

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康风险及经济损失评价 ..... 李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)

冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 ..... 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)

基于区域传输矩阵和 PM<sub>2.5</sub> 达标约束的大气容量计算方法 ..... 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)

利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 ..... 温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)

重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)

杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 ..... 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)

城市生活垃圾露天焚烧 PM<sub>2.5</sub> 及其组分排放特征 ..... 王艳, 郝伟伟, 程轲, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)

民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 ..... 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)

大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析 ..... 纪德钰 (3535)

“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 ..... 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)

浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 ..... 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)

有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 ..... 翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)

基于 MODIS\_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 ..... 胡俊, 元燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)

基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 ..... 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)

北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 ..... 陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)

丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 ..... 李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)

太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 ..... 吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)

太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 ..... 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)

台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 ..... 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)

珠江三角洲高钾地下水赋存环境特征及成因分析 ..... 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)

有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 ..... 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)

澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 ..... 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)

碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 ..... 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)

浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 ..... 张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)

人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 ..... 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)

外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N<sub>2</sub>O 排放影响 ..... 余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)

雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 ..... 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)

水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响 ..... 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)

Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/BiVO<sub>4</sub> 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A ..... 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)

海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制 ..... 于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)

磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 ..... 赵华轩, 郎印海 (3729)

污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 ..... 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 ..... 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)

阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 ..... 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)

普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 ..... 陈思, 白波, 王洪伦, 索有瑞 (3759)

PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 ..... 许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕锋, 夏四清 (3767)

苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 ..... 马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)

反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 ..... 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)

好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 ..... 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 钊珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)

苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 ..... 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)

污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 ..... 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)

生物炭对华北农田土壤 N<sub>2</sub>O 通量及相关功能基因丰度的影响 ..... 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)

设施菜田土壤 N<sub>2</sub>O 产生对 O<sub>2</sub> 的响应 ..... 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)

利用  $\mu$ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 ..... 孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)

南京市铅锌矿采场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 ..... 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)

Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 ..... 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)

基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 ..... 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)

生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 ..... 赵鹏宇, 李磊, 柴宝峰 (3876)

转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 ..... 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)

脱硫石膏对稻田 CH<sub>4</sub> 释放及其功能微生物种群的影响 ..... 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)

长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 ..... 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)

黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源镉 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 ..... 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)

黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)

氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 ..... 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)

有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 ..... 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许新 (3937)

中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO<sub>2</sub> 排放 ..... 林婷, 吴焯, 何晓漪, 张少君, 郝吉明 (3946)

气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 ..... 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)

《环境科学》征订启事 (3543) 《环境科学》征稿简则 (3570) 信息 (3600, 3728, 3844)

# 民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子

杨国威<sup>1</sup>, 孔少飞<sup>1,2,\*</sup>, 郑淑睿<sup>1</sup>, 吴剑<sup>1</sup>, 郑明明<sup>1</sup>, 郑煌<sup>1</sup>, 严沁<sup>3</sup>, 刘海彪<sup>3</sup>, 王伟<sup>3</sup>, 吴方琪<sup>1</sup>, 程溢<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系, 武汉 430074; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

**摘要:** 中国是全球碳质气溶胶最重要的贡献者之一, 民用燃煤排放占有很大的比重. 排放因子的不确定性直接影响碳气溶胶排放清单的准确性. 本研究基于室内模拟燃烧实验和稀释通道采样系统, 采用 FA-3 型 9 级撞击采样器采集了 3 种蜂窝煤(考虑明烧和闷烧)和包括烟煤与褐煤在内的 4 种块煤燃烧排放的九级粒径颗粒物, 采用热光法分析了不同粒径颗粒物中有机碳(OC)和元素碳(EC)的含量, 计算得到排放因子. 结果表明: ①对于蜂窝煤的明烧与闷烧, PM<sub>2.1</sub> 中 OC 排放因子分别为 0.07 g·kg<sup>-1</sup> 和 0.10 g·kg<sup>-1</sup>, EC 的排放因子为 0.002 g·kg<sup>-1</sup> 和 0.001 g·kg<sup>-1</sup>; 闷烧排放的有机碳颗粒物高于明烧; 元素碳排放因子低于明烧. 块煤排放 PM<sub>2.1</sub> 中 OC 与 EC 排放因子分别是 1.4 g·kg<sup>-1</sup> 和 0.02 g·kg<sup>-1</sup>, 高出蜂窝煤排放一个数量级. ②粒径分析结果表明, 民用煤燃烧排放的颗粒物及其载带的碳组分集中在细颗粒物上, 碳组分的质量中值粒径均小于 2.5 μm, 总碳(OC + EC)的排放因子粒径分布表明蜂窝煤燃烧排放的碳组分富集于 ≤0.43 μm 粒径段, 块煤富集于 0.43 ~ 0.65 μm 粒径段.

