

NQI 课题“大气污染防治认证评价技术体系研究与信息系统建设”之子任务 2

# 大气污染防治技术评价 共性技术研究

进展报告

2018 年 9 月 30 日

# 目录

一、	研究背景与文献综述.....	1
1	大气污染防治技术评价发展现状与趋势.....	1
2	大气污染防治技术评价存在的问题.....	3
3	大气污染防治技术多维评价方法研究目标.....	4
二、	研究进展.....	5
1	大气污染防治技术多维评价利益相关者分析.....	5
2	大气污染防治技术分类.....	6
3	大气污染防治技术评价多维指标体系构建.....	9
3.1	确定指标类型.....	9
3.2	建立指标量化方案.....	9
3.3	生命周期评价指标核算方法.....	14
4	综合评价方法.....	17
4.1	综合评价方法遴选.....	18
4.2	多维评价步骤：以模糊综合评价为例.....	20
5	大气污染防治技术评价案例研究：PM2.5 防治技术 .....	23
5.1	燃煤电厂细颗粒物防治技术多维评价研究背景.....	23
5.2	细颗粒物防治技术多维评价指标体系.....	24
5.3	一级指标及二级指标权重确定.....	25
5.4	评估指标量化.....	29
5.5	部分指标赋权计算过程.....	31
三、	下一步计划.....	32

# 一、 研究背景与文献综述

## 1 大气污染防治技术评价发展现状与趋势

大气污染防治技术评估是环境技术评估的重点类型。环境技术评估是通过建立客观、科学、透明的评价制度与程序,对各类环境技术在预防、监测、控制与减少环境危害等方面的能力与效用进行评估(易斌 et al. 2003)。

环境技术评估(ETV)是1995年左右开始在加拿大、美国兴起的一类环境技术评价体系,是由两国政府的环境部门倡导建立的一类基于第三方技术验证、对具有商业化潜力的创新环境技术进行测试、评价的环境技术验证制度。ETV是对企业或个人自主开发技术的自我技术声明的确认和验证,类似于项目评估中的技术评价,是建立在一套科学实验和统计学基础之上的验证程序,既不同于合格评定制度,也不同于专家评价体系。ETV不对技术做“好”、“坏”或是否合格的评价,而是通过ETV程序向技术的潜在购买者、技术开发者、咨询工程师等提供高质量的有关被评估技术的性能数据和技术特征。

我国环境技术评估工作已经进行了积极的探索。我国的环境技术管理体系由技术指导体系(最佳可行技术指南、污染防治技术政策、环境工程技术规范)、技术评价制度、技术示范与推广机制三部分组成(赵英民 2007)。最佳可行技术的评估筛选方法主要包括:同类技术调查方法、费用效益测试方法、统计方法与模型、专家系统等。目前我国的环境技术评估工作主要包括专家评价体系。专家评价是针对一项具体的环境技术,由政府或受委托的机构,邀请同行业专家、管理以及相关方面的人士组成专家委员会,通过召开专家委员会会议或函审的形式,对申请技术进行综合评价,提出评价意见,其核心为专家评价意见。它是我国环境技术评估工作中应用最广泛、最具代表性的一类评价模式。

方法论层面,环境技术的评估多使用综合评价方法。综合评价是指对多属性体系结构描述的对象系统做出全局性、整体性的评价。

环境技术特别是大气污染防治技术评估的现有案例中,多使用综合评估方法。

以烟气脱硫技术评估为例，国内研究者多使用模糊综合评价方法(王书肖 et al. 2001, 蔡昌凤 et al. 2004, 崔亚兵 et al. 2005, 赵健植 et al. 2006, 孙志翱 et al. 2007, 周小力 et al. 2008)、灰色层次分析理论(曹国庆 et al. 2006, 毛瑞勇 et al. 2006, 林琳 et al. 2014, 费蛟虹 2017), 也有使用基于熵权未确知测度模型等其他模型(许建华 2010)。典型行业的 VOCs 技术评估也多应用综合评价方法(王海林 et al. 2014, 阿克木·吾马尔 et al. 2015)。大气污染防治技术综合评价方法的指标体系多以性能指标为主, 以技术经济指标为辅, 部分关注到了二次产物带来的资源环境影响, 但总的来说, 面向技术应用方的评价目标与方案仍是现有评价体系的主流。

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 方法逐渐成为环境技术评估的重要方法。生命周期评价是一种以综合量化评估为特征的系统分析工具, 被广泛应用于产品生态设计、工艺生态优化、废弃物可持续管理以及绿色供应链建设等绿色发展的诸多领域(Hellweg et al. 2014), 成为企业改善产品环境表现、政府开展可持续生产与消费政策设计的重要决策工具。

由于大气污染的复杂性与防治技术的多样性, 大气污染防治技术评估方面的生命周期评价研究相对零散。工业点源污染物控制方面, Inga Stasiulaitiene 等应用 LCA 对比分析了等离子技术与传统末端技术处理工业废气的适用性(Stasiulaitiene et al. 2016); 面源污染方面, Xiaoling Zhang 等对香港区域的建筑过程的大气污染物排放开展了生命周期评估, 得出了相应的污染控制方案(Zhang et al. 2013); 移动源方面, Tessum 等对美国轻型汽车使用不同燃料情景下的大气污染排放开展细致完整的生命周期评价, 提出了发展生物质燃料及车型改进的具体措施(Tessum et al. 2014)。

**基于生命周期影响评价的多类资源与环境影响类别, 同时结合技术本身的多层次功能指标及经济指标的综合评估方法成为环境技术评估的发展趋势。**例如, 应用 LCA、成本效益分析以及 Markal 综合能源系统优化模型可对火力发电厂的大气污染排放防治技术进行优化整合(Wu et al. , Tokimatsu et al. 2016)。

**环境技术评估关注的重点正由单一的污染物去除向资源回收率等多重技术功能转变。**生命周期评价目前正处于由资源消耗与环境影响评估为重点向多维指标综合评价方法(Dewulf et al. 2005, Heijungs et al. 2010, Hellweg et al. 2014),

从传统的静态数据的获取到考虑时间和空间分布的动态生命周期方法（Harald Dyckhoff et al. 2014），有望为我国大气污染防治技术的认证评估提供有效的方法论支持。

## 2 大气污染防治技术评价存在的问题

目前，国内针对大气污染防治技术的评估主要集中在火电厂脱硝脱硫防治技术的评估，和典型行业 VOCs 防治技术的评估等，但是评估理论结果难以为污染物控制方案的选择给予实际的有效指导(孙现伟 et al. 2015)。

综上，我们认为目前关于大气污染防治技术的评估方法和评估体系的研究较少，在评价指标体系与评价方法的系统性、科学性、全面性和针对性方面均需开展深入探讨。

（1）大气污染防治技术评估目标需满足多方利益相关者的关注点。不同利益相关者对待技术评估的目标与价值期望差异性较大，例如，技术应用方多希望直接用于指导技术选择，多关注污染控制功能和技术应用的经济成本；技术研发方及其行业组织则多关注技术功能标准的制定，有利于技术的市场推广；政府管理方则多关注推广污染控制技术与改善大气环境质量的之间的关系，技术导向政策实施的效果，以及社会经济污染控制总成本的变化。

（2）大气污染防治技术评估的指标体系需更加系统和全面。目前的大气污染防治技术评估应用案例中，多应用综合评价技术，指标体系中，多为技术应用方的可控性功能指标，部分考虑到二次污染物处理量的指标，以及面向单一工程的经济指标。应用生命周期评价的案例中，则根据评价的全面性多应用终端型指标，例如酸化、富营养化、温室效应等指标。两类指标与不同的评估目标、评估边界密切相关，因此，大气污染防治技术评估需有机融合上述两类指标。

（3）大气污染防治技术评估所使用基础数据的可靠性、时效性、全面性亟需加强。大气污染物排放生产原料辅料、工艺过程、生产规模等多种生产要素相关，因此，防治技术的评估中应扩大所使用数据的采集方式类型与规模，努力取得技术研发与应用部门的配合，并在数据获取条件、可靠性、时效性等

方面开发相适应的数据质量控制技术。而且，按照评估指标的覆盖面要求，开发并应用相适应的生命周期清单数据库为污染防治技术评估提供数据基础。

(4) 大气污染防治技术的系统化评价方法亟待开发。基于指标体系的各类综合评价方法均为成熟的、通用的评价方法，其评价结果一般能够满足指标型的评价目标，有利于技术研发与应用机构的技术遴选，但其系统性全面性不足。基于系统分析的生命周期评价方法则在区域性评价方面具备改进空间，能够体现防治技术的系统化效应，有利于管理决策机构寻求社会经济成本最优的环境质量提升方案，但其评价结果在落地实践中作用不明显。

### 3 大气污染防治技术多维评价方法研究目标

(1) 本次研究将充分考虑大气污染防治技术应用过程多主体利益，重点为技术标准制定部门提供科学、客观的技术多维评价方法。面向不同利益相关者的期望目标，污染防治技术评估方法将涵盖社会经济发展的多个维度，扩展技术评估的系统边界，开发更有针对性、开放度更高的评估方法。

(2) 本研究将大气污染防治技术的功能指标与直接、间接资源环境效应指标，将防治技术本身的多种间接效应纳入技术评估的考察范围，重视二次产物的处理及引发的资源环境问题，体现污染防治技术在无害化基础上实现资源化的发展趋势。

