环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2019

Vol.40 No.3

第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 3 期 2019 年 3 月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

四川省典型工业行业 $PM_{2.5}$ 成分谱分析

冯小琼[1,2], 陈军辉[2*], 熊文朋[1], 梅林德[1], 徐雪梅[1], 尹寒梅[1], 范武波[2], 姜涛[2], 钱骏[2], 叶宏[2]
(1. 四川省环保科技工程有限责任公司, 成都 610041; 2. 四川省环境保护科学研究院, 成都 610041)

摘要: 利用荷电低压颗粒物撞击器(ELPI+)对四川省水泥行业、玻璃行业、陶瓷行业、砖瓦行业、燃煤锅炉、生物质锅炉、电厂、钢铁行业等典型行业开展排放特征测试, 通过组分分析, 获取各行业 $PM_{2.5}$ 成分特征谱. 结果表明: ① 水泥、玻璃、陶瓷、砖瓦等建材行业均以 Si、Ca、Mg 等元素为主要排放组分, 双碱法脱硫 SO_4^{2-} 排放占比高于其他脱硫工艺; ② 电厂 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^{2-}、Ca^{2+}、NH_4^+、Mg 和 Si 为特征组分; 燃煤锅炉中 OC、Al、Si 和 Ca 等为特征组分; ③ OC 和 EC 是生物质锅炉 $PM_{2.5}$ 主要排放组分, 成型生物质燃料锅炉中 K 排放占比也较高, 非成型生物质燃料锅炉中 Cl^- 排放占比为所有行业中最高; ④ 钢铁行业中 Ca 含量最高, 为 18.11%, 其次为 SO_4^{2-}、Na^+ 和 Fe.

关键词: 细颗粒物; 工业行业; 成分谱; 四川省; 排放特征
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1043-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201804137

Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province

FENG Xiao-qiong[1,2], CHEN Jun-hui[2*], XIONG Wen-peng[1], MEI Lin-de[1], XU Xue-mei[1], YIN Han-mei[1], FAN Wu-bo[2], JIANG Tao[2], QIAN Jun[2], YE Hong[2]
(1. Sichuan Province Environmental Protection Technology Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Research Institute of Environmental Protection, Chengdu 610041, China)

Abstract: An electrical low pressure impactor particle monitor was used to monitor typical industries in Sichuan Province, such as cement, glass, ceramic, brick-tile, coal-fired boiler, biomass boiler, power plant, and steel industry. Fine particulate matter source profiles of each industry were developed based on the laboratory analysis. The results showed that Si, Ca, and Mg were the major elements of building industry particulate matter emission. Sulfate emission from double sodium-calcium was higher than from other desulfurization technologies in the building industry. The main chemical components of $PM_{2.5}$ from power plants were SO_4^{2-}, Ca^{2+}, NH_4^+, Mg, and Si, while OC, Al, Si, and Ca were the main chemical components of $PM_{2.5}$ from coal-fired boilers. The content of OC was the most abundant in biomass briquette boiler particulate matter emissions, followed by K and EC. In term of the biomass fuel boiler $PM_{2.5}$ source profile, OC, EC, and Cl^- were the major chemical components. Ca was the largest component of $PM_{2.5}$ from the steel industry, accounting for 18.11% of the total $PM_{2.5}$ emission, followed by SO_4^{2-}, Na^+, and Fe.

Key words: fine particulate matter; industries; source profile; Sichuan Province; emission characteristics

颗粒物成分谱是区域空气质量模型模拟的重要数据之一, 也是化学组分清单、污染形成机制研究、源解析、灰霾污染控制策略制定和风险暴露评估等研究的重要基础. 尤其是源解析模型和空气质量模型, 本地化的污染源成分谱是模型的关键输入文件之一, 也是模型的关键影响因素, 可有效提高模型模拟结果的准确性, 为环境空气质量改善提供科学依据和技术支撑[1~4]. 因此, 国内外很多地区均建立了颗粒物污染源成分谱库, 如美国[5]、土耳其[6]、墨西哥[7], 国内的北京市[8]、天津市[9]、上海市[10]、重庆市[11]等. 颗粒物污染源成分谱具有一定地域性, 以建筑水泥尘为例, 除了 Ca 以外, 其主量成分不同地方略有差异: K 是土耳其建筑水泥尘中排放量第二的元素[6]; OC 是除 Ca 之外墨西哥建筑尘排放量最大的组分[7]; SO_4^{2-} 则是香港建筑水泥尘排放的主要成分[12]; 而在美国得克萨斯州的研究结果表明 SO_4^{2-} 的排放量甚至超过了 Ca, 为 31%[8], 而 Ca 仅为 19%, 因此建立本地化的颗粒物污染源成分谱十分必要.

四川省是西部经济、人口与资源大省, 目前大气污染正呈现出复合型、区域性的特征, 主要表现为一次污染和二次污染的相互影响、相互叠加, 进而造成以高浓度臭氧为代表的光化学污染事件和以高浓度细粒子污染为代表的大气灰霾过程的持续出现[13]. 相关研究表明, 工业源是四川省颗粒物的主要排放来源[13], 然而目前鲜有针对四川省颗粒物工业源成分谱的研究报道. 本研究针对四川省水泥、玻璃等建材行业, 以及燃煤锅炉、生物质锅炉、钢铁行业、电厂等行业进行深入调查和污染排放特征测试分析, 建立源排放成分谱, 以期为政府拟定环境保护政策提供科学决策依据.

收稿日期: 2018-04-17; **修订日期**: 2018-09-07
基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(17ZDYF0779)
作者简介: 冯小琼(1986~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: f_xiaoqiong@126.com
* 通信作者, E-mail: 9503062@qq.com

1 材料与方法

1.1 试验对象筛选

相关研究表明[13]，建材、钢铁、电厂等行业是四川省 $PM_{2.5}$ 主要工业排放来源，排放量分别占工业源 $PM_{2.5}$ 排放总量的 39%、38%、5%. 建材行业中，水泥、玻璃、陶瓷等行业为主要排放行业. 因此本研究选取电厂、钢铁、水泥、玻璃、陶瓷、砖瓦、燃煤锅炉、生物质锅炉等作为典型行业开展 $PM_{2.5}$ 本地化成分谱研究. 此外，考虑企业生产规模、生产工艺、治理设施的差异，各行业分别选择 1 ~ 3 家企业开展测试，共测试 19 家企业，具体采样位置均是在污染治理设施后，测试企业基本信息如表 1 所示，燃煤锅炉和燃煤电厂所使用的煤炭信息如表 2 所示.