**关键词:** 民用煤燃烧; 稀释通道; 碳组分; 排放因子; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3524-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711081

## Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China

YANG Guo-wei<sup>1</sup>, KONG Shao-fei<sup>1,2,\*</sup>, ZHENG Shu-rui<sup>1</sup>, WU Jian<sup>1</sup>, ZHENG Ming-ming<sup>1</sup>, ZHENG Huang<sup>1</sup>, YAN Qin<sup>3</sup>, LIU Hai-biao<sup>3</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, WU Fang-qi<sup>1</sup>, CHENG Yi<sup>1</sup>

(1. Department of Atmospheric Sciences, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** China is one of the most important contributors to the global burden of carbonaceous aerosols, of which domestic coal combustion occupies a large fraction. Uncertainty in the emission factors (EFs) directly influences the accuracy of corresponding emission inventories. In the present study, based on domestic burning tests with a dilution sampling system, nine size-segregated particle classes emitted from the burning of three kinds of honeycomb coals (under flaming and smoldering burning conditions) and four kinds of chunk coals, including bituminous and lignite, were collected via a cascade impactor (FA-3). Organic and elemental carbon (OC and EC, respectively) were analyzed using the thermal-optical method. The EFs of particulate matter (PM), OC, and EC for nine size ranges were obtained. For honeycomb coals, the EFs of OC and EC in PM<sub>2.1</sub> were 0.07 g·kg<sup>-1</sup> and 0.002 g·kg<sup>-1</sup>, respectively, under flaming burning conditions and 0.10 g·kg<sup>-1</sup> and 0.001 g·kg<sup>-1</sup>, respectively, under smoldering burning conditions. Carbonaceous particles exhibited higher EFs under flaming burning conditions. For chunk coals, the EFs of OC and EC in PM<sub>2.1</sub> were 1.4 g·kg<sup>-1</sup> and 0.02 g·kg<sup>-1</sup>, respectively, which are about one magnitude higher than those for honeycomb coal burning. Particulate matter and its associated carbonaceous components preferred to concentrate in fine particles. The EFs of carbonaceous components peaked at the size of ≤0.43 μm and 0.43-0.65 μm for honeycomb coal burning and chunk coal burning, respectively.

**Key words:** domestic coal burning; dilution sampling; carbonaceous components; emission factor; size distribution

含碳燃料不完全燃烧释放的碳质颗粒物, 按其组分通常分为黑碳(BC, 或元素碳 EC)和有机碳(OC)两部分. BC 具有强烈的太阳辐射吸收特性<sup>[1, 2]</sup>, OC 的光学效应则表现为散射. 碳质气溶胶的净辐射特性对全球以及区域气候变化的影响已得到公认<sup>[3-15]</sup>. 燃料燃烧产生的 BC 可使全球近地层气温明显升高同时产生 0.25 W·m<sup>-2</sup> 的辐射强

迫<sup>[16]</sup>. 在 0.2% 的过饱和度下含碳气溶胶对全球云

收稿日期: 2017-11-08; 修订日期: 2018-02-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602002, 2017YFC0212602); 国家自然科学基金项目(41305119); 中国地质大学(武汉)高层次人才科研启动项目; 江苏省环境保护科研项目(2015017)

作者简介: 杨国威(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为碳气溶胶排放, E-mail: yanggw@cug.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: kongshaofei@cug.edu.cn

凝结核的贡献率为 52% ~ 64%<sup>[17]</sup>. 碳质颗粒物中的吸光成分也可通过加热对流层低层大气加大海陆热力差异, 改变对流层温度梯度, 使季风环流加强<sup>[18]</sup>, 区域降水分布改变<sup>[19~21]</sup>. 黑碳通过降低积雪的反照率<sup>[22, 23]</sup>对喜马拉雅山脉<sup>[24]</sup>和极地气候环境<sup>[25]</sup>产生极大的影响, 尤其是冰冻圈积雪与冰川融化<sup>[26]</sup>. 碳质颗粒物对人体健康也有不利影响<sup>[27]</sup>, 细小的 BC 可为有毒污染物提供吸附点并深入肺部<sup>[28]</sup>; OC 则通常含有有毒有机化合物, 如多环芳烃(PAHs)及其烷基化同系物, 二者均具备致癌性和化学诱变性<sup>[29]</sup>.

由于其潜在的气候影响和环境健康影响, 中国煤炭燃烧的碳质气溶胶排放受到广泛关注. 中国的煤炭消耗占国内一次能源消耗量的 64% 左右, 占全球煤炭消耗总量的一半<sup>[30, 31]</sup>, 被认为是全球碳排放的主要贡献者<sup>[32~39]</sup>. 据估计其 BC 排放约占全球排放总量的 20%<sup>[32]</sup>, 其中约有 25% ~ 28%<sup>[33, 40]</sup>来自民用燃煤, 但是这些估计包含有很大的不确定性并且彼此之间的差异很大, 这是由其活动水平和 BC 与 OC 假定的排放因子不同造成的. 因此, 民用燃煤排放因子的研究是评估其排放清单、改进排放清单准确性的基础.

