

燃煤电厂超低排放湿法脱硫治霾影响分析

朱跃, 杨用龙

(华电电力科学研究院有限公司, 浙江省 杭州市 310030)

Influence Analysis on Haze Control of Ultra-low Emission Wet Flue Gas Desulfurization of Coal-fired Power Plants

ZHU Yue, YANG Yonglong

(Huadian Electric Power Research Institute Co., LTD., Hangzhou 310030, Zhejiang Province, China)

摘要: 根据燃煤电厂湿法脱硫出口污染物排放浓度及其排放绩效, 分析了超低排放湿法脱硫的治霾效果, 阐明了湿法脱硫有利于减少 SO_2 、颗粒物、 SO_3 的排放量, 这些污染物都是形成雾霾的前体物, 表明超低排放湿法脱硫对雾霾治理有积极的贡献。同时, 烟气超低排放具有协同治理有色烟羽的能力, 对于有色烟羽治理应采取因地制宜的策略。煤电行业广泛开展烟气超低排放改造后, 大气污染物排放量持续减少, 空气环境质量逐年改善, 湿法脱硫、烟气超低排放功不可没。

关键词: 燃煤电厂; 湿法脱硫; 超低排放; 雾霾治理; 有色烟羽

ABSTRACT: According to the emission concentration and emission performance of pollutants from wet flue gas desulfurization (WFGD) of coal-fired power plants. The haze control effects of ultra-low emission WFGD were analyzed. Emissions of SO_2 , particulate matter and SO_3 are reduced by WFGD. These pollutants are precursors of haze. It shows that it has positive contribution to haze control by ultra-low emission WFGD. At the same time, the colored plume has been ability to control cooperatively by ultra-low emission. The colored plume should be controlled according to local conditions. After the extensive transformation of ultra-low emission in electricity industry, emissions of air pollutants have been continuously reduced. The quality of air environment has improved year after year. The contribution is due to WFGD and ultra-low emissions.

KEY WORDS: coal-fired power plant; wet flue gas desulfurization; ultra-low emission; haze control; colored plume

0 引言

2014年9月, 国家发展改革委、环境保护部、国家能源局联合颁布了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》(发改能源[2014]2093号), 明确要求东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机组排放限值(SO_2 质量浓度 $< 35 \text{ mg/m}^3$, NO_x 质量浓度 $< 50 \text{ mg/m}^3$, 烟尘质量浓度 $< 10 \text{ mg/m}^3$)^[1], 自此拉开了我国燃煤电厂“超低排放”的序幕。

据生态环境部公布的信息, 截至2019年年底, 全国约有8.9亿kW的煤电机组实施了烟气超低排放改造, 通过烟气脱硫技术使 SO_2 排放浓度控制在 35 mg/m^3 以下。在我国煤电机组全面实施烟气超低排放的时代背景下, 石灰石-石膏湿法烟气脱硫(wet flue gas desulfurization, WFGD)技术^[2-4]作为湿法脱硫技术的典型代表, 因其突出的技术性能优点, 在煤电行业的市场占有率达95%以上, 因此, 下文除特别注明外, 湿法脱硫均指石灰石-石膏湿法脱硫技术。同时, 湿法脱硫装置还对烟气中的颗粒物(particulate matter, PM)、 SO_3 具有一定的协同脱除能力, 湿法脱硫为我国煤电行业的 SO_2 减排和雾霾前体物减排做出了关键性贡献。

然而, 近年来也有观点认为烟气湿法脱硫致霾, 质疑湿法脱硫对大气环境治理的贡献^[5]。因此, 本文结合湿法脱硫的实际应用情况, 分析湿法脱硫的治霾效果, 厘清雾霾形成的主要原因, 为雾霾治理提供指导性依据。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0603201-03)。

Project Supported by National Key Research and Development Program (2017YFB0603201-03).