(3) 本研究拟将综合评价方法与生命周期系统分析相结合，同时考虑污染防治技术动态化更新的特征，为优选“可持续、可落地”的大气污染防治技术提供科学方法。

## 二、 研究进展

### 1 大气污染防治技术多维评价利益相关者分析

分析大气污染防治技术不同核心利益相关者的评价目的。厘清大气污染防治技术评估应用的主要利益相关方及评估结果的主要应用者，梳理得到大气污染防治技术评估的现实需求与待突破难点，确定大气污染防治技术的评价目标与框架。评价利益相关方将包括大气污染防治技术选购企业、技术评价认证部门、技术推广机构、地方政府等环境管理部门以及技术研发机构。

不同利益相关者对待技术评估的目标与价值期望差异性较大，例如，技术应用方多希望直接用于指导技术选择，多关注污染控制功能和技术应用的经济成本；技术研发方及其行业组织则多关注技术功能标准的制定，有利于技术的市场推广；政府管理方则多关注推广污染控制技术与改善大气环境质量的之间的关系，技术导向政策实施的效果，以及社会经济污染控制总成本的变化。

表 1 技术评价的利益相关者与评价目标

利益相关者	技术阶段	评价目标	相关指标类型	评价需求偏好
技术研发机构	研发	功能效率高	功能指标、经济指标	技术性价比优势
技术应用机构	应用	功能效率高	功能指标、经济指标	技术功能的精准化评估
地方环保部门	管理	功能效率高	功能指标、经济指标（补贴）	技术功能需求
评价认证部门	标准化认证	生态效率高 社会效益好	功能指标、经济指标、 资源环境指标	通用技术指标评估 最佳可行技术认定
中央决策部门	统筹管理	生态效率高 社会效益好	功能指标、经济指标、 资源环境、社会指标	与政策目标相结合； 可跨越技术大类

由于各个利益相关者所关心的评价目的各不相同，所关心的指标类型也有差异。因此本模型在需求方面将选取较为灵活的评价方式，即在综合评估模型构建过程中，将加入更为弹性的指标选取与整合方法，提供不同的评价结果。

## 2 大气污染防治技术分类

技术分类体系是有效地进行技术鉴定和技术管理工作的基础。分类体系将直接与指标的选择、技术评价的目标相关联。而由于大气污染物产生源在生产规模、生产原料、燃料、生产工艺等多方面的差异，对防治技术的要求更是可细化至工艺水平。

本研究技术分类根据评价目标确定分类的粗糙度，确定大气污染防治技术评估的主要对象，为建立大气污染防治技术的指标体系奠定基础。

大气污染防治技术的类别在文献与政策文件中均有涉及。文献中多针对某单一污染物或者具备行业特征的混合污染物，根据大气污染防治技术原理进行分类。科技部与环保部 2014 年发布了《大气污染治理先进技术汇编》，将大气污染治理技术粗略分为电站锅炉烟气排放控制、工业锅炉及炉窑烟气排放控制、典型有毒有害工业废气净化、机动车尾气排放控制、居室及公共场所典型空气污染物净化、无组织排放源控制、大气复合污染监测模拟与决策支持、清洁生产等八个领域。

在充分调研大气污染防治技术发展现状与趋势的基础上，本研究将防治技术按照防治的过程分为生产前（燃烧前、反应前等）防治（源头削减），即对原料、燃料等进行处理以减少污染物产生；生产中防治（过程控制），即改变燃烧或者反应的条件减少污染物的产生；产生后防治（末端处理），即对已经产生的污染物进行收集、处理、转化，使之无害化或者转入其它易处理的介质中去。本研究还根据目标污染物类型（ $\text{NO}_x/\text{SO}_x/\text{PM}_{2.5}/\text{VOCs}$  等）来源（面源、点源、移动源）、行业（电力、化工等）、多寡（例如单污染物去除技术、行业特征的多污染物协同处理技术）做细化分类典型的大气污染物包括硫氧化物、氮氧化物、颗粒物、有机废气等。