不同学者在建立碳颗粒物清单时所采用的排放因子存在较大差异. 近年来国内学者对民用燃煤燃烧研究获取的排放因子也有所不同. Chen 等<sup>[41]</sup>采用一套全流稀释采样装置研究了 3 种烟煤, 1 种无烟煤及 1 种无烟煤的 5 种蜂窝煤燃烧的 OC 和 BC 排放因子, 得到烟煤 OC 和 BC 的排放因子分别为 3.580 ~ 13.818  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.064 ~ 0.675  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 无烟煤为 4.729  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.096  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 无烟煤为 0.017  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.004  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Chen 等<sup>[42]</sup>同样对 9 种不同成熟度的煤种 OC 和 BC 排放因子进行了研究, 得到 7 种烟煤 OC 和 BC 的排放因子分别为 2.66 ~ 17.01  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.20 ~ 12.67  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 2 种无烟煤分别为 0.30 ~ 0.51  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.002 ~ 0.007

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Zhi 等<sup>[43]</sup>将 9 种蜂窝煤及其原煤放入对应的燃煤炉中燃烧采样, 得到蜂窝煤炉中烟煤 OC 和 BC 排放因子分别为 3.12  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.047  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 无烟煤为 0.12  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.003  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 块煤炉中烟煤 OC 和 BC 排放因子分别为 4.24  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 4.34  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 无烟煤为 0.23  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.013  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 孔少飞等<sup>[44]</sup>对蜂窝煤和块煤的排放因子进行了测定并比较了  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  之间的碳组分排放因子差异, 蜂窝煤 OC 和 BC 的排放因子 ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 分别为 0.143  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.003  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 块煤为 5.286  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.915  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Shen 等<sup>[45, 46]</sup>认为排放因子的大小和粒径分布与燃料的水分、燃烧速率和供氧条件有关, EF 随着燃料水分增加而增加, 当燃烧速率较高, 供氧不足时则会产生更多的污染物. 前人研究表明, 不同的煤炭类型、成熟度、燃烧方式、燃烧炉具、采样方法等都会对碳质颗粒物的排放因子产生影响<sup>[41~53]</sup>.

不同方案下测定的排放因子之间差异可从几倍至几十倍或更高, 更多的碳质颗粒物排放因子的测量成为当前急需的研究. 截止目前, 仅有陈颖军等<sup>[54]</sup>和沈国峰等<sup>[55]</sup>关注了民用燃煤中碳质颗粒物排放因子的粒径分布特征, 对于不同燃烧状况下的对比分析研究更为少见. 本研究基于室内燃烧实验, 结合稀释通道采样系统, 开展明烧与闷烧两种燃烧条件下民用燃煤排放分级颗粒物中碳质组分的排放因子分析, 以期为不同粒径段的碳质组分清单构建及其气候与环境健康风险评估提供精确可靠的数据支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源与分析

本研究共包括 3 种蜂窝煤 HB、GZ 和 NM 以及 4 种块煤 HB、GZ、NM 和 XJ, 煤炭来源于淮北、贵阳、乌鲁木齐和呼和浩特的市场, 煤样组分分析如表 1; 燃烧炉具为当地市场购置的民用炉具.

表 1 煤样组分分析/%

Table 1 Analytical values for the seven coals tested in both raw chunks and honeycomb briquettes/%

煤样	水分( $M_{\text{ad}}$ )	灰分( $A_{\text{ad}}$ )	挥发分( $V_{\text{ad}}$ )	固定碳( $FC_{\text{ad}}$ )	煤样类型	产地
HB(K)	1.68	4.30	8.70	85.32	无烟煤	安徽
GZ(K)	3.50	3.96	9.73	82.82	无烟煤	贵州
NM(K)	12.83	3.95	28.54	54.67	烟煤	内蒙古
XJ(K)	14.09	3.32	47.23	35.37	褐煤	新疆
HB(H)	2.73	48.27	8.92	40.08	—	安徽
GZ(H)	1.09	42.89	10.73	45.29	—	贵州
NM(H)	2.13	59.49	15.41	22.97	—	内蒙古

## 1.2 样品采集

采用稀释通道系统对烟气进行采集, 稀释通道结构见孔少飞等<sup>[44]</sup>的研究, 原理如下: 燃料燃烧后排放的烟气通过烟囱排出, 在烟囱距火苗高约 1.5 m 处用采样枪通过等速采样将一定体积的烟气抽进稀释系统, 在烟气进入采样舱前先经过除湿装置将水汽除去, 烟气进入采样舱后, 空压机将一定体积的干洁空气与烟气一并送入稀释舱进行稀释, 本研究中稀释倍数为 30 倍。

烟气稀释冷却后, 采用 FA-3 型 9 级撞击采样器将烟气中的颗粒物收集到滤膜上。采用稀释通道采集石英纤维滤膜与聚丙烯纤维滤膜样品, 采样流量为  $28.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 采样粒径分为  $\leq 0.43$ 、 $0.43 \sim 0.65$ 、 $0.65 \sim 1.1$ 、 $1.1 \sim 2.1$ 、 $2.1 \sim 3.3$ 、 $3.3 \sim 4.7$ 、 $4.7 \sim 5.8$ 、 $5.8 \sim 9.0$  以及  $9.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$  共 9 个粒径段。

