



王春艳,申进朝,周伟峰,等. 燃煤电厂 CPM 排放状况及其环境效应研究[J]. 轻工学报,2022,37(6):101-109.

WANG C Y, SHEN J C, ZHOU W F, et al. Researches on CPM status emitted by coal-fired power plants and its environmental effects[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(6):101-109. DOI:10.12187/2022.06.013

燃煤电厂 CPM 排放状况及其环境效应研究

王春艳¹, 申进朝², 周伟峰³, 刘红艳⁴, 刘桓嘉⁵

1. 安阳工学院 化学与环境工程学院, 河南 安阳 455000;
2. 河南省生态环境监测中心, 河南 郑州 450046;
3. 河南省郑州生态环境监测中心, 河南 郑州 450007;
4. 河南省安阳生态环境监测中心, 河南 安阳 455000;
5. 河南师范大学 环境学院, 河南 新乡 453002

摘要: 参考 2017 年 EPA 推荐的《固定污染源废气 可凝结颗粒物的测定 干冲击瓶法》(Method 202) 和我国《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836-2017), 设计并应用同步采集可过滤颗粒物 (Filterable Particulate Matter, FPM) 和可凝结颗粒物 (Condensable Particulate Matter, CPM) 的装置, 测定了国内华北地区 3 家燃煤电厂 A、B、C 排放的 FPM、CPM 及其中水溶性离子和金属元素质量浓度, 并应用计算流体力学模拟一定气象条件时固定源排放 CPM 形成 PM_{2.5} 的扩散轨迹。结果表明: 燃煤电厂 A、B、C 排放的总颗粒物 (Total Particulate Matter, TPM) 水平均较低, 质量浓度分别为 (8.63±3.11) mg/m³、(19.05±8.85) mg/m³、(5.07±1.59) mg/m³, 其中 CPM 占比约 90%; CPM 中以 CPM_{无机} 为主, SO₄²⁻、NH₄⁺、Na⁺ 等水溶性离子是其中重要组分, 金属尤其是重金属的排放不容忽视; 在不利于污染物扩散的气象条件下, CPM 累积在大气边界层下面的固定源周边大气中, 引起了 PM_{2.5} 短时间内累积升高, 是重污染天气形成的重要因素。

关键词: 可过滤颗粒物; 可凝结颗粒物; 超低排放; 燃煤电厂; 环境效应

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2022)06-0101-09

0 引言

近年来, 我国部分地区常发生雾霾天气, 燃煤电厂湿法脱硫后高湿烟气和其中溶解性颗粒物的排放, 被认为是导致雾霾产生的重要因素^[1]。美国环保署 (EPA) 将固定源排放的一次颗粒物定义为可过滤颗粒物 (Filterable Particulate Matter, FPM) 和可凝结颗粒物 (Condensable Particulate Matter, CPM), 二者之和定义为总颗粒物 (Total Particulate Matter,

TPM)。我国关于固定源排放颗粒物的测定标准《固定污染源排气中颗粒物和气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)^[2] 和《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836—2017)^[3] 中只规定了 FPM 的测定方法, 不包括 CPM 的测定方法, 但 CPM 在大气中会形成空气动力学直径 ≤ 1 μm 的颗粒物, 即 PM₁, 是大气中 PM_{2.5} 和气溶胶物质的重要前体物, 也是特定气象条件下雾霾形成的重要成分^[4-6]。国际上关于 CPM 的研究始于

收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42007204)

作者简介: 王春艳 (1976—), 女, 河南省安阳市人, 安阳工学院高级工程师, 博士, 主要研究方向为大气污染控制和环境监测技术。E-mail: chen.lan00000@163.com

通信作者: 申进朝 (1977—), 男, 河南省郑州市人, 河南省生态环境监测中心教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为环境监测技术。E-mail: zhengsjc@126.com

20世纪90年代,一致认为CPM的排放不容忽视^[4-8]。国内关于CPM的研究尚处于起步阶段,关于其形成机理的研究较少^[9-11],对其环境效应尚没有科学的评估方法。为进一步明确我国燃煤电厂CPM排放状况及其对周边环境空气质量的影响,本文参考2017年EPA推荐的《固定污染源废气 可凝结颗粒物的测定 干冲击瓶法》(Method 202)(下文简称Method 202)^[12]和我国《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836—2017)^[3],设计并应用同步采集FPM和CPM的装置,测定了国内华北地区3家燃煤电厂FPM、CPM及其中9项水溶性离子和20种金属元素质量浓度,并研究其排放特征,初步探索其环境效应,以期为准确解析大气中PM_{2.5}的来源提供技术支持。

1 实验方法

1.1 排放源的选择

选择华北地区运行稳定的燃煤电厂A、B和C作为监测对象,其烟气治理工艺及监测期间生产工况见表1。其中,B是一家企业自备电厂,使用1台220 t/h燃煤锅炉,锅炉型号HG-220/9.8-L·PM18。