1.2 采样测试系统

本研究利用芬兰 dekati 公司的ELPI+ (electrical low pressure impactor) 及其烟枪系统采集污染源颗粒物样品，ELPI+ 可实时测量颗粒物粒径分布和质量浓度，其工作原理基于荷电、低压撞击、电荷测量这 3 个部分. 采样系统如图 1 所示，含有细颗粒的烟气经过预切割器和稀释器后，进入单极电晕充电室进行充电，带电的颗粒物在低压串联的撞击器内依照空气动力学粒径分级收集. 串联撞击器间绝缘，并各自连接灵敏静电计，测量其收集颗粒物产生的电流值，每一级电流值与颗粒物粒子数成正比.

ELPI+ 将 6 nm ~ 10 μm 颗粒分为 14 级(表 3)，前 13 级测量 17 nm ~ 10 μm 颗粒，每一级收集的颗粒物可用于后续化学分析. 最后一级为过滤段，测量 6 ~ 17 nm 颗粒. 为保证数据的有效性，所有粒径段均放置石英膜和 Teflon 膜，在工况稳定的情况下进行采集，每个企业采集完 1 组石英膜后再采集 1 组 Teflon 膜，共采集 3 组石英膜和 3 组 Teflon 膜.

表 1 测试企业基本情况

Table 1 Information about monitoring industries

编号	企业基本情况	所属行业	采样位置
企业 1	水泥产量 15 000 $t \cdot d^{-1}$，SNCR 脱硝，布袋除尘	水泥	窑尾
企业 2	水泥产量 5 000 $t \cdot d^{-1}$，SNCR 脱硝，静电除尘	水泥	窑尾
企业 3	水泥产量 2 200 $t \cdot d^{-1}$，SNCR 脱硝，布袋除尘	水泥	窑尾
企业 4	玻璃产量 1 000 $t \cdot d^{-1}$，静电除尘，SCR 脱硝	平板玻璃	窑炉
企业 5	玻璃产量 1 600 $t \cdot d^{-1}$，静电除尘，SCR 脱硝	平板玻璃	窑炉
企业 6	玻璃产量 165 $t \cdot d^{-1}$，水膜除尘，双碱法脱硫	日用玻璃	窑炉
企业 7	玻璃产量 23 $t \cdot d^{-1}$，无治理设施	日用玻璃	窑炉
企业 8	陶瓷产量 60 000 $m^2 \cdot d^{-1}$，布袋 + 水膜除尘，双碱法脱硫	陶瓷行业	窑炉
企业 9	陶瓷产量 7 300 $m^2 \cdot d^{-1}$，布袋 + 水膜除尘，双碱法脱硫	陶瓷行业	窑炉
企业 10	砖瓦日产量 100 块，双碱法脱硫	砖瓦行业	窑炉
企业 11	8 $t \cdot h^{-1}$ 层燃炉，造纸行业，使用烟煤为燃料，炉内喷钙脱硫，旋风 + 水膜除尘	燃煤锅炉	锅炉
企业 12	35 $t \cdot h^{-1}$ 循环流化床锅炉，造纸行业，使用无烟煤为燃料，石灰石-石膏湿法脱硫，布袋除尘	燃煤锅炉	锅炉
企业 13	75 $t \cdot h^{-1}$ 循环流化床锅炉，化学纤维制造行业，使用无烟煤为燃料，炉内喷钙脱硫，SNCR 脱硝，布袋除尘	燃煤锅炉	锅炉
企业 14	4 $t \cdot h^{-1}$ 层燃炉，家具行业，非成型生物质作为燃料，水膜除尘	生物质锅炉	锅炉
企业 15	35 $t \cdot h^{-1}$，木材加工行业，非成型生物质作为燃料，旋风除尘	生物质锅炉	锅炉
企业 16	15 $t \cdot h^{-1}$，成型生物质作为燃料，布袋除尘	生物质锅炉	锅炉
企业 17	2 台 600 MW 机组，煤粉炉，静电除尘，SCR 脱硝，石灰石-石膏湿法脱硫	电厂	锅炉
企业 18	2 台 600 MW 超临界燃煤发电机组，煤粉炉，静电除尘，SCR 脱硝，石灰石-石膏湿法脱硫	电厂	锅炉
企业 19	烧结矿产量 1 800 $t \cdot d^{-1}$、生铁产量 5 648 $t \cdot d^{-1}$、粗钢产量 6 143 $t \cdot d^{-1}$，烧结烟气采用石灰石-石膏法脱硫，布袋除尘，高炉烟气采用布袋除尘	钢铁行业	烧结结尾，高炉

表 2 燃煤锅炉与燃煤电厂煤炭信息/%

Table 2 Information about coal for boiler and power plant/%

企业编号	含硫率	灰分	挥发分	烟气含氧量	煤炭产地
企业 11(燃煤锅炉)	0.5	11.2	26.16	16.37	陕西
企业 12(燃煤锅炉)	1.18	38.1	7.97	11.1	陕西
企业 13(燃煤锅炉)	1.48	44.2	8.12	12.11	陕西
企业 17(电厂)	3.39	32.14	14.46	8.23	泸州
企业 18(电厂)	3.37	34.79	15.41	7.67	宜宾

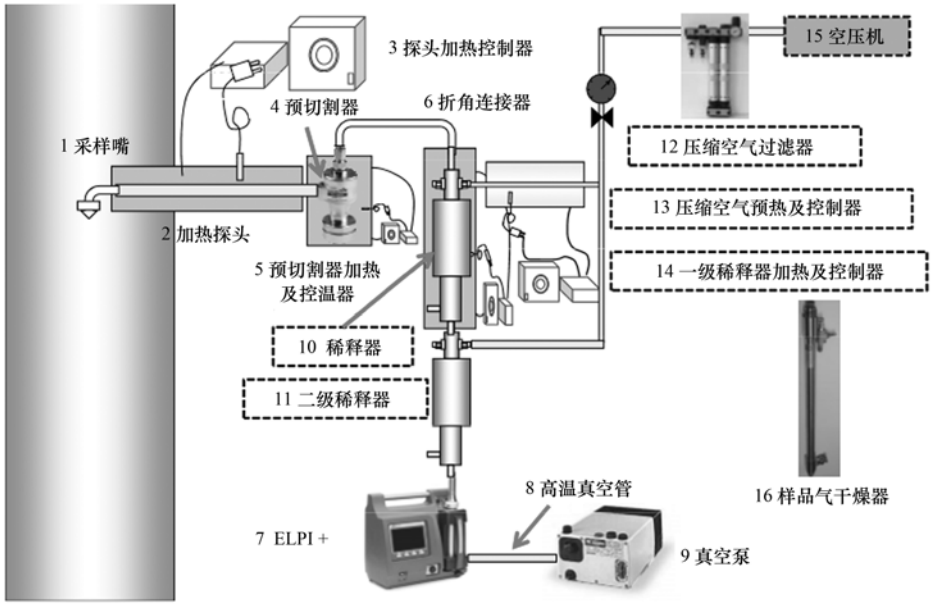


图 1　ELPI+ 颗粒物污染源测试原理示意

Fig. 1　ELPI+ particulate matter monitoring principle

表 3　ELPI+ 各级捕集颗粒物粒径/μm

Table 3　Diameter of particles captured by ELPI+ drip catcher at various stages/μm

