

Research on Evaluation Method of Nitrogen Oxide Control Technologies Based on Grey Multi-Hierarchy Comprehensive Evaluation Method for Coal-Fired Power Plants

Yi Zuo¹, Sheng Wang^{1*}, Lingyuan Meng²

¹State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing Jiangsu

²Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

Email: grace_zuo@126.com, *wangsheng9999@126.com

Received: Oct. 8th, 2015; accepted: Oct. 22nd, 2015; published: Oct. 28th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

12 typical coal-fired power plants in China were researched in this paper. A multi-level assessment index system of nitrogen oxide control technologies was established in consideration of environmental performance, economic performance and technical performance. Then, seven kinds of mainstream nitrogen oxide control technologies including air staged combustion technology, fuel staging combustion technology, flue gas recirculation technology, low NO_x burner, selective non-catalyst reduction (SNCR), selective catalyst reduction (SCR) and hybrid SNCR/SCR (SNCR-SCR) were evaluated comprehensively by making use of grey multi-hierarchy comprehensive evaluation method. According to the result, the prior sequence of these seven kinds of nitrogen oxide control technologies was got in turn: selective catalyst reduction (SCR), low NO_x burner, air staged combustion technology, flue gas recirculation technology, fuel staging combustion technology, SNCR-SCR and SNCR.

Keywords

Nitrogen Oxide Control Technologies, Index System, Grey Multi-Hierarchy Comprehensive Evaluation Method

*通讯作者。

基于灰色层次分析法的燃煤电厂氮氧化物控制技术评价方法研究

左漪¹, 王圣^{1*}, 孟令媛²

¹国电环境保护研究院, 江苏 南京

²南京信息工程大学, 江苏 南京

Email: grace_zuo@126.com, wangsheng9999@126.com

收稿日期: 2015年10月8日; 录用日期: 2015年10月22日; 发布日期: 2015年10月28日

摘要

本文对国内12个具有代表性的燃煤电厂进行了实地调研,在此基础上,建立了包括环境、技术、经济3个方面的多因素多层次的综合评价指标体系,并且运用灰色层次分析法对当前火电行业采用的空气分级燃烧技术、燃料分级燃烧技术、烟气再循环技术、低氮燃烧器技术、SNCR、SCR和SNCR-SCR共7种主流氮氧化物控制技术进行了环境、经济、技术三个方面的综合评价,得出7种主流氮氧化物控制技术的优劣顺序为:SCR、低氮燃烧器技术、空气分级燃烧技术、烟气再循环技术、燃料分级燃烧技术、SNCR-SCR、SNCR。

关键词

氮氧化物控制技术, 指标体系, 灰色层次分析法

1. 引言

在“十一五”期间,我国在环境保护方面做出了很大努力,实现了SO₂排放总量减排14.29%,SO₂的排放得到了有效控制,但是氮氧化物的减排工作尚处于起步阶段,其年排放总量不断增加,还部分抵消了我国“十一五”期间SO₂的减排对酸雨的控制成果,已成为制约我国社会发展的重要环境因素。我国的氮氧化物排放主要来自煤炭的燃烧,其中火电厂排放量最大,2011年其贡献率达到了46.07% [1]。可见,火电行业氮氧化物的减排工作是我国的氮氧化物总量控制工作中十分重要的环节[2],是现阶段最重要的环保工作之一。

国外自上世纪开始就对燃煤电厂的氮氧化物控制技术进行了综合评价和分析,并且已经形成了一套较为完善的行业性的评价方法[3] [4]。到目前为止,我国对氮氧化物控制技术进行经济评价立法的研究尚处于探索期,对氮氧化物控制技术的成本费用计算还没有建立一套完整的数据收集分析系统,并且对氮氧化物控制技术的综合评价还处于研究阶段,未形成一套完整的、得到权威部门认可的行业性的评价方法。