## 1.3 采样过程

燃烧实验分为明烧实验(F, flaming burning)与闷烧实验(S, smoldering burning)两部分。明烧实验时, 为保证燃煤有足够的供氧, 炉具下方风口始终打开, 在炉具上方采用烟囱结合稀释通道系统采集烟气; 闷烧实验时, 炉具下方风口保持关闭, 燃煤在供氧不足条件下燃烧, 燃烧产生烟气通过烟囱进入稀释通道系统。通过对上述地区燃煤用户以及市场的调研, 对块煤采用明烧实验, 蜂窝煤采用明烧与闷烧实验。

块煤实验前先用电炉将块煤引燃, 待充分燃烧后, 将准备好的 0.3 kg 块煤放进炉灶中, 保证稀释通道系统和 9 级撞击采样器处于正常工作状态, 直至块煤完全燃烧, 停止采样。蜂窝煤实验采用 3 块蜂窝煤重叠燃烧的方式, 首先将最底部的一块蜂窝煤引燃, 然后将另两块蜂窝煤放上, 开始采样, 待 3 块蜂窝煤燃烧完全后, 停止采样。燃烧实验开始前与结束时, 需记录燃料未燃烧时的初始质量与完全燃烧后的燃料残渣质量; 燃烧实验中, 每种燃料均在固定时间记录烟囱排出的烟气流速。

## 1.4 样品保存与分析

采样滤膜为直径 47 mm 石英滤膜和聚丙烯纤维滤膜。石英滤膜用于有机碳/元素碳分析, 聚丙烯纤维滤膜用于质量采集。

石英滤膜采样前置于  $800^\circ\text{C}$  的马弗炉中高温灼灼 2 h, 除去含碳化合物; 聚丙烯纤维滤膜采样前在  $60^\circ\text{C}$  的烘箱中烘烤 0.5 h, 然后在  $25^\circ\text{C}$ 、40% 相对湿度的超净实验室中进行 48 h 平衡, 使用精度为

$10^{-5} \text{ g}$  的天平称重, 恒重前后膜质量差值在  $5 \times 10^{-5} \text{ g}$  以内认为恒重合格。样品采集结束后, 采样膜存入干净的膜盒中, 盒盖密封, 在膜盒外用铝箔包裹进行遮光保存, 然后将其放入冰箱中低温 ( $-20^\circ\text{C}$ ) 冷冻保存, 防止样品损失。称重前, 将采样后滤膜置于相同的环境中恒温、恒湿平衡 48 h, 称量质量, 两次膜质量差值即为膜上颗粒物质量。

EC 和 OC 的分析采用美国 DRI-2001A 型有机碳/元素碳分析仪, 使用 IMPROVE\_A 热光碳分析方法完成。分析方法为钻取  $0.153 \text{ cm}^2$  的小块滤膜, 在纯氦气 ( $> 99.999\%$ ) 条件下,  $140^\circ\text{C}$  (OC1),  $280^\circ\text{C}$  (OC2),  $480^\circ\text{C}$  (OC3),  $580^\circ\text{C}$  (OC4) 逐步加热分析, OC 组分脱离滤膜, 经此步骤检测出的碳组分即为 OC 含量; 冷却样品炉, 在 2%  $\text{O}_2$ /98% He 条件下,  $580^\circ\text{C}$  (EC1),  $740^\circ\text{C}$  (EC2) 和  $840^\circ\text{C}$  (EC3) 逐步加热分析, EC 组分脱离滤膜, 同时激光检测膜黑度变化, 修正由于 OC 高温裂解成 EC 而造成的 EC、OC 分析误差, 此步骤分析结果即为 EC 含量。

## 1.5 质量控制和质量保证

采样后滤膜存入干洁膜盒, 铝箔遮光处理后立即放入  $-20^\circ\text{C}$  的冰箱中冷冻保存, 防止样品损失。碳分析仪 OC 的检出限为  $0.45 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , EC 为  $0.06 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , TC 为  $0.45 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

## 1.6 排放因子

排放因子按公式(1)进行计算:

$$EF_{ij} = (v \times m_{ij} \times n) / (v_1 \times M_j) \quad (1)$$

式中,  $EF_{ij}$  为第  $j$  种燃料燃烧后  $i$  类污染物的排放因子,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $v$  为烟气流量,  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $v_1$  为采样流量,  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $m_{ij}$  为第  $j$  种燃料燃烧后滤膜中  $i$  类污染物的质量,  $\text{g}$ ;  $n$  是稀释倍数;  $M_j$  为第  $j$  种燃料的燃烧量,  $\text{kg}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 民用燃煤分级颗粒物排放因子