级数	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
粒径	0.006	0.017	0.03	0.06	0.108	0.17	0.26	0.4	0.64	1	1.6	2.5	4.4	6.8	10

1.3　样品分析方法

采样膜处理：石英膜使用前在 700℃ 的马福炉中灼烧 2 h，以消除膜上有机物对碳质组分测量带入的正误差影响. Teflon 膜不做处理. 采样前的石英膜和 Teflon 膜放置在铝箔袋中，包裹石英膜的铝箔也在马福炉中灼烧. 样品采集后，放在 4℃ 的冰箱保存[14].

水溶性离子分析：采样后的石英膜经超纯水超声萃取和 0.45 μm 水系微孔滤头过滤后，采用戴安 ICS1100 离子色谱仪进行阴、阳离子测量. 阳离子分析使用 CS12A 分析柱和 CG12A 保护柱，淋洗液为 20 $mmol \cdot L^{-1}$ 的甲基磺酸溶液；阴离子分析柱为 AS11-HC，保护柱为 AG11-HC，淋洗液为 30 $mmol \cdot L^{-1}$ 的 KOH 溶液. 将 3 ~ 13 级样品混合进行超声提取，测试的离子组分包括 Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等.

有机碳和元素碳分析：采样后的石英膜使用美国沙漠研究所（DRI）研制的碳分析仪（DRI 2001A）测量有机碳（OC）和元素碳（EC）. 由于 OC/EC 分析不需要前处理，每级样品进行分析后，将 3 ~ 13 级样品测试结果加和即为 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 浓度.

无机元素分析：采样后的 Teflon 膜通过微波消解后，采用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS NexION 300）进行测量，测量的元素组分包括 K、Si、Ca、Mg、Zn、Fe、Al、Ti、Ni、Pb、Mn、Cu、Cr、Se、Ba、As、Sn、Mo、V、Cd 等. 微波消解方法为：①用陶瓷剪刀剪 1/4 Teflon 滤膜放入消解罐中，加入 HNO_3 3 mL、HCl 3 mL 和 H_2O_2 3 mL，在微波消解仪（Mars6）中消解，5 min 升温至 120℃，保持 5 min；5 min 升温至 160℃，保持 5 min；继续 5 min 升温至 180℃，保持 40 min. 消解结束后，转移至 50 mL 容量瓶中，用超纯水定容，用中速定量滤纸过滤残渣，滤液收集于定容试管中，待测. 此消解方法适用于 K、Ca、Mg、Zn、Fe、Al、Ti、Ni、Pb、Mn、Cu、Cr、Se、Ba、As、Sn、Mo、V、Cd 等元素. ②取 1/4 Teflon 滤膜样品用陶瓷剪刀剪碎，放入聚四氟乙烯消解罐中，加入 3%（质量分数）氢氧化钾溶液 20mL，放置于消解罐专用加热仪器中，保持微沸，蒸至近干，取下消解罐. 过滤，用试管收集滤液并定容至 50 mL，待测. 此消解方法适用于 Si. 将 3 ~ 13 级样品混合进行微波消解.

2　结果与讨论

2.1　$PM_{2.5}$ 成分谱特征分析

经过组分分析后，采用归一化的方法得到四川省典型行业 $PM_{2.5}$ 化学成分所占质量分数统计结果，

如表4所示.

2.1.1 电厂

电厂 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 含量最高，占比为39%，其次是 Ca^{2+}、NH_4^+、Mg 和 Si，占比分别为14%、8%、7%和7%. SO_4^{2-} 排放量较高一是由于测试的电厂燃煤含硫率较高，平均为3.38%；二是由于2家企业均采用石灰石-石膏法脱硫，该工艺的核心是将燃煤烟气绝热增湿，以促进 $Ca(OH)_2$ 与 SO_2 反应的进行，烟气湿度大，加速了 SO_2 在水中的溶解，SO_2 溶于水后生成 H_2SO_3，可与其它阳离子生成稳定的盐，或氧化成不易挥发的 H_2SO_4，SO_4^{2-} 是湿法脱硫后的主要产物[8]. NH_4^+ 含量较高可能是与SCR脱硝工艺有关，该技术原理为在催化剂作用下，向温度约280~420℃的烟气中喷入氨，将 NO_x 还原成 N_2 和 H_2O. 向烟气中喷入的氨存在一定的逃逸，根据测试企业氨逃逸率仪器监测结果显示，氨逃逸率约为3%. Ca^{2+}、Mg 和 Si 排放主要来自煤炭燃烧[8]，Ca^{2+} 含量较高还与石灰石-石膏法脱硫工艺有关.

2.1.2 燃煤锅炉

燃煤锅炉颗粒物中主要成分为 OC，占比为38%，其次是无机元素 Al、Si 和 Ca 等元素. 郝吉明等[15]的研究也表明，燃煤工业锅炉中 OC 的含量为3.7%~21.4%. 而 Al、Si 和 Ca 等元素含量较高，