1 湿法脱硫及其治霾效果

湿法脱硫技术起源于英国,日本、德国、美国等发达国家对燃煤电厂实施烟气脱硫始于 20 世纪 70 年代初。1992—2002 年,我国引入欧、美、日等发达国家的各种烟气脱硫技术,经过广泛实践,湿法脱硫因脱硫效率高、可靠性好、操作简便、脱硫剂易得等优点,得到广泛应用。湿法脱硫技术经过近半个世纪的发展,成为世界各国首选的烟气脱硫技术,其中,日本湿法脱硫占 98%,美国占 92%,中国占 91%,德国占 90%,世界平均占 85%^[6]。

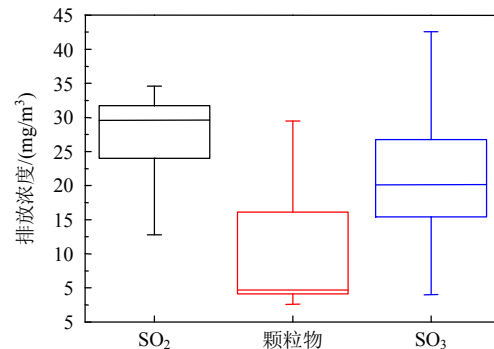
雾是自然现象,霾与空气污染有关,当两者同时出现时,被称为雾霾。目前,世界各国均以环境空气中 PM_{2.5}(指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物,也称细颗粒物)浓度来表征雾霾污染的严重程度。环境空气中的 PM_{2.5} 来源包括自然源和人为源。人为源从成分上分为一次 PM_{2.5} 和二次 PM_{2.5}。一次 PM_{2.5} 由污染源(煤炭源、工业源、移动源、生物质源、城市扬尘、生活源等)直接排放到大气中,二次 PM_{2.5} 是气体在大气环境中发生复杂的化学反应形成的颗粒物,如空气中的挥发性有机化合物(VOCs)与 NO_x 发生光化学反应,增强了大气的氧化性,可将空气中的 SO₂ 氧化为硫酸盐颗粒,NO_x 氧化为硝酸盐颗粒,VOCs 氧化为有机颗粒物等^[7-8]。另外,大气中的 SO₃(硫酸根离子、硫酸雾、气溶胶)直接与无机盐离子、碱性物质等结合形成硫酸盐颗粒。

因此,只要能够减少颗粒物、SO₂、NO_x、SO₃、VOCs 等污染物的排放,就能降低大气中的 PM_{2.5} 浓度,对雾霾治理起到积极作用。但由于二次 PM_{2.5} 形成的复杂性,使得单一污染物的减排与雾霾治理之间并不是呈简单的线性关系,大气中 PM_{2.5} 浓度下降是各种污染物共同减排的效果。

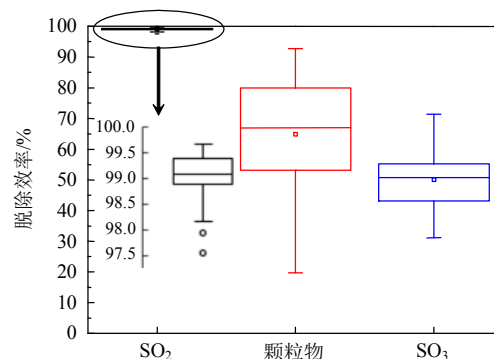
现场检测了全国范围内 81 台燃煤机组超低排放湿法脱硫装置排放的 SO₂、颗粒物(除特别说明,下文均指可过滤颗粒物)、SO₃ 浓度及其对污染物的脱除效率,结果如图 1 所示。由图 1 可知,湿法脱硫装置的 SO₂、颗粒物、SO₃ 平均排放浓

度分别为 27.50、9.25、21.00 mg/m³(标态、干基、6%O₂,下文除特别注明外,监测结果均为此状态),其对 SO₂、颗粒物、SO₃ 的平均脱除率分别为 99.06%、64.87%、50.09%,其中 SO₃ 排放浓度较好地服从正态分布,SO₃ 排放浓度值范围为 4.01~42.59 mg/m³;SO₂、颗粒物排放浓度均呈偏态分布,SO₂ 排放浓度值范围为 12.80~34.60 mg/m³,颗粒物排放浓度值范围为 2.60~29.50 mg/m³,表明大部分监测数据分布在低浓度区域,低于平均值,与实际排放情况一致。以上监测数据充分说明湿法脱硫能将 SO₂、颗粒物、SO₃ 排放浓度控制在较低水平。上述 81 台燃煤机组中有 31 台机组颗粒物排放浓度超过 10 mg/m³,为了满足超低排放要求,均在湿法脱硫装置下游配备了湿式电除尘器(wet electro-static precipitator, WESP),WESP 出口颗粒物、SO₃ 排放浓度监测结果如图 2 所示,均低于 10 mg/m³。

