

# 燃煤电厂烟气超低排放现状分析研究

张翼<sup>1</sup>, 营娜<sup>2</sup>, 冯蕾<sup>3</sup>, 顾永正<sup>4</sup>, 程轲<sup>5</sup>, 薛志钢<sup>2</sup>, 任岩军<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>国家能源投资集团有限责任公司, 北京

<sup>2</sup>中国环境科学研究院, 北京

<sup>3</sup>国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京

<sup>4</sup>国电电力发展股份有限公司, 北京

<sup>5</sup>河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南 新乡

收稿日期: 2021年10月9日; 录用日期: 2021年11月10日; 发布日期: 2021年11月17日

## 摘要

燃煤电厂作为电力主要的生产方式, 其大气污染物控制是中国关注的重点。为满足日益严格的要求, 我国对燃煤电厂大气污染物排放标准已进行了多次修订。尤其是在2015年, 多部门联合发布《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》, 期望到2020年全部具备改造条件的燃煤电厂均实现超低排放。中国正处于“超低排放”收尾阶段和下一步计划“近零排放”的开始阶段。尽管我国燃煤电厂大气污染物的排放限值在国际上处于相对领先的水平, 但与欧美国家相比, 相关排放标准仍然存在一些不足。在此背景下, 通过多视角对比分析我国燃煤电厂与国外欧美国家燃煤电厂排放标准差异, 分别从执行对象、达标评判方法、分析检测方法和经济效益等多方位提出进一步优化我国燃煤电厂大气污染物排放标准的相关建议, 以便更好地实施近零排放。

## 关键词

燃煤电厂, 超低排放, 近零排放, 现状分析

# Current Status and Problem Analysis of Ultra-Low Flue Gas Emissions from Coal-Fired Power Plants

Yi Zhang<sup>1</sup>, Na Ying<sup>2</sup>, Lei Feng<sup>3</sup>, Yongzheng Gu<sup>4</sup>, Ke Cheng<sup>5</sup>, Zhigang Xue<sup>2</sup>, Yanjun Ren<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>National Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing

<sup>2</sup>Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing

<sup>3</sup>CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing

<sup>4</sup>GD Power Development Co., Ltd., Beijing

\*通讯作者。

文章引用: 张翼, 营娜, 冯蕾, 顾永正, 程轲, 薛志钢, 任岩军. 燃煤电厂烟气超低排放现状分析研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(6): 1073-1082. DOI: 10.12677/aep.2021.116129

<sup>5</sup>Key Laboratory of Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang Henan

Received: Oct. 9<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 10<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 17<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

As the main form of coal used for electricity, the control of air pollutants from coal-fired power plants has always been the focus of China. To meet increasingly stringent requirements, the air pollutant emission standards for coal-fired power plants in China have been revised several times. In 2015, the “Work Plan for Comprehensive Implementation of Ultra-Low Emissions and Energy-saving Retrofits for Coal-fired Power Plants” was issued, and it is expected that by 2020, all coal-fired power plants that are eligible for transformation will achieve ultra-low emissions. At this stage, the control of air pollutants from coal-fired power plants in China is at the end of “ultra-low emissions” and the beginning of “near-zero emissions”. Although the emission standards of coal-fired power plants in my country are already at the international leading of coal-fired power plants in my country. In this context, multi perspective comparative analysis was conducted between coal-fired power plants of China and abroad in Europe and the united national standards level. Related suggestions of further optimization of the emission standard of Chinese coal-fired power plants were proposed in terms of implementation objects, evaluation methods for meeting standards, analysis and detection methods, and economic benefits, which can help to better implement near-zero emissions.

## Keywords

Coal-Fired Power Plants, Ultra-Low Emissions, Near-Zero Emissions, Status Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

电力作为我国最大的煤炭消耗行业，其燃烧产生的污染物也是大气污染物的主要来源。据统计，以煤炭为主的化石燃料的燃烧排放了全国约 70% 的烟粉尘、85% 的二氧化硫、67% 的氮氧化物[1]。燃煤电厂具有大气污染物排放量大、扩散传输距离远等特点，因此成为了各国大气污染控制的重点。伴随着燃煤电厂的发展，中国制定了《燃煤电厂大气污染物排放标准》来限制污染物的排放浓度，并在不同阶段进行修改。为了降低发电煤耗和污染排放，在 2015 年，国家环保部、发展和改革委员会以及能源局联合印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造计划》的通知[2]，提出了“超低排放”。

所谓“超低排放”，是指燃煤电厂的大气污染物排放浓度基本符合燃气机组排放限值，即烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放浓度(基准含氧量 6%)分别不超过 10 mg·m<sup>-3</sup>、35 mg·m<sup>-3</sup>、50 mg·m<sup>-3</sup>。随后，国家和地方还出台了相关优惠政策推进燃煤电厂“超低排放”升级改造作为响应。截止到 2019 年底，国务院新闻办公室举行新闻发布会称，全国约有 8.9 亿千瓦的煤电机组实现了超低排放，占煤电总装机容量 86%，这意味着中国已建成了世界最大规模的超低排放清洁煤电供应体系[3]，基本实现了燃煤电厂与燃气电厂在烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的排放上同等清洁的目标[4]。