表4 典型行业 $PM_{2.5}$ 成分谱1)/%

Table 4 $PM_{2.5}$ source profile of typical industries/%

项目	电厂		燃煤锅炉		成型生物质锅炉		非成型生物质锅炉		水泥		玻璃		陶瓷		砖瓦		钢铁（烧结和高炉烟气）	
	占比	偏差	占比	偏差	占比	偏差	占比	偏差	占比	偏差	占比	偏差	占比	偏差	占比	偏差	占比	偏差
Na^+	2.35	0.51	5.29	2.65	3.56	0.01	4.06	2.37	3.33	2.85	3.45	2.40	7.12	1.00	11.66	2.08	11.02	0.83
NH_4^+	7.96	0.23	1.30	0.46	0.97	0.01	2.06	1.63	1.67	0.96	1.41	0.97	1.56	2.20	0.00	0.38	2.68	0.49
K^+	0.67	0.78	0.58	0.56	0.19	0.00	5.54	3.56	0.19	2.47	1.48	2.62	2.58	3.12	0.47	0.74	1.34	0.69
Mg^{2+}	4.12	2.77	0.66	0.10	0.57	0.00	0.41	0.17	0.99	1.00	0.61	0.65	8.78	3.70	4.73	3.12	3.06	0.52
Ca^{2+}	14.30	8.34	3.02	2.02	0.93	0.00	2.71	2.78	9.08	1.58	1.09	1.78	18.10	5.51	12.58	5.29	6.51	2.17
Li^+	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.38	0.20	nd	nd	0.96	0.22	nd	nd	2.54	0.06
Cl^-	2.91	2.87	1.40	0.57	3.89	0.01	10.95	5.85	0.77	3.15	1.96	1.90	6.69	6.44	2.94	3.83	4.28	1.67
NO_3^-	1.39	1.33	0.95	0.21	0.42	0.00	2.13	2.63	0.67	1.08	0.80	0.82	2.56	2.73	0.89	1.54	1.65	1.07
SO_4^{2-}	39.23	4.99	3.44	1.78	1.52	0.00	4.34	4.17	4.65	2.91	15.55	9.40	11.30	0.18	17.04	7.50	12.99	1.16
F^-	nd	nd	0.46	0.36	0.04	0.00	1.16	1.50	0.01	0.02	0.60	1.01	0.75	0.00	nd	nd	0.85	0.00
PO_4^{3-}	0.61	0.08	1.76	0.40	0.82	0.00	2.91	2.30	1.77	0.86	2.13	2.64	4.05	1.42	4.71	5.01	5.76	0.45
Br^-	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.59	0.30	nd	nd	1.05	0.27	nd	nd	1.91	0.13
Ca	1.63	2.03	12.56	6.59	5.02	4.09	2.42	2.46	25.16	5.80	24.93	11.08	9.10	4.47	2.62	2.12	18.11	1.36
K	1.89	1.78	1.18	1.31	30.39	4.00	4.09	4.02	1.35	3.54	4.06	3.12	1.60	0.57	0.75	0.41	5.69	1.10
Mg	6.77	4.44	2.17	1.44	0.73	3.02	0.69	0.31	5.49	5.66	4.43	2.77	3.92	4.43	0.32	0.29	1.07	0.21
Si	7.23	5.40	8.06	6.45	1.24	1.12	1.50	0.02	27.82	12.72	25.19	8.85	7.34	3.05	33.80	8.54	0.00	0.00
Al	0.41	0.23	9.09	3.51	0.83	0.09	0.88	0.01	2.71	1.86	2.11	2.00	2.32	2.52	2.76	2.13	1.96	1.36
Ti	0.08	0.09	3.82	3.02	2.10	0.00	2.07	2.53	1.39	2.06	0.09	0.09	0.09	0.10	0.20	0.75	0.45	0.23
V	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.07	0.03	0.03	0.04	0.02
Cr	0.00	0.01	0.12	0.15	0.03	0.00	0.07	0.05	0.10	0.14	0.00	0.00	0.24	0.26	0.09	0.13	0.32	0.29
Mn	0.09	0.13	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	5.08	4.87	0.08	0.13	0.05	0.07	0.02	3.02	0.10	0.01
Fe	1.69	2.22	1.62	1.47	2.36	0.00	1.85	1.53	2.43	3.65	1.28	1.15	3.19	2.10	1.57	2.96	9.26	2.80
Ni	0.08	0.11	0.29	0.42	0.05	0.00	0.20	0.16	0.01	0.01	0.08	0.12	0.01	0.01	0.00	0.05	0.00	0.01
Cu	0.15	0.21	0.04	0.06	0.01	0.00	0.04	0.00	0.13	0.20	0.10	0.16	0.10	0.06	0.04	0.14	0.02	0.03
Zn	0.12	0.16	1.10	1.55	0.52	0.00	0.75	0.13	0.92	1.41	0.13	0.12	0.79	0.46	0.10	0.66	0.06	0.07
As	0.10	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.08	0.14	0.16	0.21	0.04	0.12	0.10	0.09
Se	0.17	0.05	0.04	0.05	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.03	0.08	0.14	0.02	0.01	0.00	0.06	0.16	0.02
Mo	0.08	0.11	0.02	0.02	0.02	0.00	0.05	0.06	0.07	0.12	0.07	0.12	0.02	0.02	0.00	0.09	0.00	0.00
Cd	0.10	0.15	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.08	0.14	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
Sn	0.08	0.11	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.18	0.32	0.07	0.12	0.04	0.06	0.01	0.17	0.01	0.01
Sb	0.08	0.11	0.04	0.06	0.03	0.00	0.03	0.05	0.91	1.60	0.08	0.12	0.01	0.01	0.00	0.58	0.02	0.00
Ba	0.00	0.00	0.11	0.14	0.29	0.00	0.33	0.31	0.01	0.10	0.32	0.61	0.01	0.01	0.00	0.24	0.27	0.03
Pb	1.28	1.80	0.16	0.16	0.53	0.00	0.59	0.57	0.48	0.92	4.67	2.28	0.22	0.11	0.01	0.77	1.64	1.28
Ag	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	0.00	0.02	0.00	0.09	0.00	nd	nd	0.77	0.00
Co	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.06	0.00
OC	3.18	1.49	37.86	14.12	33.77	0.02	36.41	4.51	1.53	1.76	2.91	2.13	4.56	1.43	2.56	1.77	4.85	1.34
EC	1.24	0.98	2.83	1.66	9.13	0.00	11.68	5.14	0.09	0.20	0.06	0.10	0.56	0.37	0.06	0.22	0.48	0.07

1) nd 表示未检出

表明这些地壳物质广泛地存在于燃煤中，这与其他研究结果基本一致[8,16,17].

燃煤锅炉成分谱与电厂相比，主要差异在于 SO_4^{2-}、OC、Al、Ca 等地壳元素. 研究表明，燃煤硫含量是影响细粒子中 SO_4^{2-} 含量的主要因素[18,19]. 测试的 2 家电厂平均含硫率为 3.38%，3 家燃煤锅炉平均含硫率为 1.05%，此外，脱硫方法不同也是造成 SO_4^{2-} 占比存在差异的原因，2 家燃煤电厂均采用石灰石-石膏湿法脱硫，而 3 家燃煤锅炉中，2 家采用炉内喷钙法脱硫，1 家采用石灰石-石膏湿法脱硫. 湿法脱硫 SO_4^{2-} 排放相对较高[8]. OC 排放则主要与锅炉类型、燃烧效率有关. 燃煤电厂均为煤粉炉，燃煤锅炉中，2 家为循环流化床，1 家为层燃炉，李松等[19]的研究表明，循环流化床碳组分排放较高. 徐健等[20]的研究表明，燃烧效率越低，OC 排放相对较高. 本研究中，燃煤电厂的含氧量平均为 7.95%，燃煤锅炉含氧量平均为 13.19%. 含氧量越高，锅炉燃烧效率越低，从而使得燃煤锅炉 OC 占比高于燃煤电厂. 地壳元素的差异可能与煤炭组分有关，电厂煤炭均为本地煤，锅炉煤炭多来自陕西. 此外，锅炉的燃烧方式、燃煤的细度、锅炉运行负荷、配风的方式及炉内空气动力场等因素均会对其造成影响.

