

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                            |                                                                         |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 .....                              | 李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)                                           |
| 钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征 .....                                     | 张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)                                                |
| 常州市大气 PM <sub>2.5</sub> 中 PAHs 污染特征及来源解析 .....             | 顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)                                |
| 兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 .....                                 | 尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)                                  |
| 株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 .....                                    | 王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)                                  |
| 传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 .....                                | 徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)                                        |
| 基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 .....                               | 史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)                                  |
| 基于 wavelet-SVM 的 PM <sub>10</sub> 浓度时序数据预测 .....           | 王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)                                             |
| 广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 .....                              | 黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162) |
| 沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 .....                            | 李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)                                               |
| 典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 .....                                | 芦会杰 (3178)                                                              |
| 杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 .....                                  | 张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)                               |
| 黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 .....                            | 聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)                                            |
| 漓江地表水体有机碳来源 .....                                          | 赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)                                         |
| 夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 .....                           | 吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)                                       |
| 城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例 .....                           | 徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)                                           |
| 地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例 .....                          | 张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)                                           |
| 人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 .....                          | 李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)                                                 |
| 长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 .....                                 | 刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)                                      |
| 三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 .....                   | 陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)                                            |
| 黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例 .....                  | 鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)                                      |
| 新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 .....                                  | 李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)                                         |
| 藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 .....                                 | 张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)                                        |
| 汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 .....                             | 向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)                                  |
| 石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 .....                               | 宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)                                    |
| 不同湿地模型中根系微生物的多样性 .....                                     | 王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)                                             |
| 北海湖微生物群落结构随季节变化特征 .....                                    | 张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)                                                |
| 基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 .....                              | 张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)                                      |
| 高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 .....                                | 孟婷, 杨宏 (3339)                                                           |
| 基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 .....                                 | 韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)                                               |
| 生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 .....                                | 王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)                                               |
| 微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 .....                            | 刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)                                        |
| pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 .....                         | 于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)                                       |
| 酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 .....                                | 周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)                                      |
| 模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 .....                             | 康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)                                               |
| 采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 .....                             | 王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)                                           |
| CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 .....                              | 张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)                             |
| 硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 .....                                    | 完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)                                       |
| 不同 TOC/NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 ..... | 王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)                                           |
| 盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 .....                            | 谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)                                                  |
| CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 .....                               | 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)                                           |
| 胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响 .....                      | 刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)                                       |
| 不同施肥方式下紫色土 N <sub>2</sub> O 与 NO <sub>x</sub> 的排放特征 .....  | 胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)                                                       |
| 地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 .....                                      | 张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)                                      |
| 模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 .....                           | 张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)                       |
| 长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 .....                             | 徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)                                       |
| 施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 .....                                  | 郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)                                      |
| 水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 .....                             | 魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)                                  |
| 凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 .....                                | 张彦军 (3497)                                                              |
| 西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 .....                                  | 王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)                                              |
| 小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd <sup>2+</sup> 活性 .....           | 张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)                                 |
| 交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 .....                                   | 汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)                              |
| 外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 .....                                | 杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)                                         |
| 中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 .....                                 | 刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)                                                     |
| 《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)  |                                                                         |

# 钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征

张进生, 吴建会\*, 马咸, 冯银厂

(南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071)

**摘要:** 为探究钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征, 使用荷电低压颗粒物撞击器(ELPI)采样, 采集到3组不同载荷和除污设施的烧结炉和1组炼铁高炉排放的颗粒物样品, 利用热-光反射法, 分析颗粒物中的有机碳(OC)和元素碳(EC)以及按温度划分的7种碳组分物质。结果表明, 烧结工艺排放颗粒物中OC的质量分数高于炼铁工艺, OC在 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 质量分数分别是 $(5.3 \pm 2.3)\%$ 和 $(7.1 \pm 3.0)\%$ , 说明OC易在细粒径段颗粒富集, 炼铁工艺排放颗粒物中OC在 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 质量分数分别是2.5%和2.0%; 4组样品的7种碳组分相对比例相似, OC2和OC3在7种碳组分中质量分数最高, EC1、EC2、EC3的质量分数依次递减, OC1的质量分数可能与锅炉规模和脱硫设施有关; 另外, 烧结工艺排放各粒径段的颗粒物中OC和EC表现出较高的相关性, 一次排放的 $PM_{2.5}$ 中的OC/EC为 $4.7 \pm 0.7$ , 远高于受体中估算二次碳组分的指标值。钢铁工业排放颗粒物中碳质组分的深入分析, 可以为受体碳质气溶胶的来源解析提供基础数据, 也有助于钢铁工业后续的除污管理。

**关键词:** 钢铁工业; 烧结工艺; 炼铁工艺; 颗粒物; 碳组分

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3102-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201701121

## Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry

ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui\*, MA Xian, FENG Yin-chang

(State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** In order to investigate the carbonaceous characteristics of particles emitted from the iron and steel industry, an electrical low-pressure impactor (ELPI) was used to collect three sets of samples from the sintering process and one set of samples from the ironmaking process emissions of particulate matters. Organic carbon (OC) and elemental carbon (EC), which were divided into seven carbonaceous components based on the temperature of the particulate matter, were analyzed using a thermal-light reflection method. Results show that OC in sintering process particles is higher than that in ironmaking particles and accounts for  $5.3\% \pm 2.3\%$  and  $7.1\% \pm 3.0\%$  of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ , respectively, which reveals that OC tended to be enriched in fine particles. In the ironmaking process particles, OC accounted for 2.5% and 2.0% of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ , respectively. The relative proportions of the seven carbonaceous components in the four sets of samples were very similar. OC2 and OC3 accounted for the highest proportion; the EC1, EC2, and EC3 contents decreased in turn; and OC1 may be associated with boiler scale and desulfurization. In addition, the OC and EC of sintering process particles had higher correlation, and the OC/EC value of primary emission particles was  $4.7 \pm 0.7$ , which is much higher than the value of the secondary OC estimation index in environment. Analyzing deeply on the carbonaceous characteristics in particles emitted from the iron and steel industry, which will provide essential data for source apportionment of carbonaceous aerosols in environment and will be conducive to the follow supervisory of pollution cleaning in iron and steel industry.

