

吕庆志,曾小岚,朱天乐,等.大气污染控制技术评价方法研究[J].环境科学与技术,2017,40(7):188-192. Lyu Qingzhi, Zeng Xiaolan, Zhu Tianle, et al. Method for evaluation of air pollution control technologies[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(7): 188-192.

大气污染控制技术评价方法研究

吕庆志, 曾小岚, 朱天乐*, 孙轶斐, 李兴华, 孙也

(北京航空航天大学空间与环境学院, 北京 100191)

摘要 基于结合专家意见的层次分析、模糊综合评价等方法,构建评价指标体系,建立了大气污染控制技术的综合性能评价方法。基于全生命周期成本和现值成本等方法,建立了大气污染控制技术的经济性能定量评价方法。2种方法的结合可支撑大气污染控制可行技术的筛选,以及针对具体大气污染控制工程的最终技术选择决策。

关键词 大气污染控制; 技术评价; 综合性能; 经济性能; 定量评价

中图分类号 X51 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1003-6504.2017.07.031 **文章编号**:1003-6504(2017)07-0188-05

Method for Evaluation of Air Pollution Control Technologies

LYU Qingzhi, ZENG Xiaolan, ZHU Tianle*, SUN Yifei, LI Xinghua, SUN Ye

(School of Space and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract According to the hierarchy analysis and fuzzy comprehensive evaluation methods, combined with the reference of expert opinions, this paper elaborated on the building of an evaluation index system and the comprehensive performance evaluation method of air pollution control technologies. Furthermore, on the basis of the life cycle cost theory and the present-value cost method, the economic performance quantitative evaluation method of air pollution control technologies was established. Finally, by using the above two methods together it was possible to facilitate the screening of practicable air pollution control technologies, which were suitable for a specific air pollution control project.

Key words air pollution control; technologies evaluation; comprehensive performance; economic performance; quantitative evaluation

大气污染物种类多,来源复杂,浓度和气象变化范围大,所涉及的大气污染控制技术也多种多样^[1-2]。因此,科学合理地评价大气污染控制技术的性能,对于高效、经济地进行大气污染防治至关重要。

发达国家和地区围绕大气污染控制技术评价方法已进行全面、系统的研究,形成了包括美国EPA的最佳可行控制技术(BACT)^[3]、环境技术验证计划(ETV)^[4]、欧盟的最佳可行技术(BAT)^[5]等比较完整的方法体系。但是这些评价方法依托的基础信息和数据较复杂,在我国推广应用较困难。近年来我国科研人员也针对大气污染控制技术评价方法体系进行了相关研究^[6-11]。但研究广度和深度仍然不能完全满足评价大气污染控制技术的需求。

本文通过基于综合性能评价方法与经济性能定量评价方法相结合的思路,建立了一套科学、全面、可操作性强的大气污染技术评价方法体系,可用于同类技术的选择决策,筛选出符合控制目的要求、综合性能好、经济成本少的最佳可行技术,继而支撑大气污染控制的目标实现。

1 评价方法框架及流程

能够参与评价的技术首先应当符合评价准入条件,只有同时满足下列条件的技术,才适合进行大气污染控制技术评价。不满足下述任意一项条件的技术,均不宜进入评价程序。

(i) 符合国家产业和环境保护政策;

《环境科学与技术》编辑部:(网址) <http://tjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkyjs@vip.126.com

收稿日期 2016-11-21 修回 2016-12-27

基金项目 公益性行业科研专项(201409019) 美国能源基金会(G-1409-22021)

作者简介 吕庆志(1990-),男,硕士,主要从事大气污染控制理论与技术研究,(电子信箱) lvqingzhi526@163.com; * 通讯作者,男,教授,从事大气污染控制理论与技术方面的研究,(电子信箱) zhutl@buaa.edu.cn。