为了研究燃煤电厂超低排放湿法脱硫装置的



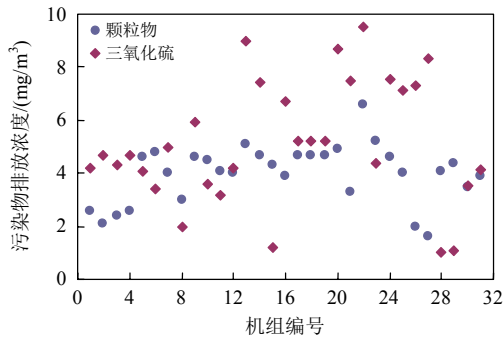
(a) 排放浓度



(b) 脱除效率

图 1 湿法脱硫 SO₂、SO₃、颗粒物的排放浓度及其脱除效率

Fig. 1 Emission concentration and removal efficiency of SO₂, SO₃ and PM of WFGD

图2 湿式电除尘器颗粒物、SO₃的排放浓度Fig. 2 Emission concentration of SO₃ and PM of WESP

污染物排放绩效,引入污染物排放绩效模型^[9-10],计算公式如式(1)所示。

$$\theta = \varepsilon \times C_{\text{out}} \quad (1)$$

式中: θ 为某一污染物的排放绩效, $\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; ε 为单位时间内烟气排放体积与机组发电量比值, $3.15 \leq \varepsilon \leq 3.75$, $\text{m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$,取值与空气过剩系数正相关; C_{out} 为某一污染物排放浓度, mg/m^3 。

根据式(1)计算得到湿法脱硫装置 SO₂、颗粒物、SO₃的排放绩效范围分别为 86.63~103.13、29.14~34.69、66.15~78.75 $\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,湿式电除尘器颗粒物、SO₃排放绩效范围分别为 12.60~15.00、16.07~19.13 $\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。2018年电力行业统计数据,我国单位火电发电 SO₂、颗粒物排放绩效分别为 200、40 $\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[11]。显然,实施超低排放改造的燃煤机组,SO₂、颗粒物的排放绩效远低于行业平均水平,大气中二次 PM_{2.5}的前体物浓度也因此大幅降低,对雾霾治理有显著贡献。

目前,我国已建成全球最大的清洁节能煤电体系,燃煤电厂超低排放的成功经验可以为其他行业的污染物控制提供参考^[12]。

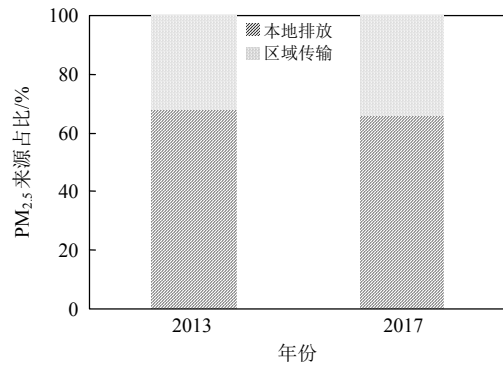
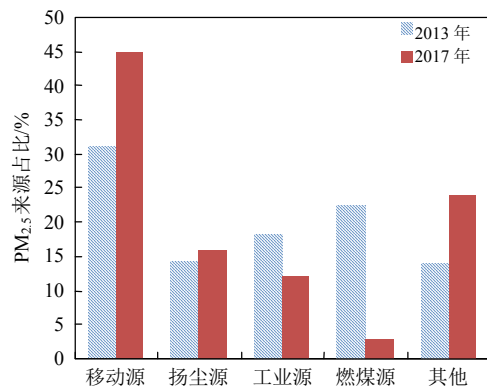
2 烟气超低排放协同治霾效果

