

基于模糊评价方法的燃煤电厂氮氧化物控制技术评价

于超,王书肖,郝吉明*

(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要:为定量地综合评价燃煤电厂氮氧化物控制技术,建立了包括环境、技术、经济3个方面共11项指标的多因素多级评价指标体系.采用模糊评价方法,选择低氮燃烧器(LNB)、燃尽风(OFA)、再燃(Reburning)、 γ 性催化还原(SCR)、 γ 性非催化还原(SNCR)和SCR/SNCR联合6种典型的氮氧化物控制技术,定量评估其技术、经济和环境性能,以筛选出燃煤电厂最佳适用控制技术组合.案例分析结果表明,对于燃烧贫煤或无烟煤的墙式锅炉,要求脱硝效率>70%,SCR与LNB联用技术是最优 γ ;对于使用烟煤或褐煤的W火焰和切圆燃烧锅炉,脱硝效率30%即可达标排放,LNB和再燃等燃烧中脱硝技术是最佳选择.因此,在经济较发达、生态环境脆弱的重点地区,建议燃用无烟煤和贫煤的大型机组安装LNB和SCR,燃用烟煤和褐煤的机组或者<100 MW机组可考虑LNB和SNCR联用来减少 NO_x 排放;在其它尚有环境容量的地区,建议燃无烟煤和贫煤的机组安装LNB和SNCR,其它机组通过安装LNB减少 NO_x 排放.

关键词:氮氧化物;控制技术;综合评价;模糊数学;燃煤电厂

中图分类号:X511 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)07-1464-06

Comprehensive Fuzzy Evaluation of Nitrogen Oxide Control Technologies for Coal-fired Power Plants

YU Chao, WANG Shu-xiao, HAO Ji-ming

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A multi-level assessment index system was established to quantitatively and comprehensively evaluate the performance of typical nitrogen oxide control technologies for coal-fired power plants. Comprehensive fuzzy evaluation was conducted to assess six NO_x control technologies, including low NO_x burner (LNB), over the fire (OFA), flue gas reburning (Reburning), selective catalyst reduction (SCR), selective non-catalyst reduction (SNCR) and hybrid SCR/SNCR. Case studies indicated that combination of SCR and LNB are the optimal choice for wall-fired boilers combusting anthracite coal which requires NO_x removal efficiency to be over 70%, however, for W-flame or tangential boilers combusting bituminous and sub-bituminous coal which requires 30% NO_x removal, LNB and reburning are better choices. Therefore, we recommend that in the developed and ecological frangible regions, large units burning anthracite or meager coal should install LNB and SCR and other units should install LNB and SNCR. In the regions with environmental capacity, units burning anthracite or meager coal shall install LNB and SNCR, and other units shall apply LNB to reduce NO_x emissions.

Key words: nitrogen oxide; control technology; comprehensive evaluation; fuzzy mathematics; coal-fired power plants

近年来,随着我国国民经济的快速发展, NO_x 的排放量也迅速增加,其中电厂排放量最大,其贡献率为43%^[1-3]. NO_x 的大量排放导致多种环境问题.卫星遥感监测表明,我国东部地区 NO_2 浓度值增加量明显高于世界其它地区^[4].此外, NO_x 的排放不仅加重了我国城市的细粒子和 O_3 污染^[5-7],还部分抵消了我国 SO_2 污染减排对酸沉降的改善效果^[8].

1990年代以来外国政府和研究部门已对燃煤电厂 NO_x 控制技术进行了评价和分析^[9,10].在我国开展防治 SO_2 污染战略时,李忠华、王书肖等^[11,12]分别采用模糊数学和经济分析的方式对应优先发展的烟气脱硫技术提出了宝贵的建议.借鉴国外和我国在控制 SO_2 时的经验,吴阿峰、马垠等^[13,14]对氮氧化物控制技术进行了综合评价,但这些研究中涉

及的 NO_x 控制技术较少.