在 2014 年首次提出“超低排放”标准并实施后, 中国标准已实现对超欧美国家的反超, 烟尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放限值均达到国际领先水平。尽管我国在燃煤电厂行业已取得如此巨大的成绩, 但对燃煤电厂大气污染防治工作却未止步。尤其, 在实现对燃煤电厂一次排放的可过滤颗粒物(FPM)进行有效控制的同时, 可凝结颗粒物(CPM)的排放及控制逐渐成为研究热点。现有的研究表明, CPM 对总颗粒物的排放贡献可达 43.5%~92.2%。作为燃煤电厂等固定污染源排放颗粒物的主要组分, CPM 的排放值得重视[5]。

目前, 部分企业已经开始探索“近零排放”。所谓“近零排放”, 是指对生产过程中产生的污染物排放进行严格控制, 尽可能使其减少到接近零状态[6]。通过近零排放, 燃煤电厂的排放将等于甚至优于燃气发电, 从而解除因环境影响而产生的对燃煤电厂的桎梏。尽管中国燃煤电厂的排放限值标准在国际上处于相对领先的水平, 但在技术管理和实际运行过程中还有很多进步的空间[7]。对于燃煤电厂, 美国和欧盟都拥有比较完善和成熟的技术和管理体系, 其制定的相关排放标准也得到世界各国的认可。笔者通过分析借鉴欧美发达国家燃煤电厂行业污染物排放控制的成功经验, 为中国燃煤机组的近零排放改造和运行优化提供参考。

## 2. 我国燃煤电厂大气污染物排放标准变化历程

中国“富煤少气”的能源格局决定了燃煤电厂长期占据中国火电领域的主导地位[8], 污染物排放标准可以对污染源的排放行为起到约束和限制作用, 因此燃煤电厂的排放标准对改善由燃煤电厂引起的污染情况起到根本作用。世界各国对燃煤电厂产生的污染物控制的立法工作和条例在本世纪五十年代中期到七十年代末就开始出现了。我国属于发展中国家, 在燃煤电厂污染控制上起步比较晚, 但在我国国家的大力推动下, 我国制定和修改法规的进程较快。

1973 年, 我国颁布了《工业“三废”排放标准(试行)》(GBJ4-1973), 并于 1974 年 1 月开始试行。该标准基于大气扩散公式的推导计算和实践经验参数的修正得出不同排放高度的排放量和排放浓度。此外, 燃煤电厂的排放速率和烟囱高度也得到了限制, 排放指标包括烟尘和  $\text{SO}_2$ 。《工业“三废”排放标准(试行)》(GBJ4-1973)从 1974 年一直使用到 1992 年 7 月底, 后被 1992 年 8 月开始实施的《燃煤电厂大气污染物排放标准》(GB13223-1991)所替代[9]。后者首次规定了燃煤电厂的烟尘允许排放浓度( $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 并根据除尘设备的类型和燃煤灰分差异制定不同的排放限值。到了 1996 年, 《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-1996)被颁布, 其对 GB13223-1991 标准进行了修订, 加严了烟尘排放标准和对 1997 年新、扩和改建的燃煤电厂实施  $\text{SO}_2$  全场排放总量和各烟囱排放浓度双重控制[10]。此外, 这一标准首次增加了  $\text{NO}_x$  作为燃煤电厂的排放指标, 并对其排放浓度作出了限制性规定。2004 年 1 月 1 日开始实施的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2003)对之前的标准做出了进一步的修改: 调整了大气污染物排放浓度限值; 取消了按除尘器类型和燃煤灰分、硫分含量区分不同排放浓度限值的做法; 增加了对现有火电锅炉达到更加严格排放限值的时限规定; 对折算火电厂大气污染物排放浓度的过量空气系数做出了调整[11]。1997 年~2003 年间, 中国对燃煤电厂  $\text{SO}_2$  和颗粒物的排放限值约为欧美同时期限值的 2 倍。由此可见, 当时中国的燃煤电厂排放标准明显松于欧美国家。

2011 年出台的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011) [12], 不仅对燃煤电厂大气污染物排放浓度限值进行了调整, 还首次增加了汞及其化合物的排放限值, 并对重点地区设置了大气污染物特别排放限值。这一标准的实施意味着我国燃煤电厂大气污染物排放标准首次赶超欧美国家, 迈入国际先进水平。但由于我国突发雾霾污染且未得到明显缓解, 故加大了对燃煤电厂的管控力度, 此后, 国务院办公厅于 2014 年 6 月首次发文要求新建燃煤发电机组大气污染物排放接近燃气机组排放水平, 从此中国燃煤电厂走上了超低排放的道路。在 2015 年, 多部门联合出台了《全面实施燃煤电厂超低