**Key words:** iron and steel industry; sintering process; ironmaking process; particulate matter; carbonaceous component

近年来,我国空气污染形势严峻,霾天气频发<sup>[1]</sup>,对人体健康和大气环境产生不利影响<sup>[2]</sup>,工业生产是导致霾的一类突出贡献源<sup>[3]</sup>,尤其是其排放颗粒物中的碳组分危害较大<sup>[4]</sup>。碳组分主要包括有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC),OC含有多环芳烃、醛酮类等多种有毒有害的有机化合物<sup>[5,6]</sup>,有很多学者指出,钢铁、焚烧等工业是二噁英的重要排放源<sup>[7,8]</sup>,二噁英也属于OC中的一部分;EC为一种吸光性较强的黑色物质,是大气能见度下降和气候变暖的重要因素<sup>[9,10]</sup>,所以说,研究钢铁工业排放颗粒物的碳组分特征具

有重要意义。

钢铁工业中的颗粒物排放源包括燃煤发电、烧结、炼铁和焦化等生产工艺,燃煤源与燃煤电厂的排放性质类似,研究较为成熟<sup>[11~13]</sup>,但是烧结和炼铁源,学者主要对其无机离子和金属元素等进行了研究<sup>[14,15]</sup>,而针对这两种排放源排放颗粒物中碳组分研究比较缺乏。基于此,本文以钢铁工业的烧结

收稿日期: 2017-01-14; 修订日期: 2017-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016FYC0208500, 2016FYC0208505)

作者简介: 张进生(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 36992839@qq.com

\* 通信作者, E-mail: envwujh@nankai.edu.cn

源和炼铁源为研究对象,探究这两种排放源所排放的颗粒物中碳组分的排放特征,以期为受体中碳质颗粒物的来源解析提供数据参考,并为钢铁工业后续的除污管理提供实践建议。

1 材料与方法

1.1 样品采集

基于本研究目的“以钢铁工业的烧结源和炼铁源为研究对象,探究这两种排放源所排放的颗粒物中碳组分的排放特征”,从锅炉的载荷、除污设施、工况条件等多个角度确定采样点,选取包头市 A 钢铁厂两个烧结机(烧结一和烧结二)、常州市 B 钢铁厂烧结机(烧结三)为烧结采样点(均为机尾),燃料均为无烟煤,选取常州市 C 特钢厂高炉炼铁工艺

(炼铁)为炼铁采样点,炼铁原料来自烧结矿,燃料为焦粉(主要燃料)和煤粉(补充燃料),由于炼铁工艺采样口常散布着高浓度的 CO 气体,采样难度大,只采集一组样品。4 个采样锅炉基本参数信息见表 1,关于采样锅炉的除尘设备,3 个烧结机均采用静电除尘,炼铁采用布袋除尘;关于采样锅炉的脱硫方式,3 个烧结的脱硫方式分别为干法脱硫、石灰石湿法、SDA 半干法,炼铁工艺无脱硫设施;关于采样锅炉的烟气温度和湿度,参数来自烟道在线监测设备,烧结机的排放烟温较高,为 55 ~ 92℃,其中烧结三的烟气温度最高,炼铁的烟气温度和湿度均比较低。所选的采样点均为大型的具有完善的除污设备的锅炉,实际采样中,运行工况稳定,样品基本可以代表烧结源和炼铁源的排放颗粒物。

表 1 采样点基本参数  
Table 1 Basic parameters of the sampling sites

| 采样点 | 锅炉载荷/m <sup>2</sup> | 除尘设备 | 脱硫方式    | 烟气温度/℃ | 烟气湿度/% |
|-----|---------------------|------|---------|--------|--------|
| 烧结一 | 180                 | 静电除尘 | 干法脱硫    | 69     | 8.9    |
| 烧结二 | 500                 | 静电除尘 | 石灰石湿法   | 55     | 8      |
| 烧结三 | 550                 | 静电除尘 | SDA 半干法 | 92     | 5.7    |
| 炼铁  | —                   | 布袋除尘 | 无       | 41     | 3      |

采样仪器为芬兰 Dekati 公司生产的荷电低压撞击器(electrical low pressure impactor, ELPI),该仪器在污染源的样品采集中应用广泛<sup>[16,17]</sup>,可以在 0.006 ~ 10 μm 范围内分 14 个粒径段进行采集,并且全通道加热保温。如图 1 所示,运用稀释通道法进行采样(4 组样品均采用 1:8 的稀释比),现场可以得到各粒径段内的包括颗粒数浓度和质量浓度的在线数据。采样中根据不同的烟气流速,使用不同面积的采样嘴,最大程度地实现了等速采样。

采样膜为 25 mm 的铝箔膜和石英膜:铝膜具有良好的导电性,膜中间涂有耐高温的阿皮松脂可以有效防止颗粒物反弹,本研究将其用于测在线数据,采样时长为 4 ~ 6 h;石英滤膜为美国 PALL 公司生产,本研究将其用于碳组分分析,采样时长为 8 ~ 12 h。

1.2 样品分析

铝箔膜测在线数据的产生原理:烟气中颗粒物先在高压电晕室内被荷电,进而被层叠的低压(出口压力保持 40 mbar)撞击器按粒径分离,这样在每一级撞击器中,产生环路感应电流,且每一级都与静电计连接,相邻两个撞击器的电流之差即为该粒径段的电流,最后一级收集盘(蜂窝式超导体材料)对实时测得的电流值进行校正后,得到颗粒物数浓度,

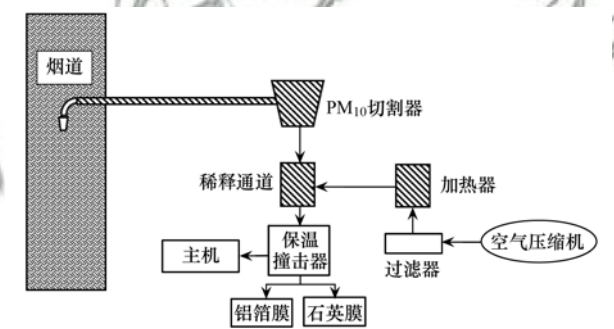


图 1 ELPI 采样示意

Fig. 1 Schematic of sampling process used by an ELPI

计算如公式(1)所示,再乘以相应粒径段的体积和密度得出质量浓度,如公式(2)所示。

$$N_i = \frac{I}{PneQ}$$
 (1)

式中, $N_i$  为颗粒物数浓度( $\text{cm}^{-3}$ );  $I$  为校正电流;  $P$  为一定粒径范围颗粒在荷电区的带电效率;  $n$  为一定粒径范围颗粒所带的基本电荷数目;  $e$  为每个电子的电荷( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ );  $Q$  为 ELPI 的流量( $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

$$m_i = \rho_{\text{eff}} \frac{\pi}{6} d_i^3 N_i$$
 (2)

