

 方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

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

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

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 SO₄²⁻ 排放占比高于其他脱硫工艺; ② 电厂 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、Ca²⁺、NH₄⁺、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 SO₄²⁻、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.hjxx.201804137

Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province

FENG Xiao-qiong^{1,2}, CHEN Jun-hui^{2*}, XIONG Wen-peng¹, MEI Lin-de¹, XU Xue-mei¹, YIN Han-mei¹, FAN Wu-bo², JIANG Tao², QIAN Jun², YE Hong²

(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 SO₄²⁻, Ca²⁺, NH₄⁺, 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 SO₄²⁻, 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]; SO₄²⁻ 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 SO₄²⁻ 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·d ⁻¹ , SNCR 脱硝, 布袋除尘	水泥	窑尾
企业 2	水泥产量 5 000 t·d ⁻¹ , SNCR 脱硝, 静电除尘	水泥	窑尾
企业 3	水泥产量 2 200 t·d ⁻¹ , SNCR 脱硝, 布袋除尘	水泥	窑尾
企业 4	玻璃产量 1 000 t·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·d ⁻¹ , 静电除尘, SCR 脱硝	平板玻璃	窑炉
企业 6	玻璃产量 165 t·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·d ⁻¹ , 无治理设施	日用玻璃	窑炉
企业 8	陶瓷产量 60 000 m ² ·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 ·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·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·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·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·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·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·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·d ⁻¹ 、生铁产量 5 648 t·d ⁻¹ 、粗钢产量 6 143 t·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

如表 4 所示.

2.1.1 电厂

电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱¹⁾ / %
Table 4 $\text{PM}_{2.5}$ 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 SO₄²⁻、OC、Al、Ca 等地壳元素. 研究表明, 燃煤硫含量是影响细粒子中 SO₄²⁻ 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 SO₄²⁻ 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 SO₄²⁻ 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 SO₄²⁻ 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 K₂O·Al₂O₃·6SiO₂. 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 SO₄²⁻ 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] SO₄²⁻ 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 SO₄²⁻、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. SO₄²⁻ 烧结工艺排放较高, 部分来自燃煤产生的 SO₂ 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].

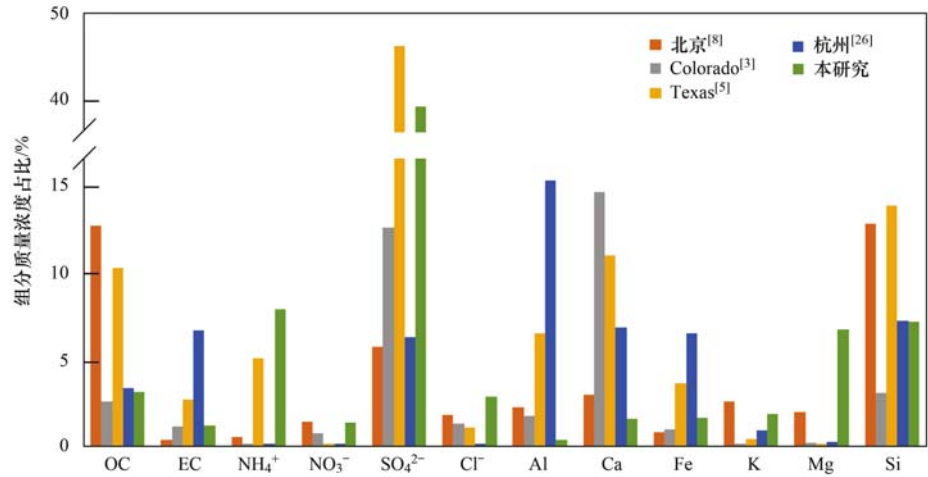
2.2 与其他地区比较

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 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ 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

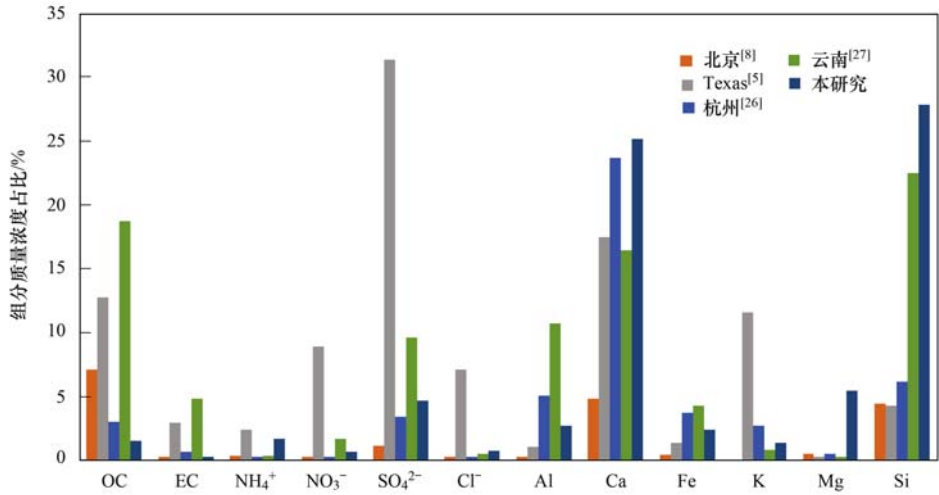


图 3 水泥行业成分谱比较

Fig. 3 $\text{PM}_{2.5}$ 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.

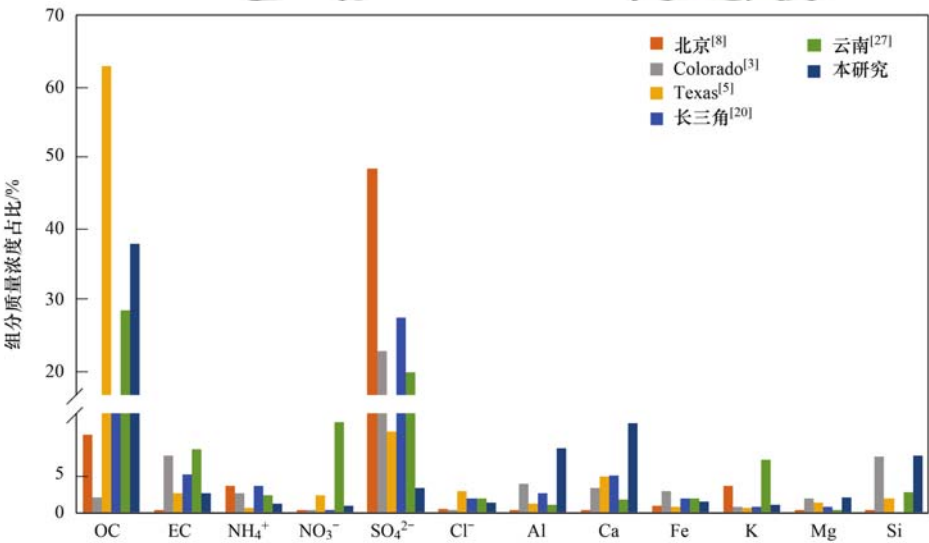


图4 燃煤锅炉行业成分谱比较

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, 徐子忱, 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, 张廷君, 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 PM₁₀ 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 PM₁₀ 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 PM₁₀ 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, 郎建全, 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 Energetica 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, 郭积钺. 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 PM₁₀ 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 PM₁₀ 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.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)