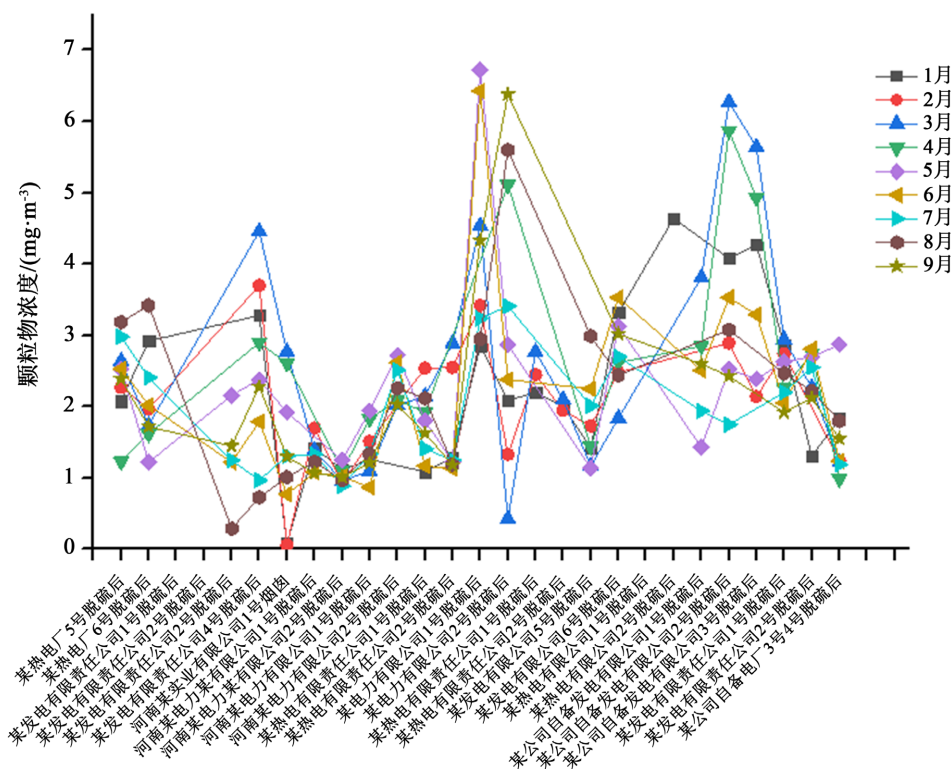
排放和节能改造工作方案》，进一步提出对全国所有具备改造条件的燃煤电厂到 2020 年实现超低排放(即在基准氧含量 6% 条件下，烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于 10、35、50  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的要求[2]。

为了响应国家上述超低排放计划，各省市陆续出台了相关的地方标准。其中，浙江、山东、天津等省市制定的地方排放标准[13] [14] [15]，比国家超低排放的要求更为严格，这些省市虽不能代表整个中国的燃煤电厂情况，但却能显示出我国关于燃煤电厂的污染物排放标准逐渐向着“近零排放”的目标前进。

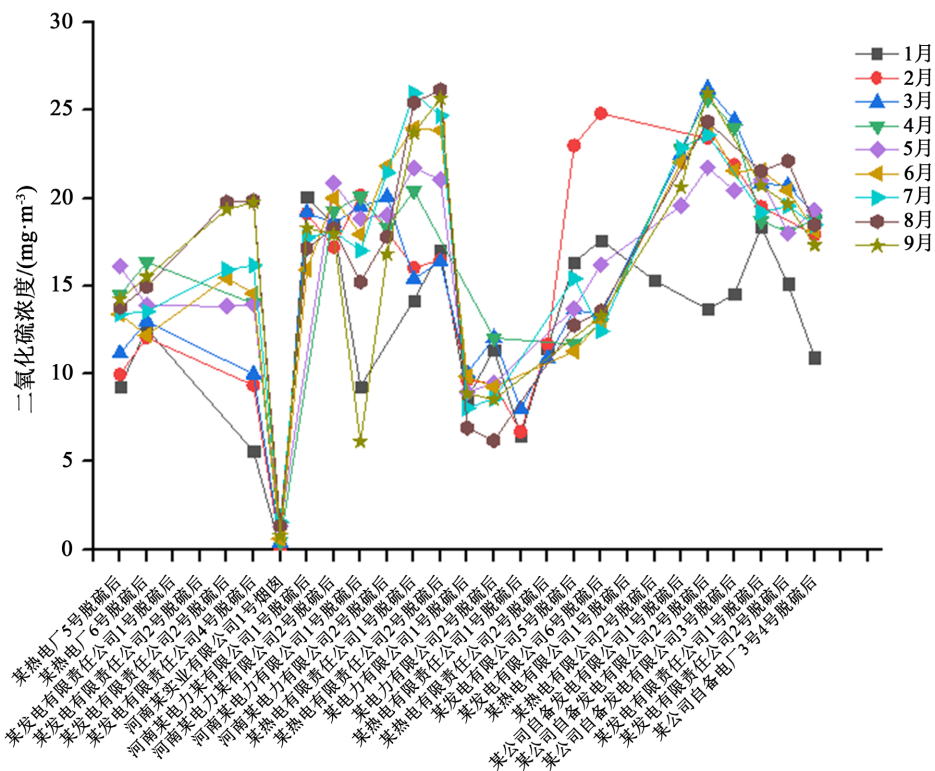
### 3. 基于在线监测的燃煤电厂排放现状分析

目前，我国的超低排放改造已经处于收尾的阶段，为详细了解改造的效果，通过对重点监管企业自行监测信息进行统计，收集了大唐、华能、神华集团下属及其他发电厂、热电联产企业及自备电厂共 12 家企业 25 台燃煤机组的主要大气污染物在线监控数据(月均值)。其中 60 万千瓦及以上机组 6 台，介于 30 万千瓦和 60 万千瓦之间的机组有 11 台，30 万千瓦以下锅炉 8 台。

