排放源模式、中尺度气象模型和通用多尺度空气质量模型（CMAQ）三部分组成。排放源模式的主要作用是将初始污染物进行化学物质

种类和质量比例分配，以满足空气质量模型对于排放清单在时空分辨率和化学物种方面的高精度要求；中尺度气象模型模拟研究范围内及周围气象场变化情况；CMAQ 是系统的核心，模拟污染物在大气中的扩散和输送过程、气相化学过程、气溶胶化学和动力学过程、液相化学过程以及云化学和动力学过程。

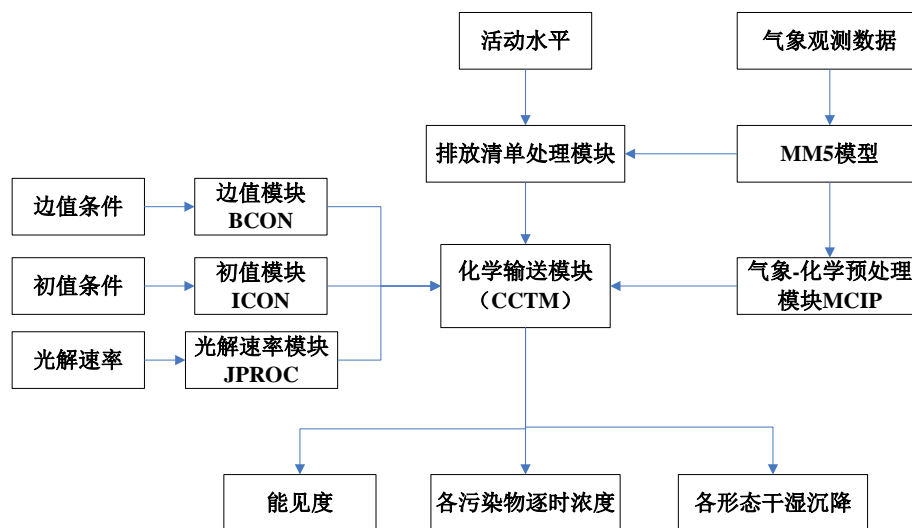


图 5-1 CMAQ 模型的基本结构

超低排放改造政策的环境效益，可以通过计算政策实施后的主要大气污染物削减情况，对比分析政策实施与否的环境质量改善效益。环境质量改善效益=基准情景下（基准年）的空气质量-进行超低排放改造后（目标年）的空气质量。在基准情景下的空气质量模拟基础上，利用目标年超低排放改造后的主要污染物减排量更新现有排放清单，构建基于目标年超低排放改造后的网格化排放清单；然后基于此排放清单，利用三维空气质量数值模式进行数值模拟，得到目标年超低排放改造后主要污染物的浓度分布。最后，用基准情景下的空气质量减去进行超低排放改造后的空气质量，得到超低排放改造政策的环境质量改善效益。

5.3.3 环境健康效益

大气环境质量改善健康效益通过大气环境健康损失减少进行核算。健康效益分析可以采用基于大气污染导致的疾病负担模型、BenMap 等模型方法进行评估计算。

(1) 大气污染导致的疾病负担模型

当年大气环境质量改善的环境效益通过上年大气环境质量下的环境退化损失减去当年大气环境质量下的环境健康损失。采用疾病负担法，以 PM_{2.5} 作为大

气污染因子，以心血管疾病和呼吸道疾病作为大气污染健康结局，从大气污染造成的全死因过早死亡损失、大气污染造成的呼吸系统和心血管疾病病人的住院增加和误工损失、大气污染造成的慢性支气管炎的新发病损失三方面进行核算。

全死因过早死亡经济损失（ EC_{a1} ）：

$$EC_{a1} = P_{ed} \cdot VSL = [(RR - 1) / RR \cdot f_p \cdot P_e] \cdot VSL$$

P_{ed} 为现状大气污染水平下造成的全死因过早死亡人数； f_p 为现状大气污染水平下全死因死亡率（参考值 1/10 万，中国卫生统计年鉴）， P_e 为暴露人口； VSL 为统计生命价值； RR 为大气污染引起的全死因死亡相对危险归因比，公式如下：

$$RR = [C + 1] / [C_0 + 1]^{0.075723}$$

这里 C 是某种大气污染物的当前浓度水平， C_0 是其基线（清洁）浓度水平， $PM_{2.5}$ 基线浓度为 $10\mu g/m^3$ 。

相关疾病住院经济损失（ EC_{a2} ）：

$$EC_{a2} = P_{eh} \cdot (C_h + WD \cdot C_{wd}) = \left(\sum_{i=1}^n f_{pi} \frac{\Delta c_i \cdot \beta_i / 100}{1 + \Delta c_i \cdot \beta_i / 100} \right) \cdot (C_h + WD \cdot C_{wd})$$

n 为大气污染相关的呼吸系统疾病和心血管疾病； f_{pi} 为现状大气污染水平下的住院人次； β_i 为回归系数，即单位污染物浓度变化引起健康危害 i 变化的百分数； Δc_i 为实际污染物浓度与健康危害污染物浓度阈值（ $15\mu g/m^3$ ）之差； C_h 为疾病住院成本，包括直接住院成本和交通、营养等间接住院成本； WD 为疾病误工天数； C_{wd} 为疾病误工成本，疾病误工成本 = 人均 GDP/365。