部分典型污染物类型的主要技术分类结果如图 1-4 所示。其中，绿色标记技术类型为源头削减技术，蓝色为过程控制技术，黄色为末端处理技术。



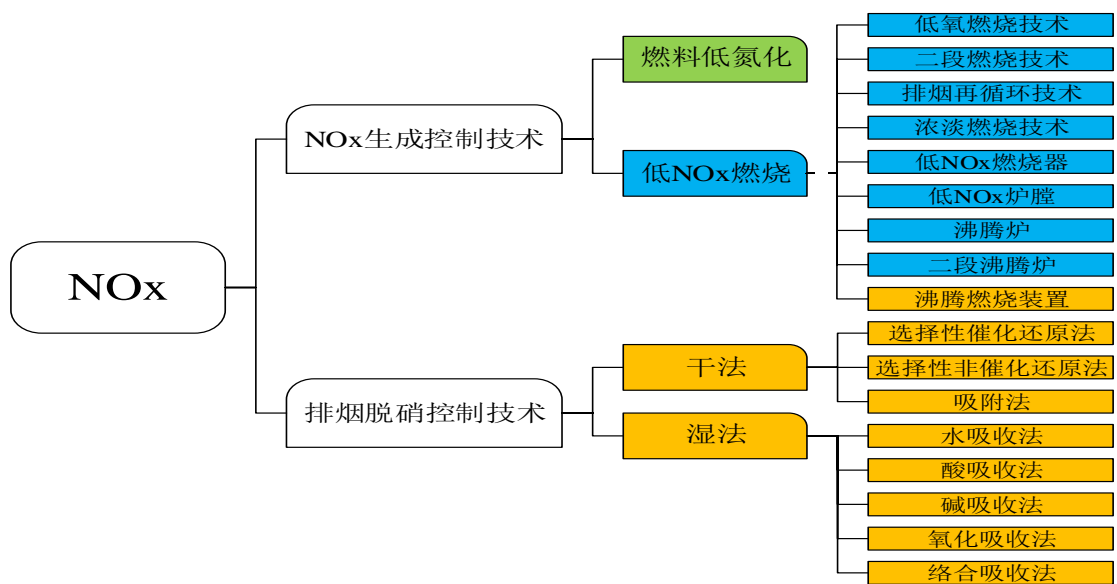


图 1 氮氧化物典型防治技术分类

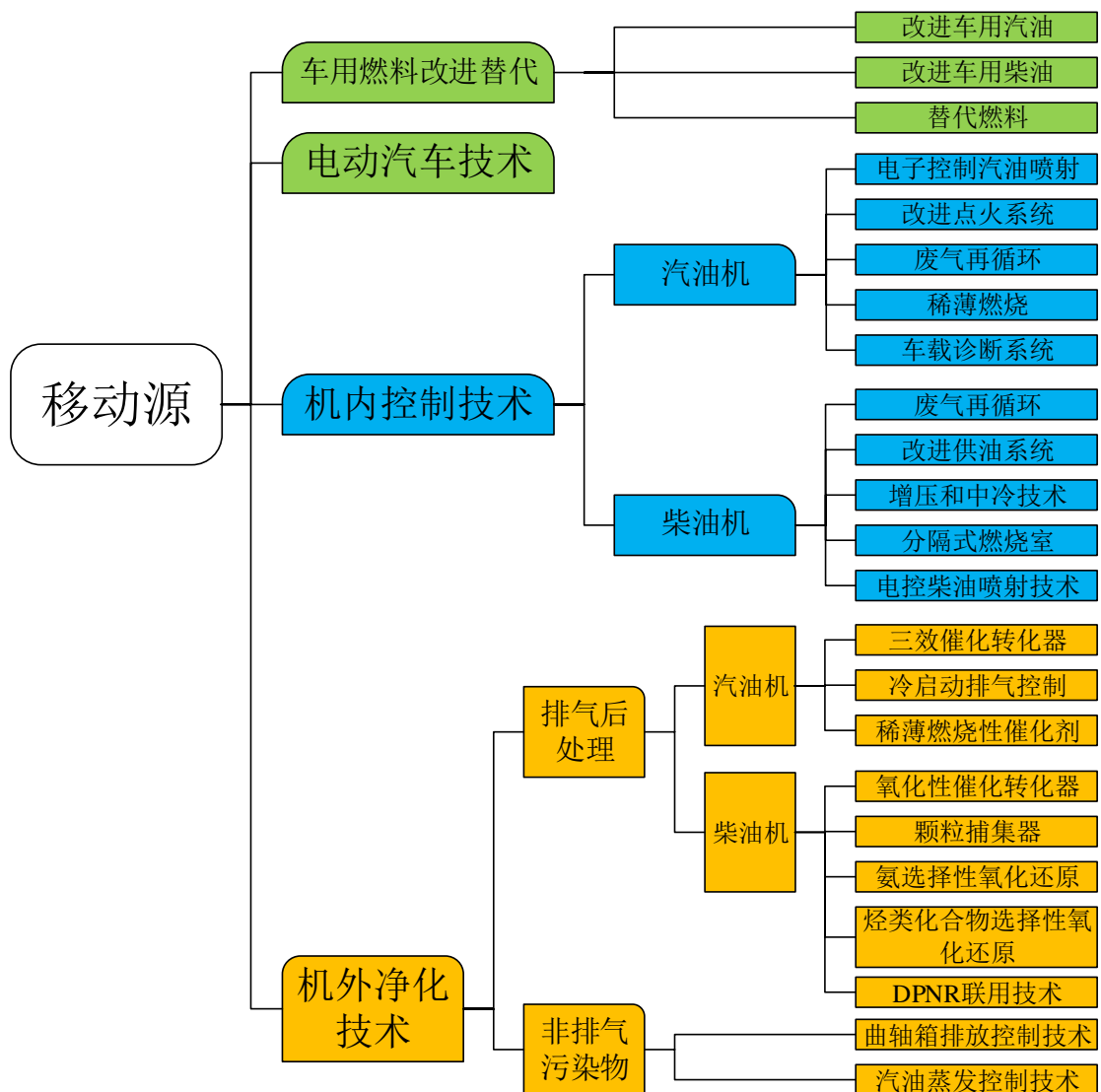


图 2 移动源大气污染物典型防治技术分类

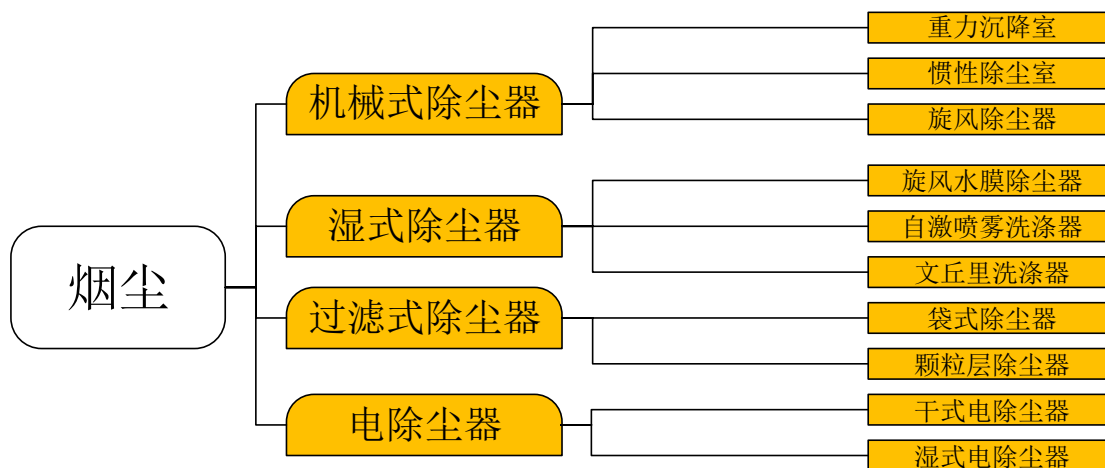


图 3 烟尘与细颗粒物典型防治技术分类

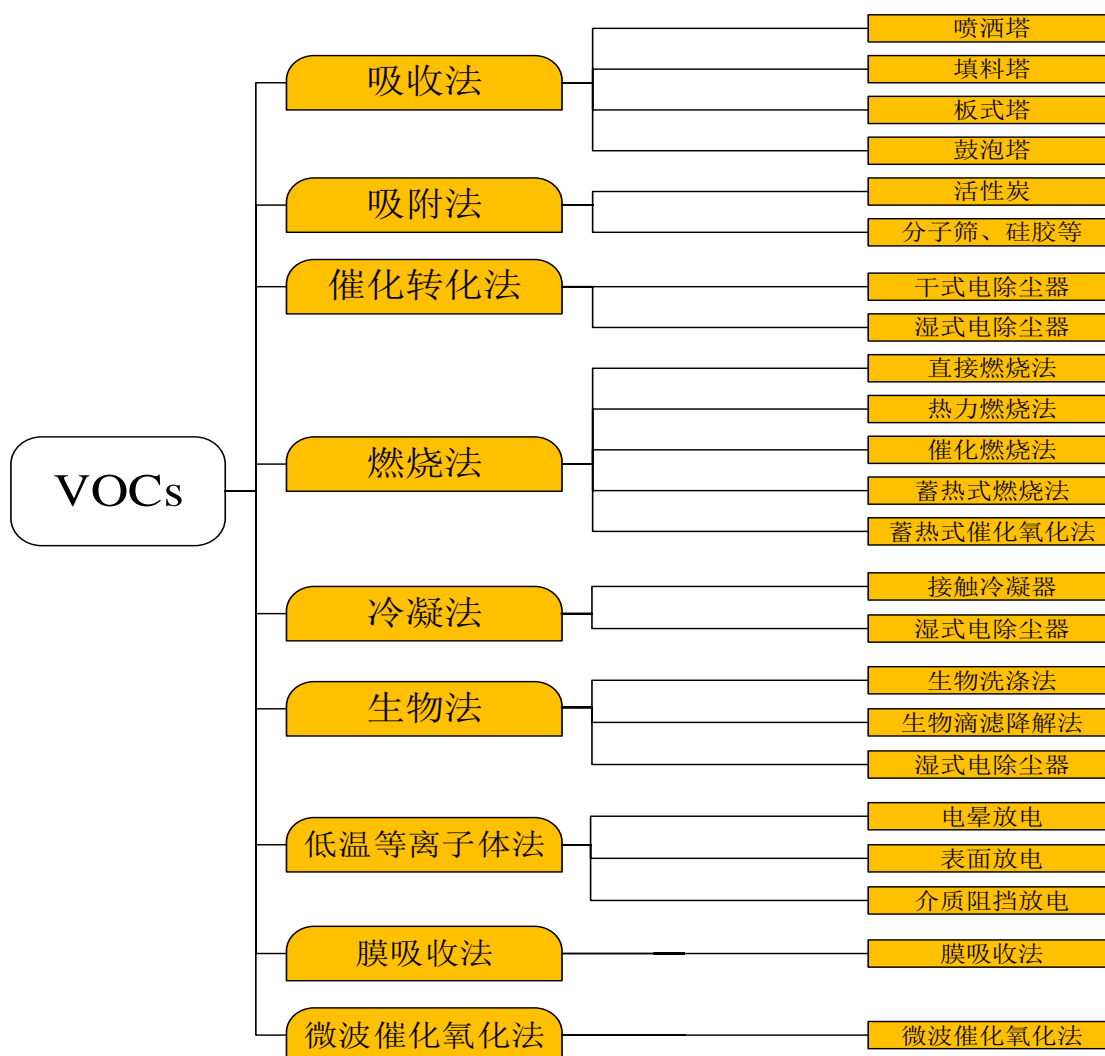


图 4 挥发性有机物典型防治技术分类

### 3 大气污染防治技术评价多维指标体系构建

#### 3.1 确定指标类型

总结整理文献中指标，并根据应用现状，基于文献与实地调研结果，提出涵盖防治技术功能、资源能源效应、环境影响、经济效益与社会影响在内的细化指标体系，具体指标类型如表 2 所示。

(1) 在防治技术分类的基础上，依据相应污染物的去除效果、适应条件、对大气环境质量提升的重要程度等因素，建立大气污染防治技术的技术功能指标。技术功能指标将包括目标污染物削减量、削减效率、适应条件等定性指标与定量化二级指标。

(2) 依据大气污染防治技术的方法原理与实践案例，建立覆盖技术应用的重点生命周期阶段的关键资源、能源评价指标。资源消耗类指标将包括原材料消耗、一次能源消耗、二次能源消耗等指标，以及表征资源、能源消耗影响的终端型指标。

(3) 依据大气污染防治技术的方法原理与实践案例，建立覆盖技术应用的重点生命周期阶段的关键污染物排放指标。该类指标将包括废水、危险废弃物、一般固废等直接排放指标，以及人体健康与生态系统健康影响等终端型指标。

(4) 依据技术经济特征建立经济效益类指标。该类指标包括技术应用的成本指标、收益指标。

(5) 依据污染防治技术应用的利益相关者分析建立社会影响类指标。该类指标将技术应用人员的经济收入、岗位数量等指标。

#### 3.2 建立指标量化方案

根据我国大气污染防治技术发展与管理实际调研，建立了不同技术类型的定量与定性指标数值与信息的获取方法，如表 2 所示。

(1) 大气污染防治技术的功能指标将通过技术调研、类比分析、模型模拟以及实测等方法获取。

（2） 资源、能源与环境影响指标将通过实测以及基于基础生命周期清单数据库的生命周期评价方法获取。

（3） 经济效益类指标主要通过成本效益分析、生命周期成本分析以及投入产出分析等技术经济学方法获取数据，国家主要商品价格变化数据将作为经济效益类数据的主要来源。

（4） 社会影响类指标则主要通过利益相关者调研以及类比等方法获取，社会就业与收入数据将作为主要数据源。

表 2 技术多维评价量化方法与指标核算方案

指标类型			指标范围	数据获取	指标值核算	单位
资源能源	能源消耗	一次能源消耗 $E_1$	技术应用直接消耗的煤、汽油、柴油、煤油、燃油、天然气	实测/调研	$E_1 = \sum E_{\text{coal}} + E_{\text{ng}} + \dots$	Kgce
		二次能源消耗 $E_2$	技术应用直接消耗的电力、蒸汽	实测/调研	$E_2 = \sum E_E + E_{\text{steam}}$	kgce
		可再生能源消耗 $E_r$	技术应用直接消耗的生物质能	实测/调研	$E_r = E_{\text{bio}}$	kgce
		化石能源耗竭效应 $E_s$	技术应用全生命周期的能源消耗影响	LCA 核算	ReCiPe method	kg oil-eq
	资源消耗	主要原料易得性	技术应用过程所使用的主要购置设备、原辅料的易得性	原料市场规模/本地化供应	半定量参数, 分为易得 (100%)、一般 (50%)、难以得到 (0%)	无量纲
		主要原料使用量 $Q_m$	技术应用过程所使用主要原辅料数量	调研/实测	$E_1 = \sum E_{\text{water}} + E_m + \dots$	kg
		资源耗竭效应	技术应用全生命周期的资源耗竭影响	LCA 核算	ReCiPe method	kg Cu-eq
环境影响	直接影响	重点污染物排放量 $Q_{\text{pm}}$	技术面向的主要污染物排放量	实测/调研		Kg/a
		重点污染物排放浓度 $I_{\text{pm}}$	技术面向的主要污染物排放浓度	实测/调研		Kg/m <sup>3</sup>
		其他污染物排放量 $Q_{\text{po}}$	其他固体、水、大气大气污染物排放量	实测/调研		Kg/a
		其他大气污染物排放浓度 $I_{\text{po}}$	其他大气污染物排放浓度	实测/调研		Kg/m <sup>3</sup>
	间接影响	颗粒物形成潜势	技术应用全生命周期的环境影响	LCA 核算	Recipe Method	kg PM2.5-eq
		光化学烟雾形成潜势				kg NOx eq.
		气候变化效应				Kg CO2-eq
		臭氧层损耗效应				Kg CFC11-eq
		水体富营养化潜势				kg P-eq.
		陆地酸化潜势				kg SO2 eq.
		人体毒性效应				1,4-DCB eq.
		水体毒性效应				1,4-DCB eq.
技	污染	重点污染物去除率 $R_{\text{pm}}$	技术面向的主要污染物去除率	实测	$R_{\text{pm}} = Q_{\text{pm}} / Q_{\text{tpm}}$	无量纲