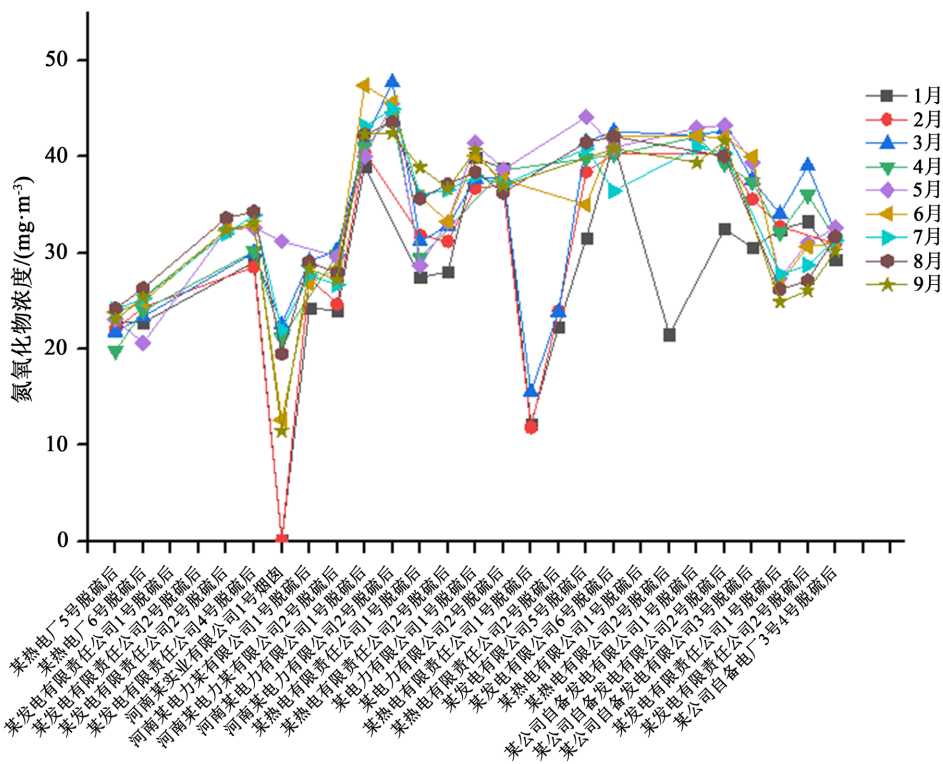
从图 1 的图 1(a)、图 1(b)、图 1(c)中可以看出，颗粒物平均排放浓度为  $2.24 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最大值  $4.64 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最小值  $1.03 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；二氧化硫平均排放浓度为  $14.45 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最大值  $22.03 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最小值  $0.73 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这 12 家企业 25 台燃煤机组涵盖了不同容量的机组类型，可将其分为 <300 MW、300~600 MW 和 >600 MW 三种类型。对于 <300 MW 的机组，颗粒物、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的平均浓度分别为  $3.05$ 、 $11.64$  和  $27.66 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；300~600 MW 机组的平均浓度为颗粒物  $2.12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{SO}_2$   $18.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{NO}_x$   $29.01 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；>600 MW 机组的颗粒物、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的平均浓度分别为  $1.51$ 、 $18.08$  和  $35.48 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。颗粒物的排放浓度会随机组容量的增加而减少，而  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的排放浓度则会随之增大。