虽然国内一些学者根据模糊数学原理、灰色理论等数学方法对氮氧化物控制技术的综合评价进行了研究,但其研究更加侧重于这些理论方法是否适用于综合评价的可行性上,而对综合评价模型中的各评价指标数据的收集上较为薄弱,研究中涉及到的氮氧化物控制技术较少[5] [6]。针对这样的情况,本文对国内具有代表性的12个燃煤电厂进行了实地调研,根据调研得到的我国燃煤电厂现阶段的氮氧化物控制

技术的实际情况,运用灰色层次分析法,对氮氧化物控制技术进行多指标、多层次的综合评价,为火电行业在满足《火电厂大气污染物排放标准》的前提下采用何种氮氧化物控制技术提供参考,促进氮氧化物减排事业的发展。

2. 研究方法

灰色层次分析法是层次分析法与灰色理论相结合的一种综合评价方法。在两种方法原有的理论基础之上,充分发挥两者的优势,针对某预定目标进行定性和定量分析,最后对其作出一种评价与描述。其主要步骤如下:

2.1. 评价指标体系的确定

评价指标体系是由一系列互相联系、互相补充的,反映方案技术特征、经济性及其影响效果的,比较完整的评价指标所组成的统一整体。

2.2. 评价指标权重的确定

本文采用层次分析法中的和法确定各评价指标权重 W 。其主要步骤如下[7]:

- ① 把问题层次化,建立层次结构模型,由高层次到低层次分别包括目标层、准则层、指标层等。
- ② 构建判断矩阵

$$A = (\delta_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \cdots & \delta_{nn} \end{pmatrix}$$

其中, $\delta_{ij} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n)$ 表示各层次因素 B_i 与 B_j 相对 A_k 的重要性标度值。

- ③ 计算评价指标权重。其计算步骤如下:

I. 将矩阵 A 按列做归一化处理,得矩阵 $Q = (q_{ij})_{n \times n}$, 其中

$$q_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\sum_{k=1}^n \delta_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

II. 将矩阵 Q 按行相加得向量 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$, 其中

$$c_{ij} = \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

III. 把 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$ 归一化,即求得最大特征值所对应的特征向量:

$$w_i = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^n c_k} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

IV. 计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{ij} w_i}{w_j}$$

- ④ 一致性检验。其计算公式如下:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

$$CR = CI / RI$$

式中, CI 为判断矩阵的一般一致性指标; RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标。

2.3. 数据的无量纲化处理

本文采用的方法为白化权函数法, 对各指标值进行无量纲化处理, 统一变换到[0, 1]范围内。

2.4. 评价矩阵的确定

根据无量纲化处理后的数据计算出灰色关联系数 $\varepsilon_{ki(j)}$, 构建灰色关联系数矩阵 E 。其计算公式如下 [8] [9]:

$$a'_{kij} = \frac{a_{kij} - \min_i a_{kij}}{\max_i a_{kij} - \min_i a_{kij}}$$

$$a'_{koj} = \frac{a_{koj} - \min_i a_{kij}}{\max_i a_{kij} - \min_i a_{kij}}$$

$$\Delta_{kij} = |a'_{koj} - a'_{kij}|$$

$$\varepsilon_{ki(j)} = \frac{\min_i \min_j \Delta_{kij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{kij}}{\Delta_{kij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{kij}}$$

式中 ρ 为分辨系数, 介于 0~1 之间, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

2.5. 综合评价

由评价矩阵 E 和权重系数 W , 得到灰色综合评价结果, 其公式如下 [8]:

$$R = E \times W$$

最后, 根据灰色最大关联度原则对各技术方案进行评价, 即与 r_i 中最大值相对应的氮氧化物控制技术为最佳选择。

3. 评价对象

本文选择了 7 种燃煤电厂主流氮氧化物控制技术, 分别为: S_1 : 空气分级燃烧技术; S_2 : 燃料分级燃烧技术; S_3 : 烟气再循环技术; S_4 : 低氮燃烧器技术; S_5 : SNCR; S_6 : SCR; S_7 : SNCR-SCR。