本研究应用模糊数学原理,建立了包括环境、技术、经济3方面共11项指标的多因素多级评价指标体系,定量综合评价了典型 NO_x 控制技术及其组合的技术、经济和环境性能,以期为国家制定 NO_x 控制技术政策和燃煤电厂选择技术上合理、经济上可行的脱硝工艺提供了科学指导.

1 研究方法

综合评价是指对多种因素所影响的事物或现象

收稿日期:2009-09-14;修订日期:2009-11-08

基金项目:公益性行业科研专项(200709032);国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A309)

作者简介:于超(1984~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制,E-mail: yuc07@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人,E-mail: hjm-den@tsinghua.edu.cn

进行 Γ 评价,若这种评价过程涉及模糊因素,便是模糊综合评价,还可以采取多层模糊综合评价的方式,逐级评价,进而汇总^[15~17].

设评价对象集为 $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$. 多层次模糊综合评价的原理为:将评价对象的多种因素按属性分成若干类大因素,然后对每一类大因素进行较低层次的评价,在此基础上再对初级评价的结果进行高一级的综合评价.

(1) 设 U 是因素集,按一定的方式将 U 中元素分成 p 个互不相交的因素子集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_p\}$

(2) 对每个因素子集 $U_k (k=1, 2, \dots, p)$ 进行初级综合评价

设因素子集 U_k 含有 m 个评价指标,即 $U_k = \{u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{km}\}$,对于对象集 Y 中的 Y_j 可用向量 $\vec{X}_j(k)$ 表示 m 个评价指标的属性值,即:

$$\vec{X}_j(k) = (x_{1j}(k), x_{2j}(k), \dots, x_{mj}(k))^T$$

对于因素子集 U_k 来说, n 个评价对象的评价指标属性值可用下面的矩阵表示:

$$\vec{X}(k) = \begin{bmatrix} x_{11}(k) & x_{12}(k) & \dots & x_{1n}(k) \\ x_{21}(k) & x_{22}(k) & \dots & x_{2n}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1}(k) & x_{m2}(k) & \dots & x_{mn}(k) \end{bmatrix} = |x_{ij}(k)|$$

由于各评价指标之间具有不可公度性,即各个指标没有统一的度量标准,如果直接使用指标值不便于进行分析和比较. 因此在进行综合评价前,应先将评价指标进行规范化,即构造评价指标的隶属函数使指标值统一变换到 $[0, 1]$ 范围内. 由因素子集 U_k 中的每个因素 u_{ki} 的隶属度组成隶属度评价矩阵 E_k :

$$E_k = \begin{bmatrix} \mu_{11}(k) & \mu_{12}(k) & \dots & \mu_{1n}(k) \\ \mu_{21}(k) & \mu_{22}(k) & \dots & \mu_{2n}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{m1}(k) & \mu_{m2}(k) & \dots & \mu_{mn}(k) \end{bmatrix} = |\mu_{ij}(k)|$$

根据因素子集 U_k 中各因素所起作用大小定出权重分配 $A_k = (a_1(k), a_2(k), \dots, a_m(k))$,且 $\sum_{i=1}^m a_i(k) = 1$. 通过对模糊矩阵进行复合运算,可得出对因素子集 U_k 的一级综合评价 B_k ,

$$B_k = A_k \times E_k = (b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{kn}), \\ (k = 1, 2, \dots, p)$$

(3) 对 U 进行综合评价

将 U 中的 p 个因素子集 $U_k (k=1, 2, \dots, p)$ 看成是因素集 U 上的 p 个单因素,按各 U_k 在 U 中所起作用的大小,给出其权重分配 A :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$$

由各因素子集 U_k 的评价结果 $B_k (k=1, 2, \dots, p)$,得出 Γ 单因素评价矩阵 E :

$$E = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} b_{12} \dots b_{1n} \\ b_{21} b_{22} \dots b_{2n} \\ \dots \\ b_{p1} b_{p2} \dots b_{pn} \end{bmatrix}$$