2.1 烟气超低排放协同减排 PM_{2.5}

雾霾主要是由颗粒物、无机盐、重金属、挥发性有机物(VOCs)等组成的气溶胶系统。通过降低 SO₂、NO_x、颗粒物的排放量,有利于协同治理雾霾。

为了完成《大气十条》要求的“有针对性进行大气污染治理工作”,我国部分城市开展了

PM_{2.5}的源解析工作。北京市大气中 PM_{2.5}的源解析研究结论如图3^[13-14]所示。

(a) 本地和区域传输 PM_{2.5}比例(b) 本地 PM_{2.5}来源图3 北京市大气中 PM_{2.5}来源分析Fig. 3 Sources of PM_{2.5} in air of Beijing

研究表明:北京市大气中 PM_{2.5}主要来源中本地排放约占 67%,区域传输约占 33%,随着污染级别增大,区域传输贡献呈明显上升趋势,重污染日区域传输占 55%~75%^[13]。2017年,北京市本地排放的 PM_{2.5}来源占比关系为移动源>其他>扬尘源>工业源>燃煤源,并且,燃煤电厂全面实施超低排放改造的期间,燃煤源排放的 PM_{2.5}由 2013 年的 22.4%下降至 2017 年的 3%,同比下降 19.4%,减排效果明显,燃煤源已经不是北京市大气中 PM_{2.5}主要来源。

选取 27 台超低排放燃煤机组作为研究对象,检测其总排放口 PM_{2.5}浓度值,检测结果如图 4 所示。

由图 1、4 可知,燃煤电厂实施超低排放改造后,颗粒物排放浓度相对于 GB 13223—2011 排放标准要求大幅下降。燃煤电厂超低排放系统对烟气中 PM_{2.5}协同减排效果明显,燃煤电厂总排

放口 $\text{PM}_{2.5}$ 排放浓度控制在 5.0 mg/m^3 以下, 有效降低了燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量, 从源头上消减了大气雾霾的前体物。

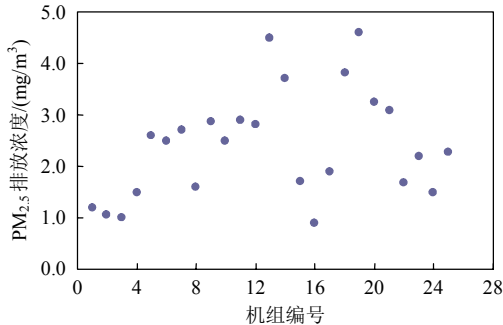


图4 超低排放燃煤机组 $\text{PM}_{2.5}$ 排放浓度
Fig. 4 Emission concentration of $\text{PM}_{2.5}$ of ultra-low emission coal-fired units

2.2 烟气超低排放协同治理“有色烟羽”

烟气中的 SO_3 在湿法脱硫系统中因浆液喷淋急剧降温会冷凝形成 $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶, 烟气中的气溶胶、水汽和其他污染物会因天空背景色和光照、观察角度等原因发生颜色的细微变化, 产生具有白色、灰色、黄色、蓝色、棕色等视觉效果烟羽, 即“有色烟羽”^[2]。其中, 蓝色/黄色烟羽因其含有较高的 SO_3 等可凝结颗粒物具有污染性环境影响, 极易与大气中 NH_3 等发生反应而形成硫酸盐, 这是二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分。因此, “有色烟羽”治理主要是减少 SO_3 排放量。

目前, 国内“有色烟羽”治理技术包括烟气冷凝(塔内冷凝和塔外冷凝)、烟气加热、烟气冷凝再加热和溶液吸湿技术, 但这些技术对燃煤电厂烟气中的 SO_3 脱除有限。不管采用哪种“有色烟羽”治理技术, 均具有污染物协同脱除作用, 但“有色烟羽”治理技术仅对污染物排放浓度有一定影响, 在污染物种类上并没有实质不同, 即“有色烟羽”治理技术和湿法脱硫外排烟气的主要成分均为 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CO 、水蒸气、烟尘、 SO_2 、 SO_3 、 NO_x 、可凝结颗粒物等。因此, 两者外排烟气成分并没有本质差异。超低排放后烟气污染物的浓度水平极低, 对大气环境质量的影响已相对较小, 盲目追求降低烟气污染物排放浓度的目标, 导致燃煤电厂能耗增加, 会间接增