术 功 能	物去除率	其他污染物去除率 R <sub>po</sub>	其他大气污染物去除率	实测	R <sub>po</sub> =Q <sub>po</sub> /Q <sub>tpo</sub>	无量纲
	对生产效率影响	能源效率变动比例 R <sub>echg</sub>	污染防治技术应用引起的锅炉等能源转换效率的变化	实测、调研	R <sub>echg</sub> =R <sub>eo</sub> -R <sub>ep</sub> , R <sub>eo</sub> 指原有效率, R <sub>ep</sub> 指技术应用后的效率	无量纲
		其他生产效率变化 R <sub>pchg</sub>	污染防治技术应用引起的其他生产效率变化	实测、调研	R <sub>pchg</sub> =R <sub>po</sub> -R <sub>pp</sub> , R <sub>po</sub> 指原有效率, R <sub>pp</sub> 指技术应用后的效率	无量纲
	技术特征	技术就绪度	技术成熟程度, 包括小试、中试、应用、成功推广等	调研	半定量参数, 可分为小试 (10%)、中试 (40%)、工业应用 (80%)、推广 (100%)	无量纲
		条件适应性	技术适用条件参数的可变程度, 例如温度、湿度、对象种类、规模等适用范围	调研	专家咨询判定	无量纲
		安全性	技术应用过程有毒有害物质/高温高压条件的使用等	调研	半定量参数, 分为风险高 (100%)、一般 (50%)、风险较低 (10%)	无量纲
		复杂性	技术应用的复杂程度, 包括主体工程的改造程度等等	调研	半定量参数	无量纲
	经济效益	成本收益	技术应用总体投资占比 R <sub>c</sub>	基础设施与设备等固体投资成本占项目总投资比例	调研核算	R <sub>c</sub> =C <sub>p</sub> /C <sub>total</sub> , 其中 C <sub>p</sub> 指防治技术用用的建设成本, C <sub>total</sub> 指生产项目建设总成本
单位治污成本			基础设施建设、设备制造与运行费用	调研、核算	C <sub>pp</sub> =(C <sub>p</sub> ×(1-R%) /Y+C <sub>e</sub> +C <sub>m</sub> ) /Q <sub>pm</sub> , 其中 R 为贴现率, Y 为基础设施使用年限, C <sub>e</sub> \C <sub>m</sub> 分别为能源资源消耗费用	Yuan/kg
副产物处理处置成本 C <sub>sp</sub>			技术应用过程产生的副产物(暂不考虑基础设施与固定设备) 处理处置费用, 如脱硫石膏、滤布等	调研	C <sub>sp</sub> =P <sub>sp</sub> *Q <sub>sp</sub> ,其中 P <sub>sp</sub> 指副产物处理单价, Q <sub>sp</sub> 为产生量	Yuan

社会 影响	就 业 收入	工作岗位数量 $Q_i$	技术应用过程需要的工作人数	调研		人
		工作岗位平均收入 $I$	技术应用过程可提供的就业岗位的收 入	调研		Yuan
		收入与社会平均工资比 $R_I$	岗位收入所占的比例	调研	$R_I = I/I_{avg}$ , 其中 $I_{avg}$ 指社平工资	无量纲

### 3.3 生命周期评价指标核算方法

#### (1) 目标定义与范围确定

目标定义、系统设定和功能单位确定是开展生命周期评价的首要步骤。

本研究中，开展生命周期评价的目标与多维评价方法研究的目标类似，简而言之即评价技术应用全过程的资源、能源与环境影响。

针对大气污染防治技术开展生命周期评价，其生命周期阶段包括技术应用准备阶段，即污染防治技术装备生产制造与安装、耗材生产等阶段；技术应用实施阶段，即污染防治技术实施，去除目标污染物的阶段；技术应用后续阶段，即已使用耗材处理处置（例如滤布）、二次污染物的处理处置（例如脱硫石膏）阶段。

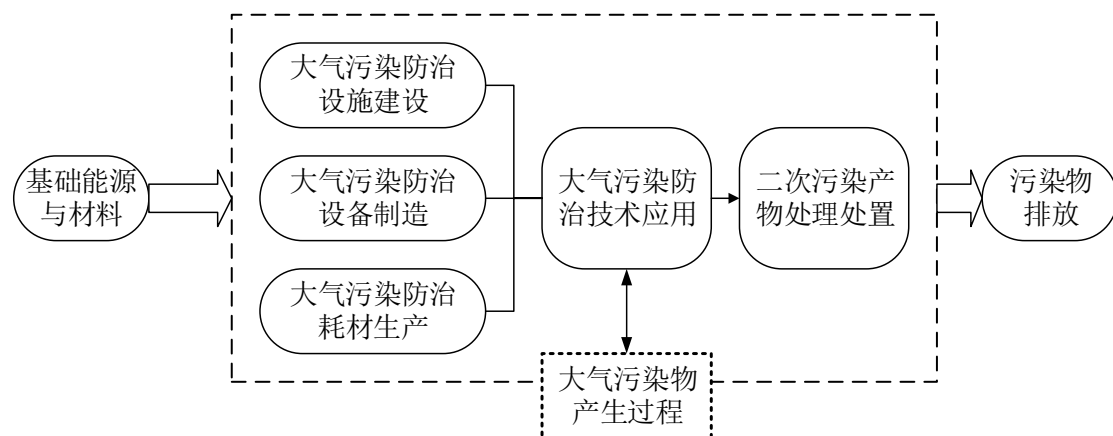


图 5 大气污染防治技术生命周期评价系统边界

针对大气污染防治技术开展生命周期评价时，需根据待评价技术的类型，选择不同的功能单位，以全面系统反应技术的服务功能。例如，对比针对同一污染物的末端处理技术，可将功能单位确定为“实现某种/某类大气污染物不高于某一特定排放量的防治技术”；对比针对同一产品生产工艺的源头削减和末端处理技术，则可将功能单位确定为“某生产过程提供一定量的产品/服务时，其大气污染物排放量不高于某一特定值的防治技术”。

#### (2) 清单编制



厘清大气污染防治技术的实施步骤、关键工艺，通过实地调研、文献查阅等方法获得关键单元过程输入输出清单。该清单将涵盖大气污染防治技术应用的全过程。

### （3） 影响评价

生命周期影响评价对清单分析所识别的环境影响压力进行分类定量或者定性的表征评价，即确定产品系统的物质和能量交换对其外部环境的影响。本研究中将采用 Recipe 2016 方法中的中点型指标（Midpoint Indicator），如图 6 第一列所示。

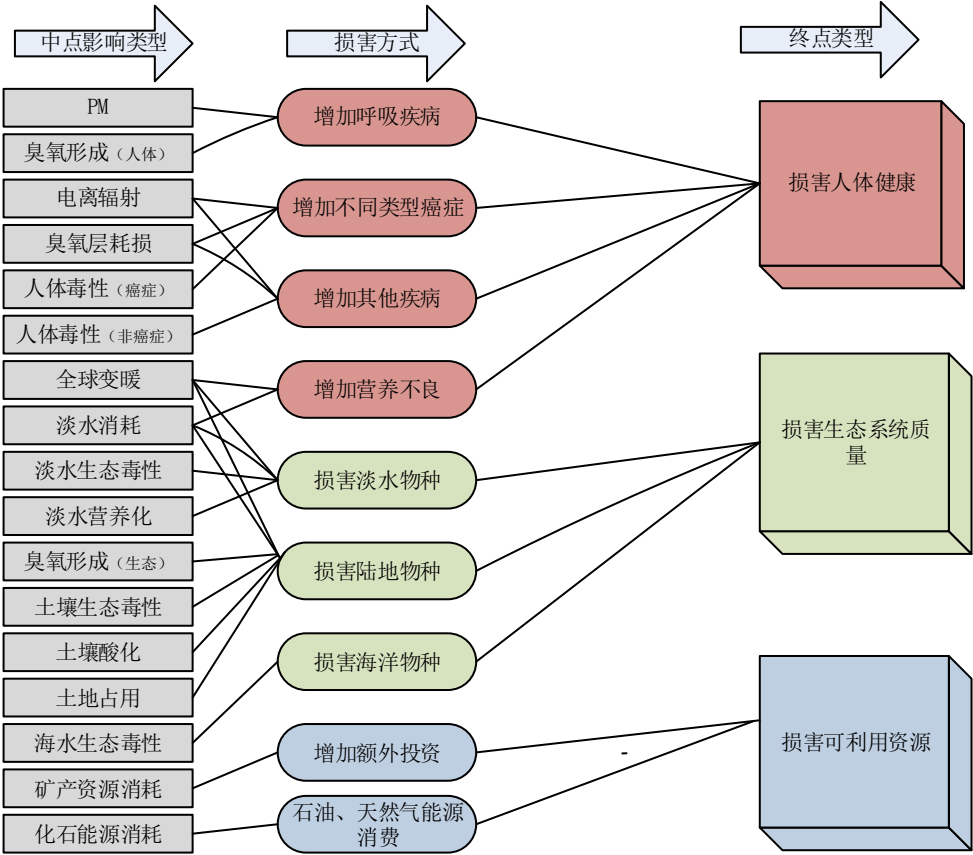


图 6 ReCiPe 2016 方法影响类型及指标

中点型指标可经过特征化计算获得，即将每一个影响类型中不同物质进行转化和汇总，通过以下公式计算。

$$I_m = \sum_i Q_m i M_i$$

$I_m$  属于环境影响类型的影响潜值即指标结果， $Q_{mi}$  为第  $i$  种污染物对第  $m$  种环境影响类型的当量因子， $M_i$  属于第  $i$  种污染物排放量。其中，细颗粒物形成过程和光化学烟雾形成过程的特征化因子如表 3、表 4 所示。