这 7 种技术代表了典型的炉内和炉外控制技术, 其主要技术和经济指标见表 1。

4. 燃煤电厂氮氧化物控制技术综合评价

4.1. 评价指标体系

通过对国内 12 个燃煤电厂的实地调研, 结合行业专家意见及国内外相关的指标体系研究, 在对氮氧化物控制技术进行环境性能、技术性能和经济性能分析的基础上, 确定以下氮氧化物控制技术综合评价指标体系。其主要包括环境指标、经济指标和技术指标三个方面的内容, 如图 1 所示。每个方面由多个指标来构成和反映, 最后由上述三个方面的内容的综合性能评价来评价各种氮氧化物控制技术的综合性能优劣。

Table 1. Comprehensive performance index of nitrogen oxide control technology
表 1. 氮氧化物控制技术综合性能指标

指标	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇
脱硝效率(%)	15~30	30~40	10~25	10~50	20~40	60~90	40~90
NH ₃ 逃逸率(ppm)	0	0	0	0	<10	<3	<3
SO ₂ /SO ₃ 氧化程度	无	无	无	无	无	大	较大
单位造价(元/kW)	20~30	30~40	20~30	30~40	30~60	80~180	75~80
单位脱硝成本(元/kg)	1.12	2.48	2.08	1.48	8.59	13.56	7.93
单位发电增加成本(分/kWh)	0.067	0.149	0.083	0.119	0.414	0.886	0.715
技术复杂程度	较简单	中等	较复杂	简单	中等	复杂	较复杂
系统压力损失	无	无	无	无	无	大	较大
工艺成熟度	商业化	工业应用	商业化	商业化	商业化	商业化	工业应用
对空气预热器的影响	无	无	无	无	中等	大	较大
占地空间	小	中等	较大	小	中等	大	较大
燃料适应性	强	一般	强	强	强	较强	较强
还原剂与催化剂的可获得性与易处理性	无	无	无	无	一般	较难	一般

4.2. 评价指标权重的确定

本文通过专家打分法确定判断矩阵,按照层次分析法中的和法计算各评价指标的权重 W_i ,其结果如表 2 所示。

4.3. 评价指标的量化

根据白化权函数构建方法确定了氮氧化物控制技术综合评价指标体系中各指标的白化权函数[10][11]。

4.3.1. 环境指标

1) 脱硝效率

考虑到火电厂氮氧化物的减排经常采用多种控制技术才能满足国家的减排标准,所以设定的脱硝效率不以单种技术直接满足标准为准,适当下调,取 20%。其白化权函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0, 20] \\ \frac{x-20}{80}, & x \in (20, 100] \end{cases}$$

2) NH₃ 逃逸率

当 NH₃ 逃逸率大于 10 ppm 时认为是不可取的,其白化权函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, 1] \\ \frac{10-x}{9}, & x \in (1, 10] \\ 0, & x > 10 \end{cases}$$