经模糊复合运算可得因素集 U 的综合评价矩阵 B :

$$B = A \times E = A \times \begin{bmatrix} A_1 \times E_1 \\ A_2 \times E_2 \\ \dots \\ A_p \times E_p \end{bmatrix} = \\ A \times \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_p \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

这里全面考虑各个因素,对所有因素依权重的大小均衡兼顾,适用于要求整体指标的情形. 对应的模糊算子组合为加权平均模式 $(\oplus - \odot)$,即:

$$b_j = \bigoplus_{i=1}^m (a_i \times \mu_{ij}) = \sum_{i=1}^m a_i \times \mu_{ij}$$

2 评价对象

选取了3种燃烧中控制技术和3种燃烧后控制技术,即A. 低氮燃烧器(LNB)、B. LNB配合燃尽风(OFA)、C. 再燃、D. 选择性催化还原(SCR)、E. 非选择性非催化还原(SNCR)和F. SCR/SNCR联合技术作为评价对象.

这6种技术代表了典型的燃烧中和燃烧后控制技术. 对这些控制技术的技术指标分析见表1.

另外考虑这些控制方式的组合,包括B+D(LNB+OFA+SCR)、A+D(LNB+SCR)、A+E(LNB+SNCR)、B+E(LNB+OFA+SNCR)、A+F(LNB+SCR/SNCR联合技术)、B+F(LNB+OFA+SCR/SNCR联合技术).

3 燃煤电厂氮氧化物控制技术综合评价

3.1 评价指标体系

通过对上述现有评价方法的研究,确定了包含环境性能、技术性能、经济性能3方面的评价指标,然后进行逐级评价. 确定的综合评价指标体系如图1所示.

表 1 控制技术的综合性能分析

Table 1 Comprehensive performance of control technologies

指标	A	B	C	D	E	F	文献
去除效率/%	20~50	40~60	30~50	60~90	30~60	40~70	[10, 18~20]
二次污染	无	无	无	氨 $<5\times10^{-6}$	氨 $<10\times10^{-6}$	氨 $<8\times10^{-6}$	[18~20]
单位造价 /元 $\cdot\text{kW}^{-1}$	20~30	30~40	20~40	75~180	30~60	50~100	[13, 20~22]
单位脱除成本 (NO_x)/元 $\cdot\text{t}^{-1}$	0.000 5~0.001	0.001~0.002	0.001~0.002	0.005~0.015	0.002~0.006	0.005~0.01	[21]
使用和运行 中的限制	可能使得未燃 碳(UBC)增加	可能使得未燃 碳(UBC)增加	需使用较细 的煤粉	压降较大,可能生 成硫酸铵影响系统	氨泄漏较多,在大 锅炉去除效果不好	介于 SCR 和 SNCR 之间	[9, 18, 20, 21]
工艺成熟度	商业化	商业化	国内工业示范	商业化	国内工业应用少	国内工业应用少	
脱硝剂及 催化剂	无	无	无	氨水或尿素需催 化剂	大多尿素无需催 化剂	大多尿素需催 化剂	

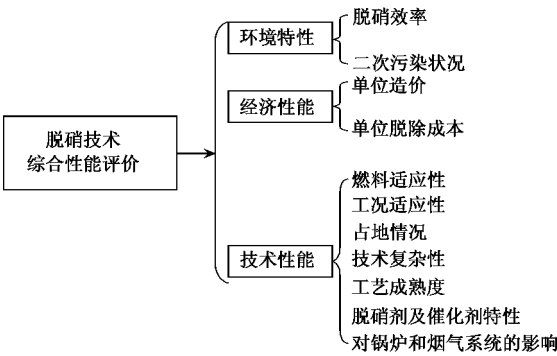


图 1 评价指标体系

Fig. 1 Structure of evaluation factors

根据综合评价指标体系,从而确定评价的因素集为:

$$U = \{U_1, U_2, U_3\} = \{\text{环境特性, 经济性能, 技术性能}\}$$

$$U_1 = \{u_{11}, u_{12}\} = \{\text{脱硝效率, 二次污染程度}\}$$

$$U_2 = \{u_{21}, u_{22}\} = \{\text{单位造价, 单位去除成本}\}$$

$$U_3 = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}, u_{35}, u_{36}, u_{37}\} = \{\text{燃料适用性, 工况适应性, 占地面积, 技术复杂性, 吸收剂和催化剂, 工艺成熟度, 对锅炉和烟气系统的影响}\}$$