式中, $m_i$  为第  $i$  粒径段的颗粒物质量浓度;  $\rho_{\text{eff}}$  为等效密度,为  $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $d_i$  为  $i$  粒径段的  $D_{50}$  空气动力

学当量直径。

石英滤膜采样前后,在恒温恒湿的环境中平衡 48 h,用百万分之一天平(MX5, Mettler Toledo)进行称量,循环称量至少两次,每次称量结果相差不超过 4  $\mu\text{g}$ 。称重后的石英滤膜用于分析碳组分,分析方法为热光反射法(TOR),仪器为美国沙漠研究所研发的 Model 2001A 型热/光碳分析仪,进样前用 0.558  $\text{cm}^2$  打孔器在样品膜上打一圆孔,前 6 级的样品可以将全部颗粒物打出分析,后 8 级的样品不能全部打出,需要根据所打的点数比例乘以仪器分析结果,得出碳组分质量(ELPI 所采集的膜样品呈点状分布),采用 Improve-A 升温协议,工作原理如下:在无氧的纯 He 环境下,程序按 120、250、450、550 $^{\circ}\text{C}$ 逐步升温,使颗粒物中有机碳挥发,之后通入 2%  $\text{O}_2$ /98% He 混合气,继续逐步加热至 550、700、850 $^{\circ}\text{C}$ ,使得样品中的元素碳完全氧化成  $\text{CO}_2$ 。无氧加热释放的有机碳经催化氧化炉(镍催化剂)生成  $\text{CO}_2$ ,有氧加热阶段生成的  $\text{CO}_2$ ,按时间顺序在还原炉中被催化还原( $\text{MnO}_2$ ),生成甲烷( $\text{CH}_4$ ),再由火焰离子化检测器(FID)定量检测,分别检测出有机碳 OC1、OC2、OC3、OC4 和元素碳 EC1、EC2、EC3<sup>[18~20]</sup>。在仪器分析过程中会产生焦化石碳(OPC),实际上是 OC4 的一部分,样品中的 OPC 量很少(总碳的 5% 以下),会产生一定数量的负值(理论上不应产生负值,负值改为 0),且没有发现明显特征。

### 1.3 质量控制与质量保证

采样环节,为防止高温烟气冷凝,烟枪、预切割器、收集盘以及每个管路均有加热套件或保温装置;运输和保存环节,使用保温冰袋运输样品,在实验室 4 $^{\circ}\text{C}$  密闭的冰箱内冷藏;平衡和称重环节,温度控制为  $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ ,湿度控制为  $(50 \pm 5)\% \text{RH}$ ;分析碳组分环节,每天测试前后进行校样,偏差控制在 5% 以内。

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒物的质量浓度和数浓度特征

为观察低于 10  $\mu\text{m}$  的颗粒物排放特征,在进样系统中采用旋风式预切割器将烟气中粒径大于 10  $\mu\text{m}$  的颗粒物去除,通过动力学撞击分级,颗粒物进一步被分粒径采集到滤膜表面<sup>[21]</sup>。 $\text{PM}_{10}$  在线数浓度和质量浓度见表 2,样品的数浓度变化范围是  $2.7 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ,与范真真等<sup>[22]</sup>观测的炼铁高炉数浓度接近,但是低于李超等<sup>[23]</sup>用 ELPI 观测

的燃煤锅炉的排放数浓度, $\text{PM}_{10}$  质量浓度变化范围是  $0.45 \sim 7.93 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  变化范围是  $0.10 \sim 0.84$ ,相对炼铁工艺来说,烧结工艺排放的颗粒物质量浓度较高,粒径较粗,尤其是烧结一的粒径( $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  是 0.10),可能与其采用的干法脱硫工艺相关。

ELPI 没有明确的 2.5  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  的粒径切割点,本实验是将前 11 级(2.44  $\mu\text{m}$  以下)的质量加和作为  $\text{PM}_{2.5}$  的质量,14 级(10.23  $\mu\text{m}$  以下)总的加和作为  $\text{PM}_{10}$  的质量。另外,在采集炼铁高炉排放颗粒物时,由于仪器故障导致缺失 0.61 ~ 0.95、2.44 ~ 4.10、6.89 ~ 10.23  $\mu\text{m}$  粒径段的荷电数据,所以炼铁工艺排放的颗粒物质量和粒数浓度要比测量值高。

进一步观察颗粒物质量浓度和数浓度的粒径分布,由图 2 可以看出,烧结工艺排放的颗粒物数浓度

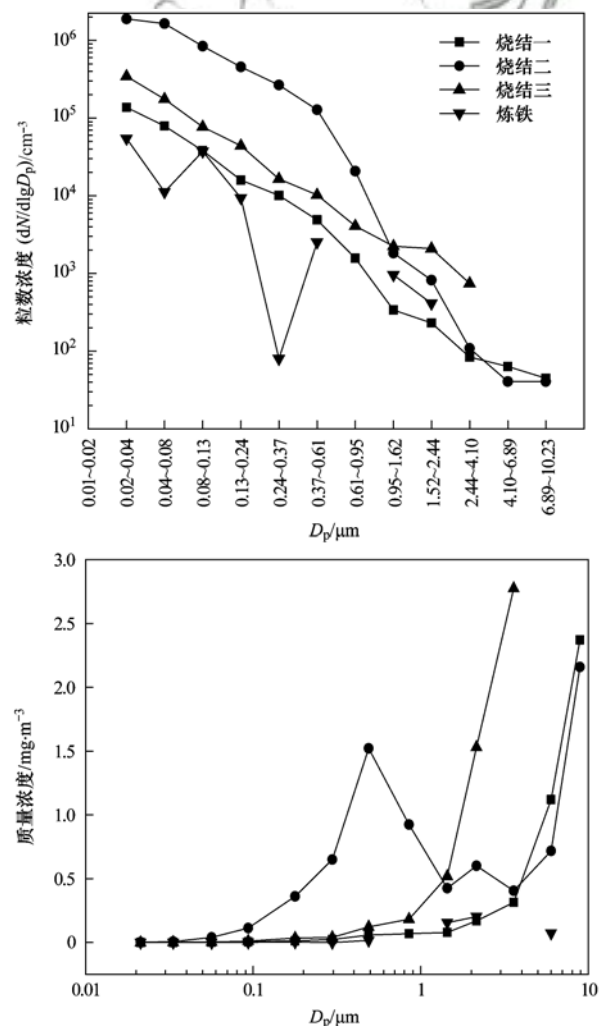


图 2 钢铁工业排放颗粒物的数浓度和质量浓度分布

Fig. 2 Number and mass concentration distributions of particulate matter emitted from the iron and steel industry