(a) 颗粒物



(b) 二氧化硫

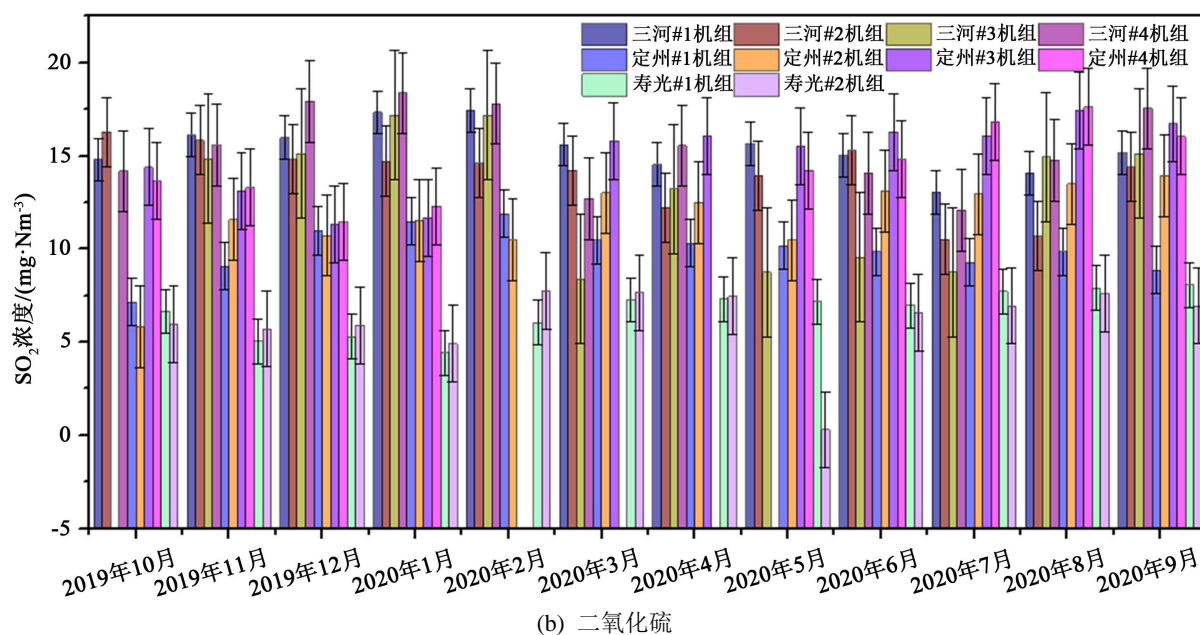
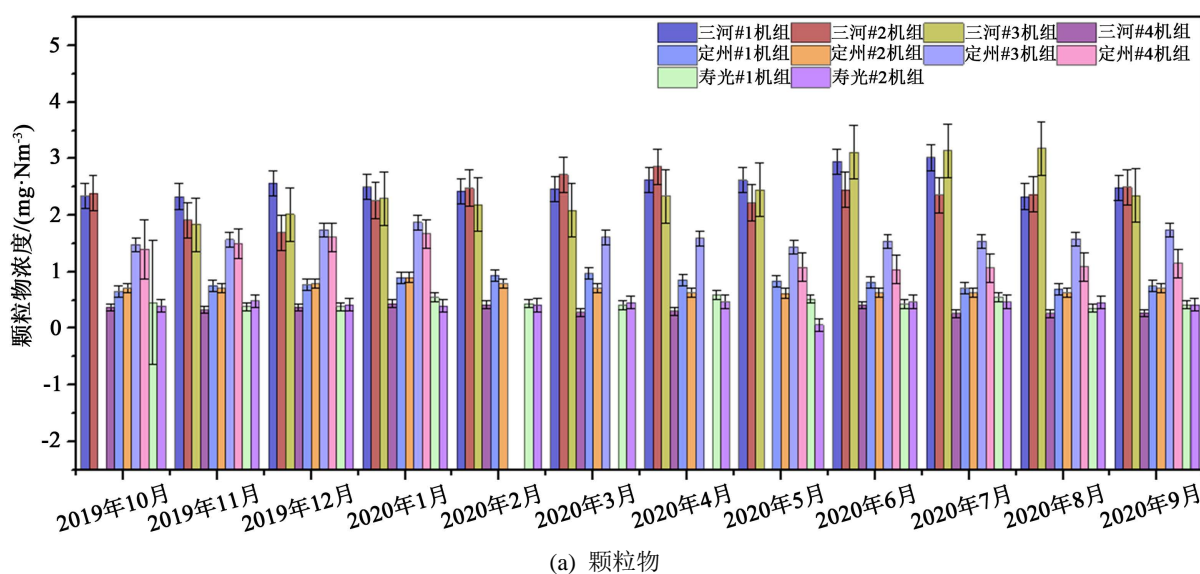


(c) 氮氧化物

**Figure 1.** Time change curve of air pollutant emission of typical coal-fired power plant  
**图 1.** 典型燃煤电厂大气污染物排放时间变化曲线

此外,我们还收集了国华公司旗下三个电厂 10 台机燃煤机组,自 2019 年 10 月至 2020 年 9 月共 12 个月间,主要大气污染物的监控数据(月均值、最大值和最小值)。

图 2 中图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)分别为 10 台燃煤机组在 12 个月的颗粒物、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的月均值浓度变化情况。从图中我们可以看出在燃煤机组实际运行过程中,大气污染物浓度会发生明显的波动。根据 12 个月的监测结果发现,三河#1、#2、#3 机组和定州#3、#4 机组的颗粒物、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的浓度要高于其对应的平均值,颗粒物浓度最高可以达到 3.18 mg·Nm<sup>-3</sup>、SO<sub>2</sub> 最高为 18.38 mg·Nm<sup>-3</sup> 以及 NO<sub>x</sub> 最高为 32.9 mg·Nm<sup>-3</sup>。三河#4 机组、定州#1、#2 机组以及寿光#1、#2 机组的污染物浓度要相对较低,颗粒物最低可以达到 0.06 mg·Nm<sup>-3</sup>、SO<sub>2</sub> 最低为 0.31 mg·Nm<sup>-3</sup> 以及 NO<sub>x</sub> 最高为 0.54 mg·Nm<sup>-3</sup>。10 台燃煤机组产生的颗粒物、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的平均浓度分别为 1.29 mg·Nm<sup>-3</sup>、12.03 mg·Nm<sup>-3</sup> 和 20.72 mg·Nm<sup>-3</sup>。国华公司旗下三个电厂 10 台机燃煤机组主要大气污染物不仅满足了超低排放要求,还基本上接近了“近零排放”的标准。