表 3 特征化因子：细颗粒物形成过程

Emitted substance	Unit	Factors: Hierarchist
NH3	kg PM2.5-eq/kg	0.24
NOx	kg PM2.5-eq/kg	0.11
SO2	kg PM2.5-eq/kg	0.29
PM2.5	kg PM2.5-eq/kg	1
NO	kg PM2.5-eq/kg	0.17
NO2	kg PM2.5-eq/kg	0.11
NO3	kg PM2.5-eq/kg	0.08
SO	kg PM2.5-eq/kg	0.39
SOx	kg PM2.5-eq/kg	0.29
SO3	kg PM2.5-eq/kg	0.23

表 4 特征化因子：光化学烟雾形成

CAS nr	Substance name	Factors: Hierarchist
NO <sub>x</sub>	nitrogen oxides (as nitrogen dioxide)	1.00E+00
NMVOC	NMVOC	1.80E-01
	NO	1.53E+00
	NO3	7.40E-01
000074-84-0	Ethane	0.03
000074-98-6	Propane	0.05
000106-97-8	Butane	0.11
000075-28-5	i-Butane	0.10
000109-66-0	Pentane	0.15
000078-78-4	i-Pentane	0.12
000463-82-1	Neopentane	0.07
000110-54-3	Hexane	0.15
000107-83-5	2-Methylpentane	0.15
000096-14-0	3-Methylpentane	0.16
.....	.....	.....

## 4 综合评价方法

面向大气污染防治技术评价目标，考虑多维指标的数据可得性，比选现有的多种综合评价方法，并将生命周期评价指标的系统分析特征纳入评价过程，开发适合多维指标体系的综合评价方法及方法组合，以达到面向不同利益相关群体的差异化的评价目标。

综合评价主要目的是为科学决策提供技术和方法的支持。综合评价(Comprehensive Evaluation, CE)指对以指标体系描述的对象系统做出全局性、整体性的评价，即对评价对象的全体，根据所给的条件，采用一定的方法给每个评价对象赋予一个评价值，再据此择优或排序。实际上，综合评价也就是按照给定目标，对研究对象进行全面的分类和排序的过程。综合评价根据评价对象和评价目的，从不同的侧面选取刻画系统某种特征的评价指标，建立指标体系，并通过一定的数学模型将多个评价指标值“合成”为一个整体性的综合评价值。

针对大气污染防治技术评价，综合评价方法需满足以下目标：

(1) 多目标权衡。面向不同利益相关者的期望目标，涵盖社会经济发展的多个维度，扩展技术评价的系统边界，开发更有针对性、开放度更高的评价方法。

(2) 兼顾技术性能与间接效应。有机融合功能性指标与间接终端型指标，将防治技术本身的多种间接效应纳入技术评价的考察范围，重视二次产物的处理及引发的资源环境问题，体现污染防治技术在无害化目标基础上实现影响最小化的发展趋势。

(3) 兼顾指标评价与系统分析。将综合评价方法与系统分析相结合，同时考虑污染防治技术动态化更新的特征，是技术评价亟待解决的问题。

由于大气污染防治技术本身具有的多属性、多层次等特点，因此融合多种理论方法的优势、构建新型的主客观集成化综合评价系统是本研究重点，特别是将抽丝剥茧的生命周期影响评价指标与直接应用的指标相结合，选取综合评价的综合方法，为大气污染防治技术的发展提供科学依据和决策支持。

## 4.1 综合评价方法遴选

### (1) 模糊综合评价方法

模糊综合评价是借助模糊数学的一些概念，对实际的综合评价问题提供一些评价的方法。具体地说，模糊综合评价就是以模糊数学为基础，应用模糊关系合成的原理，将一些边界不清、不易定量的因素定量化，从多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价的一种方法。综合评判对评判对象的全体，根据所给的条件，给每个对象赋予一个非负实数——评判指标，再据此排序择优。

模糊综合评判作为模糊数学的一种具体应用方法，最早是由我国学者汪培庄提出的。它主要分为两步：第一步先按每个因素单独评判；第二步再按所有因素综合评判。其优点是：数学模型简单，容易掌握，对多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好，是别的数学分支和模型难以代替的方法。模糊综合评判方法的特点在于，评判逐对进行，对被评对象有惟一的评价值，不受被评价对象所处对象集合的影响。其中，多层次模糊综合评价的原理为，将评价对象的多种指标按属性分成若干类大指标，然后对每一类大指标进行较低层次的评价，在此基础上再对低级评价的结果进行高一级的综合评价。

多层次模糊综合评价模型的操作步骤如下：

- [1] 确定评价对象集，确定对哪几种技术进行评价；
- [2] 确定评价因子集(即评价指标集)，指标集的选取既要有广泛性又要有代表性，将给定的指标集按其不同的属性划分成互不相交的子指标集；
- [3] 建立隶属函数，隶属函数的确立方法有多种，目前应用较多的方法主要有解析定义法、专家评分法、二元对比排序法和图表法等
- [4] 建立模糊矩阵。将指标集中指标在不同评价对象下的值带入隶属函数中，计算出其隶属函数值，从而组成一级指标模糊矩阵。
- [5] 确定指标集中各指标的权重。权重是反映指标的相对重要性，权重应满足归一性和非负性。
- [6] 综合评价。即对模糊评价对象集的模糊综合评价，综合评判值最大者即为最佳方案。

## (2) 基于粗糙集理论的综合评价方法

拟应用粗糙集理论作为综合评价方法的集成基础。粗糙集的属性约简功能对于评价指标的筛选效用显著，能在保持指标集分类能力不断的条件下，删除其中不相关或不重要的指标，使得相同的评价结果可以通过更少量的条件得出，然而精度不变。这是它胜过模糊综合评价法和神经网络评价法的地方，因为模糊隶属函数的确定需要先验数据，并且处于经验判断时期，且模糊隶属函数一般由专家评定或凭经验得出，主观性较强。神经网络方法则需要大量的训练样本；粗糙集特有的属性约简和属性重要性等原理，可以科学、客观、简洁地筛选指标算法简洁，流程易于操作。

因此，将粗糙集理论导入现有的常用综合评价的全过程，是对常用综合评价方法的补充，又使得它可以与多种理论及方法进行优势互补。例如，粗糙集理论可与层次分析法集成使用，即以粗糙集方法确定客观权重，以层次分析法确定主观权重，将主、客观权重进行集成，得到组合权重，在此基础上得到综合评价模型，比单方法评价更全面客观。同样的，粗糙集理论也可与灰色关联理论联合进行权重确定与评价方法的建立。

### [1] 基于粗糙集指标体系属性约简

基本思路为：设定评价系统的指标体系  $C=\{a_i\}(i=1,2,\dots,n)$  及评价对象的集合  $U=\{x_i\}(i=1,2,\dots,m)$ ，在完成数据采集工作后，需对数据进行同度量处理，以消除量纲差异再进行分析比较。

具体计算公式  $a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_j}$ ，其中  $a'_{ij}$  当量化  $i$  方案的指标  $j$  取值， $a_{ij}$  是指  $i$  方案中指标  $j$  的原始数据取值； $a_j$  各方案指标  $j$  的平均值。而后采用等距离划分算法对指标进行离散化处理，然后将其结果带入下列计算中。

指标  $a_i$  在指标体系中的重要性程度为： $\text{Sig}_c(\{a_i\})=H(C)-H(C-\{a_i\})$  其中  $C-\{a_i\}$  指剔除  $a_i$  后的评价指标体系； $H$  函数代表知识信息熵大小， $H(P)=-\sum_{i=1}^m P(X_i) \log_2 P(X_i)$  当约简与原信息表的分类能力在给定误差限度以内时，即满足  $\text{Sig}_c \geq \epsilon$ （根据决策者对不同工程项目的需要）便能获得满意的指标体系。

### [2] 基于粗糙集确定指标权重

在粗糙集理论中，可以通过去掉该指标后对评价结果的影响度大小来反映各个指标对于整个指标的重要性，从而得到指标权重。

具体步骤如下：将指标重要度  $Sig_c(a_i)$  进行归一化处理，得出每个指标  $a_i$  的客观权重，即：
$$P_i = \frac{Sig_c(a_i)}{\sum_{i=1}^s Sig_c(a_i)}$$

除此之外，可以根据经验知识给出指标体系中每个指标的主观权重  $Q_i$ ，最后根据公式  $I_i = aQ_i + (1 - a)P_i$ ，（其中  $a$  根据决策者偏好选择， $0 \leq a \leq 1$  一般选 0.3）计算出综合权重。