1.2 颗粒物监测及其组分分析

1.2.1 颗粒物采样装置 参考2017年EPA推荐的Method 202^[12]和我国《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836—2017)^[3],搭配国内便携式低浓度大流量自动烟尘气测试仪,建立了同步采集CPM和FPM样品的TPM采样系统,装置示意图见图1。该装置FPM滤膜头安装有FPM滤膜;采样管需加热至110~120℃以防止烟气凝结;全程加热的聚四氟乙烯管路连接垂直安装的冷凝器和冷凝液收集瓶,其后顺次连接干燥冲击瓶、CPM滤膜夹、温差电偶和测试仪主机。其中,干燥

冲击瓶和CPM滤膜收集进一步凝结的液滴或颗粒物;冷凝器将烟气降温至30℃以下,冷凝液收集瓶和干燥冲击瓶置于20~30℃的恒温水箱中,确保烟气通过CPM滤膜后温度保持在20~30℃范围内。

1.2.2 样品采集与处理 按照2017年EPA推荐的Method 202^[12]方法进行采样前准备、样品采集、氮气吹洗和样品回收。

1.3 样品组分的测定

1.3.1 FPM样品的测定 参照《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836—2017)^[3]测定FPM质量浓度。

1.3.2 CPM样品的测定 采样现场收集的冷凝液和CPM滤膜均是CPM样品。

1) CPM_{无机}样品的测定

按照EAP推荐的Method 202^[12]方法,用超纯水超声提取CPM滤膜,将提取后的水相与现场采集的水相样品合并,形成CPM_{无机}样品,定容至500 mL,待测。测定因子、测定方法、仪器等信息见表2。①采用重量法测定CPM_{无机}质量浓度。量取250 mL或300 mL样品,转移至500 mL或容量更小的烧杯中,在(105±1)℃烤箱中蒸发至体积<10 mL;在<30℃的室温条件下自然晾干,置于无水硫酸钙干燥器中干燥24 h,每隔6 h称重至恒重,即前后两次称重相差不超过0.5 mg。②分别量取50 mL CPM_{无机}样品用于9项水溶性离子质量浓度的测定和20种金属元素的分析。

2) CPM_{有机}样品的测定

按照EPA推荐的Method 202^[12]方法进行CPM_{有机}质量浓度的测定。

1.4 质量控制措施

1.4.1 样品采集 采样前对微压计、皮托管和烟气采样系统进行气密性检验,确保每2 min泄露量不

表1 3家燃煤电厂烟气治理工艺和生产工况

Table 1 Flue gas treatment technology and production conditions of three coal fired power plants

| 企业 | 设计发电量/MW | 烟气治理工艺 | 运行负荷/% | 烟囱高度/m | 烟气排放量/(m ³ ·h ⁻¹) |
|----|----------|--|--------|--------|--|
| A | 4×300 | 选择性催化还原(SCR)脱硝+高频高效静电除尘器除尘+石灰石-石膏湿法脱硫 | 55 | 240 | 260×10 ⁴ |
| B | 50 | 选择性非催化还原(SNCR)脱硝+石灰石-石膏湿法脱硫+电袋复合除尘器除尘 | 95 | 90 | 21×10 ⁴ |
| C | 2×330 | SCR脱硝+MGGH(降温)+高效高频静电除尘器除尘+石灰石-石膏湿法脱硫+MGGH(升温) | 60 | 210 | 180×10 ⁴ |

大于 0.6 L。采用等速采样方法对每个排放源采集 6 次样品,每次采样体积不小于 1 m³。每个排放源均采集全程序空白,计算结果扣除空白值。

1.4.2 实验室分析质量控制 实验室分析用的各种试剂和超纯水质量均符合分析方法的要求,样品及时分析。具体质量控制措施:1)重量法分析。天平使用前必须进行校准,称量在恒温恒湿条件下进行,避免静电对称量造成的影响。2)水溶性离子分析。标准曲线的相关系数 ≥ 0.995。采用内标法检查仪器是否发生漂移或有干扰产生,即测试每批次(≤20 个)样品时,选择 1 个标准曲线中间点质量浓

度的溶液,其质量浓度测定结果与标准曲线该点质量浓度之间的相对误差 ≤ 10%。每批次(≤20 个)样品均进行实验室空白、平行双样、加标回收率的测定。实验室空白测定结果应低于方法测定下限,平行样测定值的相对偏差应 ≤ 20%,加标回收率应为 80%~120%。3)元素分析。每次分析均绘制校准曲线,使相关系数达到 0.999 以上。其他质量控制措施同措施 2)。

2 结果与分析

2.1 燃煤电厂 FPM、CPM、TPM 排放水平及其特征分析

3 家燃煤电厂 FPM、CPM 和 TPM 排放水平统计结果见表 3。由表 3 可知,B 厂排放 TPM 质量浓度最高,为(19.05±8.85) mg/m³,C 厂排放 TPM 质量浓度最低,为(5.07±1.59) mg/m³。结合表 1 可知,样品采集期间,B 厂运行负荷为 95%,远大于 A 厂和 C 厂,较高的运行负荷增加了 B 厂烟气治理负荷,这应是其 TPM 排放水平较高的主要原因。A、B、C 燃煤电厂排放的 TPM 的主要组分是 CPM,其占比分别约为 92%、89%和 89%。L. Corio 等^[13]归纳了美国 18 个燃煤锅炉 CPM 的排放水平,CPM 平均占比为 49%。而本研究中 CPM 平均占比约 90%,这表明目前我国燃煤电厂烟气治理设施处理