3.2 综合评价指标的隶属函数

3.2.1 环境性能

(1) 脱硝效率

脱硝效率的约束条件为 $0\% \leq x \leq 100\%$, 采用线性隶属函数, 设置去除效率下限为 $a\%$, 当低于下限为 0 分, 高于 $a\%$ 是分数从 0.9 逐渐升高, 即:

$$\mu_{u_{11}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a\% \\ \frac{10x + 90 - a}{100 - a} & a\% \leq x \leq 100 \end{cases}$$

(2) 二次污染程度

二次污染程度分为 5 级, 分别为严重、较严重、

中等、较轻、轻, 如表 2 所示.

表 2 二次污染程度分级

Table 2 Level of secondary pollution

二次污染程度	严重	较严重	中等	较轻	轻
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

可用隶属函数表达为:

$$\mu_{u_{12}}(x) = \frac{x}{5}, \quad 0 \leq x \leq 5$$

3.2.2 经济性能

(1) 单位造价

根据统计数据, 氮氧化物控制技术的单位脱硝成本基本上在 $30 \sim 250$ 元 $\cdot\text{kW}^{-1}$ 的范围内. 因此将 30 元 $\cdot\text{kW}^{-1}$ 脱除视为低成本, 250 元/ kW 脱除视为高成本, 隶属度用降半梯形分布来描述, 即:

$$\mu_{u_{21}}(x) = \begin{cases} 0 & x > 250 \\ \frac{250 - x}{220} & 30 \leq x \leq 250 \\ 1 & x < 30 \end{cases}$$

(2) 脱除成本

氮氧化物控制技术的运行费用在 $0.000\ 3 \sim 0.02$ 元 $\cdot\text{kW}^{-1}$ 的范围内. 因此将 0.025 元 $\cdot\text{kW}^{-1}$ 的脱除技术视为高成本, 0.003 元 $\cdot\text{kW}^{-1}$ 视为低成本, 隶属度用降半梯形分布来描述, 即:

$$\mu_{u_{22}}(x) = \begin{cases} 0 & x > 0.025 \\ \frac{0.025 - x}{0.022} & 0.003 \leq x \leq 0.025 \\ 1 & x < 0.003 \end{cases}$$

3.2.3 技术性能

(1) 燃料适应性

将氮氧化物控制系统对燃料变化的适应能力按照弱、较弱、一般、较强、强分为 5 级, 如表 3 所示.

表 3 燃料适应性分级
Table 3 Level of applicability on fuel

燃料适应性	弱	较弱	一般	较强	强
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

可用隶属函数表达为： $\mu_{u_{31}}(x) = \frac{x}{5}, 0 \leq x \leq 5$

(2) 工况适应性

将氮氧化物控制系统对工况适应能力均按照弱、较弱、一般、较强、强分为 5 级,如表 4 所示.

表 4 工况适应性
Table 4 Level of applicability on working condition

工况适应能力	弱	较弱	一般	较强	强
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

可用隶属函数表达为：

$$\mu_{u_{32}}(x) = \frac{x}{5}, \quad 0 \leq x \leq 5$$

(3) 占地面积

设氮氧化物控制工程占用电厂面积分为小、较小、中等、较大、大,这样 5 级,如表 5 所示.