通过对聚丙烯纤维滤膜的质量分析, 结合实验过程中消耗的燃料质量, 计算得到 7 种燃煤在 2 种燃烧方式下的排放因子见图 1。从中可知, 块煤燃烧颗粒物的排放因子要高于蜂窝煤燃烧,  $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{10}$  比也高于蜂窝煤。其中 NM(K) 的排放因子最高, 其  $\text{PM}_{2.1}$  和  $\text{PM}_{10}$  的排放因子分别为  $33.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $49.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; GZ(S) 的  $\text{PM}_{10}$  排放因子最低, 为  $4.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; HB(K) 的  $\text{PM}_{2.1}$  排放因子最低, 为  $0.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。4 种块煤的燃烧排放中烟煤与

褐煤的排放明显大于 2 种无烟煤, 其最高排放与最低之间的倍数差可达 6.7 ~ 45.8 倍. 燃烧条件为明烧时 HB(F)、GZ(F)、NM(F) 这 3 种蜂窝煤的  $EF_{PM_{10}}$  分别为 11.71、11.45 和 4.76  $g \cdot kg^{-1}$ ; 当燃烧条件改变为闷烧时, 3 种蜂窝煤燃烧颗粒物的排放因子变化较大, HB、GZ 的  $EF_{PM_{10}}$  降低一倍至 5.83  $g \cdot kg^{-1}$  和 4.33  $g \cdot kg^{-1}$ , NM 则增加一倍至 10.80  $g \cdot kg^{-1}$ . 3 种蜂窝煤燃烧条件改变时排放的  $EF_{PM_{2.1}}$  与  $EF_{PM_{10}}$  的变化趋势相同, HB 和 GZ 的  $EF_{PM_{2.1}}$  由明烧时的 5.86  $g \cdot kg^{-1}$  和 4.15  $g \cdot kg^{-1}$  降至 1.59  $g \cdot kg^{-1}$  和 2.67  $g \cdot kg^{-1}$ , NM 则由 1.98  $g \cdot kg^{-1}$  增长至 3.49  $g \cdot kg^{-1}$ . 蜂窝煤的燃烧条件直接影响到颗粒物的排放, 燃烧条件改变时不同蜂窝煤燃烧的颗粒物排放因子出现增长或降低 1 倍甚至更大的变化.

对于亚微米粒子( $PM_{1.1}$ )的排放, HB 块煤燃烧对应的颗粒物排放因子在 7 种煤中最低, NM, XJ 块煤的排放远高于蜂窝煤, 高出 3 ~ 10 倍. 4 种块煤的排放中, 烟煤的排放因子高于无烟煤, 最高排放与最低排放之间相差 43.9 倍. 当燃烧条件由明烧改变为闷烧时, 3 种蜂窝煤中 NM 蜂窝煤燃烧的颗粒物排放因子增加, HB, GZ 蜂窝煤的排放因子明显下降, 变化趋势与  $PM_{2.1}$  和  $PM_{10}$  相似.

现有的研究中, 民用燃煤颗粒物的排放因子相差非常大, 不同种类的煤燃烧的排放因子之间相差数倍至数十倍. Butcher 等<sup>[56]</sup>测试了 4 种无烟煤和 1 种烟煤燃烧的  $PM_{10}$  排放因子, 得到无烟煤燃烧的颗粒物排放因子在 0.33 ~ 0.50  $g \cdot kg^{-1}$  之间, 烟煤的排放因子为 10.4  $g \cdot kg^{-1}$ . Bond 等<sup>[57]</sup>测得烟煤的  $PM_{10}$  排放因子为  $(12 \pm 17) g \cdot kg^{-1}$ , 褐煤的排放因子为  $(4.6 \pm 1.9) g \cdot kg^{-1}$ . Chen 等<sup>[41, 42]</sup>测量了成熟度由次烟煤至无烟煤的 5 种蜂窝煤及 9 种块煤燃烧的颗粒物排放因子, 得到蜂窝煤中烟煤的颗粒物排放因子在 7.788 ~ 19.550  $g \cdot kg^{-1}$  之间, 几何平均值为 12.911  $g \cdot kg^{-1}$ , 次烟煤和无烟煤的排放因子分别是 8.001  $g \cdot kg^{-1}$  和 1.329  $g \cdot kg^{-1}$ ; 对应的块煤中烟煤的颗粒物排放因子为 4.05 ~ 37.81  $g \cdot kg^{-1}$  (几何均值 16.77  $g \cdot kg^{-1}$ ), 无烟煤排放因子为 0.62 ~ 0.97  $g \cdot kg^{-1}$  (几何均值 0.78  $g \cdot kg^{-1}$ ). Zhi 等<sup>[43]</sup>和 Chen 等<sup>[53]</sup>对多组来源相同的块煤和蜂窝煤燃烧颗粒物的排放进行了研究, 结果相近, 使用较为清洁的蜂窝煤代替块煤或原煤燃料可以有效地控制颗粒物的排放. 刘源等<sup>[47]</sup>测得了散煤的  $PM_{2.5}$  排放因子为 0.78 ~ 11.06  $g \cdot kg^{-1}$ , 蜂窝煤的  $PM_{2.5}$  排放因子为

3.778 ~ 7.28  $g \cdot kg^{-1}$ ; 孔少飞等<sup>[44]</sup>测得了蜂窝煤的  $PM_{2.5}$  排放因子为 0.78  $g \cdot kg^{-1}$ , 块煤的  $PM_{2.5}$  排放因子在 9.873  $g \cdot kg^{-1}$ , 与本次研究的结果相似, 具有可比性.