2.1.3　生物质锅炉

本研究测试了成型生物质燃料锅炉和非成型生物质燃料锅炉，结果显示，OC 是成型生物质燃料锅炉 $PM_{2.5}$ 中排放量最高的组分，占比为 33.77%，其次为 K 和 EC. 非成型生物质燃料锅炉 $PM_{2.5}$ 中同样以 OC 排放为主，其次是 EC 和 Cl^-，Cl^- 在非成型生物质燃料锅炉中的占比高于其他行业，为 11%，而在其他行业中的占比仅为 1% ~7%. 本文中成型和非成型生物质锅炉燃烧温度均在 700℃ ~800℃，含氧量为 10% ~15%. Cl^- 和 K 差异的主要原因在于原料不同，有研究表明生物质的元素组成对其燃烧烟尘的化学组成有影响[21]. 本研究中成型生物质燃料主要为水稻、小麦和油菜秸秆等经粉碎混合挤压烘干等工艺制成，虽然本研究缺乏生物质的工业分析数据，但根据宋兴飞等[22]的研究，水稻、小麦、油菜中 K 的含量明显高于 Cl，K/Cl 分别为 2.45、2.73 和 3.26，且在 700℃ ~800℃之间，这 3 类秸秆 K 析出量较多，而 Cl 析出量相对较少，因而使得其 K 含量较高. 此外，各类秸秆在制成成型生物质燃料的过程中，各组分含量可能会发生变化，具体还需要进一步研究. 非成型生物质燃料为废家具木料、木质废料（树枝、木竹根、树皮、木渣、锯屑，木材边角余料等），Cl^-、K^+ 和 SO_4^{2-} 为主要水溶性离子，这与刘刚等[23]的研究结果基本一致.

2.1.4　建材行业

本研究共测试了水泥、玻璃、陶瓷、砖瓦等 4 个行业，Si、Ca、Mg 等元素为 4 个行业主要排放组分，如水泥行业中这 3 种元素的占比分别为 27.82%、25.16%、5.49%；玻璃行业中占比分别为 25.19%、24.93%、4.43%. 这主要与建材行业使用的原料有关，本研究测试的企业中，水泥行业原料基本为石灰石、页岩等；平板玻璃企业所用原料均为硅砂、白云石、长石、石灰石等；日用玻璃所用原料为方解石、石英砂、钾长石、白云石等；陶瓷行业主要原料为白泥（主要矿物成分是高岭石）、黏土、长石等，砖瓦行业原料为黏土、页岩等，这些物质中富含 Si、Ca、Mg 等地质元素.

不同建材行业比较来看，玻璃行业中 K 含量相对较高，占比为 4.06%，其他 3 个行业中的占比为 0.75% ~1.35%，这主要是因为玻璃采用钾长石作为生产原料，钾长石主要组分为 $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$. 陶瓷行业中 Cl^- 排放占比高于其他 3 个行业，可能与陶瓷防腐涂料有关[24]. 水泥行业中 SO_4^{2-} 排放占比明显低于玻璃、陶瓷和砖瓦行业，为 4.65%，其他 3 个行业均大于 10%. 这可能与企业脱硫工艺有关，本研究测试的企业中，日用玻璃、陶瓷和砖瓦企业均采用双碱法脱硫，而水泥行业没有进行脱硫处理. 有研究表明[8] SO_4^{2-} 等污染物排放浓度差异与其脱硫产物溶解度关系密切，不同脱硫方法的主要脱硫产物在水中的溶解度差别很大，双碱法的主要脱硫产物硫酸钠溶解度较高，若烟气带水量或湿度相同时，高可溶性脱硫产物更易于被烟气带入大气，并在大气中经干燥、凝结、聚合和吸附等物理过程，形成无机盐类细颗粒物.

2.1.5　钢铁

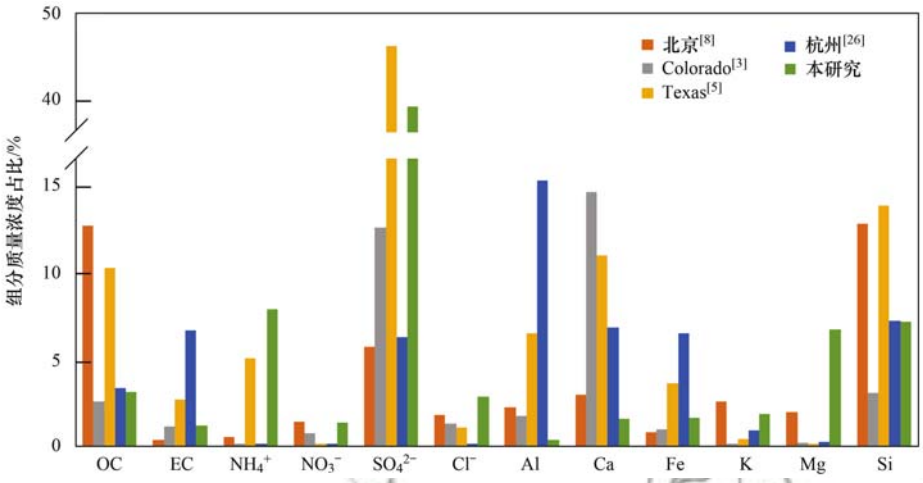
钢铁行业中烧结和高炉烟气 $PM_{2.5}$ 成分谱中 Ca 含量最高，为 18.11%，其次为 SO_4^{2-}、Na^+ 和 Fe，占比分别为 12.99%、11.02% 和 9.26%. Ca 和 Na^+ 主要来自钢铁生产过程中使用的溶剂，如石灰、碳酸钠等，主要用于去除产品中的杂质，提高产品质量. Fe 则主要来自铁矿石等生产原料. SO_4^{2-} 烧结工艺排放较高，部分来自燃煤产生的 SO_2 经二次反应生成，另一部分来源经脱硫工艺后，产生的含硫浆液滴吸附在颗粒物表面[25].