表 2 钢铁工艺排放 PM<sub>10</sub> 的数浓度和质量浓度

| Table 2 Number and mass concentrations of PM <sub>10</sub> emitted from the sintering process |                        |                         |                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 锅炉                                                                                            | 数浓度/个·cm <sup>-3</sup> | 质量浓度/mg·m <sup>-3</sup> | PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> |
| 烧结一                                                                                           | —                      | 4.22                    | 0.10                                |
| 烧结二                                                                                           | 1.9 × 10 <sup>6</sup>  | 7.93                    | 0.58                                |
| 烧结三                                                                                           | 3.1 × 10 <sup>5</sup>  | 5.22                    | 0.46                                |
| 炼铁                                                                                            | 2.7 × 10 <sup>5</sup>  | 0.45                    | 0.84                                |

随粒径增大而逐渐减小,曲线平滑,而炼铁工艺排放的颗粒物数浓度下降曲线波动较大;由图 3 可以看出,质量粒径分布方面,烧结工艺的颗粒物在超过 1 μm 后,会迅速上升,而炼铁工艺的颗粒物质量浓度粒径分布均匀.

2.2 颗粒物中 OC 和 EC 特征

样品的碳组分质量分数见表 3, PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 碳

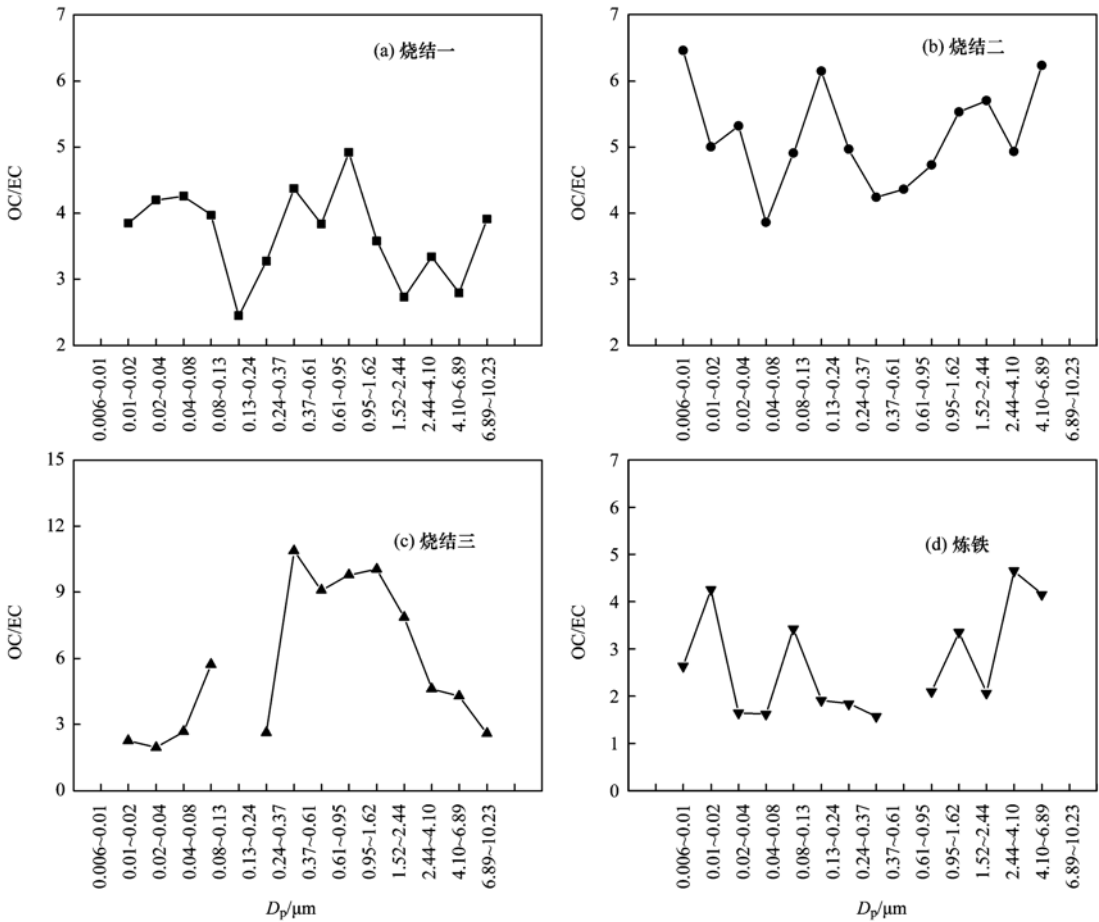


图 3 OC/EC 的粒径分布

Fig. 3 Diameter distributions of OC/EC

组分所占质量分数的计算见式(3)、(4):

$$C_{PM_{2.5}} = \frac{\sum_{i=1}^{11} m_{ij}}{\sum_{i=1}^{11} m_i} \times 100\% \tag{3}$$

$$C_{PM_{10}} = \frac{\sum_{i=1}^{14} m_{ij}}{\sum_{i=1}^{14} m_i} \times 100\% \tag{4}$$

式中, C 指组分所占质量分数; m<sub>i</sub> 指第 i 级粒径段的颗粒物质量; m<sub>ij</sub> 指第 i 级粒径段内 j 组分的质量.