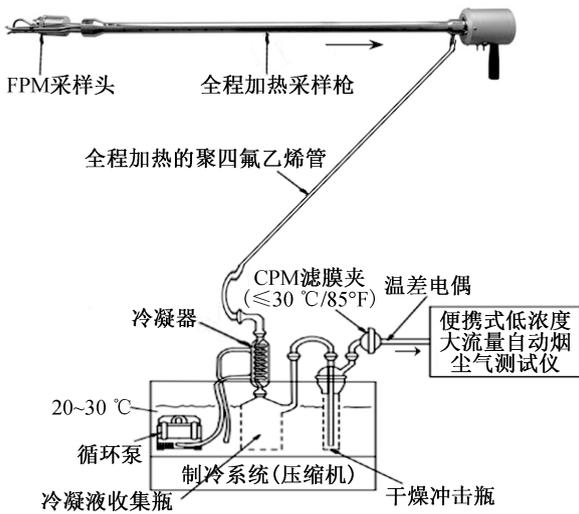


图 1 固定源 TPM 采样装置示意图

Fig. 1 Sampling device for TPM

表 2 测定因子、测量方法、仪器等信息表

Table 2 Determination factors, determination methods, instruments and other information

| 序号 | 测定因子 | 测定方法 | 仪器及型号 |
|----|---|-------------|-----------------------|
| 1 | F ⁻ 、Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ 、NH ₄ ⁺ 、Na ⁺ 、K ⁺ 、Mg ²⁺ 、Ca ²⁺ | 离子色谱法 | 阴阳离子双通道离子色谱仪,瑞士万通 883 |
| 2 | Be、Se、Al、V、Ag、Cr、Mn、Sb、Fe、Mo、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba、Ti、Pb | 电感耦合等离子体质谱法 | 电感耦合等离子体质谱仪,7700X |
| 3 | FPM、CPM _{有机} 、CPM _{无机} | 重量法 | 精密电子天平,CPA225D |
| 4 | Hg | 冷原子吸收分光光度法 | 冷原子吸收测汞仪,LEEMAN LABS |

表 3 3 家燃煤电厂 FPM、CPM 和 TPM 排放水平统计结果

Table 3 Concentrations of FPM, CPM and TPM emitted by three coal fired power plants

| 燃煤电厂 | 指标 | 质量浓度/(mg·m ⁻³) | | | | | CPM 与 TPM 质量浓度比值/% |
|------|------|----------------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|--------------------|
| | | FPM | CPM _{无机} | CPM _{有机} | CPM | FPM | |
| A | C±S | <1 | 6.69±1.94 | 1.21±0.99 | 7.89±2.69 | 8.63±3.11 | 91.6±3.98 |
| | RS/% | — | 29 | 81 | 34 | 36 | 4 |
| B | C±S | 4.20±2.80 | 15.16±5.75 | 0.31±0.20 | 15.47±5.66 | 19.05±8.85 | 89.4±10.10 |
| | RS/% | 65 | 38 | 24 | 35 | 46 | 13 |
| C | C±S | <1 | 0.44±0.69 | 4.57±1.59 | 4.13±1.43 | 5.07±1.59 | 89.4±2.84 |
| | RS/% | — | 25 | 175 | 35 | 31 | 3 |

注:—表示未检出,下同。

FPM 的效果较好,排放颗粒物以 CPM 为主。3 家燃煤电厂 FPM、CPM_{有机} 和 CPM_{无机} 排放情况见图 2。由图 2 可以看出,A、B、C 燃煤电厂排放的 CPM 中的主要组分是 CPM_{无机},平均占比分别为 CPM 的 85%、98%、90%。H. H. Yang 等^[14]测定的燃煤电厂排放的 CPM_{无机} 占比约为 CPM 的 90%,与本研究较接近。CPM_{有机} 占比较低,这与电厂较高的煤炭燃烧效率和烟气处理工艺有关,湿法脱硫和湿式电除尘工艺对有机物(多环芳烃、二噁英等)有协同处理作用^[15-16]。C 厂具有最低的 CPM 和 TPM 排放水平,这是因为其经 SCR 脱硝后,采用了低低温电除尘技术,即由低低温省煤器(MGGH)将烟气由 130 ~

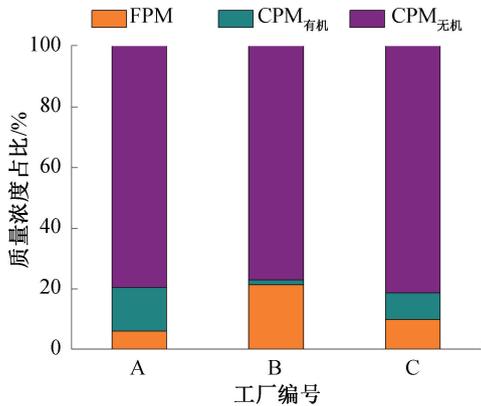


图 2 3 家燃煤电厂 FPM、CPM_{有机} 和 CPM_{无机} 排放情况

Fig. 2 Mass concentration percent of FPM, Inorganic CPM and organic CPM emitted by three coal fired power plants