2.2　与其他地区比较

2.2.1　电厂

图 2 显示了电厂行业 $PM_{2.5}$ 中各地区主要组分对比情况. 从中可以看出，不同地区电厂行业均以

SO_4^{2-}、Si、Ca 和 OC 为主，但占比存在一定差异. SO_4^{2-} 质量分数差异最大，本研究和 Chow 等[5] 在 Texas 的研究结果相对较高，分别为 39% 和 46%，而对北京市[8]、Colorado[3]、杭州市[26] 的研究结果相对较低，分别为 6%、13%、6%. 这主要与煤炭含硫率和污染治理设施有关，本研究与北京市测试的电厂企业所采用的污染治理设施相同(表 5)，但含硫率差异较大，本研究为 3.38%，北京为 0.69%. 此外，本研究 NH_4^+ 质量分数也较高，推测与氨逃逸率有关.



图中所摘录的数据进行了归一化处理，下同

图 2 电厂行业成分谱比较

Fig. 2 $PM_{2.5}$ source profile comparison of power plants

表 5 各研究中测试企业信息

Table 5 Information about monitoring industries in different studies

项目	含硫率/%	污染治理设施	采样方法
本研究	3.38	SCR 脱硝 + 静电除尘 + 石灰-石膏湿法脱硫	治理设施后稀释通道等速跟踪采样
北京[8]	0.69	SCR 脱硝 + 静电除尘 + 石灰-石膏湿法脱硫	治理设施后稀释通道等速跟踪采样
Colorado[3]	—1)	主要为静电除尘 + 湿法脱硫	治理设施后稀释通道等速跟踪采样
Texas[5]	—	主要为布袋除尘 + 湿法脱硫	治理设施后稀释通道等速跟踪采样
杭州[26]	—	—	采集除尘后下载灰，通过颗粒物再悬浮采样系统进行粒径切割分级采样

1) 表示文献中未进行说明

2.2.2 水泥行业

水泥行业不同地区的 $PM_{2.5}$ 成分谱比较结果如图 3 所示，北京[8]、Texas[5]、云南[27] 和本研究均在治理设施后采用稀释通道等速跟踪采样，杭州[26] 采样方法为：采集除尘后下载灰，然后通过颗粒物再悬浮采样系统进行粒径切割分级采样. Si 和 Ca 为各城市水泥企业中主要组分，原因在于水泥原料多为矿石，Si、Ca 为矿石的主要组分. 各城市比较

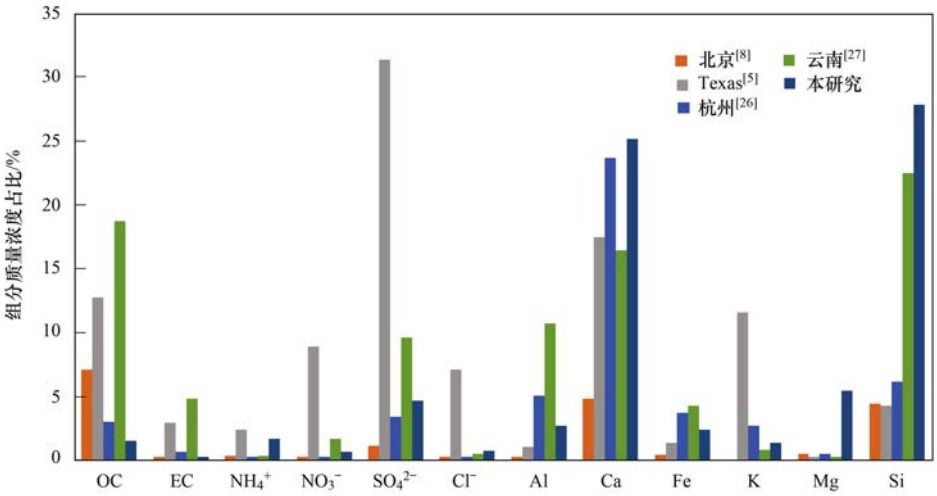


图 3 水泥行业成分谱比较

Fig. 3 $PM_{2.5}$ source profile comparison of cement industries

而言，Texas 的研究中 SO_4^{2-}、K、NO_3^-、Cl^- 组分含量较高[5]，这主要是因为原料构成和污染治理设施不同造成的. Texas 原料中 70% 为低硫煤，其他为石油焦、木屑等[5]；北京市的原料中 60% 为矿石，20% 为煤，其他为土壤或污泥[8]；本研究原料中 71% 为石灰石，27% 为煤，其余为建筑垃圾、石膏等. Texas 的原料中煤炭占比明显高于其他城市，使得其 SO_4^{2-} 占比较高，木屑则是 K 和 Cl^- 的主要来源，NO_3^- 含量较高则是因为其所测试企业没有脱硝设施，而其他城市均安装有脱硝设施(SCR 脱硝或者 SNCR 脱硝). 杭州市采样方法与其他城市不同，但各组分占比无明显差异，表明若均在污染治理设施之后进行样品采集，直接采集窑尾烟气和采集除尘下载灰-再悬浮，这两种方法对 $PM_{2.5}$ 中组分含量影响不大，水泥行业 $PM_{2.5}$ 中组分含量主要受原料构成影响.

2.2.3　燃煤锅炉

不同地区燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 成分谱对比结果如图 4 所示，所有城市均在污染治理设施之后采用稀释通道等速跟踪采样. 与其他地区研究结果相比，本研究 SO_4^{2-} 占比较低，Ca、Al、Ti 等元素占比较高. 本研究燃煤锅炉平均含硫率为 1.05%，多为炉内喷钙脱硫 + 布袋除尘；北京市[8]含硫率为 0.35%，采用氢氧化钠碱法脱硫除尘一体化；长三角地区[20]含硫率为 0.67%，未写明脱硫方法，湿法除尘；Colorado[3]未写明含硫率，无治理设施；云南[27]报道文献中未写明含硫率和脱硫方法，湿法除尘. 综合比较各地区煤炭含硫率和污染治理设施，由此可见，在含硫率均较低的情况下，治理设施对 SO_4^{2-} 排放影响较大，湿法脱硫，尤其是氢氧化钠碱法脱硫排放相对较高，且布袋除尘去除效率更高[8]. Ca、Al、Ti 等元素占比可能与煤炭成分和除尘工艺对各组分去除效率有关，由于仅长三角地区给出了煤炭的工业分析和元素分析结果，难以比较煤炭组分差异. 对比各城市除尘工艺，结果表明布袋除尘对 Ca、Al、Ti 等元素具有较好的去除效率.