数据表明,烧结样品中 OC 质量分数明显高于炼铁,在 PM<sub>10</sub> 的占比为(5.3 ± 2.3)%,在 PM<sub>2.5</sub> 中占

表 3 颗粒物中 OC 和 EC 的质量分数

| Table 3 Mass fraction of OC and EC in particles |                   |      |      |       |
|-------------------------------------------------|-------------------|------|------|-------|
| 锅炉                                              | 粒径                | OC/% | EC/% | OC/EC |
| 烧结一                                             | PM <sub>10</sub>  | 7.90 | 2.11 | 3.74  |
|                                                 | PM <sub>2.5</sub> | 7.44 | 1.89 | 3.94  |
| 烧结二                                             | PM <sub>10</sub>  | 4.05 | 0.79 | 5.13  |
|                                                 | PM <sub>2.5</sub> | 9.98 | 2.06 | 4.84  |
| 烧结三                                             | PM <sub>10</sub>  | 3.82 | 0.74 | 5.16  |
|                                                 | PM <sub>2.5</sub> | 3.99 | 0.75 | 5.32  |
| 炼铁                                              | PM <sub>10</sub>  | 2.51 | 1.11 | 2.26  |
|                                                 | PM <sub>2.5</sub> | 2.04 | 1.06 | 1.92  |

比为(7.1 ± 3.0)%,这与郑玫等<sup>[24]</sup>以两组烧结为样品的分析结果不同,其结果显示烧结源 OC 质量分数为(13.0 ± 11.5)%,含量与相对偏差均比本研究

高,较马京华<sup>[25]</sup>测得的 OC 质量分数(10.53%)要低,同时,与 Ma 等<sup>[26]</sup>用 ELPI 研究的燃煤源颗粒物的碳组分质量分数相比,烧结样品的 OC 质量分数介于煤粉炉和循环流化床炉之间(煤粉炉、循环流化床、格栅炉 PM<sub>10</sub> 的 OC 质量分数分别为 3.0%、7.5%、11.4%);另外,烧结样品 PM<sub>2.5</sub> 中 EC 平均值及相对偏差为(1.56% ± 0.7%),这与炼铁样品 EC 接近。炼铁源颗粒物中的 OC 明显小于烧结源颗粒物,这与郑玫的结论一致,且郑玫等<sup>[24]</sup>、齐堃等<sup>[27]</sup>均认为烧结产生的碳质组分与工艺中的有机添加剂有关。事实上,颗粒物中的 OC 可能比测量值要高一些,因为 ELPI 的小粒径段中的压强较小,造成颗粒物表面的低沸点有机物挥发。

在很多环境受体的碳质颗粒物研究中,OC/EC 大于 2 左右,被认为发生了二次反应,大于 2 左右的 OC 被估算为二次反应生成的有机物<sup>[28~30]</sup>,但是发现钢铁工业一次排放的颗粒物中,OC/EC 近乎都大于 2,烧结 PM<sub>2.5</sub> 中为 3.94~5.32,炼铁 PM<sub>2.5</sub> 中 OC/EC 接近 2,为 1.92,当然,一次排放的颗粒物的 OC 可能会和大气中的 O<sub>3</sub> 或者自由基等发生反应,或者挥发等,产生衰减变化。进一步观察 OC/EC 与粒径的关系,如图 3 所示,烧结一和烧结二在 2.5~7.5

上下波动,都有“翘尾”现象,烧结三样品在 0.24~1.62 μm 出现较高峰,而炼铁颗粒物的 OC/EC 是在 1.5~4.5 之间上下波动。

图 4 和表 4 所示为各粒径段的 OC 与 EC 相关性分析,发现:①烧结源颗粒物 OC 与 EC 表现出较高的线性关系,前两个样品皮尔逊相关系数分别是 0.92 和 0.98,相对来说,炼铁源颗粒物 OC 与 EC 表现出较低的线性关系,皮尔逊相关系数为 0.74;②烧结源排放的颗粒,较多粒径段的 OC 质量分数值集中在 9% 左右;③烧结三排放源颗粒物的 OC 与 EC 相关性较低,有可能是烟温较高,部分粒径段 OC 不稳定所致。

图 5 所示为 OC 和 EC 的粒径分布,可以看出,4 个样品都会在 0.05 μm 附近出现一个峰值,烧结源颗粒物在粗粒径(大于 2.5 μm)的碳含量明显小于细粒径,这是由于已蒸发的气相有机物向液相和颗粒相转化中,易形成在细小的颗粒物中所致的富集效应。欧阳丽华等<sup>[31]</sup>对锅炉排放颗粒物的扫描电镜拍摄,颗粒物表面粗糙呈多孔状,推断碳物质一部分会吸附在颗粒物表层,另一部分会吸附在颗粒物中多孔内部,小粒径段的比表面积较大,吸附的碳物质更多。