- (2) 知识产权清晰,不涉及产权纠纷。
- (3) 工艺原理和技术路线科学合理。
- (4) 不会带来严重且不可控的二次污染。
- (5) 具有推广应用潜力。

本研究建立的大气污染控制技术评价方法主要包括综合性能评价和经济性能定量评价 2 个评价部分。在综合性能评价阶段,首先借助专家意见,建立科学合理的指标体系,并确定各指标的相对重要性。然后,利用层次分析方法,计算得到各指标的权重系统;最后,借助专家意见,确定各指标的得分,再结合模糊综合性能评价手段,即可确定被评价技术的综合性能排序,实现技术的初步筛选。在经济性能定量评价阶段,先于全生命周期成本理论和改良现值成本法,建立成本估算模型,再利用成本信息数据,即要计算确定被评价技术现值总成本,支撑技术的最终选择决策。评价方法流程如图 1 所示。

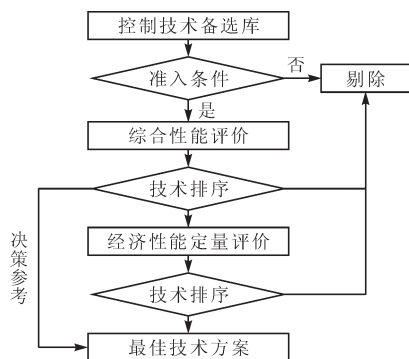


图1 大气污染控制技术评价流程图

Fig.1 Flow chart of air pollution control technologies evaluation

2 综合性能评价方法

2.1 评价指标体系构建

本研究中,遵循系统性、科学性、可比性等原则,综合使用指标初选常用的分析法、综合法、交叉法和指标属性分组法,进行分析和比较,建立指标初选清单。在此基础上,通过征询专家意见,对指标进行了调整和修正,得到如表 1 所示的评价指标体系。该指标体系包含技术性能、环境性能和经济性能 3 个一级指标,再根据大气污染控制技术的自身属性和应用情景特征,设立若干个二级指标。

2.2 评价指标权重的确定

科学合理地确定指标权重对于评价结论和技术决策意义重大。本研究采用结合专家评价的改进型层次分析法确定指标权重。根据大气污染控制技术评价的要求,结合实践调研和专家意见,对层次分析法进行了改进,减少了标度(表 2),使该方法更加简洁、实用^[12-13]。

实际应用时,先借助调查问卷的方式,由具有丰

表 1 大气污染控制技术评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of air pollution control technologies

一级指标	二级指标	指标说明
技术性能	处理效率	去除目标污染物的效率
	技术可靠性	技术原理和工艺路线科学性、技术成熟度和连续运行稳定性
	技术适应性	对于工况波动的适应性,以及与主体生产工艺、外界环境(气候、场地)等条件的相容性
环境性能	运行维护要求	运行维护的技术难度和维护工作量
	二次污染程度	二次污染及其可控性
	协同处理能力	协同净化其它污染物的能力
经济性能	投资费用	工程建设(含占地)和设备等费用
	运行费用	运行原辅料(扣减副产品收益)、水电气、人工和设备折旧等费用

表 2 判断矩阵标度及含义

Table 2 Calibration and meaning of judgment matrix

标度	含义
1	2 个指标相比,具有同样重要性
3	2 个指标相比,一个指标比另一个指标稍重要
5	2 个指标相比,一个指标比另一个指标重要
7	两个指标相比,一个指标比另一个指标重要的多
倒数	如果指标 i 与指标 j 的重要性之比为 a_{ij} ,那么指标 j 与指标 i 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}, a_{ii}=1$ 。

富工程实践、科研和管理工作经验的专家或技术型领导确定指标的相对重要性。再借助层次分析法,计算得到指标权重。

2.3 综合性能评价

本研究采用模糊集理论进行评价,确定技术的综合得分,该方法更适合东方人的思维习惯和描述方法。具体来说,先根据指标体系,构建因素集和隶属度专家评分表(表 3),再由专家确定评分等级,最后利用模糊评价方法进行定量化处理,得到一个确定的标量值,以便于方案之间比较^[14]。