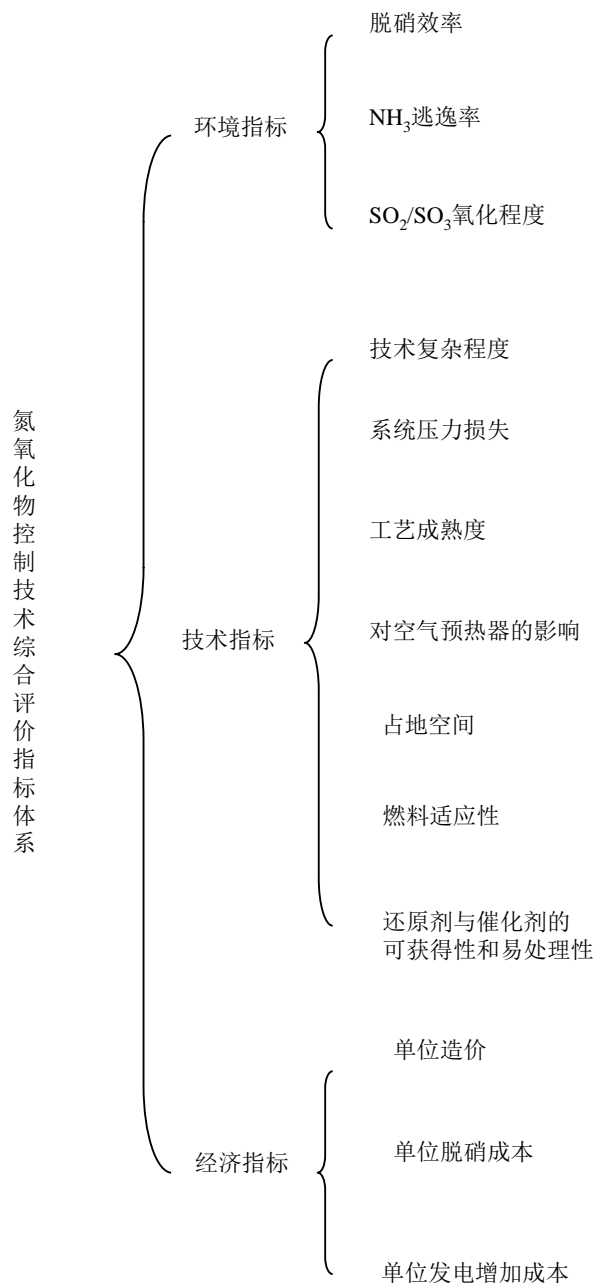


Figure 1. Comprehensive evaluation index system of nitrogen oxide control technology

图 1. 氮氧化物控制技术综合评价指标体系

Table 2. The weights of each index

表 2. 各评价指标权重

第一层次	权重系数	CR	第二层次	权重系数	CR
第一层次评价指标	0.62, 0.24, 0.14	0.0138	环境指标	0.68, 0.19, 0.13	0.0817
			经济指标	0.54, 0.30, 0.16	0.0052
			技术指标	0.31, 0.19, 0.16, 0.13, 0.10, 0.074, 0.046	0.0930

3) SO₂/SO₃ 氧化程度

将 SO₂/SO₃ 氧化程度分为大、较大、中等、较小、小五级，如表 3 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{5-x}{5}, \quad x \in [0,5]$$

4.3.2. 经济指标

1) 单位造价

氮氧化物控制技术单位造价一般在 30~200 元/kW 之间，超过 200 元/kW 视为高成本，低于 30 元/kW 视为低成本，其白化权函数：

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x > 200 \\ \frac{200-x}{170}, & x \in [30, 200] \\ 1, & x < 30 \end{cases}$$

2) 单位脱硝成本

氮氧化物控制技术单位脱硝成本一般在 2~15 元/kg 之间，超过 15 元/kg 视为高成本，低于 2 元/kg 视为低成本，其白化权函数：

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x > 15 \\ \frac{15-x}{13}, & x \in [2, 15] \\ 1, & x < 2 \end{cases}$$

3) 单位发电增加成本

氮氧化物控制技术单位发电增加成本一般在 0.1~1 分/kWh 之间，超过 1 分/kWh 视为高成本，低于 0.1 分/kWh 视为低成本，其白化权函数：

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x > 1 \\ \frac{1-x}{0.9}, & x \in [0.1, 1] \\ 1, & x < 0.1 \end{cases}$$

4.3.3. 技术指标

1) 技术复杂程度

根据氮氧化物控制技术工艺流程的复杂程度，将技术复杂程度分为复杂、较复杂、中等、较简单、简单五级，如表 4 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{x}{5}, \quad x \in [0,5]$$

2) 系统压力损失

根据氮氧化物控制技术运行过程中造成的压力损失，将系统压力损失分为大、较大、中等、较小、小五级，如表 5 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{5-x}{5}, \quad x \in [0,5]$$

3) 工艺成熟度

根据氮氧化物控制技术的开发和应用，将工艺成熟度分为实验室、中试、工业示范、工业应用、商

业化五级，如表 6 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{x}{5}, x \in [0,5]$$

4) 对空气预热器的影响

根据氮氧化物控制技术运行过程中对空气预热器的影响，将影响等级分为大、较大、中等、较小、小五级，如表 7 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{5-x}{5}, x \in [0,5]$$