表 5 工艺复杂程度分级
Table 5 Level of technology's complexity

工艺复杂性	小	较小	中等	较大	大
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

可用隶属函数表达为：

$$\mu_{u_{33}}(x) = \frac{x}{5}, \quad 0 \leq x \leq 5$$

(4) 技术复杂性

将工艺复杂性按简单、较简单、中等、较复杂、复杂分为 5 级,如表 6 所示.

表 6 工艺复杂程度分级
Table 6 Level of technology's complexity

工艺复杂性	简单	较简单	中等	较复杂	复杂
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

可用隶属函数表达为：

$$\mu_{u_{34}}(x) = \frac{5-x}{5}, \quad 0 \leq x \leq 5$$

(5) 吸收剂和催化剂

吸收剂和催化剂的获取和处理的难易程度按容

易、较易、一般、较难、难分为 5 级,如表 7 所示.

表 7 药剂获得(处理)难易程度分级
Table 7 Level of the handle of reagent and catalyst

药剂获得(处理)难易程度	容易	较易	一般	较难	难
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

可用隶属函数表达为：

$$\mu_{u_{35}}(x) = \frac{5-x}{5}, \quad 0 \leq x \leq 5$$

(6) 工艺成熟度

将工艺成熟度按商业化、工业应用、工业示范、中试、实验室分为 5 个不同阶段,分别定为 0~5 级,如表 8 所示.

表 8 工艺成熟度分级
Table 8 Level of the technology's maturity

技术阶段	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

将工艺成熟度用隶属函数表达,即：

$$\mu_{u_{36}}(x) = \frac{x}{5}, \quad 0 \leq x \leq 5$$

(7) 对锅炉和烟气系统的影响

将氮氧化物控制系统运行对锅炉和烟气系统的影响分为表 9 所示的 5 级.

表 9 脱硝系统运行对电厂的影响分级
Table 9 Effect of NO_x control technologies on power plant's operation

系统影响	小	较小	中等	较大	大
分级	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

可用隶属函数表达为：

$$\mu_{u_{37}}(x) = \frac{5-x}{5}, \quad 0 \leq x \leq 5$$

按照表 1 中的数据,根据上述隶属函数计算得到各类技术对应评价指标的隶属度,如表 10 所示(对取值为一定范围的量,取对应范围的中点值).

3.3 二级综合评价案例分析

使用上述评价方法试分析以下案例,当墙式燃烧贫煤或无烟煤时,烟气中 NO_x 浓度较高(>1 200 mg/m³),要将排放浓度控制在 400 mg/m³ 以下,控制技术的脱硝效率需 70% 左右的控制技术进行评价.评价技术包括 B+D、A+D、A+E、B+E、A+F、B+F.

表 10 各类脱硝技术的指标隶属度¹⁾

Table 10 Target indices of various NO_x control technologies

指标	A	B	C	D	E	F
二次污染	1.0	1.0	1.0	0.50	0.20	0.50
单位造价	0.92	0.85	0.94	0.46	0.85	0.68
脱除成本	0.94	0.90	0.85	0.11	0.58	0.25
技术成熟度	1.0	0.70	0.70	1.0	0.70	0.50
技术复杂性	0.90	0.70	0.50	0.10	0.50	0.30
对锅炉和烟气的影响	0.70	0.70	0.70	0.30	0.50	0.40
脱硝剂与催化剂	1.0	1.0	1.0	0.10	0.30	0.30
工况适用性	0.40	0.30	0.50	0.50	0.50	0.60
燃料适用性	0.80	0.60	0.50	0.70	0.70	0.70
占地面积	1.0	1.0	0.70	0.10	0.50	0.30

1) “脱硝效率”一项得分与设置的脱硝效率下限有关,未列出

3.3.1 初级评价

(1) 环境性能评价

根据 NO_x 控制实际情况,确定权重为 $A_1 = (0.73, 0.27)$, 进行模糊综合评价:

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0.88, 0.87, 0.71, 0.73, 0.78, 0.80)$$

(2) 经济性能评价

确定权重向量矩阵为 $A_2 = (0.55, 0.45)$, 加权平均后可得:

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 = (0.10, 0.16, 0.62, 0.56, 0.37, 0.31)$$

(3) 技术性能评价

权重向量矩阵为:

$$A_3 = (0.49, 0.62, 0.49, 0.41, 0.39, 0.33)$$

进行加权计算,

$$B_3 = A_3 \cdot R_3 = (0.74, 0.68, 0.41, 0.52, 0.42)$$

3.3.2 二级评价

3 类因素的权重分配为:

$$A = (0.55, 0.26, 0.19)$$

得到综合评价为:

$$B = (0.625, 0.666, 0.639, 0.618, 0.601, 0.585)$$

3.3.3 评价结果

墙式锅炉燃烧贫煤或无烟煤,要求脱硝效率 >70% 的控制技术评价的结果如图 2 所示. 此时应首选 SCR + LNB, 如 SCR 和其它方法同时使用,可获得更好的控制效果,但费用较高. SNCR 法和燃烧中控制技术联用也可考虑.

如果使用 W 火焰炉、切圆燃烧炉等方式燃烧烟煤或褐煤,烟气中 NO_x 浓度较低,只需 30% 左右的去除,就可能将排放浓度控制在 400 mg/m³ 以下. 这种情况的评价结果见图 3. 此时燃烧中控制的评分明显优于燃烧后控制. 燃烧后控制技术在环境性能中评分较高,但价格高昂、技术复杂影响了评价结

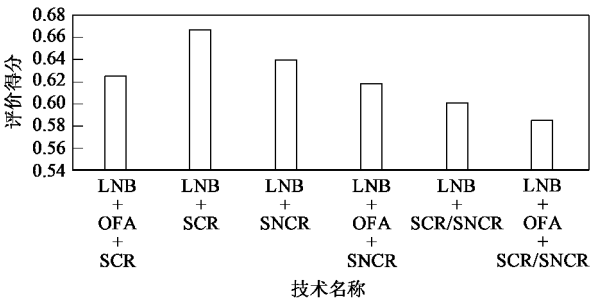


图 2 脱硝效率 >70% 的控制技术评价结果

Fig.2 Evaluation of technologies with high efficiency

果. 在要求去除效率不高时,优先考虑燃烧中控制技术. 另外一些燃烧中控制方式能够结合在一起,如 OFA 加 LNB 这样控制效率接近燃烧后控制技术的环境效果,但造价远低.

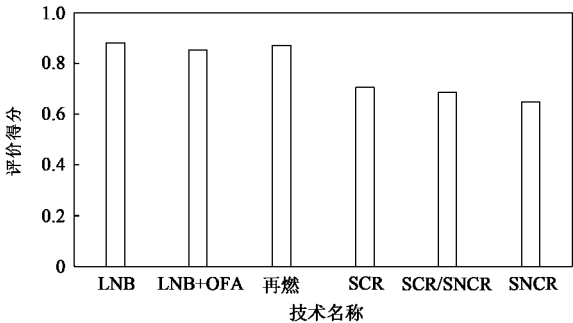


图 3 脱硝效率 >30% 的控制技术评价结果

Fig.3 Evaluation of technologies with low efficiency

我国地域辽阔、经济发展不平衡,考虑到 NO_x 控制技术投资较大,可将经济较发达,生态环境脆弱的地区优先开展控制. 通过改变权重和指标可以根据实际需要调整,评价结果见表 11.

表 11 不同条件下的 NO_x 控制技术选择
Table 11 NO_x control technologies under different conditions

容量	煤种	重点地区	其它地区
> 100 MW	无烟煤、贫煤	LNB + SCR	LNB + SNCR
	烟煤、褐煤	LNB + SNCR	LNB + OFA(+ 再燃)
< 100 MW	无烟煤、贫煤	LNB + OFA + SNCR(+ 再燃)	LNB + SNCR
	烟煤、褐煤	LNB + SNCR	LNB + OFA(+ 再燃)

4 结论

(1)在经济较发达,生态环境脆弱的重点地区,对于燃无烟煤和贫煤的大型机组,应要求其安装 LNB 和 SCR,燃烟煤和褐煤的机组或者 < 100 MW 机组可考虑通过 LNB 和 SNCR 减少 NO_x 排放;在其它尚有环境容量的地区,建议燃无烟煤和贫煤的机组安装 LNB 和 SNCR,其它机组通过低氮燃烧减少 NO_x 排放.