2.3.1 确定评价因素集

根据前文所述的评价指标体系,确定因素集如下:

$$B=\{B_1, B_2, B_3\}=\{\text{技术性能, 环境性能, 经济性能}\}$$

$$B_1=\{C_1, C_2, C_3, C_4\}=\{\text{处理效率, 技术可靠性, 技术适应性, 运行维护要求}\}$$

$$B_2=\{C_5, C_6\}=\{\text{二次污染程度, 协同处理能力}\}$$

$$B_3=\{C_7, C_8\}=\{\text{投资费用, 运行费用}\}$$

2.3.2 确定隶属度

结合环保部的环发[2009]58号《国家环境保护技术评估与示范管理办法》,采用专家评分的方式确定综合性能评价指标的隶属度(表 3),评价分优、良、中、及格 4 个档次,各档次对应的分值价于 90~100、80~89、70~79 和 60~69 之间。必须说明的是,技术的综合性能评价只针对符合准入条件的技术进行,因此,最低等级定为及格。

表 3 综合性能评价指标的隶属度专家评分表
Table 3 Expert assessment table of comprehensive performance evaluation index membership degree

评价指标	权重	评分等级			
		优/ (90~100)	良/ (80~89)	中/ (70~79)	及格/ (60~69)
技术	处理效率	W_1			
	技术可靠性	W_2			
	技术适应性	W_3			
	运行维护要求	W_4			
环境	二次污染程度	W_5			
	协同处理能力	W_6			
经济	投资费用	W_7			
	运行费用	W_8			

当有 n 种技术参与评价时, 假定专家权重相同, 根据专家评分表, 利用算术加权法确定每项各项指标隶属度, 形成评价隶属度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2n} \\ r_{31}, r_{32}, \dots, r_{3n} \\ r_{41}, r_{42}, \dots, r_{4n} \\ r_{51}, r_{52}, \dots, r_{5n} \\ r_{61}, r_{62}, \dots, r_{6n} \\ r_{71}, r_{72}, \dots, r_{7n} \\ r_{81}, r_{82}, \dots, r_{8n} \end{bmatrix}$$

2.3.3 综合性能评价结果分析

由于指标权重已经确定, 构造权重向量为 $W = (W_1, W_2, \dots, W_8)$, 则可得出 n 种技术最终的评价结果: $B = W \cdot R = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$

其中 b 值越大, 即该技术的综合性能评价结果越好。此时, 可根据实际情况设定 b 值大于等于一定值时可参与下一步评价, 即为技术决策提供参考依据。

3 经济性能定量评价方法

大气污染控制技术的产出效益往往难以用货币价值来计量, 但是考虑到各技术方案的目标相同, 因此对于多个技术方案的比较决策, 可以假设不同技术方案的收益相同 (即控制目标污染物的要求相同), 继而通过比较各技术方案的成本, 最终选择技术方案。本研究采用基于全生命周期成本理论 (LCC) 的现值成本法进行大气污染控制技术经济性能定量评价。

3.1 定量评价的成本分析边界

大气污染控制技术定量评价应建立在相同的边界条件之上。大气污染控制工程主要包括气、液和固 3 种要素, 因此, 大气污染控制技术的定量评价应以控制系统涉及的气、液和固 3 种物质要素的入口和出口作为边界。同时, 要求出口边界的 3 种物质要素皆满足环境保护要求。

大气污染控制技术成本估算的周期是指从技术方案的项目建设到最终淘汰所经历的全部时间, 并采用经济寿命进行估算。当各技术方案的生命周期不同时, 根据客观情况做出合理假设, 采用生命周期最小公倍数法进行处理, 即取各技术方案经济寿命的最小公倍数作为计算年限。