140 °C 降温至 90 ~ 100 °C,该过程可去除大部分 SO₃,大幅提高湿法脱硫的协同除尘效果^[16]。

2.2 CPM 组分特征分析

2.2.1 水溶性离子组分特征及其形成机理分析

3 家燃煤电厂 CPM 中水溶性离子质量浓度统计结果见表 4。由表 4 可知,A、B、C 燃煤电厂排放的水溶性离子总质量浓度相差不大,分别占 CPM 的 61%、30%和 57%,这表明水溶性离子是 CPM 的重要组成部分。A 厂与 C 厂排放的 CPM 中水溶性离子组分特征类似,SO₄²⁻ 质量分数最高,平均占比分别为 60.5%和 45.3%,是 CPM 中主要水溶性离子组分;其次是 Na⁺,平均占比分别为 21.5%和 22.5%。这是由于 3 家燃煤电厂采用石灰石-石膏湿法脱硫,烟气中的 SO₂ 可与浆液中的 Ca(OH)₂ 反应生成 CaSO₄ 沉淀,去除后,少量 CaSO₄ 会溶于湿烟气形成水溶性离子 SO₄²⁻。同时,烟气中 SO₂ 可进一步氧化为 SO₃,其在有 H₂O 条件下产生 SO₄²⁻^[15]。而 B 厂排放的 CPM 中 NH₄⁺ 质量分数最高,其次是 SO₄²⁻。这与杨柳等^[9]的研究结果相似。B 厂排放的 CPM 中 NH₄⁺ 和 SO₄²⁻ 平均占比分别为 46.9%和 37.8%,共 84.7%,这表明脱硝过程也是湿烟气中 CPM 形成的重要原因。A 厂和 C 厂采用 SCR 脱硝技术,B 厂采用 SNCR 脱硝技术,均以 NH₃ 作还原剂。NH₃ 除与 NO_x 发生反应生成 N₂ 和 H₂O 之外,还会产生氨逃逸。逃逸的 NH₃ 在烟气中 SO₂、NO_x 等酸性气体

表 4 3 家燃煤电厂 CPM 中水溶性离子质量浓度统计结果

Table 4 Statistical results of water-soluble ions mass concentrations in CPM emitted by three coal fired power plants

| | | mg·m ⁻³ | | | | |
|------|------|--------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 燃煤电厂 | 指标 | Na ⁺ | NH ₄ ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ |
| A | C±S | 1.03±0.22 | 0.07±0.04 | 0.05±0.03 | 0.01±0.01 | 0.29±0.19 |
| | RS/% | 21 | 55 | 57 | 48 | 65 |
| B | C±S | 0.15±0.09 | 2.17±1.77 | 0.11±0.01 | — | — |
| | RS/% | 63 | 81 | 79 | — | — |
| C | C±S | 0.58±0.22 | 0.05±0.01 | 0.01±0.02 | 0.01±0.01 | 0.46±0.04 |
| | RS/% | 38 | 28 | 206 | 158 | 82 |
| | | | | | | |
| 燃煤电厂 | 指标 | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | 总量 |
| A | C±S | 0.04±0.02 | 0.27±0.07 | 0.13±0.11 | 2.90±0.44 | 4.79±0.81 |
| | RS/% | 39 | 25 | 89 | 15 | 17 |
| B | C±S | 0.01±0.01 | 0.10±0.03 | 0.34±0.25 | 1.75±0.91 | 4.63±3.03 |
| | RS/% | 97 | 93 | 71 | 52 | 65 |
| C | C±S | 0.01±0.01 | 0.10±0.03 | 0.34±0.25 | 1.75±0.91 | 4.63±3.03 |
| | RS/% | 58 | 24 | 23 | 22 | 26 |

条件下形成 NH_4^+ 。在 SO_2 和 H_2O 存在的条件下, NH_3 也会在催化剂表面发生不利反应生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4HSO_4 ^[15]。因此 B 厂排放的 CPM 中 NH_4^+ 质量分数较高,这与其较高的运行负荷和脱硝运行条件有关。 Na^+ 在 A 厂和 C 厂 CPM 中质量分数较高, B 厂最低。这是由于脱硫、脱硝、除尘等烟气治理过程与 Na^+ 的产生无关, Na^+ 产生来源应是燃料煤,不同企业使用的煤质不同,煤炭燃烧产生烟气中 Na^+ 质量分数也就不同。因此, A 厂和 C 厂 CPM 中 Na^+ 占比较高是由于其使用煤质中 Na 元素含量较高。

2.2.2 元素分析 3 家燃煤电厂排放 CPM 中元素分析统计结果见表 5。由表 5 可知, CPM 中元素分析结果差别较大: A 厂检出元素共有 11 种, 总质量浓度约为 $20.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$; B 厂检出元素共有 12 种, 总质量浓度约为 $18.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$; C 厂检出元素共有 7 种, 总质量浓度约为 $5.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中, A 厂和 B 厂均检出质量浓度高于 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 Zn、Cu、Al、Fe 和 Ba 元素; B 厂检出元素种类最多, 其中对人体健康和生态环境影响较大的重金属元素有 Cr、As、Hg 和 Pb, 排放质量浓度较高的元素有 As、Hg、Pb, 其中 As 的质量浓度为 $(0.76 \pm 0.42) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 分别是 A 厂和 C 厂的 24 倍和 30 倍; A 厂和 B 厂检测出的 Cr 质量浓度分别为 $(0.06 \pm 0.02) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(0.03 \pm 0.07) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而 C 厂未检出。