(2)基于本研究的方法,电厂在实际烟气脱硝工艺时,可根据自身的具体情况和要求,调整各项经济技术指标的权重,确定出适合本厂的脱硝方案.

参考文献:

[1] 吴晓青.我国大气氮氧化物污染控制对策[J]. 环境保护, 2009,**8B**(426): 9-11.

[2] Zhang Q, Streets D G, He K, *et al.* NO_x emission trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space[J]. J Geophys Res, 2007, **112**:D22306, doi:10. 1029/2007JD008684, 2007.

[3] 张楚莹,王书肖,邢佳,等. 中国能源相关的氮氧化物排放现状与发展趋势分析[J]. 环境科学学报, 2008,**28**(12): 2470-2479.

[4] Richter A, Burrows J P, Nu H. Increase in tropospheric nitrogen dioxide levels over China observed from space [J]. Nature. 2005,**437**(7055):129-132.

[5] World Health Organization (WHO). Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide [R]. Copenhagen: WHO, 2003:46-47.

[6] He K, Yang F, Ma Y. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing China[J]. Atmos Environ, 2001, **35**(29):4959-4970.

[7] 单文坡,殷永泉,杜世勇,等. 夏季城市大气 O₃ 浓度影响因素及其相关关系[J]. 环境科学, 2006,**27**(7):1276-1281.

[8] Zhao Y, Duan L, Xing J, *et al.* Soil Acidification in China: Is Controlling SO₂ Emissions Enough? [J]. Environ Sci Technol, 2009, **43**(21):8021-8026.

[9] Electric Power Research Institute (EPRI). Achieving NO_x Compliance at Least Cost: A Guideline for Selecting the Optimum Combination of NO_x Controls for Coal-Fired Boilers [R]. Palo Alto: EPRI, 1998. 1-14.

[10] US Environmental Protection Agency (EPA). The EPA Air Pollution Control Cost Manual[R]. NC: EPA, 2002. 40-44.

[11] 李忠华,薛建明,韩琪. 火电厂烟气脱硫工程建设方案的经济评价[J]. 电力建设, 2003,**24**(8):60-63.

[12] 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.

[13] 吴阿峰,李明伟,黄涛,等. 烟气脱硝技术及其技术经济分析[J]. 中国电力, 2006,**39**(11):71-75.

[14] 马垠. 中国燃煤电厂烟气脱硝工艺的 [D]. 北京:华北电力大学, 2005.

[15] 汪培庄,韩立岩. 应用模糊数学[M]. 北京:北京经济学院出版社, 1989. 160-167.

[16] 彭祖赠,孙韞玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2001. 122-131.

[17] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京:科学出版社, 2005. 309-311.

[18] Srivastava R K, Hall R E, Khan S, *et al.* Nitrogen oxides emission control options for coal-fired electric utility boilers[J]. J Air Waste Manag Assoc, 2005, **55**(9):1367-1388.

[19] 杨飏. 氮氧化物减排技术与烟气脱硝工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007. 147-162.

[20] 孙克勤,钟秦. 火电厂烟气脱硝技术及工程应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2007. 32-110.

[21] US Environmental Protection Agency (EPA). Documentation for EPA Base Case 2006 (V. 3. 0) Using the Integrated Planning Model[R]. Washington: EPA, 2006. 5-9.

[22] 路涛,贾双燕,李晓芸. 关于烟气脱硝的 SNCR 工艺及其技术经济分析[J]. 现代电力, 2004,**21**(1):17-22.