加发电煤耗, 烟气污染物排放量反而增加, 耗费大量宝贵资源, 得不偿失。

3 污染物排放与空气环境质量现状

3.1 污染物排放现状

根据中国统计年鉴的数据^[15], 2013—2017年全国污染物(SO_2 、 NO_x 、颗粒物)排放量统计如图5所示。

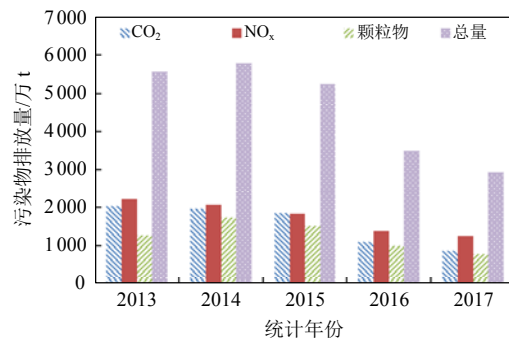


图5 2013—2017年全国污染物排放情况统计
Fig. 5 Statistics on national pollutant emission between 2013 and 2017

由图5可知, 近5年来, 颗粒物、 SO_2 、 NO_x 排放量均呈逐年下降的趋势, 这5年正是燃煤电厂实施环保达标排放改造和超低排放改造的关键时期。同时, 我国环境空气质量逐年持续改善, 也间接反映了环保改造对空气环境质量的积极影响。

图6为中国电力企业联合会2014—2018年电力行业污染物排放情况的统计数据。2018年煤电行业 SO_2 、 NO_x 、颗粒物的排放量分别约为99万、96万、21万 t, 3种污染物的年总排放量由2014

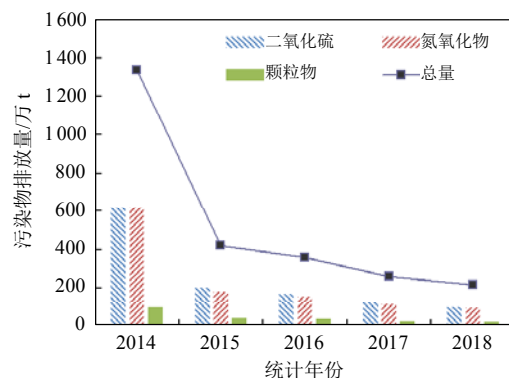


图6 2014—2018年电力行业污染物排放情况统计
Fig. 6 Statistics on pollutant emission in power industry between 2014 and 2018

年的1338万t下降至2018年的216万t,下降约83.9%,其中,SO₂排放量相比2006年的SO₂排放量峰值(1350万t左右)下降约92.7%,比1980年的245万t下降约59.6%,这充分说明燃煤电厂超低排放湿法脱硫改造对SO₂减排起到关键性作用。

3.2 空气质量现状

随着国家及地方的环保政策日益严格,全国范围内实施燃煤电厂超低排放改造。经过近5年的技术改造和检测评估,燃煤电厂超低排放节能减排效果显著。

根据我国生态环境部数据^[16],全国338个城市的空气质量延续了过去5年的改善势头,平均达标天数比例由78%升至79.3%,193个城市的优良天数比例大于80%,同比增加18个。2018年全国338个城市PM_{2.5}、SO₂、NO₂平均浓度统计如表1所示。

表1 2018年全国338个城市PM_{2.5}、SO₂、NO₂平均浓度

Tab. 1 Average concentrations of PM_{2.5}, SO₂ and NO₂ of 338 cities in 2018

项目	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂
2017年排放浓度/(μg/m ³)	43	18	31
2018年排放浓度/(μg/m ³)	39	14	29
2018年比2017年下降水平/(μg/m ³)	4	4	2
2017达标城市比例/%	35.8	99.1	80.2
2018达标城市比例/%	43.8	100.0	84.6

由表1可知,SO₂成为首个所有城市均能实现达标的污染物,2018年PM_{2.5}、NO₂平均浓度比2017年均有一定程度下降。全国重污染天气的发生频次、影响范围、污染程度都有大幅度降低。煤电行业实施的超低排放为我国空气质量好转做出了重要贡献。