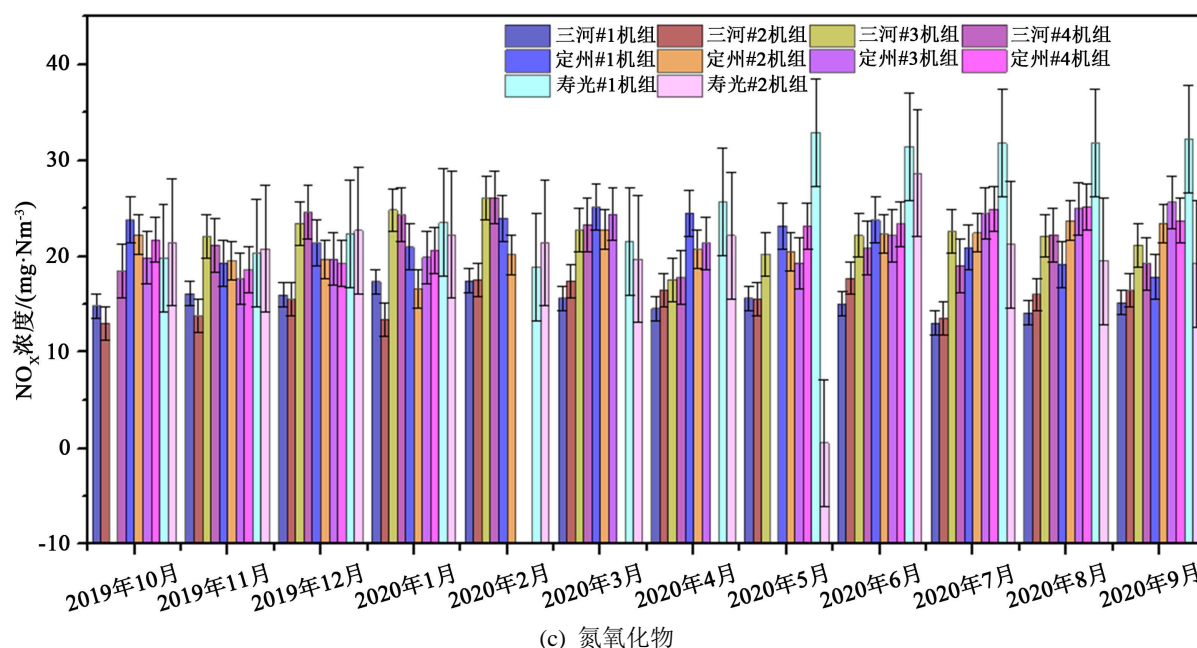


Figure 2. Changes in monthly average concentration of air pollutants in coal-fired units  
图 2. 燃煤机组大气污染物月均值浓度变化

基于上述燃煤电厂的实例分析，可以认为使燃煤电厂与燃气机组同等清洁的目标通过超低排放改造成为了现实，也反映了完成超低排放改造对方法、技术和工艺等方面的严苛要求。下一步的“近零排放”也将会更加艰难，因此，我们也需要迫切了解和解决我国燃煤电厂目前存在的问题，为近零排放打好基础。

## 4. 中美欧燃煤电厂的对比与分析

### 4.1. 执行对象的对比与分析

美国按照燃煤锅炉建设时间或改造时间进行分类，并且据此执行不同的排放标准。除此之外，美国还考虑了基于燃料类型的不同进行的分类。以  $\text{NO}_x$  绩效限值为例：将 1997 年 7 月 10 日之前改扩建的燃煤锅炉，基于燃料类型，分为“采自达科他州、或者蒙大拿州的褐煤超过 25%”、“采自达科他州、或者蒙大拿州的褐煤少于 25%”、“次烟煤”、“烟煤”、“无烟煤”和“其他煤型”共 6 种，并分别执行对应的限值[16]。欧盟现行的 2010/75/EU 指令中指出以 2013 年 1 月 7 日为界将燃煤机组分为现有机组新建机组，现有机组执行的排放限值要松于新建机组的排放标准。对于标准适用的机组，欧盟还按总额定热输入(MW)将其划分为三类：50~100 MW、100~300 MW、>300 MW，分别执行不同的排放限值。我国《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)中以 2012 年 1 月 1 日标准实施之日为界，将本标准实施之日前建成或环境影响评价文件已通过审批的火力发电锅炉定为现有锅炉；实施之日起环境影响评价文件通过审批的新建、扩建和改建的火力发电锅炉为新建锅炉[17]。除此之外，与美国和欧盟相比，中国还按电厂所在的地区进行分类，位于广西壮族自治区、重庆市、四川省和贵州省的燃煤锅炉排放限值要比重点地区的排放限值低 30%~50%。虽然，按地区分类是考虑到不同地区间经济技术和燃煤电厂的实际情况，但却忽略了机组功率和燃煤类型的影响。

尚毅林[18]等人研究了不同规模机组的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和烟尘的排放强度和减排潜力，结果表明机组规模越大，减排潜力越大；采用同一种处理技术时，机组规模越大  $\text{SO}_2$  和烟尘排放强度越低，且降低幅度明显。

张辉[14]等人发现机组容量为 200 MW 时,使用烟煤和无烟煤的  $\text{SO}_2$  的排放量分别为  $823.294 \text{ mg} \cdot (\text{KW} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $600.364 \text{ mg} \cdot (\text{KW} \cdot \text{h})^{-1}$ ; 机组容量为 600 MW 时,使用烟煤和无烟煤的  $\text{SO}_2$  的排放量分别为  $552.35 \text{ mg} \cdot (\text{KW} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $397.270 \text{ mg} \cdot (\text{KW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。由此可见,污染物的排放量与机组容量和煤种都有关系。