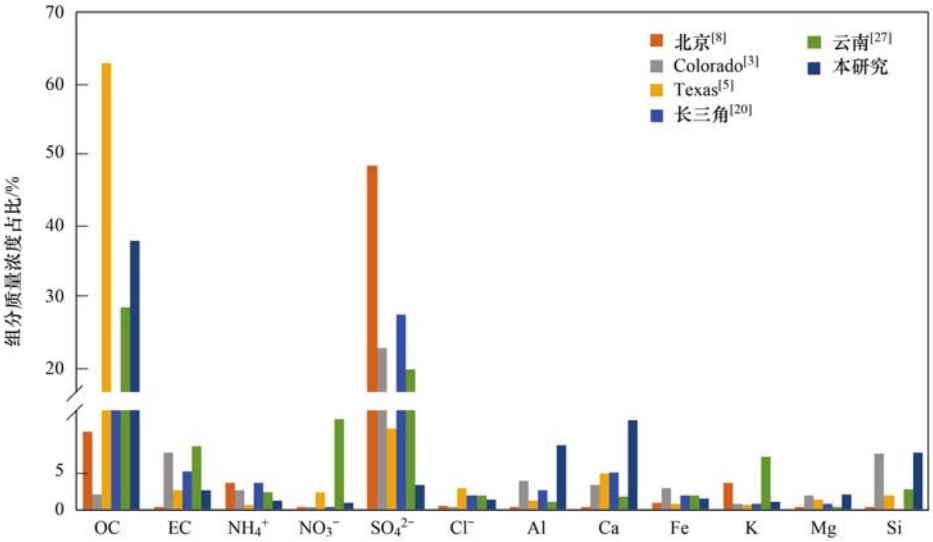


图 4　燃煤锅炉行业成分谱比较

Fig. 4　$PM_{2.5}$ source profile comparison of coal-fired boilers

2.2.4　非成型生物质燃料锅炉

表 6 列出了本研究与北京市非成型生物质燃料锅炉 $PM_{2.5}$ 主要组分比较结果. 可以看出，本研究与北京市 OC 均为非成型生物质燃料锅炉 $PM_{2.5}$ 中排放量最高的组分，Ca、SO_4^{2-}、K、EC、Cl^-、Fe、Si 的占比均大于 1%. 不同之处在于，北京市研究结果中，Zn、Al 和 Ca 这 3 种元素排放占比也在 1% ~10% 范围内，而本研究中 Zn、Al 和 Ca 的占比均小于 1%，取而代之的是 Ca^{2+}、Ti 等组分. 生物质燃烧排放的 $PM_{2.5}$ 受诸多因素影响，如燃料性质、炉灶结构和燃烧状况等. 北京市为使用玉米秆、麦秆为主，配以少量木材为燃料的锅炉测试结果，且烟气直接排放；本

表 6　非成型生物质燃料锅炉成分谱比较1)

Table 6　$PM_{2.5}$ source profile comparison of biomass fuel boilers

项目	占比 1% ~10%	占比 >10%
北京市[8]	Si、Ca、SO_4^{2-}、Zn、Al、K、EC、Cl^-、Fe	OC
本研究	K^+、Na^+、K、NH_4^+、SO_4^{2-}、NO_3^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Si、Ti、Fe	OC、EC、Cl^-

1)表中所摘录的数据进行了归一化处理，下同

研究结果为使用废家具木料、木质废料为燃料锅炉的测试均值，采用布袋除尘和水膜除尘. 燃料和除尘工艺的差异可能是造成成分谱差异的原因.

2.2.5 钢铁行业

本研究烧结和炼铁工艺 $PM_{2.5}$ 中主要组分所占质量分数与其他研究结果对比如表 7 所示，不同城市均在污染治理设施后采用稀释通道等速跟踪采样法采集 $PM_{2.5}$ 样品. 烧结工艺差异较大的组分为 Ca 和 Cl^-. Ca 含量较高主要原因是本研究测试企业在烧结过程中加入了石灰. Zhan 等[28]的研究表明 Cl^- 是烧结工艺原料的标识组分，温杰等[29]的研究中，Cl^- 的占比为 1.5%，推测是由于测试的企业采用布袋除尘方式能够促进 Cl^- 的吸收，而企业烧结工艺除污设施到位；Guo 等[30]的研究结果中 Cl^- 的占比为 23.2%，本研究为 6.7%. 3 个研究中均采用布袋除尘，表明治理设施运行情况对 Cl^- 排放有较大影响.

炼铁工艺差异较大的组分为 Fe. 本研究中 Fe 占比低于其他研究结果，原因在于本研究所测试企业采用的是钒钛磁铁矿，铁品位为 20%，即铁含量为 20%，属于低品位铁矿石，而其他研究中铁的含量均大于 30%[29,30].

表 7 烧结和炼铁工艺 $PM_{2.5}$ 中主要组分的所占质量分数对比/%

Table 7 Main chemical compositions of $PM_{2.5}$ source profiles for sintering and iron/%

工艺	项目	Fe	Ca	Pb	OC	EC	NH_4^+	SO_4^{2-}	Cl^-
烧结	武汉[29]	3.0	4.5	0.2	5.5	1.0	8.7	55.0	1.5
	北方某城[30]	2.7	16.5	3.3	6.0	0.3	8.9	13.0	23.2
	本研究	1.5	16.8	1.8	5.6	0.6	2.7	19.5	6.7
炼铁	武汉[29]	37.4	13.3	1.2	9.5	1.2	2.6	2.3	0.6
	北方某城[30]	62.9	2.5	0.3	4.0	4.2	2.3	7.1	1.6
	本研究	17.1	19.4	1.5	4.1	0.4	1.7	6.6	1.9

3 结论

(1)Si、Ca、Mg 等为建材行业主要排放组分，但不同建材行业由于原料、污染治理设施的不同使得组分排放特征也有一定的差异，如玻璃行业因采用钾长石作为生产原料，其 K 排放占比高于其他建材行业；采用双碱法脱硫的企业 SO_4^{2-} 排放占比高于其他行业.

(2)燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 主要成分为 OC，其次是无机元素 Al、Si 和 Ca 等元素；电厂 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^{2-}、Ca^{2+}、NH_4^+、Mg 和 Si 为特征组分.

(3)成型生物质燃料锅炉颗粒物中主要以 OC 为主，其次是 K 和 EC；非成型生物质燃料锅炉颗粒物中主要以 OC 为主，其次是 EC 和 Cl^-.

(4)钢铁行业烧结和高炉烟气中颗粒物特征组分为 Ca、SO_4^{2-}、Na^+ 和 Fe，排放占比分别为 18.11%、12.99%、11.02% 和 9.26%.