3.2 定量评价的成本估算模型

本研究采用的全生命周期成本理论的成本一般包括项目决策、设计、建设、运行、维修和报废等全过程所发生的费用^[15]。由于本研究的经济定量评价目的是在可用技术范围内选出最经济的技术。为使方法简单方便, 项目决策和设计阶段的费用可不进行估算。也就是说, 全生命周期成本估算主要由投资成本、运行成本 (扣减副产品收益)、检修维护成本和退役处置成本 4 部分构成, 具体构成见表 4。

表 4 全生命周期成本构成
Table 4 Composition of life cycle cost

投资成本	设备购置费用
	安装工程费用
	建筑工程费用
	其他费用
运行成本	能耗费用
	物耗费用
	人工管理费用
	副产品收益
维护检修成本	维护费用
	故障费用
退役处置成本	退役处置费用
	退役残值

基于现值成本法^[16], 综合考虑成本估算范围和折现, 并假设技术的经济寿命为 n 年, 则成本估算模型为:

$$LCC = C_I + C_O + C_M + C_D \quad (1)$$

$$LCC_P = C_I + \sum_{t=1}^n (C_{Ot} + C_{Mt})(1+i_0)^{-t} + C_D(1+i_0)^{-n} \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中, LCC 为总成本; C_I 为投资成本; C_O 为运行成本; C_M 为检修维护成本; C_D 为退役处置成本, LCC_P 为总成本现值; C_{Ot} 为第 t 年运行成本; C_{Mt} 为第 t 年维护检修成本; n 为生命周期年限, 即经济寿命; i_0 为折现率 (基准收益率)。

3.3 定量评价的成本估算方法

3.3.1 投资成本估算方法

(1) 设备购置费用。如果是购买设备, 则可以根据市场价格估算其费用。如果是自制设备, 则需估算研究、开发、设计、试制时所需的材料费、劳务工时费、外购件费用等。计算公式为:

$$\text{设备购置费用} = \sum (\text{单位设备数量} \times \text{设备原价}) \times (1 + \text{运杂费率}) \quad (3)$$

设备购置费用 = $\sum$ (单位设备数量 $\times$ 设备估算价格) (4)

(2) 安装工程费用。安装工程费用包含设备及辅助设施的装配费用、安装过程的材料费用等,为使估算简便,安装费率进行估算,安装费率按相关行业或部门的概算指标或定额所规定费率取用,计算公式为式(5)。

安装工程费用 = 设备原价 $\times$ 设备安装费率 (5)

(3) 建筑工程费用。本研究中建筑工程费用根据建筑工程量和技术使用所在地区的建筑物、构筑物工程概算综合指标估算,计算公式为式(6)。

建筑工程费用 = 建筑工程量 $\times$ 概算指标 (6)

(4) 其他费用。其他费用主要包括土地征购费、建设单位管理费等等。当不同技术方案涉及的此部分费用差别不大时或费用本身总额较小时,可以忽略不计。

3.3.2 运行成本估算方法

(1) 能耗费用。根据大气污染控制系统的特点,能耗费用主要包括泵、风机及其他机电设备的电费,以及特定技术工艺中涉及的燃料费用,计算公式为式(7)。

$$C_E = \sum_{i=1}^m E_i P_i \quad (7)$$

式(7)中, C_E 为能耗费用(按年计算); E_i 为第 i 种能源的年消耗量; P_i 为第 i 种能源的单价。

(2) 物耗费用。物耗费用包括消耗性原材料、辅助材料和药剂等。如吸附工艺中可能用到的活性炭、脱硫工艺中可能用到的石灰石等。计算公式为式(8)。

$$C_G = \sum_{i=1}^m G_i P_i \quad (8)$$

式(8)中, C_G 为物耗费用(按年计算); G_i 为第 i 种材料的年消耗量; P_i 为第 i 种材料的估算单价(考虑运杂、回收等因素后单价)。

(3) 人工管理费用。人工管理费用是指技术方案在运行过程中人员的工资和福利费用,技术不同需要的管理人员数目和岗位技能不同。计算公式为式(9)。

人工管理费用 = $\sum$ (人员数量 $\times$ 岗位技能工资及福利费) (9)