5) 占地空间

根据氮氧化物控制技术建设所占空间大小，将占地空间分为大、较大、中等、较小、小五级，如表 8 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{5-x}{5}, x \in [0,5]$$

6) 燃料适应性

根据氮氧化物控制技术对燃料变化的适应能力，将燃料适应性分为强、较强、一般、较弱、弱五级，如表 9 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{x}{5}, x \in [0,5]$$

7) 还原剂与催化剂的可获得性和易处理性

按照还原剂与催化剂的获取和处理难易程度，将还原剂与催化剂的可获得性和易处理性分为难、较难、一般、较容易、容易五级，如表 10 所示。其白化权函数为：

$$f(x) = \frac{5-x}{5}, x \in [0,5]$$

4.3.4. 各指标因素值的确定

根据上述各指标的白化权函数，计算出各指标的因素值，如表 11 所示。

Table 3. SO₂/SO₃ oxidation degree classification

表 3. SO₂/SO₃ 氧化程度分级

氧化程度	小	较小	中等	较大	大
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 4. Classification of technical complexity

表 4. 技术复杂程度分级

复杂程度	复杂	较复杂	中等	较简单	简单
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 5. System pressure loss classification

表 5. 系统压力损失分级

系统压力损失	小	较小	中等	较大	大
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 6. Process maturity classification
表 6. 工艺成熟度分级

工艺成熟度	实验室	中试	工业示范	工业应用	商业化
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 7. Classification of air preheater
表 7. 对空气预热器的影响分级

影响程度	小	较小	中等	较大	大
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 8. Space classification
表 8. 占地空间分级

占地空间	小	较小	中等	较大	大
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 9. Fuel adaptive classification
表 9. 燃料适应性分级

适应程度	弱	较弱	一般	较强	强
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 10. Pharmacy to obtain and deal with difficulty degree classification
表 10. 药剂获得和处理难易程度分级

难易程度	容易	较容易	一般	较难	难
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

Table 11. The value of each index factor
表 11. 各指标因素值

指标	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇
脱硝效率(%)	0.13	0.25	0.06	0.38	0.25	0.88	0.63
NH ₃ 逃逸率(ppm)	1	1	1	1	0.22	0.89	0.89
SO ₂ /SO ₃ 氧化程度	1	1	1	1	1	0.1	0.3
单位造价(元/kW)	1	0.94	1	0.94	0.82	0.12	0.71
单位脱硝成本(元/kg)	1	0.96	0.99	1	0.49	0.11	0.54
单位发电增加成本 (分/kWh)	1	0.95	1	0.98	0.65	0.13	0.32
技术复杂程度	0.7	0.5	0.3	0.9	0.5	0.1	0.3
系统压力损失	1	1	1	1	1	0.1	0.3
工艺成熟度	1	0.8	1	1	1	1	0.7
对空气预热器的影响	1	1	1	1	0.5	0.1	0.3
占地空间	1	0.5	0.4	1	0.5	0.1	0.2
燃料适应性	0.9	0.5	0.8	0.8	0.8	0.6	0.7
还原剂与催化剂的 可获得性与易处理性	1	1	1	1	0.6	0.2	0.5

4.4. 综合评价

4.4.1. 第二层次综合评价

① 环境性能评价

根据环境性能指标的关联系数矩阵 E_1 和权重系数 W_1 , 得出:

$$R_1 = E_1 \times W_1 = (0.558, 0.510, 0.544, 0.626, 0.510, 0.871, 0.627)$$

② 经济性能评价

根据经济性能指标的关联系数矩阵 E_2 和权重系数 W_2 , 得出:

$$R_2 = E_2 \times W_2 = (1, 0.895, 0.994, 0.929, 0.614, 0.33, 0.533)$$

③ 技术性能评价

根据技术性能指标的关联系数矩阵 E_3 和权重系数 W_3 , 得出:

$$R_3 = E_3 \times W_3 = (0.908, 0.661, 0.743, 0.986, 0.686, 0.446, 0.395)$$

4.4.2. 第一层次综合评价

由第二层次的评价结果, 得到第一层次的评价指标矩阵 E 。根据环境性能、经济性能和技术性能的权重 $W = (0.62, 0.14, 0.24)$, 得出氮氧化物控制技术经济的综合评价 R :

$$R = E \times W = (0.553, 0.426, 0.486, 0.615, 0.389, 0.750, 0.398)$$

4.5. 评价结果分析

根据灰色最大关联度原则, 可知: 仅从环境性能评价结果 R_1 来看, S_6 (SCR) 是最佳的; 仅从经济性能评价结果 R_2 来看, S_1 (空气分级燃烧技术) 是最佳的; 仅从技术性能评价结果 R_3 来看, S_4 (低氮燃烧器技术) 是最佳的; 从环境性能、经济性能、技术性能的综合评价结果 R 来看, 这 7 种氮氧化物控制技术的优劣顺序为: S_6 (SCR)、 S_4 (低氮燃烧器技术)、 S_1 (空气分级燃烧技术)、 S_3 (烟气再循环技术)、 S_2 (燃料分级燃烧技术)、 S_7 (SNCR-SCR)、 S_5 (SNCR)。因此, SCR 是燃煤电厂氮氧化物控制技术综合指标下优先考虑的对象。

5. 结论与建议

对国内 12 个具有代表性的燃煤电厂的氮氧化物控制技术进行了实地调研考察, 在此基础上, 运用灰色层次分析法就燃煤机组上应用较广的 7 种主流氮氧化物控制技术进行了综合评价, 根据综合评价结果得出 SCR 是目前燃煤电厂氮氧化物控制技术综合指标下优先考虑的对象。

本文的综合评价结果是在综合评价指标体系的基础上, 运用灰色层次分析法得到的, 各项指标的定性和定量分析直接影响到评价结果, 所以, 在燃煤电厂实际的氮氧化物控制工程评价中, 要具体问题具体分析, 根据实际情况确定氮氧化物控制技术的指标和权重, 进而得到符合特定条件下的评价结果。此外, 还建议由政府部门负责, 建立燃煤电厂氮氧化物控制技术经济的数据库, 能实时更新相关信息, 可以为氮氧化物控制技术综合评价工作提供准确、有效的信息支持, 以便能够得到更加科学合理的评价结果。

基金项目

环保部 2014 年度污染减排技术政策研究课题。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国环境保护部 (2013) 2011 年环境统计年报. <http://zls.mep.gov.cn/hjtj/nb/2011nb/>
- [2] 朱法华, 王圣, 郑有飞 (2004) 火电 NO_x 排放现状与预测及控制对策. *能源环境保护*, **1**, 1-6.
- [3] EPA (2001) Cost of selective catalytic reduction (SCR) application for NO_x control on coal-fired boilers. EPA, Washington DC.
- [4] EU (2006) Integrated pollution prevention and control reference document on best available techniques for large combustion plants.
- [5] 于超, 王书肖, 郝吉明 (2010) 基于模糊评价方法的燃煤电厂氮氧化物控制技术评价. *环境科学*, **7**, 1464-1469.
- [6] 张彩庆, 胡文培 (2010) 灰色层次分析法在脱硝技术评价中的应用. *环境工程*, **4**, 97-99.
- [7] 叶义成, 柯丽华, 黄德育 (2006) 系统综合评价技术及其应用. 冶金工业出版社, 北京.
- [8] 毛瑞勇 (2006) 基于灰色理论的燃煤电厂烟气脱硫工艺技术经济评价的研究. 硕士学位论文, 重庆大学, 重庆.
- [9] 邓聚龙 (2002) 灰理论基础. 华中科技大学出版社, 武汉.
- [10] 董奋义, 肖美丹, 刘斌, 等 (2010) 灰色系统教学中白化权函数的构造方法分析. *华北水利水电学院学报*, **3**, 97-99.
- [11] 董奋义, 刘斌 (2010) 灰色系统、白化规律和白化权函数. *第19届灰色系统全国会议论文集*.