### [3] 综合评价方法

根据上述方法求得的指标权重和指标值，可以采用线性加权法对各个指标进行加权计算，求得综合评价结果。

也可以通过将上述的指标矩阵值通过公式

$$\frac{\Delta min + \varepsilon \Delta max}{|x_o(k) - x_i(k)| + \varepsilon \Delta max}$$

计算评价对象与参考样本的关联度，得到关联系数矩阵，最后跟权重矩阵进行向量运算，得到最终评价结果。

### [4] 评价结果优化处理

在指标值与权重矩阵进行向量运算时，通常采用三种运算，其中两种采用模糊算子，以便突出主要因素或次要因素对评价结果的影响，还有一种便是权重平均型，均衡处理每一个因素，得出的三种综合评价结果，而后跟每种算法的权重进行新一轮的向量计算，便可得到唯一的评价结果

## 4.2 多维评价步骤：以模糊综合评价为例

### （1）建立因素集

因素集是由影响评价对象的各种元素为元素所组成的普通集合， $U = \{U_1, U_2, U_3, U \dots\} = \{\text{技术指标、经济指标、环境指标}\}$ ， $U_1 = \{\text{污染物去除率、与排放标准接近程度、} \dots \dots \}$

### （2）建立权重集

构造判断矩阵，按照从上至下确定各层次指标权重，建立权重集。为了反映

个因素的重要程度,对各因素  $U_i(i=1,2,3,\dots,m)$  应赋予相应的权数  $a_i(i=1,2,3,\dots,m)$ , 则由各权数所组成的集合:  $A=(a_1,a_2,a_3,\dots,a_m)$ 。该权重矩阵的确定可根据利益相关者分析的结果确定,也可由利益相关者在应用模型软件时自行确定。

序号	重要性等级	$C_i$ 赋值
1	$i, j$ 两元素同等重要	1
2	$i$ 元素比 $j$ 元素稍重要	3
3	$i$ 元素比 $j$ 元素明显重要	5
4	$i$ 元素比 $j$ 元素强烈重要	7
5	$i$ 元素比 $j$ 元素极端重要	9
6	$i$ 元素比 $j$ 元素稍不重要	1/3
7	$i$ 元素比 $j$ 元素明显不重要	1/5
8	$i$ 元素比 $j$ 元素强烈不重要	1/7
9	$i$ 元素比 $j$ 元素极端不重要	1/9

此数值是判定同一层次各个指标相对重要性大小,然后可以得出各指标重要性。具体见表:

$B_k$	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$C_1$	$C_{11}$	$C_{12}$	...	$C_{1n}$
$C_2$	$C_{21}$	$C_{22}$	...	$C_{2n}$
...	...	...	...	...
$C_n$	$C_{n1}$	$C_{n2}$	...	$C_{nn}$

此种判断矩阵需要满足一致性,若出现甲比乙极端重要,乙比丙极端重要,丙比甲极端重要的情况是违反常识。所以需要对构造的判断矩阵进行一致性检验。

• 一致性检验:在层次分析法中引入判断矩阵最大特征根以外的其余特征根的负平均值,作为度量判断矩阵偏离一致性的指标,即用  $CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$ ,当判断矩阵具有完全一致性是,  $CI=0$ , 反之亦然。从而我们有  $\lambda_1 = \lambda_{max} = n$ , 判断矩阵具有完全一致性。

• 衡量不同阶段矩阵是否具有满意一致性,还需引进判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 值。对于 1-9 阶判断矩阵, RI 值分别为

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

对于 1, 2 阶判断矩阵, RI 只是形式上的, 因为 1, 2 矩阵总是具有完全一致性。当阶数大于 2 时,  $CR=\frac{CI}{RI}<0.1$  即认为判断矩阵具有满意的一致性。

### (3) 模糊综合评价

		指标	A	B	C	D
资源	能源消耗 B1	一次能源消耗 C11				
		二次能源消耗				
		...				
	资源消耗 B2	土地使用量				
		...				
环境	直接影响 B3	污染物排放量				
		...				
	间接影响 B4	气候变化				
		...				
技术	污染去除率 B5	重点污染物去除率				
		...				
	技术特征 B6	复杂性				
		...				
	污染物去除效率 B7	关键污染物去除效率				
		...				
	对生产效率的影响 B8	能源效率变动比例				
社会	工作岗位 B9	工作岗位的平均收入				
经济	效益 B10	单位去污成本				
		...				
		...				

按照从下至上分级进行评价，如：B={b1, b2,b3,b4,b5} 每个因素子集下有 n 个因素，即 bi={bi1,bi2...bin}，从 bin 开始建立指标矩阵即通过建立隶属函数，将选取的评价对象的指标值转化成隶属度，从而将各个隶属度组成矩阵。

于是便可得到  $B_i = A_i \bullet R_i$

$$= (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3} \dots a_{in}) \bullet \begin{bmatrix} r_{i11} & \dots & r_{i1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{in1} & \dots & r_{inp} \end{bmatrix}$$

$B_1 = \max[\min(A_i, R_{ij})]$  即  $A_i$  中每一个数与  $R$  中第一列两两比较留最小值，然后各数值之间再进行二次比较，留最大值；

$B_2 = \min[\max(A_i, R_{ij})]$  即：与  $B_i$  求法类似，但先比较留最大值，再二次比较留最小值；

$$B_3 = A_i \bullet R_{ij}$$



三种结果按照{0.3,0.3,0.4}权重进行计算得到单一结果。此时评价目标对象便会有单一的综合评价价值。此后，重复上述方法继续进行计算，最终各目标对象会得出唯一的综合评价价值。

## 5 大气污染防治技术评价案例研究：PM2.5 防治技术

开展燃煤电厂一次 PM2.5 污染防治技术评价，选取 4 类一次 PM2.5 防治技术：静电除尘、袋式除尘、电袋复合除尘和湿式除尘，开展了生命周期评价指标核算，得到了初步的技术评价结果。

### 5.1 多维评价研究背景

我国燃煤电厂多已安装了脱硫、脱硝与除尘的污染控制设施，尤其是颗粒物控制装置，但迄今为止我国燃煤电厂仍没有专门针对 PM2.5 的减排措施，PM2.5 多在脱除颗粒物的过程中被协同去除。

多篇文献对燃煤电厂锅炉现有除尘设备的细颗粒物去除效率进行了测定。徐明厚等对四室五电场静电除尘器进行测定，发现该除尘器对 PM2.5 的脱除效率达到 90%左右；徐鸿等在对循环流化床电站的静电除尘器 PM2.5 脱除效率测定值为 91.4%；刘建忠等对粉煤炉尾部静电除尘器进行测定，发现其对 PM2.5 的脱除效率为 90.6%；而李贞在锅炉负荷对静电除尘颗粒物脱除效率的研究结果显示在锅炉满负荷时，静电除尘器对 PM2.5 的脱除效率为 90.6%，而在 80%负荷时静电除尘器对 PM2.5 的脱除效率为 91.7%。总的来看，除尘设备对 PM2.5 的脱除效率均有提升空间。

随着我国环保法规的日益严格，电力行业污染物排放要求不断提高，传统的低效高能耗的除尘技术正在逐渐被淘汰。根据中国电力企业联合会报道，截至 2015 年底，燃煤电厂安装电除尘的机组容量占全国煤电机组容量的 69.1%，袋式除尘器和电袋复合除尘器分别占 8.68%和 22.2%。除此之外，电力行业所采用的除尘技术已经达到我国除尘技术的最高水平，通过多种除尘设备联用，如低低温静电除尘配高频电源、静电除尘配高频电源+湿式静电除尘，已能够实现超低排放。2014 年以来，国内一批燃煤机组已通过技术升级改造或新建到达了烟尘排放浓度小于 5 mg/m<sup>3</sup> 的目标。低低温静电除尘和湿式电除尘等一批具有应用前景

的新除尘技术及组合技术得到广泛推广。

表 5 典型细颗粒物防治技术对比分析

分类		机械除尘			湿式除尘		静电除尘		过滤除尘	
类型	重力沉降	惯性除尘	旋风除尘	喷雾除尘	水膜除尘	文丘里除尘	干式静电除尘	湿式静电除尘	袋式除尘	电袋复合除尘
捕集机制	重力	惯性力	离心力	惯性碰撞、凝聚等拦截机制			库仑力	库仑力与惯性碰撞	惯性碰撞、扩散等拦截机制	
除尘效率 (%)	40-60	50-70	70-92	75-95	85-98	90-98	85-99	90-99	85-99	85-99
主要特点	结构简单、除尘效率低		结构简单除尘效率高	阻力小、对大颗粒除尘效率较高、耗水量大		阻力高、除尘效率高	除尘效率高、设备阻力小、处理烟气量大		除尘效率高、对细颗粒物的捕集效率高	
应用领域	广泛应用小型工业锅炉，多为预除尘			适用高温、易燃和有害气体场所，如冶金、化工等行业			广泛应用于电力、钢铁、水泥等多个行业		广泛应用于水泥、冶金、陶瓷等多个行业	

以 PM2.5 为目标污染物，开展燃煤锅炉常用除尘技术综合评价，可为改进本研究提出的多维评价方法提供验证案例，也将为燃煤锅炉细颗粒物防治技术的推广提供决策依据与科学数据。