慢性支气管炎发病失能经济损失（ EC_{a3} ）：

慢性支气管炎的经济损失以患病失能法来取代一般疾病采用的疾病成本法，卫生服务调查中只有分年龄组的 COPD 死亡率，以 COPD 死亡率代替慢性支气管炎的死亡率。相关研究表明，患上慢性支气管炎的失能（DALY）权重为 40%。

$$EC_{a3} = 0.4 \cdot (f_{COPD} \cdot P_e) / t \cdot \frac{\Delta c \cdot \beta}{1 + \Delta c \cdot \beta} \cdot VSL$$

f_{COPD} 为慢性阻塞性肺疾病患病率，我国可取 3.3%， t 为大气污染引起的慢性支气管炎早死的平均损失寿命年数，23 年；回归系数 β 为 0.0048；其他同上。

（2）BenMAP 模型

BenMAP (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program)是由美国EPA 开发的健康效益评价模型,主要用来评估周围空气污染变化引起的人类健康效应及其经济价值。该模型通过综合利用空间网格化的人口与空气质量信息来评估空气污染物浓度的改变对急性疾病和死亡率变化的影响,并进一步利用价值衡量函数,估计污染物浓度变化所带来的健康经济效益。BenMap 可提供一种或多种空气污染物浓度变化对特定区域内居民的健康影响(如死亡人数的变化),并根据所选影响的指标,提供不同空气质量场景模拟变化的地理分布。具体计算流程和方法(略)。

5.3.4 碳协同减排效益

工业行业超低排放污染物处理设施运行将带来能耗增加,可能产生负的碳协同减排效益,如下式所示:

$$E_{CO_2} = A_{op} \cdot D_{CO_2}$$

式中 E_{CO_2} 为工业行业超低排放改造增加的碳排放量; D_{CO_2} 为超低排放改造后比改造前单位产量增加的碳排放。

5.4 费用与效益比较分析

对超低排放改造政策实施的费用和效益进行比较分析,通常采用的是净效益、效费比等指标和方法。

(1) 净效益 (NB)

在费用效益评估中最常用的评价公式就是计算政策实施的净效益。净效益的计算方法是用总效益减去总费用,即

$$NB_{\text{净效益}} = TB_{\text{总效益}} - TC_{\text{总费用}}$$

若 NB 净效益大于零,表明效益大于费用。若净效益小于零,则该项政策实施的费用大于效益。

(2) 效益成本比 (B/C)

$$B/C = TB_{\text{总效益}} / TC_{\text{总费用}}$$

效益成本比 (B/C) 是从净效益的计算公式中推导出来的,即总效益与总费用之比。如果大于 1,说明总效益大于费用,表明效益大于费用;如果小于 1,

则该政策实施支出的费用大于所得的效益。

5.5 经济社会影响评估

由于工业行业超低排放政策的实施，对相关环保产业等产生影响，对产业结构调整、拉动宏观经济、促进就业等有贡献作用。根据超低排放改造政策实施的不同情景（基准情景和现实情景），可采用投入产出模型、一般均衡（CGE）模型等，对不同情景下的宏观经济效益（如 GDP、行业增加值、产业结构调整、税收、进出口等指标）进行模拟分析，考虑贴现率，对政策实施的宏观经济影响进行计算。

工业行业超低排放政策的实施还可能对社会造成影响，主要是指由于超低排放政策实施可能带来的劳动力就业数量增加、群众投诉减少等，一般通过社会调查或计算评价，进行定性分析。

表 5-2 工业行业超低排放政策实施社会经济影响指标

内容	细化指标
经济影响	GDP 的增长
	带动其他行业的经济增长
	产业结构的优化调整
	价格调整
社会影响	进出口增加
	税收增加
	劳动力和就业的增加
	环境事件的减少

6 结论分析

6.1 不确定性分析

在工业行业超低排放的费用效益评估中，由于参数系数、计算方法、数据来源、政策措施假设等需要开展不确定性分析。不确定性通常包括模型不确定性和数据不确定性。模型不确定性是由对真实物理过程进行必要的简化，模型构建过程中所提到的假设、边界条件以及目前技术水平难以在计算中反应的种种因素，

导致理论值与真实值的差异，都归结为模型的不确定性。数据不确定性包括数据来源、数据缺失、测量误差、模型参数系数不确定性以及用于模型校正的观测数据的不确定性。

6.2 综合分析和建议

根据工业行业超低排放政策实施的各项费用和效益（效果）等相关方面的综合分析（从成本与效益、污染物减排、环境质量改善、环境健康、社会经济影响等），得出费用大小、效益大小、经济社会等可行性评估结论。通过对评估结果进行不同角度、不同层面的深入详细的分析，提出工业行业超低排放改造政策优化的相关建议。