C 厂检出元素种类最少, 总质量浓度最低, 这表

明 C 厂烟气治理设施去除 CPM 中金属及其化合物的效果最好。杨柳等^[11]研究了超低排放路线下燃煤烟气中 CPM 在湿法脱硫装置(Wetflue Gas Desulfurization, WFGD)和湿式电除尘装置(Wet Electrostatic Precipitator, WESP)中的转化特性, 结果表明, WFGD 和 WESP 对 FPM 和 CPM 均具有去除作用。由于 CPM 中以 $\text{CPM}_{\text{无机}}$ 为主, 故 WFGD 和 WESP 对 CPM 的去除作用包含了对 $\text{CPM}_{\text{无机}}$ 和其中金属及其化合物的去除。

从“源”和“汇”的角度, 排放到大气中的 CPM 中金属及其化合物均是大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素的来源。重金属元素 Hg、Pb、As 等一旦进入大气或有机体, 在迁移转化过程中价态会发生改变, 不能被分解, 而会通过食物链累积在人体, 引起严重的健康问题^[8]。可见, 固定源排放 CPM 中含有的金属及其化合物不容忽视。

2.3 固定源排放 CPM 环境效应的初步探索

2.3.1 大气湿度对 CPM 环境效应的影响 在雾霾易发气象条件下, 燃煤电厂排放的湿烟气含有大量水蒸气和水溶性离子, 大气中常规污染物发生二次复合形成的湿态水溶性离子颗粒物也易在大气边界层内富集, 致使 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度快速增长形成雾霾^[17]。这些颗粒物从环境中吸收水气并引起颗粒物粒径和质量浓度增加的现象, 称为颗粒物的吸湿性。颗粒物中硫酸盐、硝酸盐、铵盐和二次有机气溶胶都具有吸湿性^[18], 一般为 $\text{PM}_{2.5}$, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 是 PM_{10}

表 5 3 家燃煤电厂排放 CPM 中元素分析统计结果

Table 5 Statistics results of elements analysis in CPM emitted by three coal fired power plants $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 燃煤电厂 | 指标 | Al | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu |
|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A | C±S | 1.34±2.22 | 0.06±0.02 | 2.24±2.28 | 1.14±0.75 | 0.02±0.03 | 1.02±0.87 | 3.81±3.00 |
| | RS/% | 166 | 37 | 102 | 66 | 136 | 85 | 79 |
| B | C±S | 2.18±4.76 | 0.03±0.07 | 0.39±0.44 | 2.35±4.54 | 0.02±0.04 | 0.04±0.10 | 1.37±1.70 |
| | RS/% | 219 | 224 | 112 | 193 | 224 | 224 | 124 |
| C | C±S | 1.22±0.26 | — | — | — | — | 0.01±0.02 | — |
| | RS/% | 21 | — | — | — | — | 156 | — |
| 燃煤电厂 | 指标 | Zn | As | Se | Ba | Pb | Hg | Mo |
| A | C±S | 6.85±3.16 | 0.03±0.05 | 1.16±0.71 | 2.35±2.78 | — | — | — |
| | RS/% | 46 | 164 | 61 | 119 | — | — | — |
| B | C±S | 8.79±7.92 | 0.76±0.42 | — | 2.23±0.75 | 0.25±0.09 | 0.03±0.03 | — |
| | RS/% | 90 | 55 | — | 34 | 35 | 91 | — |
| C | C±S | 2.35±0.44 | 0.03±0.04 | 0.04±0.10 | 1.55±1.83 | — | — | 0.02±0.03 |
| | RS/% | 19 | 157 | 245 | 118 | — | — | 157 |

的组成部分^[19]。以我国京津冀大气污染传输通道城市安阳2020年11月29日—12月3日发生的重污染天气为例(数据来源:安阳市生态环境监测中心),以 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 对大气相对湿度($RH\%$)做相关性分析,所得相关性曲线见图3。由图3可知,相关系数 $R=0.63$,可见其相关性较好,大气相对湿度对 $PM_{2.5}$ 有明显影响。由图3还可以看出,大气相对湿度与CPM的环境效应呈正相关关系。这是由于CPM中含有大量硫酸盐、硝酸盐、铵盐等具有吸湿性的盐类,排放到大气中形成的 $PM_{2.5}$ 必然也有一定的吸湿性。

2.3.2 风速对CPM环境效应的影响 目前,国内外关于CPM的环境效应尚没有科学的评估方法。有学者对韩国Chungcheongnam-do和Jeollanam-do两个城市的大气颗粒物进行解析,如果考虑固定源CPM排放因素,工业燃烧源产生的颗粒物对区域颗粒物污染的贡献分别从87.3%、78.7%上升至94.5%、96.5%^[7]。对我国3个垃圾焚烧发电厂排放CPM的测定结果表明,TPM中CPM分别占97%、87%和98%,意味着目前我国垃圾焚烧发电厂有大量一次颗粒物未被监测,其对周边环境空气质量的影响有可能被低估^[20]。此外,由于没有考虑污染物的累积和大气边界层高度的变化所引起的大气环境容量的动态变化,国外的WRF/CMAQ、WRF/Chem、WRF/CAMx等模型^[21]都不能准确模拟我国重污染天气时的大气环境质量,而CPM引起的环境