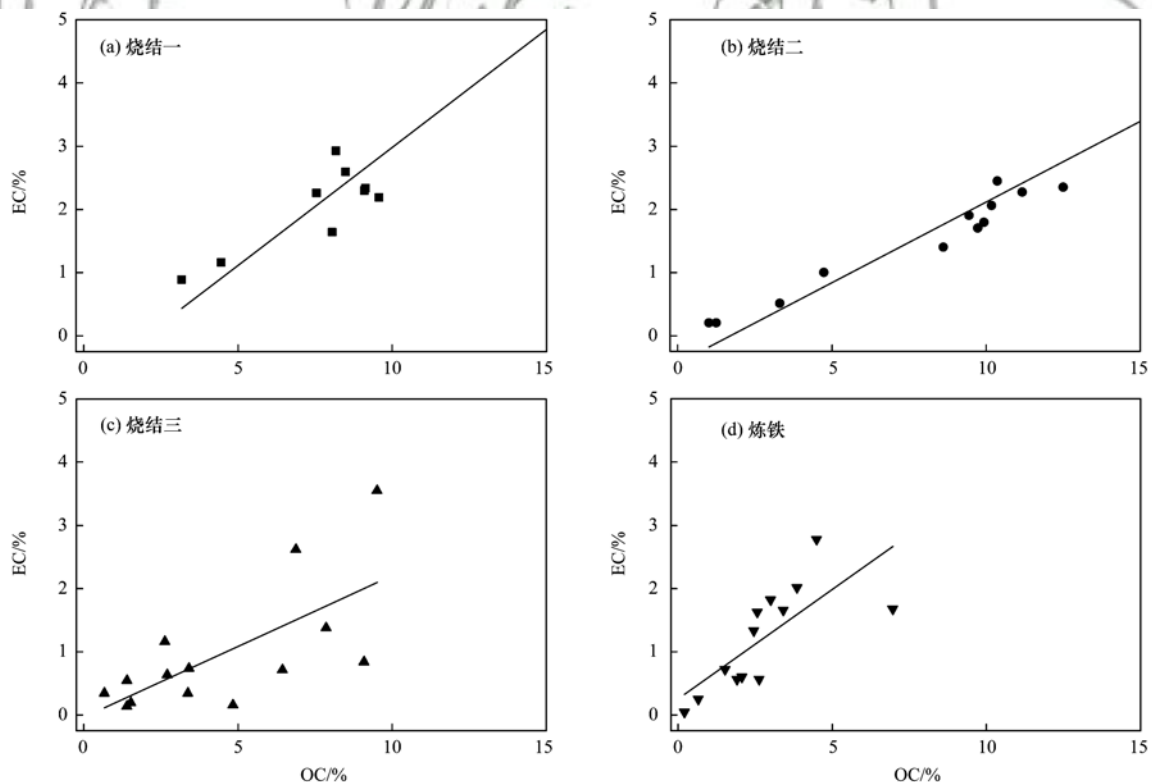


图 4 OC 和 EC 相关性分析

Fig. 4 Correlations analysis of OC and EC

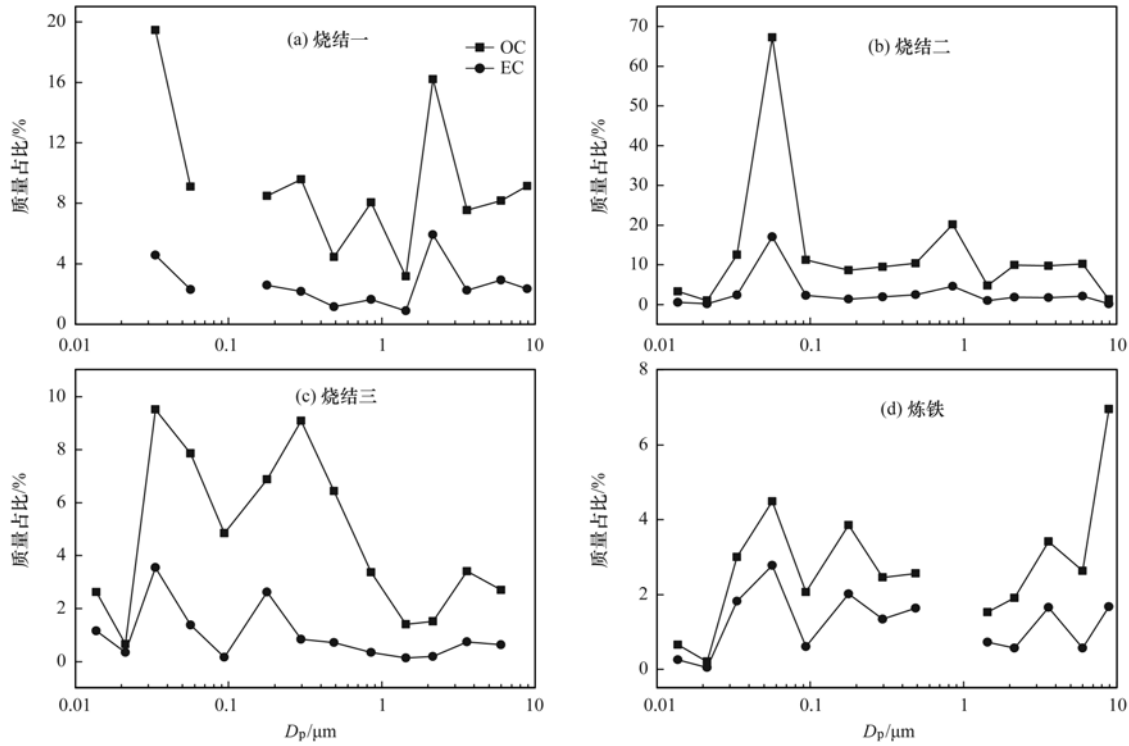


图 5 OC 和 EC 的粒径分布  
Fig. 5 Particle size distribution of OC and EC

2.3 7 种碳组分特征

根据 Improve-A 升温协议,将碳组分按温度划分为 7 种,图 6 所示为 4 组样品中的 7 种碳组分质

量分数特征,可以看出,烧结一和烧结二样品碳组分结构非常相似,OC3 质量分数最高,其次是 OC2,EC 中,均为  $\text{EC1} > \text{EC2} > \text{EC3}$ ,可能是烧结一和烧结二

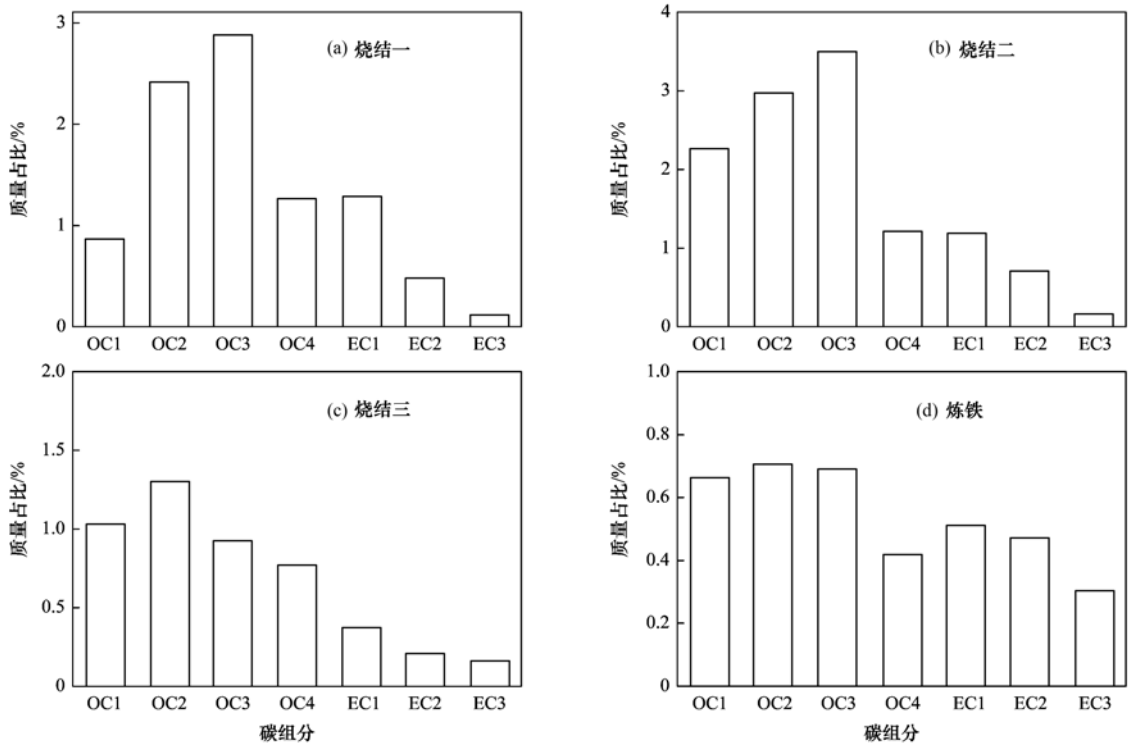


图 6  $\text{PM}_{2.5}$  中 7 种碳组分的特征  
Fig. 6 Characteristics of the even carbonaceous components in  $\text{PM}_{2.5}$