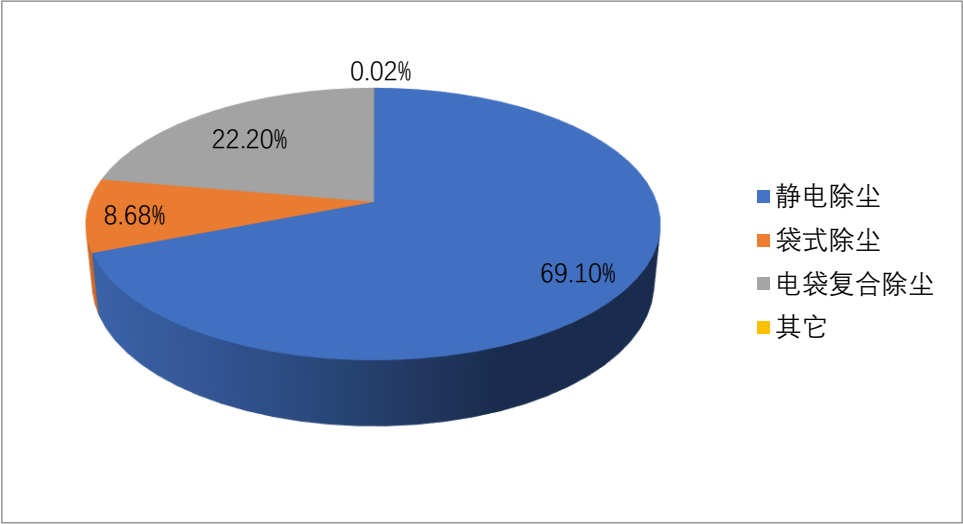


图 7 典型细颗粒物防治技术市场份额

5.2 细颗粒物防治技术多维评价指标体系

根据多维评价方法中提供的指标体系，结合细颗粒物防治技术现状，选择下图所示指标群。

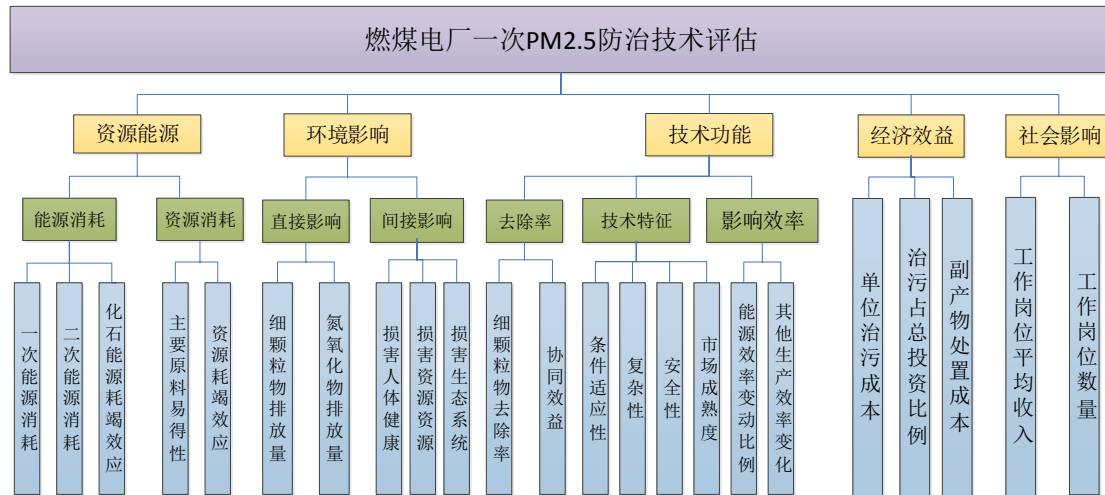


图 8 燃煤电厂一次 pm2.5 防治技术多维评价指标

### 5.3 一级指标及二级指标权重确定

权重的确定步骤如下:

- (1)确定评价目标和评价指标集  $U$ ;
- (2)通过专家权重问卷调查表，确定专家参考权重;
- (3)参考专家权重问卷调查结果，构造判断矩阵  $P$ ,  $u_i$  表示评价指标,  $u_i \in U (i=1, 2, \dots, n)$ ,  $P_{ij}$  表示  $p_i$  对  $p_j$  的重要性数值( $j=1, 2, \dots, n$ ) 取值可按照 1-9 标度
- (4)利用 Matlab 软件计算判断矩阵  $P$  的最大特征根 $\lambda_{\max}$  及其对应特征向量，然后对特征向量进行归一化处理得到单位向量  $A$ ,  $A$  的各分量即为各对应指标的权重值。
- (5)当判断矩阵的阶数  $n$  较大时，构造出的判断矩阵往往很难满足一致性的要求，甚至可能存在一些矛盾。为验证权重向量的合理性，判断矩阵进行必须经过一致性检验。一致性指标验证公式:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

当  $CI=0$  时，判断矩阵完全符合一致性要求; $CI$  越大，判断矩阵越不符合一致性要求。由于随着判断矩阵阶数  $n$  的增加，一致性检验公式的判断误差也随之变大，因此必须采用随机一致性比值  $CR=CI/RI$  来确定判断矩阵的一致性，其中， $RI$  表示平均随机一致性指标，可当  $CR<0.1$  时，说明判断矩阵一致性良好，权重分配合理; 当  $CR>0.1$  时，说明判断矩阵不具备一致性，则必须对判断矩阵进行调整，直到合理为止。

表 6 一级指标权重问卷调查结果及单层权重

污染防控技术	资源能源	环境影响	技术功能	经济效益	社会影响
资源能源	1	1	1/5	1/4	5
环境影响	1	1	1/5	1/4	5
技术功能	5	5	1	3	7
经济效益	4	4	1/3	1	6
社会影响	1/5	1/5	1/7	1/6	1
单层权重	0.1043	0.1043	0.4818	0.2753	0.0342

注： $l_{\max}=5.3512$ ； $CI=0.0878$ ； $RI=1.12$ ； $CR=0.0784$

表 7 资源能源指标权重问卷调查结果及单层权重

资源能源	能源消耗	资源消耗
能源消耗	1	2
资源消耗	1/2	1
单层权重	0.6667	0.3333

注： $l_{\max}=2$ ； $CI=0$ ； $RI=1E-6$ ； $CR=0$

表 8 能源消耗指标权重问卷调查结果及单层权重

能源消耗	二次能源消耗	一次能源消耗	化石能源耗竭效应
二次能源消耗	1	1/2	1
一次能源消耗	2	1	2
化石能源耗竭效应	1	1/2	1
单层权重	0.2500	0.5000	0.2500

注： $l_{\max}=3$ ； $CI=0$ ； $RI=0.58$ ； $CR=0$

表 9 资源消耗指标权重问卷调查结果及单层权重

资源消耗	主要原料易得性	资源耗竭效应
主要原料易得性	1	1
资源耗竭效应	1	1
单层权重	0.5000	0.5000

注： $l_{\max}=2$ ； $CI=0$ ； $RI=1E-6$ ； $CR=0$

表 10 环境影响指标权重问卷调查结果及单层权重

环境影响	直接影响	间接影响
直接影响	1	2
间接影响	1/2	1
单层权重	0.6667	0.3333

注： $l_{\max}=2$ ； $CI=0$ ； $RI=1E-6$ ； $CR=0$

表 11 直接环境影响指标权重问卷调查结果及单层权重

直接影响	其他污染物排放量	重点污染物排放量
其他污染物排放量	1	1/3

重点污染物排放量	3	1
单层权重	0.2500	0.7500

注：l<sub>max</sub>=2； CI=0； RI=1E-6； CR=0

表 12 间接环境影响指标权重问卷调查结果及单层权重

间接影响	损害人体健康	损害生态系统	损害可利用资源
损害人体健康	1	1/2	3
损害生态系统	2	1	6
损害可利用资源	1/3	1/6	1
单层权重	0.3000	0.6000	0.1000

注：l<sub>max</sub>=3； CI=0； RI=0.58； CR=0

表 13 技术功能指标权重问卷调查结果及单层权重

技术功能	污染物去除率	技术特征	对生产效率影响
污染物去除率	1	1	2
技术特征	1	1	2
对生产效率影响	1/2	1/2	1
单层权重	0.4000	0.4000	0.2000

注：l<sub>max</sub>=3； CI=0； RI=0.58； CR=0

表 14 污染物去除率指标权重问卷调查结果及单层权重

污染物去除率	重点污染物去除率	其他污染物去除率
重点污染物去除率	1	3
其他污染物去除率	1	1
单层权重	0.75	0.25

注：l<sub>max</sub>=2； CI=0； RI=1E-6； CR=0

表 15 技术特征指标权重问卷调查结果及单层权重

技术特征	条件适应性	复杂性	安全性	市场占有率
条件适应性	1	3	2	1
复杂性	1/3	1	2	1/3
安全性	1/2	1/2	1	1/2
市场占有率	1	3	2	1
单层权重	0.3548	0.1556	0.1348	0.3548

注：l<sub>max</sub>=4.1533； CI=0.0511； RI=0.9； CR=0.0568

表 16 生产效率影响指标权重问卷调查结果及单层权重

对生产效率影响	能源效率变动比例	其他生产效率变化
能源效率变动比例	1	1
其他生产效率变化	1	1
单层权重	0.5000	0.5000

注：l<sub>max</sub>=2； CI=0； RI=1E-6； CR=0

表 17 经济效益指标权重问卷调查结果及单层权重

经济效益	单位治污成本	副产物处理处置成本	占地面积
单位治污成本	1	1	2
副产物处理处置成本	1	1	2
占地面积	1/2	1/2	1
单层权重	0.4000	0.4000	0.2000