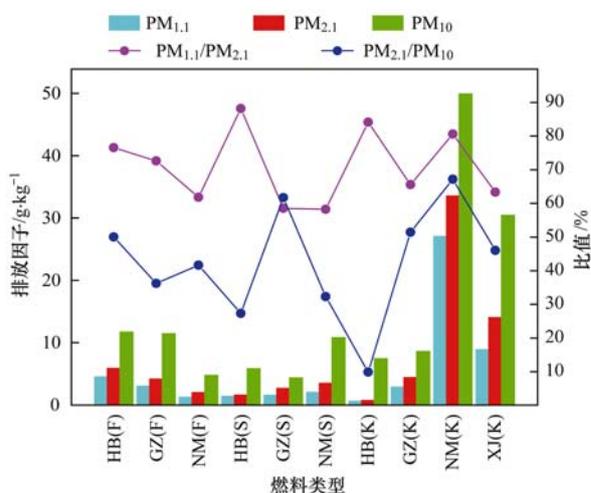


图 1 民用燃煤不同粒径颗粒物排放因子

Fig. 1 Emission factors for size-resolved particulate matter from domestic coal combustion

## 2.2 民用燃煤分级碳组分排放因子

$PM_{1.1}$ 、 $PM_{2.1}$  及  $PM_{10}$  中碳组分排放因子见表 2. 4 种块煤及 2 种燃烧状态下的 3 种蜂窝煤的排放因子变化范围较大, 同一粒径段间排放因子相差数十至百倍.  $PM_{1.1}$  上 NM(F) 的 OC 排放因子在 7 种煤样中最小, 为 40.49  $mg \cdot kg^{-1}$ , 碳颗粒物的排放因子也最小, 为 41.36  $mg \cdot kg^{-1}$ ; NM(K) 的碳颗粒物排放因子,  $EF_{OC}$ ,  $EF_{EC}$  均是最大, 其 OC 与 EC 的排放因子分别为 4914.05  $mg \cdot kg^{-1}$  和 37.00  $mg \cdot kg^{-1}$ ,  $EF_{TC}$  为 4951.05  $mg \cdot kg^{-1}$ ; HB 蜂窝煤闷烧的黑碳排放因子最小, 为 0.83  $mg \cdot kg^{-1}$ .  $PM_{2.1}$  上 NM(K) 的 OC 与 EC 排放因子最高分别为 5276.84  $mg \cdot kg^{-1}$  和 68.67  $mg \cdot kg^{-1}$ , NM(F) 的 OC 排放因子最低为 47.27  $mg \cdot kg^{-1}$ , HB(S) 的 EC 排放因子最低为 1.10  $mg \cdot kg^{-1}$ .  $PM_{10}$  的排放因子与  $PM_{2.1}$  和  $PM_{1.1}$  变化趋势相似, NM(K) 的 OC 与 EC 排放因子最高分别为 5647.15  $mg \cdot kg^{-1}$  和 87.80  $mg \cdot kg^{-1}$ , NM(F) 的 OC 排放因子最低为 79.21  $mg \cdot kg^{-1}$ , HB(S) 的 EC 排放因子最低为 2.66  $mg \cdot kg^{-1}$ .

在民用蜂窝煤的排放因子中(表 3), 本文的研究结果与 Chen 等<sup>[41]</sup>的研究成果比较接近, OC 的排放因子要高于孔少飞等<sup>[44]</sup>的研究而低于刘源等<sup>[47]</sup>的研究, EC 的排放因子差异不大. 在块煤的排放因子方面, 本研究中块煤的 OC 排放因子大于 Zhi 等<sup>[43]</sup>, 与孔少飞等<sup>[44]</sup>、Zhang 等<sup>[48]</sup>和 Chen

表 2 民用燃煤分级碳组分排放因子/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 2 Emission factors for EC and OC from domestic coal combustion/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 