表 4 OC 和 EC 相关性分析

Table 4 Correlation analysis of OC and EC

| 锅炉  | 拟合方程                | 皮尔逊系数 |
|-----|---------------------|-------|
| 烧结一 | $y = -0.75 + 0.37x$ | 0.93  |
| 烧结二 | $y = -0.43 + 0.25x$ | 0.98  |
| 烧结三 | $y = -0.03 + 0.22x$ | 0.68  |
| 炼铁  | $y = 0.25 + 0.35x$  | 0.74  |

同在 A 公司,煤质和矿石几乎相同造成的,不同处为,烧结一中 OC1 的质量分数较低,这一原因有可能与锅炉规模有关,烧结二的锅炉吨位明显高于烧结一,Wierzbicka 等<sup>[32]</sup>曾发现 OC 的质量分数与锅炉的载荷相关,但是,本研究认为这可能还与其脱硫方式有关,烧结一采用干法脱硫,烟气中的气-液相转化效率低于烧结二的湿法脱硫,且烟温高,造成沸点较低的部分 OC1 以气体形式存在,并且,采用半干法的烧结三样品中 OC1 质量分数特征也可作为这一现象的佐证. 烧结三样品中为 OC2 > OC1 > OC3 > OC4 > EC1 > EC2 > EC3,与前两个样品略有不同,可能是由于煤源地和工况均不同造成的. 总体而言,无论是烧结样品还是炼铁样品,源颗粒物 OC 中突出的组分是 OC2 和 OC3,EC 含量中均为 EC1 > EC2 > EC3,4 组样品碳组分成分谱的两两相关系数均在 0.73 以上,说明钢铁工艺排放颗粒物中 7 种碳组分相对比例相似,指纹特征明显,但炼铁源排放颗粒物的 7 种碳组分质量分数相对较少,在 0.3%~0.7% 范围内.

3 结论

(1) 烧结工艺排放的颗粒物粒径较粗,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 范围为 0.10~0.46. 颗粒物中的 OC 易在细粒径段中富集,PM<sub>2.5</sub> 中的 OC 所占质量分数明显高于 PM<sub>10</sub>. 另外,一次排放的 PM<sub>2.5</sub> 中 OC/EC 为 4.7±0.7,高于受体中估算二次碳组分的指标值.

(2) 炼铁工艺排放的颗粒物粒径较细,OC 所占质量分数相比烧结工艺要低,但是 EC 所占质量分数是与烧结工艺接近.

(3) 7 种碳组分的指纹特征明显,丰富了钢铁工业源的成分谱信息,有利于 CMB 等受体模型的进一步精细化解析.

参考文献:

[ 1 ] Tian M, Wang H B, Chen Y, *et al.* Characteristics of aerosol pollution during heavy haze events in Suzhou, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16** (11): 7357-7371.

[ 2 ] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度

PM<sub>2.5</sub>持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 1-8.

Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of PM<sub>2.5</sub> related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 1-8.

[ 3 ] 高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 等. 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4094-4102.

Gao S, Cui H X, Fu Q Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs of high pollution process at chemical industrial area in winter of China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4094-4102.

[ 4 ] Zhang R J, Ho K F, Cao J J, *et al.* Organic carbon and elemental carbon associated with PM<sub>10</sub> in Beijing during spring time [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172** (2-3): 970.

[ 5 ] Offenberg J H, Baker J E. The influence of aerosol size and organic carbon content on gas/particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(7): 1205-1220.

[ 6 ] 符海欢, 田娜, 商惠斌, 等. 模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 46-52.

Fu H H, Tian N, Shang H B, *et al.* Size distribution of particle and polycyclic aromatic hydrocarbons in particle emissions from simulated emission sources[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 46-52.

[ 7 ] 闻胜, 惠阳, 张晓岭, 等. 烧结厂烟尘和静电除尘器灰尘中二噁英的分布特征[J]. 环境化学, 2007, **26**(6): 823-827.

Wen S, Hui Y, Zhang X L, *et al.* Levels and characteristics of polychlorinated Dibenzo-*P*-dioxin and polychlorinated dibenzofuran in fly ash and ESP dusts from a Chinese sinter plant [J]. Environmental Chemistry, 2007, **26**(6): 823-827.

[ 8 ] 耿静, 吕永龙, 任丙南, 等. 淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1171-1178.

Geng J, Lü Y L, Ren B N, *et al.* Effects of eliminating backward production capacities on reduction of dioxin emissions in key industries [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1171-1178.

[ 9 ] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 2002, **297** (5590): 2250-2253.

[ 10 ] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. Nature, 2001, **409** (6821): 695-697.

[ 11 ] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H, *et al.* Simulating changes in source profiles from Coal-Fired Power Stations: use in chemical mass balance of PM<sub>2.5</sub> in the Mount Zirkel Wilderness [J]. Energy & Fuels, 2002, **16**(2): 311-324.

[ 12 ] Zhao Z F, Du Q, Zhao G B, *et al.* Fine particle emission from an industrial Coal-Fired Circulating Fluidized-Bed Boiler equipped with a fabric filter in China [J]. Energy & Fuels, 2014, **28**(7): 4769-4780.