中国燃煤电厂排放标准中缺少对机组功率和燃煤类型的详细划分。我国可以借鉴欧盟国家的经验,对于不同容量的机组设定不同的排放标准,这样不仅避免过度改造增加机组负担,减轻企业大规模改造的投入成本,还可以调动企业进行改造的积极性和主动性。中国还应提倡省市对燃煤电厂进行摸底排查,详细了解各省市的情况,然后根据省市的煤种性质,燃煤电厂的机组容量,制定不同的排放要求。

## 4.2. 达标评判方法对比与分析

在《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)中,污染物排放限值是单一的浓度限值形式。与中国不同,在美国新源绩效标准(NSPS)中,排放限值分为绩效限值、脱除率限值、不透明度百分比限值,其中最为重要的绩效限值是将 30 天滑动平均尺度作为考核周期[19]。与美国相似,欧盟 2010/75/EU 指令中也是以日历年均值作为排放限值达标评判标准[20]。中国历年的燃煤电厂大气污染物排放标准尚未明确指出排放限值达标评判方法,普遍以小时均值来核查是否达标。因此,与欧美所使用的一段时间内的平均浓度相比,中国所使用的每小时的浓度标准要更加严格。

有学者[21]曾针对国内燃煤电厂进行了随机检测,结果表明受检测的已完成超低排放改造的燃煤电厂超标概率较大,存在较为明显的“验收达标,运行超标”的情况。若以欧盟国家的月均值作为考核标准,徐振等[22]人发现燃煤电厂烟尘、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的排放口达标率由小时浓度的 60% 提升至 80% 以上。由此可见,针对我国燃煤电厂的生产特点,更适合使用这种长期严格、短期放宽的评判方法。我国可以借鉴美国国家的评判方法,结合燃煤电厂的实况,将评判标准由小时浓度延长至 7 天或结合燃煤电厂的运行的周期进行制定。

## 4.3. 分析检测方法对比与分析

对于烟尘类污染物,美国 EPA 测定体系较我国更为细致,对烟气中 PM、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CPM 等颗粒物制定了详细的测试方法,并且可以分为烟道内过滤法与烟道外过滤法,在烟道外过滤法中对滤膜温度进行了规定。而中国则仅有烟道内过滤法测定可过滤颗粒物,无  $\text{PM}_{2.5}$  及 CPM 测试方法规定。中国固定源颗粒物测试方法均为烟道内过滤法,未对滤筒温度做出规定。对于气态污染物,中国按照气态污染物定量的方法的不同制定了不同的标准体系,并给出了明确的技术条件规定,而美国测试方法标准中仅规定了仪器测定污染物时需满足的性能指标(校准、采样、质控、漂移等),但对采用的分析技术并未作出规定,即无论分析仪采用何种方法(紫外、非分散红外、化学发光法或其他),只要满足性能指标即可。

为“近零排放”可以更快的成为现实,我国应尽快发展适用于我国高湿低浓度烟气环境下的分粒径颗粒物采样方法标准,完善颗粒物采样方法中对滤膜/滤筒的采样温度的要求,对固定源烟气中可凝结颗粒物及可过滤颗粒物的测试方法标准进行补充和完善,建立适用于对我国燃煤电厂烟气中的颗粒物进行稀释采样的方法标准。

## 4.4. 经济效益的对比与分析

美国曾采用命令控制型的政策手段和市场激励的经济手段成功降低了燃煤电厂  $\text{NO}_x$  的排放量,同时大大降低了减排成本[23]。我国制定的“超低排放”属于先命令控制型后经济鼓励型政策,虽然改造成功会减缓燃煤电厂带来的环境污染问题,但改造成本过大,这也导致一些企业不愿主动实施改造。通过研究发现,对于超低减排的设备投入和运行费用相较于常规污染治理设施基本增加了 30% 左右的成本,



这样一来,企业将会面临较大的经营压力。如果想要达到烟尘  $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{SO}_2$   $35 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{NO}_x$   $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,则需要再增加 10%的投入[24]。这也说明,我国在燃煤电厂领域,超低减排的补贴政策仍需进一步完善和细化。

对此,我国应该仿效美国充分利用经济来调动燃煤电厂减排的积极性。首先,考虑不同阶段和地区的燃煤电厂大气污染物控制,进一步完善和细化惩处手段和激励政策,对企业大气污染物减排成本进行有效补贴,同时对排放不达标的煤电企业制定明确的惩处方案。其次,在市场方面,激励企业积极研发和健全污染物控制措施,进一步降低大气污染物排放水平。对于积极进行超低技术研发和工程改造的企业和单位,予以经济上的奖励。

## 5. 结语

本文基于不同类型和装机容量的燃煤电厂在线监测数据,对燃煤电厂超低排放现状进行了实例分析,结果表明我国燃煤电厂已实现稳定超低排放,部分企业更接近“近零排放”水平。由于起步比较晚,我国燃煤电厂大气污染物排放标准仍存在一些不足之处。对此,本文在参考欧美国家经验的基础上,提出了以下几点建议:

- 1) 建议根据煤电机组功率和煤种性质细分燃煤电厂大气污染物排放标准,实现因地制宜、因煤制宜;
- 2) 建议结合燃煤机组容量和机组运行规律,明确制定燃煤电厂排放限值达标评判方法;
- 3) 建议补充和完善燃煤电厂大气污染物分析检测方法;
- 4) 建议完善燃煤电厂在改造过程中涉及的奖惩政策,以提高机组运行的稳定性和经济性。

综上所述,中国应进一步加强国际合作,制定和实施更为科学合理可行的燃煤电厂大气污染物排放标准,早日实现燃煤电厂近零排放。

## 基金项目

国家重点研发计划项目(大气污染源排放清单与重点行业管控技术研究示范, 2019YFC0214201); 国家自然科学基金项目(21507024, 21407122)。

## 参考文献

- [1] 王永英. 我国燃煤大气污染物控制现状及对策研究[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(8): 66-70.
- [2] 环境保护部. 关于印发全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案的通知[EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215\\_319170.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm), 2020-12-11.
- [3] 生态环境部. 国新办举行“十三五”生态环境保护工作新闻发布会[EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk15/202010/t20201021\\_804298.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk15/202010/t20201021_804298.html), 2020-12-20.
- [4] 酆建国, 朱法华, 孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状及挑战[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 1-10.
- [5] 胡月琪, 冯亚君, 王琛, 等. 燃煤锅炉烟气中 CPM 与水溶性离子监测方法及应用研究[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(1): 41-45.
- [6] 戴铁华, 李彦, 胡昌斌, 等. 大型燃煤电厂大气污染物近零排放技术方案[J]. 湖南电力, 2014(6): 47-50.
- [7] 邓伟妮. 中欧火电厂烟气排放规定对比研究[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 156-160.
- [8] 赵东阳, 靳雅娜, 张世秋. 燃煤电厂污染减排成本有效性分析及超低排放政策讨论[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2841-2848.
- [9] 国家环境保护局. GB 13223-1991. 燃煤电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991.
- [10] 国家环境保护总局. GB 1323-1996. 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [11] 国家环境保护总局. GB 13223-2003. 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [12] 国家环境保护总局. GB 13223-2011. 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.

- 
- [13] 浙江省生态环境厅. 浙江省燃煤电厂大气污染物排放标准: DB33/2147-2018[EB/OL]. [http://sthjt.zj.gov.cn/art/2018/9/30/art\\_1201816\\_25781409.html](http://sthjt.zj.gov.cn/art/2018/9/30/art_1201816_25781409.html), 2020-12-20.
- [14] 山东省生态环境厅. 山东省火电厂大气污染物排放标准: DB37/ 664-2019[EB/OL]. [http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjbhdfxbz/200804/t20080430\\_1123111.html](http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjbhdfxbz/200804/t20080430_1123111.html), 2020-12-20.
- [15] 天津市生态环境局. 天津市火电厂大气污染物排放标准: DB12/ 810-2018[EB/OL]. [http://sthj.tj.gov.cn/YWGWZ7406/FGBZ390/HBBZ3354/DFHJBHBZ9500/202010/t20201021\\_3975550.html](http://sthj.tj.gov.cn/YWGWZ7406/FGBZ390/HBBZ3354/DFHJBHBZ9500/202010/t20201021_3975550.html), 2020-12-20.
- [16] 宋国君, 赵英昶, 耿建斌, 等. 中美燃煤火电厂空气污染物排放标准比较研究[J]. 中国环境管理, 2017, 9(1): 21-28.
- [17] 孙雪丽, 胡正新, 王圣. 欧盟排放指令对我国火电厂大气污染物排放标准修订的启示[J]. 环境保护, 2019, 47(7): 62-65.
- [18] 尚毅林, 周徐海, 管蓓. 南京市燃煤电厂不同规模机组大气污染物排放强度研究[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(24): 105-107.
- [19] 张辉, 贾思宁, 范菁菁. 燃气与燃煤电厂主要污染物排放估算分析[J]. 环境工程, 2012, 30(3): 59-62, 30.
- [20] U.S. Government Publishing Office (2017) Electronic Code of Federal Regulations. [https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=07583fac0f905d38a2a98149fea1c602&mc=true&n=pt40.7.60&r=PART&ty=HTML#sp40.7.60.d\\_0a](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=07583fac0f905d38a2a98149fea1c602&mc=true&n=pt40.7.60&r=PART&ty=HTML#sp40.7.60.d_0a).
- [21] 赵伟, 孙雪丽, 胡正新, 王圣. 欧盟火电厂大气污染排放标准分析[J]. 电力学报, 34(4): 399-404.
- [22] 崔冬冬, 薛海涛, 于振波. 关于燃煤电厂超低排放改造的几点思考[J]. 科技资讯, 2020, 18(4): 28, 30.
- [23] 徐振, 莫华, 杨光俊, 等. 火电厂大气污染物自动监测达标判定现状与国际经验借鉴[J]. 环境影响评价, 2018, 40(1): 38-41.
- [24] 董文彬, 朱林, 朱法华. 中美两国火电厂 NO<sub>x</sub> 控制政策比较研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(2): 13-17.