注：l<sub>max</sub>=3； CI=0； RI=0.58； CR=0

表 18 社会影响指标权重问卷调查结果及单层权重

社会影响	工作岗位平均收入	工作岗位数量
工作岗位平均收入	1	1
工作岗位数量	1	1
单层权重	0.5000	0.5000

注：l<sub>max</sub>=2； CI=0； RI=1E-6； CR=0

表 19 指标权重问卷调查结果及单层权重

大气污染控制 技术评价指标	资源能源 (0.1)	能源消耗(0.67)	二次能源消耗 (0.25)
			一次能源消耗(0.5)
			化 石 能 源 耗 竭 效 应 (0.25)
		资源消耗 (0.33)	主要原料易得性(0.5)
			资源耗竭效应(0.5)
	环境影响 (0.1)	直接影响 (0.67)	其 他 污 染 物 排 放 量 (0.25)
			重 点 污 染 物 排 放 量 (0.75)
		间接影响 (0.33)	损害人体健康
			损害生态系统
			损害可利用资源
	技术功能 (0.5)	污染物去除率 (0.4)	重 点 污 染 物 去 除 率 (0.75)
			其 他 污 染 物 去 除 率 (0.25)
		技术特征 (0.4)	条件适应性(0.35)
			复杂性(0.16
			安全性(0.14)
			成 熟 度 - 市 场 占 有 率 (0.35)
对生产效率影响 (0.2)		能源效率变动比例(0.5)	
		其他生产效率变化(0.5)	
经济效益		单位治污成本(0.4)	

	(0.27)	占地面积 (0.2)
		副产物处置成本 (0.4)
	社会影响 (0.03)	工作岗位平均收入 (0.5)
		工作岗位数量 (0.5)

## 5.4 评价指标量化

由于指标间评估等级和量纲存在差异，无法直接进行综合比较，因此，必须对评价指标进行量化。评估指标量化常用方法主要有归一化法和等级赋值法，在评估过程中可将评估指标分为定量指标和定性指标，分别用归一化法和等级赋值法进行量化。本论文运用模糊统计分析法，根据最大隶属度原则，构建隶属度函数，对各指标进行统一量化，将各原始值变换为[0, 1]范围内的某一数值，数值大小直接反映被评估指标的好坏。

对于定性指标，常常通过文献调研、专家评分的方式对不同控制技术的某项指标进行赋值，赋值结果通常为[0,1]之间的某一个数值，赋值越大表明该项指标的技术好。

表 20 等级和赋值表

等级	低/无/好/易	较低、轻、较 好、易	中	较高、轻差、 较大	高、差、大、 难
分值 x	1	2	3	4	5

用隶属函数表达式为：

$$U = \frac{x}{5}$$

对于定量指标，采取归一化进行量化，可利用公式：

$$u_i = \begin{cases} 0 & x_i < \eta_0 \\ \frac{x_i - \eta_0}{100 - \eta_0} & \eta_0 < x_i < 100 \end{cases}$$

其中 $\eta$ 为边界条件

### (1) LCA 部分简要结果

对目标防控技术的建设和运行阶段进行 LCA 评价。由于研究目标均为末端处置型技术评价，所以功能单位（FU）运行一年（年运行时间 7000 小时）进行设置。

表 21 典型细颗粒物防治技术主要特征

除尘器	静电除尘	袋式除尘	电袋复合除尘	湿式除尘	四电厂静电除尘器+低低温静电除尘器
年运行时间 h	7000	7000	7000	7000	7000
系统运行周期/年	30	30	30	30	30
烟气温度℃	93		130	50	90
入口烟气量 m <sup>3</sup> /h	744390.5	744240.5	470000	1550000	1350000
规模	300MW×2	300MW×2	300MW×2	600MW	600MW×2
滤袋个/年		1680	1836		
滤袋材质		PPS	PPS		
滤袋寿命		10	13		
滤笼个/年		840			
滤笼寿命		10			
前浓度 mg/m <sup>3</sup>	21030	21030	1551.6096	5.53	
后浓度 mg/m <sup>3</sup>	30	30	1.9508	0.09	
除尘效率%	99.86	99.86	99.8	98.73	99.7
耗水量 t/d				10	
运行年功耗 MJ	1.55×10 <sup>7</sup>	1.2×10 <sup>7</sup>	2.8×10 <sup>7</sup>	1.2×10 <sup>7</sup>	
平时维护费用万/年	4	2.5	6.5		

其中，袋式除尘器和电除尘器 LCA 初步结果比较见下表：

表 22 袋式和电除尘器生命周期评价结果对比

Impact category	Unit	bag	Electric Precipitator
Carcinogens	DALY	2.26129E-06	4.33311E-06
Resp. organics	DALY	1.84749E-09	3.34626E-09
Resp. inorganics	DALY	1.11466E-05	1.93904E-05
Climate change	DALY	2.60668E-06	4.48253E-06
Radiation	DALY	4.40739E-09	7.67333E-09
Ozone layer	DALY	7.55752E-11	1.40397E-10
Ecotoxicity	PAF*m2yr	1.085067595	2.356755565



Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	0.218107218	0.377710193
Land use	PDF*m2yr	0.10674749	0.181050067
Minerals	MJ surplus	0.017179436	0.162747986
Fossil fuels	MJ surplus	2.268605065	3.321865575

表 23 部分指标初步量化结果

编号	指标名称	A	B	C	D
1	PM2.5 排放浓度	高 (0)	较高 (0.2)	较高 (0.2)	中 (0.4)
2	协同效益	较差(0.2)	较差(0.2)	较差(0.2)	中(0.4)
3	PM2.5 去除率	99%(0.8)	99%(0.8)	98%(0.6)	98%(0.6)
4	条件适应性	较好(0.6)	中(0.4)	中(0.4)	中(0.4)
5	复杂性	较易(0.6)	较易(0.6)	中(0.4)	中(0.4)
6	安全性	较好(0.6)	好(0.8)	较好(0.6)	中(0.4)
7	市场成熟度	好(0.8)	好(0.8)	好(0.8)	较好(0.6)
8	单位除 PM2.5 成本	低(0.8)	较低(0.6)	较低(0.6)	中(0.4)
9	占地面积	较大(0.2)	小(0.8)	较小(0.6)	大(0)
10	副产物处置成本	较低 (0.8)	低 (0.6)	中 (0.4)	中 (0.4)
11	损害人体健康(LCA)	较小 (0.2)	中 (0.6)	较小 (0.2)	
12	损害自然资源(LCA)	较小 (0.2)	较小 (0.2)	中 (0.6)	
13	损害生态系统(LCA)	较小 (0.2)	中 (0.6)	中 (0.6)	

## 5.5 部分指标赋权计算

以二级指标“技术性能”为例

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 0.35 & 0.16 & 0.14 & 0.35 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 0.8 & 0.6 & 0.4 \\ 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.6 \end{bmatrix} = [0.67 \ 0.628 \ 0.568 \ 0.477] \quad \text{加权平均计算} \\
 & = [0.267 \ 0.267 \ 0.267 \ 0.2] \quad \text{主因素突出型} \\
 & = [0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25] \quad \text{主因素决定型} \\
 & = [0.43 \ 0.41 \ 0.39 \ 0.325] \quad \text{综合结果}
 \end{aligned}$$

即 4 种目标技术的“技术性能”分别为[0.43 0.41 0.39 0.325]

以二级指标“间接环境影响”为例，目标技术的“间接环境影响”分别为 [0.18 0.512 0.48]。以经济效益”为例，为[0.49 0.448 0.4 0.3]。以“直接影响”为例 [0.67 0.67 0.52 0.53]

结果如图：

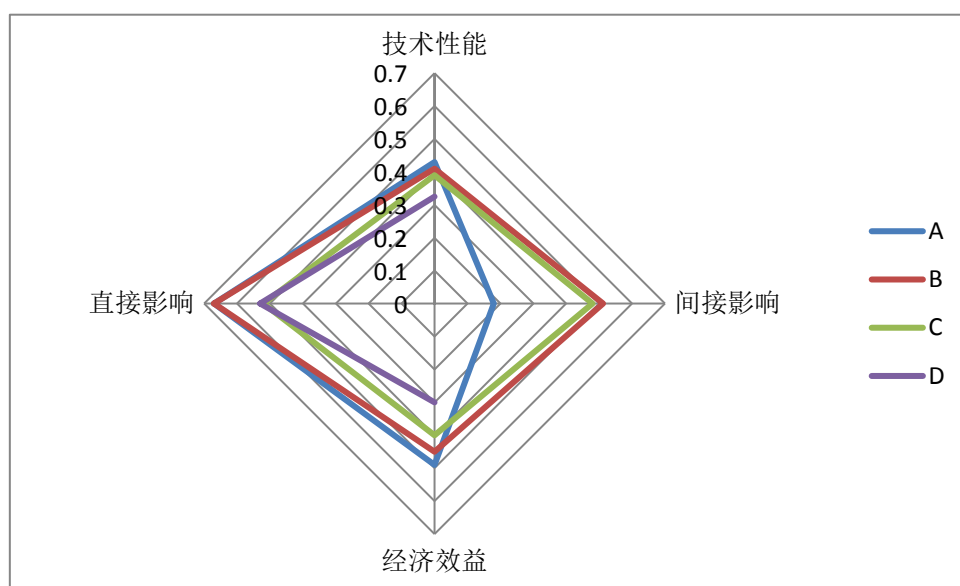


图 9 4 类技术的综合评价结果对比

### 三、 下一步计划

- (1) 2018 年 10 月：完成大气污染防治技术多维评价模型搭建、基础数据库设计与界面初步搭建；
- (2) 2018 年 10 月-11 月中旬：完成一个大气污染防治技术多维评价案例；
- (3) 2018 年 11 月中下旬召开大气污染防治技术多维评价模型研讨会。
- (4) 按照确定的指标体系与综合评估方法，基于符合实际的数据获取和量化方案，整合生命周期清单数据库等现有数据源与具体技术的实测、调研数据源，编制多维评价模型，形成一个实操性强的计算机评价与决策工具。