[ 13 ] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from

- residential coal combustion in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(6): 1861-1867.
- [14] 孙英明, 吴建会, 马咸, 等. 烧结工艺颗粒物中水溶性离子排放特性分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2270-2274.
- Sun Y M, Wu J H, Ma X, *et al.* Emission characteristics of water-soluble ions in the particulate matters from sintering process [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2270-2274.
- [15] 王亚军. 钢铁厂烧结机  $PM_{2.5}$  产排特性的实验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015. 43-46.
- [16] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对  $PM_{10}$  排放特征影响研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 1921-1927.
- Yi H H, Hao J M, Duan L, *et al.* Influence of dust catchers on  $PM_{10}$  emission characteristics of power plants[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(10): 1921-1927.
- [17] Happonen M, Mylläri F, Karjalainen P, *et al.* Size distribution, chemical composition, and hygroscopicity of fine particles emitted from an oil-fired heating plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 14468-14475.
- [18] Chow J C, Watson J G, Chen L W A, *et al.* Refining temperature measures in thermal/optical carbon analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(11): 2961-2972.
- [19] Cao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [20] 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 关中地区冬季  $PM_{2.5}$  中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 427-433.
- Tian P S, Cao J J, Han Y M, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbonaceous aerosol in  $PM_{2.5}$  during winter in Guanzhong area [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 427-433.
- [21] Marjamäki M, Keskinen J, Chen D R, *et al.* Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI) [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2000, **31**(2): 249-261.
- [22] 范真真, 赵亚丽, 赵浩宁, 等. 高炉炼铁工艺细颗粒物  $PM_{2.5}$  排放特性分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3287-3292.
- Fan Z Z, Zhao Y L, Zhao H N, *et al.* Emission characteristics of  $PM_{2.5}$  from blast furnace iron making [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3287-3292.
- [23] 李超, 李兴华, 段雷, 等. 燃煤工业锅炉可吸入颗粒物的排放特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 650-655.
- Li C, Li X H, Duan L, *et al.* Emission characteristics of  $PM_{10}$  from coal-fired industrial boiler [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 650-655.
- [24] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 上海  $PM_{2.5}$  工业源谱的建立[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(8): 1354-1359.
- Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Establishing  $PM_{2.5}$  industrial source profiles in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(8): 1354-1359.
- [25] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009. 34-35.
- [26] Ma X, Wu J H, Zhang Y F, *et al.* Size-classified variations in carbonaceous aerosols from real coal-fired boilers [J]. *Energy & Fuels*, 2016, **30**(1): 39-46.
- [27] 齐堃, 戴春岭, 冯媛, 等. 石家庄市  $PM_{2.5}$  工业源成分谱的建立及分析[J]. *河北工业科技*, 2015, **32**(1): 78-84.
- Qi K, Dai C L, Feng Y, *et al.* Establishment and analysis of  $PM_{2.5}$  industrial source profiles in Shijiazhuang City [J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2015, **32**(1): 78-84.
- [28] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区  $PM_{2.5}$  中有机碳和元素碳变化特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3263-3270.
- Zhang Y H, Wang D F, Zhao Q B, *et al.* Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in  $PM_{2.5}$  in Shanghai urban area [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3263-3270.
- [29] 吴琳, 冯银厂, 戴莉, 等. 天津市大气中  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  及其碳组分污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(11): 1134-1139.
- Wu L, Feng Y C, Dai L, *et al.* Characteristics of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and their carbonaceous species in Tianjin City [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(11): 1134-1139.
- [30] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 基于重庆本地碳成分谱的  $PM_{2.5}$  碳组分来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 810-819.
- Zhang C, Zhou Z E, Zhai C Z, *et al.* Carbon source apportionment of  $PM_{2.5}$  in Chongqing based on local carbon profiles [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 810-819.
- [31] 欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 等. 燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1975-1982.
- Ouyang L H, Zhuang Y, Liu K W, *et al.* Analysis on mechanism of rainout carried by wet stack of thermal power plant [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1975-1982.
- [32] Wierzbicka A, Lillieblad L, Pagels J, *et al.* Particle emissions from district heating units operating on three commonly used biofuels [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(1): 139-150.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                         |                                                               |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------|
| Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated $\text{MgCl}_2$ Solution                                                                            | LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>       | (3095) |
| Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry                                                           | ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>          | (3102) |
| Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City                                                          | GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>           | (3110) |
| Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China                                                    | JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>         | (3120) |
| Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China                                                                         | WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>            | (3130) |
| Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck                                                               | XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>                   | (3139) |
| Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System                                     | SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>      | (3146) |
| $\text{PM}_{10}$ Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM                                                                                                   | WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>            | (3153) |
| Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port                                                         | HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>    | (3162) |
| Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols                                                                    | LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>          | (3169) |
| Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities                                                               | LU Hui-jie                                                    | (3178) |
| Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China                                                                                                          | ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>         | (3185) |
| Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River                                                                         | NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>             | (3192) |
| Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River                                                                                                         | ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>              | (3200) |
| Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer                                           | WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>         | (3209) |
| Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo                                          | XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>             | (3218) |
| Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin                                           | ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>        | (3225) |
| Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario                                               | LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>                | (3235) |
| Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance                                                  | LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>            | (3243) |
| Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area   | CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>         | (3254) |
| Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed | E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>              | (3264) |
| New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination                                                                     | LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>               | (3273) |
| Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process                                                                      | ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>                  | (3281) |
| Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River                                              | XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>                  | (3290) |
| Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir                                                     | SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>     | (3302) |
| Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms                                                                                                         | WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>                  | (3312) |
| Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake                                                                                         | ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>               | (3319) |
| Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology                                                            | ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> | (3330) |
| Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora                                                                       | MENG Ting, YANG Hong                                          | (3339) |
| Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource                                                                                            | HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>        | (3347) |
| Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture                                                     | WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>       | (3354) |
| Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater                                     | LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>          | (3362) |
| Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater                                           | YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>                | (3369) |
| Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX                                                                                                               | ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>                 | (3377) |
| Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue                                                                       | KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>        | (3385) |
| Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space                                                                                           | WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>              | (3393) |
| Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR                                                                                                            | ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>            | (3399) |
| Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System                                                                                          | WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i>            | (3406) |
| Effect of Different TOC to $\text{NH}_4^+$ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process                                                              | WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>                    | (3415) |
| Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge                                                                                 | TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>               | (3422) |
| Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate                                                                            | SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>      | (3429) |
| Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge                                           | LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>                | (3435) |
| Characteristics of $\text{N}_2\text{O}$ and $\text{NO}_x$ Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes                                              | HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo, <i>et al.</i>                        | (3442) |
| Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field                                                                                              | ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>             | (3451) |
| Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia                                            | ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>        | (3463) |
| Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils                                                                           | XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>        | (3473) |
| Effects of $\text{CaCO}_3$ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil                                                                                 | GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>      | (3483) |
| Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil                                                       | WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>          | (3489) |
| Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors                                                                      | ZHANG Yan-jun                                                 | (3497) |
| Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications                                                           | WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>               | (3507) |
| Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium                                         | ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>           | (3519) |
| Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation                                                                                                    | WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>              | (3529) |
| Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting                                                     | YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>              | (3536) |
| Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China                                                                                       | LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun                           | (3544) |