煤样/组分	HB(F)	GZ(F)	NM(F)	HB(S)	GZ(S)	NM(S)	HB(K)	GZ(K)	NM(K)	XJ(K)	
PM <sub>1.1</sub>	PM	4 485.13	3 016.93	1 225.46	1 405.10	1 563.42	2 031.31	615.39	2 898.34	27 015.55	2 086.11
	OC	55.26	68.38	40.49	108.43	64.72	61.34	54.25	45.96	4 914.05	41.39
	EC	1.50	2.13	0.87	0.83	0.90	1.19	6.85	0.99	37.00	0.94
	OC/PM/%	1.23	2.27	3.30	7.72	4.14	3.02	8.82	1.59	18.19	1.98
	EC/PM/%	0.03	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	1.11	0.03	0.14	0.05
	OC/EC	36.93	32.15	46.60	131.33	71.67	51.58	7.92	46.23	132.81	44.00
PM <sub>2.1</sub>	PM	5 859.60	4 153.18	1 981.75	1 593.17	2 671.05	3 489.00	731.73	4 418.29	33 515.73	14 006.74
	OC	73.97	82.12	47.27	134.58	82.18	81.36	70.96	53.30	5 276.84	208.51
	EC	1.82	2.62	1.22	1.10	1.20	1.49	7.12	6.65	68.67	3.76
	OC/PM/%	1.26	1.98	2.39	8.45	3.08	2.33	9.70	1.21	15.74	1.49
	EC/PM/%	0.03	0.06	0.06	0.07	0.05	0.04	0.97	0.15	0.20	0.03
	OC/EC	40.71	31.38	38.86	122.25	68.25	54.73	9.96	8.01	76.84	55.42
PM <sub>10</sub>	PM	11 706.44	11 450.46	4 756.11	5 834.94	4 327.09	10 798.46	7 408.08	8 593.02	49 911.27	30 430.37
	OC	159.70	148.54	79.21	263.56	188.94	150.23	156.63	112.27	5 647.15	433.96
	EC	4.06	5.07	3.08	2.66	6.62	2.97	8.49	14.91	87.80	8.47
	OC/PM/%	1.36	1.30	1.67	4.52	4.37	1.39	2.11	1.31	11.31	1.43
	EC/PM/%	0.03	0.04	0.06	0.05	0.15	0.03	0.11	0.17	0.18	0.03
	OC/EC	39.32	29.29	25.68	99.07	28.53	50.53	18.44	7.53	64.32	51.26

表 3 文献研究中的民用燃煤碳组分排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 3 Emission factors for EC and OC found in the literature/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 

燃煤类型	采样方法	粒径	排放因子 <sup>1)</sup>				文献
			PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	OC	EC	
蜂窝煤(烟煤)	稀释通道采样	PM	7.788~19.550(12.911)	—	3.580~13.818(7.817)	0.064~0.675(0.283)	[41]
蜂窝煤(次烟煤)			8.001		4.729	0.096	
蜂窝煤(无烟煤)			1.329		0.017	0.004	
块煤(烟煤)	稀释通道采样	PM	4.05~37.81(16.77)	—	2.66~17.01(8.29)	0.20~12.67(3.32)	[42]
块煤(无烟煤)			0.62~0.97(0.78)		0.03~0.051(0.039)	0.002~0.007(0.004)	
蜂窝煤(烟煤)	蜂窝煤炉(HEB)	PM	1.43~11.8(5.68)	—	0.56~8.75(3.12)	0.009~0.180(0.047)	[43]
蜂窝煤(无烟煤)			0.6~2.20(1.15)		0.004~0.36(0.12)	0.001~0.012(0.003)	
块煤(烟煤)	块煤煤炉(HEC)	PM	1.95~46.6(13.2)	—	0.73~11.4(4.24)	0.13~28.5(4.34)	[43]
块煤(无烟煤)			1.47~1.54(1.50)		0.13~0.42(0.23)	0.005~0.035(0.013)	
蜂窝煤(无烟煤)	稀释通道采样	PM <sub>2.5</sub>	—	0.78	0.143	0.003	[44]
块煤(烟煤)			9.873	5.286	0.915		
蜂窝煤(无烟煤)			0.866	—	0.146	0.003	
块煤(烟煤)	稀释通道采样	PM	11.929	—	5.194	0.961	[44]
蜂窝煤			3.78~7.28		1.24~4.15	0.03~0.32	
块煤	稀释通道采样	PM <sub>2.5</sub>	—	0.78~11.06	0.49~5.39	0.02~3.51	[47]
块煤(烟煤)			7.373	2.75	2.975		
块煤(无烟煤)	稀释通道采样	PM <sub>2.5</sub>	—	1.054	0.028	0.47	[48]
煤球			5.242	0.095	2.265		
蜂窝煤(烟煤)	稀释通道采样	PM	12.0~70.3	—	7.74~46.1	0.14~2.42	[52]
蜂窝煤(无烟煤)			2.21		0.22	0.004	
蜂窝煤(烟煤)	稀释通道采样	PM	1.14~5.42(3.58)	—	0.22~1.99(1.42)	0.07~1.30(0.83)	[53]
蜂窝煤(无烟煤)			1.84		0.08	0.06	
块煤(烟煤)			1.96~7.04(4.93)		0.27~1.30(0.80)	0.61~3.46(2.04)	
块煤(无烟煤)	稀释通道采样	PM	1.04	—	0.03	0.02	[53]
块煤(无烟煤)			1.04		0.03	0.02	