4 结论

1)湿法脱硫是世界范围内煤电行业的主流脱硫技术,世界平均占85%,中国占90%以上。根据雾霾成因分析,只要减少颗粒物、SO₂、NO_x、SO₃、VOCs等污染物的排放,就对雾霾治理起到积极的效果。

2)超低排放燃煤机组湿法脱硫出口污染物排放浓度低于国家环保要求,SO₂、颗粒物的排放绩效远低于行业平均水平。

3)通过脱硫、除尘、脱硝改造形成的烟气超低排放系统,协同减排PM_{2.5}效果明显,总排放口PM_{2.5}排放浓度控制在5.0mg/m³以下,煤电行业实施超低排放,大大减少了污染物排放,对治霾起到了重要作用。

4)燃煤电厂“有色烟气”治理工作应因地制宜、按需实施,不应“一刀切”,避免盲目追求污染物减排,导致能耗、物耗增加,反而间接增加污染物排放,造成资源浪费,得不偿失。

5)煤电行业实施超低排放改造以来,我国空气质量持续好转,我国空气质量逐年改善,燃煤电厂超低排放功不可没。

我国政府不断加大环境治理力度,空气质量持续改善,但雾霾天气仍时有发生。大气雾霾治理是个漫长而复杂的过程,应从政府规划与调控、能源结构调整以及行业技术革新等方面同时进行。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会办公厅. 关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》的通知:发改能源[2014]2093号[EB/OL]. (2014-09-12)[2020-02-20]. http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201409/t20140919_626242.html.
- [2] 张赢丹,丁俊,丁宏. 单塔双区脱硫技术在燃煤电厂中的应用[J]. 浙江电力, 2018, 37(3): 73-76.
- [3] 田浩臣,蔡琳,蒋婷,等. 电厂SCR脱硝系统与石灰石-石膏湿法脱硫系统故障分析[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 11-16.
- [4] 张建华,冯英山. 燃煤电厂湿法脱硫系统运行环保监督工作探讨[J]. 华电技术, 2018, 40(12): 63-65.
- [5] 朱维群,唐震,房亚杰,等. 湿法脱硫烟气中霾的分析及解决途径[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 46-50.
- [6] 澎湃新闻. 环保部回应湿法脱硫加剧雾霾:质疑一直没断过,要靠数据说话[EB/OL]. (2017-09-02)[2020-02-20]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1782914.
- [7] 朱法华. 坚定雾霾治理的正确方向[EB/OL]. (2019-03-19)[2020-02-20]. http://www.cpn.com.cn/zdyw/201903/t20190319_1126045.html.

- [8] 李岚淼, 李龙国, 李乃稳. 城市雾霾成因及危害研究进展[J]. 环境工程, 2017, 35(12): 92-97.
- [9] 杨用龙, 苏秋风, 张杨, 等. 燃煤电站典型超低排放工艺的 SO₃ 脱除性能及排放特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2962-2970.
- [10] 杨用龙, 苏秋风, 张杨, 等. 燃煤电站湿式电除尘器对 PM_{2.5}、SO₃ 和 Hg 的脱除性能及排放特性[J]. 应用化工, 2018, 47(6): 1127-1131.
- [11] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2019[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [12] 王韵杰, 张少君, 郝吉明, 等. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1755-1762.
- [13] 北京市环境保护局. 北京市 PM_{2.5} 来源解析正式发布 [EB/OL]. (2014-04-16)[2020-02-20]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgzn/jgsz/jjgigszjzz/xcjyc/xwfb/607219/index.html>.
- [14] 北京市生态环境局. 最新科研成果新一轮北京市 PM_{2.5} 来源解析正式发布 [EB/OL]. (2018-05-14)[2020-02-20]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgzn/jgsz/jjgigszjzz/xcjyc/xwfb/832588/index.html>.
- [15] 国家统计局. 中国统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [16] 生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2019.

收稿日期: 2020-03-04。

作者简介:



朱跃

朱跃(1962), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事能源环保技术管理与研发工作, yue-zhu@chder.com;



杨用龙

杨用龙(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事火电厂环保技术开发与应用研究工作, yonglong-yang@chder.com。

(责任编辑 辛培裕)