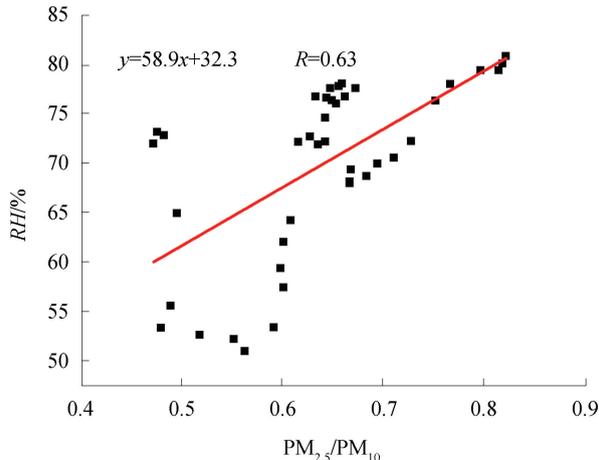


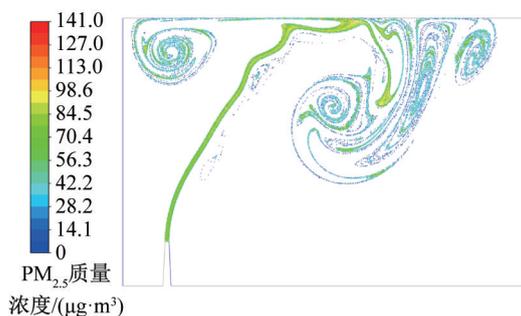
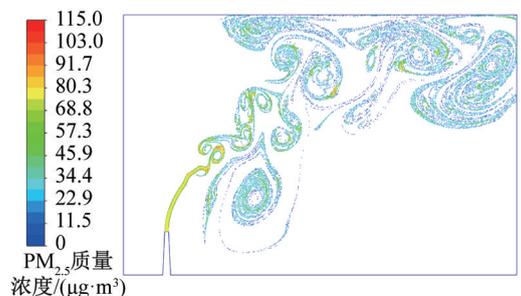
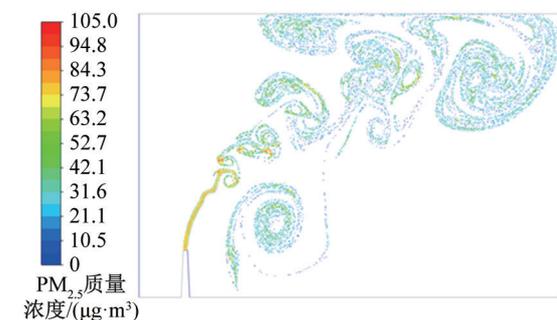
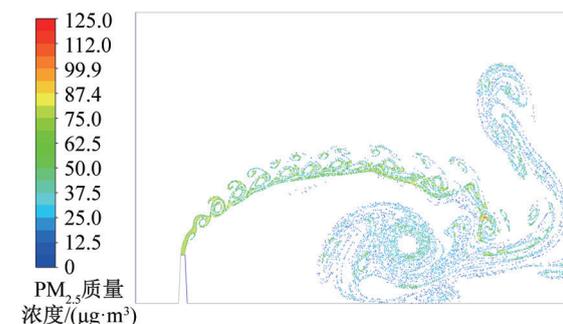
图3 重污染天气时 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 对大气相对湿度的相关性曲线

Fig. 3 Correlation curve of $PM_{2.5}/PM_{10}$ to atmospheric relative humidity in heavily polluted weather

效应在静稳天气条件下尤为突出。

计算流体力学法(Computational Fluid Dynamics, CFD)是近代流体力学、数值数学与计算机科学相结合的产物。该方法提供了丰富的物理模型,用户可以精确地模拟层流和湍流的不同流动状态,以及包含化学反应、组分运输等的复杂流动,直观展现整个流场、浓度场在时间和空间的分布和变化。在模拟湿烟气与环境空气混合扩散过程中,输入烟温、烟气流速、环境风速、环境湿度、飘滴直径等参数,应用CFD模拟烟羽长度和消散高度,结果与实测数据接近^[22-23]。