(4) 副产品收益。副产品收益是指技术方案在运行过程中可能产生的一些副产品的价值,在进行运行成本的估算时应当扣减副产品附加值,如石灰石/石膏法脱硫产生的副产品石膏、氧化法处理有机废气过程可能产生的可再利用余热等。

3.3.3 维护检修成本估算方法

(1) 维护费用。维护费用是指技术方案在经济寿命期内设备的预防性维护和日常巡检等周期性维护和故障检修维护等非周期性维护所产生的费用^[17]。其中非周期性的故障检修维护主要在故障费用计算,因此,为避免重复计算,维护费用只考虑周期性维护费用,一般按设备造价(包括设备购置费用、安装工程费用)百分比,即维护费率计算,设备的当年维护费率表现为初期低,后期高,但应在一定的维护费率范围内。计算公式为式(10)。

年维护费用 = 设备造价 $\times$ 当年维护费率 (10)

(2) 故障费用。故障费用指技术方案在经济寿命期内的因故障需要检修时所发生的设备费、材料费、人工费等构成的故障检修费用和因故障导致生产暂停所造成的经济损失的故障损失费用。一般按设备造价(包括设备购置费用、安装工程费用)百分比,即故障费率计算,设备的当年故障费率每年相对固定。计算公式为式(11)。

年故障费用 = 设备造价 $\times$ 当年故障费率 (11)

3.3.4 退役处置成本估算方法

(1) 退役处置费用。退役处置费用是指设备退役时预计的清理处置费用,一般按设备造价百分比计算。

(2) 退役残值。退役残值是指预计设备退役时可以回收的残余价值,一般按设备造价百分比计算。

退役残值扣除处置费用为设备净残值,净残值可按照设备造价的 3%~5% 计算^[18]。

4 结论

(1) 以技术性能、经济性能和环境性能为一级指标,构建了具有 8 个二级指标的大气污染控制技术综合性能评价指标体系。其中,技术性能包括去除效率、技术可靠性、技术适应性和运行维护要求 4 个二级指标;环境性能包括二次污染程度和协同处理能力 2 个二级指标;经济性能包括投资费用和运行费用 2 个二级指标。通过专家评价以及层次分析方法可确定各级指标权重,并建立了采用专家评价确定隶属度,利用模糊评价方法进行定量化处理的综合性能评价方法,可用于支撑技术方案的初选。

(2) 基于全生命周期成本理论和现值成本法构建了包含投资成本、运行成本(扣减副产品收益)、维护检修成本和退役处置成本等因素的大气污染控制技术成本估算模型,明确了各项成本费用的内容,建立了估算方法。实现了大气污染控制系统经济性能的量评价,可用于支撑技术方案的终选。

[参考文献]