参考文献：

[1] 戴树桂，朱坦，白志鹏. 受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展[J]. 中国环境科学，1995，**15**(4)：252-257.
Dai S G, Zhu T, Bai Z P. Application and development of receptor models for the source apportionment of airborne particulate matter[J]. China Environmental Science, 1995, **15**(4): 252-257.

[2] 华蕾，郭婧，徐子忧，等. 北京市主要 PM_{10} 排放源成分谱分析[J]. 中国环境监测，2006，**22**(6)：64-71.
Hua L, Guo J, Xu Z Y, *et al*. Analysis of PM_{10} source profiles in Beijing[J]. Environmental Monitoring in China, 2006, **22**(6): 64-71.

[3] Watson J G, Chow J C, Houck J E. $PM_{2.5}$ chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995[J]. Chemosphere, 2001, **43**(8): 1141-1151.

[4] 郑君瑜，王水胜，黄志炯，等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京：科学出版社，2014. 216-231.

[5] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al*. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the big bend regional aerosol visibility and observational study[J]. Chemosphere, 2004, **54**(2): 185-208.

[6] Yatkin S, Bayram A. Determination of major natural and anthropogenic source profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey[J]. Chemosphere, 2008, **71**(4): 685-696.

[7] Vega E, Mugica V, Reyes E, *et al*. Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(23): 4033-4039.

[8] 马召辉，梁云平，张健，等. 北京市典型排放源 $PM_{2.5}$ 成分谱研究[J]. 环境科学学报，2015，**35**(12)：4043-4052.
Ma Z H, Liang Y P, Zhang J, *et al*. $PM_{2.5}$ profiles of typical sources in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(12): 4043-4052.

[9] 吴虹，毕晓辉，冯银厂，等. 天津市大气颗粒物源成分谱特征研究[A]. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷)[C]. 昆明：中国环境科学学会，2013. 4812-4818.

[10] 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, Min C Q, *et al*. Establishing $PM_{2.5}$ industrial source profiles in Shanghai[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(8): 1354-1359.

[11] 张丹，周志恩，张灿，等. 重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 污染源源成份谱的建立[J]. 三峡环境与生态，2011，**33**(5)：14-18.
Zhang D, Zhou Z E, Zhang C, *et al*. The $PM_{2.5}$ source profile in the Chongqing urban areas[J]. Environment and Ecology in the

Three Gorges, 2011, **33**(5): 14-18.

[12] Ho K F, Lee S C, Chow J C, *et al*. Characterization of PM_{10} and $PM_{2.5}$ source profiles for fugitive dust in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(8): 1023-1032.

[13] 叶宏, 陈军辉, 孙蜀, 等. 四川省环境污染防治技术水平与绩效评估(2016)-大气污染防治卷[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2017. 28-33.

[14] Chen Y, Xie S D, Luo B, *et al*. Characteristics and origins of carbonaceous aerosol in the Sichuan Basin, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **94**: 215-223.

[15] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 72-77, 151-164.

[16] 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.

[17] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 燃煤锅炉排放颗粒物成分谱特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(11): 1928-1933.
Lu B, Kong S F, Han B, *et al*. Source profile of TSP and PM_{10} from coal-fired boilers[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(11): 1928-1933.

[18] 王书肖, 赵秀娟, 李兴华, 等. 工业燃煤链条炉细粒子排放特征研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 963-968.
Wang S X, Zhao X J, Li X H, *et al*. Emission characteristics of fine particles from grate firing boilers [J]. Environmental Science, 2009, **30**(4): 963-968.

[19] 李松, 郎建垒, 程水源, 等. 典型固定燃烧源颗粒物成分谱特征研究[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(5): 312-319.
Li S, Lang J L, Cheng S Y, *et al*. Analysis of the profiles'characteristic features of the particulate matters in regard to the stationary coal combustion sources[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(5): 312-319.

[20] 徐健, 黄成, 李莉, 等. 长三角地区中小燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 成分谱特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1493-1501.
Xu J, Huang C, Li L, *et al*. Chemical composition characteristics of $PM_{2.5}$ emitted by medium and small capacity coal-fired boilers in the Yangtze River Delta region [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1493-1501.

[21] 朱恒, 戴璐泓, 魏雅, 等. 生物质燃烧排放 $PM_{2.5}$ 中无机离子及有机组分的分布特征[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(12): 4483-4491.
Zhu H, Dai L H, Wei Y, *et al*. Characteristics of inorganic ions and organic components in $PM_{2.5}$ from biomass burning[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(12): 4483-4491.

[22] 宋兴飞, 朱少飞, 黄兵, 等. 生物质燃烧过程中氯及钾析出特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, **36**(10): 2543-2547.
Song X F, Zhu S F, Huang B, *et al*. Study of emission characteristics of chlorine and potassium in biomass combustion [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, **36**(10): 2543-2547.

[23] 刘刚, 黄柯, 李久海, 等. 树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3737-3742.
Liu G, Huang K, Li J H, *et al*. Chemical composition of water-soluble ions in smoke emitted from tree branch combustion[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3737-3742.

[24] 于清章, 吴霁虹, 郭积铖. 高氯化聚乙烯防腐涂料在防腐领域中的应用[J]. 涂料工业, 2010, **40**(8): 63-65.
Yu Q Z, Wu Q H, Guo J C. Application of high chlorinated polyethylene coatings in corrosion protection [J]. Paint & Coatings Industry, 2010, **40**(8): 63-65.

[25] 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 W, *et al*. Emission characteristics of water-soluble ions in the particulate matters from sintering process [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2270-2274.

[26] 包贞, 冯银厂, 焦荔, 等. 杭州市大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2010, **26**(2): 44-48.
Bao Z, Feng Y C, Jiao L, *et al*. Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Hangzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2010, **26**(2): 44-48.

[27] 丁祥. 云南高原典型固定燃烧源烟气排放颗粒物组分特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017. 16-18.
Ding X. Study on the characteristics of emission for chemical components in particulate matter from typical fixed combustion source in Yunnan plateau[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. 16-18.

[28] Zhan G, Guo Z C. Basic properties of sintering dust from iron and steel plant and potassium recovery [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(6): 1226-1234.

[29] 温杰, 杨佳美, 李蒲, 等. 我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4885-4891.
Wen J, Yang J M, Li P, *et al*. Chemical source profiles of PM emitted from the main processes of the iron and steel industry in China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4885-4891.

[30] Guo Y Y, Gao X, Zhu T Y, *et al*. Chemical profiles of PM emitted from the iron and steel industry in northern China[J]. Atmospheric Environment, 2017, **150**: 187-197.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2019

CONTENTS