根据CPM的概念,形成CPM的物质组分处于烟道中采样位置时为气态,离开烟道后在环境状况下降温数秒内凝结成为液态或固态^[12]。因此,CPM降温冷凝与湿烟气中的水分降温冷凝有着基本一致的形成机理,可以应用CFD模拟CPM在环境空气中的混合扩散。由于CPM在大气中易形成 $PM \leq 1 \mu m$ 的颗粒物,排放到大气中短时间内处于高湿环境,能够吸湿长大,成为 $PM_{2.5}$ ^[4-6,17],因此可以输入颗粒物直径 $2.5 \mu m$ 进行计算。应用CFD软件(18.0版),设置烟囱高度100 m,预测范围 $500 m \times 1000 m$ (表示高为500 m,长为1000 m的平面),网格数153 135,网格间隔1 m,CPM质量浓度 $5 mg/m^3$,烟气温度 $55 \text{ }^\circ C$,烟气排放速率 $20 m/s$,环境温度 $10 \text{ }^\circ C$,相对湿度80%,得到风速分别为 $0.5 m/s$ 、 $1.0 m/s$ 、 $2.0 m/s$ 、 $3.0 m/s$ 时形成的 $PM_{2.5}$ 轨迹图,见图4—图7。由图4—图7可以看出,环境风速是 $PM_{2.5}$ 扩散的重要因素,随着风速的降低,由CPM形成的 $PM_{2.5}$ 在水平方向扩散距离减少,纵向空间扩散高度增大。当风速 $\leq 1.0 m/s$ 时, $PM_{2.5}$ 纵向扩散明显;当风速为 $2.0 m/s$ 时, $PM_{2.5}$ 主要分布在距离烟囱较近范围内;当风速为 $3.0 m/s$ 时, $PM_{2.5}$ 轨迹水平方向扩散明显。在我国秋冬季节,容易形成逆温层,发生静稳天气(风速 $\leq 2.0 m/s$,相对湿度 $> 60\%$),且大气边界层大大降低,甚至低到数百米(数据来源:潍坊市生态环境监测中心)。因此,当风速 $\leq 2.0 m/s$ 时,固定源排放CPM形成的 $PM_{2.5}$ 水平方向扩散有限,纵向空间扩散受阻,会累积在大气边界层下面较小的空间内,造成 $PM_{2.5}$ 质量浓度

图 4 风速为 0.5 m/s 时 $PM_{2.5}$ 扩散轨迹Fig. 4 $PM_{2.5}$ diffusion trajectory when wind speed was 0.5 m/s图 5 风速为 1.0 m/s 时 $PM_{2.5}$ 扩散轨迹Fig. 5 $PM_{2.5}$ diffusion trajectory when wind speed was 1.0 m/s图 6 风速为 2.0 m/s 时 $PM_{2.5}$ 扩散轨迹Fig. 6 $PM_{2.5}$ diffusion trajectory when wind speed was 2.0 m/s图 7 风速为 3.0 m/s 时 $PM_{2.5}$ 扩散轨迹Fig. 7 $PM_{2.5}$ diffusion trajectory when wind speed was 3.0 m/s

累积升高,成为重污染天气形成的重要原因。此外,高湿环境中 $PM_{2.5}$ 的吸湿效应、气态污染物的二次转化等因素也会增强^[18],多因素共同作用造成了固定源周边 $PM_{2.5}$ 质量浓度短时间内快速升高,形成雾霾。

3 结论

本文参考 EPA 推荐的 Method 202 和我国《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836—2017),利用自主设计的 TPM 采样系统和国内大流量低浓度烟尘测试仪,分析测定了我国华北地区 3 家燃煤电厂 A、B、C 的 FPM、CPM 和 TPM 排放水平及特征分布,研究了 CPM 组分特征,并初步探索了固定源排放 CPM 环境效应,得出如下结论:1)燃煤电厂 A、B、C 排放的 FPM 质量浓度均较低,CPM 是 TPM 的主要组分,其质量浓度分别占 TPM 的 92%、89%和 89%。按照目前我国监测技术标准,燃煤电厂有约 90%能够在大气中形成 $PM_{2.5}$ 的物质未被监测,其对大气环境质量的影响可能被低估。2) $CPM_{无机}$ 是 CPM 的主要组分, SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Na^+ 等水溶性离子是 $CPM_{无机}$ 的重要组分,其种类和质量浓度与燃煤电厂煤质组成和脱硫、脱硝、除尘等烟气治理施工工艺及运行操作条件有关;A 厂和 B 厂均检出质量浓度高于 $1 \mu g/m^3$ 的 Zn、Cu、Al、Fe 和 Ba,其中,B 厂检出元素种类最多,对人体健康和生态环境影响较大的重金属是 Cr、As、Hg 和 Pb。3)大气湿度与 CPM 的环境效应呈正相关;风速是影响大气中 $PM_{2.5}$ 扩散的重要因素,当风速 $\leq 2.0 m \cdot s^{-1}$ 时,固定源排放 CPM 形成的 $PM_{2.5}$ 水平方向扩散有限,纵向空间扩散受阻,累积在大气边界层下,造成 $PM_{2.5}$ 质量浓度累积升高,是重污染天气形成的重要原因。因此,我国应加强固定源排放 CPM 及其中金属尤其是重金属元素的监测技术研究,并制定相关监测技术标准,为科学评估 CPM 污染排放、环境效应及污染控制技术研究做准备。此外,还应加强固定源排放 CPM 环境效应及其污染控制技术研究,为切实减少大气中 $PM_{2.5}$ 及其前体物排放提供技术支持。

参考文献:

- [1] 颜岩,余波,王浩,等. 燃煤电厂湿烟羽治理技术研究进展[J]. 过程工程学报,2020,20(7): 745-756.
- [2] 国家环境保护总局. 固定污染源排气中颗粒物和气态污染物采样方法:GB/T 16157—1996[S]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [3] 国家环境保护总局. 固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法:HJ 836—2017[S]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [4] 裴冰. 燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放[J]. 环境科学,2015,36(5):1544-1549.
- [5] 胡月琪,冯亚军,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] 石爱军,胡月琪,白志鹏,等. 湿法脱硫烟气中多形态颗粒物的测量方法及组分特征[J]. 中国环境监测,2017,33(2):101-109.
- [7] CHOI D S, KIM Y M, LEE I H, et al. Study on the contribution ratios of particulate matter emissions in differential provinces concerning condensable particulate matter[J]. Energy & Environment, 2019, 30(7): 1206-1218.
- [8] ZHANG Z P, LI Y Z, ZHANG X Y, et al. Review of hazardous materials in condensable particulate matter[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 220: 106892.
- [9] LI X D, ZHOU C Y, LI J W, et al. Distribution and emission characteristics of filterable and condensable particulate matter before and after a low-low temperature electrostatic precipitator [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 12798-12806.
- [10] 盛重义,张斌,杨柳,等. 燃煤电厂WFGD系统对可凝结颗粒物转化特性的影响[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会科学技术年会论文集. 北京:[出版者不详], 2018: 1302-1306.
- [11] 杨柳,张斌,王康慧,等. 超低排放线路下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性[J]. 环境科学,2019,40(1):121-125.
- [12] USEPA. Method 202-Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources(40 CFR Part 51) [R]. Washington, D. C.:USEPA,2017.
- [13] CORIO L A, SHERWELL J. In-stack condensable particulate matter measurements and issues [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, 50(2): 207-218.
- [14] YANG H H, LEE K T, HSIEH Y S, et al. Filterable and condensable fine particulate emissions from stationary sources [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2014, 14(7): 2010-2016.
- [15] LI J W, LI X D, LI M, et al. Influence of air pollution control devices on the polycyclic aromatic hydrocarbon distribution in flue gas from an ultralow-emission coal-fired power plant [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(11): 9572-9579.
- [16] 李俊华,姚群,朱廷钰. 工业烟气多污染物深度治理技术及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2019.
- [17] 苏跃进. 水蒸气和水溶性离子排放对雾霾暴发的影响分析[J]. 科学与管理,2019,39(2): 55-67.
- [18] 叶兴南,陈建民. 灰霾与颗粒物的吸湿增长[J]. 自然杂志,2013,35(5):337-340.
- [19] 戴树桂,王晓蓉,邓南圣,等. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [20] 王春艳,申进朝,谭金峰,等. 垃圾焚烧发电厂可凝结颗粒物组分特征研究[J]. 环境污染与防治,2022,44(8):1068-1073.
- [21] LIU H J, TIAN H Z, ZHANG K, et al. Seasonal variation, formation mechanisms and potential sources of PM_{2.5} in two typical cities in the Central Plains Urban Agglomeration, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 657-670.

[22] 邓斌,韩长民,赵红等. CFD 模拟在湿烟羽控制技术中的应用[J]. 环保科技,2018,24(5): 6-10.

[23] 陈逸鹏,吴昊,杨爱勇,等. 湿法脱硫尾气排放的烟羽扩散数值模拟[J]. 热能动力工程, 2019,34(6):109-115.

Researches on CPM status emitted by coal-fired power plants and its environmental effects

WANG Chunyan¹, SHEN Jinchao², ZHOU Weifeng³, LIU Hongyan⁴, LIU Huanjia⁵

1. Department of Chemical and Environmental Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China;

2. He'nan Ecological and Environmental Monitoring Center, Zhengzhou 450046, China;

3. Zhengzhou ecological environment monitoring center of He'nan Province, Zhengzhou 450007, China;

4. Anyang ecological environment monitoring center of He'nan Province, Anyang 455000, China;

5. College of Environment, He'nan Normal University, Xinxiang 453002, China

Abstract: According to Method 202 proposed by EPA in 2017 and HJ 836-2017 issued by Environmental Protection Department of China, devices of TPM was designed and utilized with which samples of FPM and CPM could be collected simultaneously. FPM, CPM, water soluble ions and elements analysis of CPM in flue gas emitted by three coal-fired power plants named A, B and C were monitored. CFD was used to simulate the diffusion trajectory of PM_{2.5} formed by CPM emission from fixed sources in stationary weather. The statistical results showed that mass concentrations of TPM emitted by plant A, B and C was $8.63 \pm 3.11 \text{ mg/m}^3$, $19.05 \pm 8.85 \text{ mg/m}^3$ and $5.07 \pm 1.59 \text{ mg/m}^3$, respectively. It was proved that CPM was 90% of TPM and FPM was low mass concentration. Inorganic CPM was dominant in CPM, SO_4^{2-} , NH_4^+ , Na^+ and other water-soluble ions were important components, and the emission of metal elements especially heavy metal should not be neglected. CFD was used to simulate the diffusion trajectory of PM_{2.5} formed by CPM emission from fixed sources in stationary weather. It was proved that CPM could accumulate below atmospheric boundary layer under meteorological conditions that were not conducive to the diffusion of pollutants, causing PM_{2.5} accumulation in a short period of time, which was an important factor in the formation of heavy pollutant weather.

Key words: FPM; CPM; ultra-low emissions; coal-fired power plant; environmental effects

(责任编辑:王晓波)