- [1] 林翎, 黄进, 高翔, 等. 高效能大气污染控制环保设备评价技术标准体系初探[J]. 中国标准化, 2014(5): 85-89.
Lin Ling, Huang Jin, Gao Xiang, et al. Study on the evaluation technical standards system of high-efficient environmental protection equipment for air pollution control [J]. China Standardization, 2014(5): 85-89.
- [2] 王洪昌, 朱金伟, 束韞, 等. 我国大气污染物可持续深度控制技术需求方向分析[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(3): 180-185.
Wang Hongchang, Zhu Jinwei, Shu Wen, et al. Analysis of requirement of sustainable and advanced air pollution control technologies in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(3): 180-185.
- [3] Stensvaag J M. Preventing significant deterioration under the Clean Air Act: the BACT requirement and BACT definition[J]. Social Science Electronic Publishing, 2011, 41 (10):10902-10920
- [4] Plan V T. Environmental technology verification program [J]. Environmental Protection, 2000, 7(4):201-206.
- [5] Zeri A. Deconstructing the industrial emissions directive's (2010/75/EU) regulatory standards: a tale of cautious optimism[J]. Ucljij Deconstructing the Industrial Emissions Directives, 2013, 10.14324/111.2052-1871.007.
- [6] 王小明, 薛建明, 颜俭, 等. 现有燃煤电厂烟气脱硫改造方案的经济评价—燃煤电厂烟气脱硫技术及经验专述之三 [J]. 电力科技与环保, 2000, 16(3):38-42, 61.
Wang Xiaoming, Xue Jianming, Yan Jian, et al. Economic evaluation of retrofitting a FGD system on the existing coal-fired plants[J]. Electric Power Environmental Protection, 2000, 16(3):38-42, 61.
- [7] 李友平, 尹华强, 刘勇军, 等. 烟气脱硫技术评价方法现状及展望[C]// 第十届全国电除尘、第二届脱硫学术会议论文集, 2003:459-464.
Li Youping, Yin Huaqiang, Liu Yongjun, et al. Present Situation and Prospect of Evaluation Methods for FGD Technology[C]// Proceedings of Tenth National Electrostatic Precipitation, the Second Session of Desulfurization Conference, 2003:459-464.
- [8] 王书肖, 郝吉明, 陆永琪, 等. 火电厂烟气脱硫技术的模糊综合评价[J]. 中国电力, 2001, 34(12):58-62.
Wang Shuxiao, Hao Jiming, Lu Yongqi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation of flue gas desulfurization technologies for thermal power plant[J]. Electric Power, 2001, 34 (12):58-62.
- [9] 毛瑞勇, 李娟, 李林方. 燃煤电厂烟气脱硫技术的灰色综合评价[J]. 中国环保产业, 2006(5):40-42.
Mao Ruiyong, Li Juan, Li Linfang. Grey comprehensive evaluation on FGD technique in coal-fired power plants[J]. China Environmental Protection Industry, 2006(5):40-42.
- [10] 高志永. 环境污染防治技术评估方法及技术经济费效分析研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
Gao Zhiyong. Study on Evaluation Method of Environmental Pollution Control Technology and Technical and Economical Cost[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [11] 王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 等. 包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选[J]. 环境科学, 2014, 35(7):2503-2507.
Wang Hailin, Wang Junhui, Zhu Chunlei, et al. Evaluation and selection of VOCs treatment technologies in packaging and printing industry[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2503-2507.
- [12] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1):9-26.
- [13] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型[M]. 第三版. 北京: 高等教育, 2003.
Jiang Qiyuan, Xie Jinxing, Ye Jun. Mathematical Model [M]. Third Edition. Beijing: Higher Education, 2003.
- [14] 张小红, 裴道武, 代建华. 模糊数学与 Rough 集理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
Zhang Xiaohong, Pei Daowu, Dai Jianghua. Fuzzy Mathematics and Rough Set Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [15] Woodward D G. Life cycle costing: theory, information acquisition and application[J]. International Journal of Project Management, 1997, 15(6):335-344.
- [16] 冯秀珍. 技术评估方法与实践[M]. 北京: 知识产权出版社, 2011.
Feng Xiuzhen. Technology Evaluation Method and Practice [M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2011.
- [17] 刘田, 陈光, 戴攀, 等. 基于全寿命周期成本理论的变电站经济性评价模型[J]. 机电工程, 2012, 29(12):1471-1476.
Liu Tian, Chen Guang, Dai Pan, et al. Model of substation economic evaluation based on LCC theory[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 23(12):1471-1476.
- [18] 苏敬勤. 技术经济学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Su Jingqin. Technical Economics[M]. Beijing: Science Press, 2011.