1) 括号内为平均值

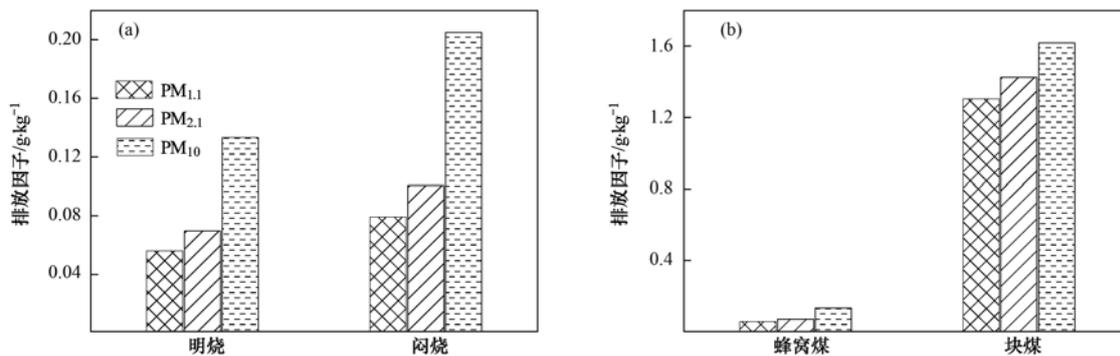
等<sup>[53]</sup>的研究结果比较接近; EC 的排放因子与 Chen 等<sup>[42]</sup>、Chi 等<sup>[43]</sup>接近. 此外, 研究中不同的采样方法和煤质组成也会造成最终结果的差异, Shen

等<sup>[49~51]</sup>利用室内燃烧室混合沉降采样得到的结果与本研究在低值上相似, 高值上相差较大.

图 2 给出了蜂窝煤明烧与闷烧状态下以及块煤

燃烧的平均碳颗粒物排放因子，从中可知，蜂窝煤的闷烧排放的碳颗粒物大于明烧，Shen 等<sup>[45-46]</sup>的研究发现，燃料的排放因子与燃烧时的供氧条件和通风效率有关，本研究通过模仿民用室内燃烧中的闷烧，当闷烧时限制燃烧的供氧与通风时得到明显高于明烧的碳颗粒物排放因子。此外，块煤燃烧的碳颗粒物排放因子远高于蜂窝煤，这可能与实验中烟煤与褐煤的高排放有关，而块煤中的无

烟煤排放与同一产区的蜂窝煤排放相近。煤样组分分析显示 HB、GZ 产区的蜂窝煤与无烟块煤样品水分与挥发分相近，而 NM 和 XJ 产区的烟煤与褐煤的水分与挥发分远高于其它样品。相关性分析显示，本研究所获得的碳颗粒物排放因子与水分和挥发分之间具备相关性，相关系数为 0.63。Shen 等认为<sup>[45]</sup>，EF 随着燃料水分增加而增加，本实验结果与其类似。



(a) 蜂窝煤明烧与闷烧条件下总碳排放因子; (b) 蜂窝煤与块煤排放总碳排放因子

图 2 民用燃煤碳颗粒物排放因子

Fig. 2 Emission factors for carbonaceous particulate matter from domestic coal combustion

OC/EC、OC/PM、EC/PM 的比值常被用于碳质颗粒物的源识别，目前较为广泛的应用是根据 OC/EC 比值讨论大气中的二次有机气溶胶的存在。本研究中蜂窝煤明烧排放 PM<sub>10</sub> 中 OC/EC、OC/PM、EC/PM 各比值的均值分别为 31.43%、1.44% 和 0.05%，与 PM<sub>2.1</sub> 中各比值 (36.98%、1.88% 和 0.05%) 的结果相比，没有较大差异。蜂窝煤明烧排放 PM<sub>1.1</sub> 中 OC/EC、OC/PM、EC/PM 各项的均值分别为 38.56%、2.27% 和 0.06%，随着粒子粒径减小，含碳颗粒物在蜂窝煤明烧排放颗粒物中所占比重增加，OC/EC 的值显示，二次有机碳可能更多地在亚微米粒子中存在。

在蜂窝煤闷烧排放的 PM<sub>10</sub> 中，OC 和 EC 的质量分数分别为 3.42% 和 0.08%，OC/EC 比为 59.4。PM<sub>2.1</sub> 中 OC/EC、OC/PM、EC/PM 各比值分别为 81.7%、4.62% 和 0.05%。与 PM<sub>10</sub> 相比，颗粒物含碳组分比重上升。与 PM<sub>1.1</sub> 的结果 (84.86%、4.96% 和 0.06%) 相比，各项值随着颗粒物粒径的减小有着上升趋势，细粒子具有更高的碳含量。与蜂窝煤明烧时相比，OC/EC 的比值闷烧大于明烧，闷烧排放的颗粒物 OC 含量更高，易产生更多的二次有机气溶胶。

块煤燃烧排放颗粒物中 OC/EC、OC/PM、EC/PM 各比值烟煤大于无烟煤，碳颗粒集中在细粒子

与亚微米粒子段。相较于同一产地的蜂窝煤，烟煤排放颗粒中 OC/EC 值要高出数倍，煤样组分的差异是影响该比值的原因之一。前人研究中，蜂窝煤烟煤的 OC/EC 比值为 1.35~69.29，蜂窝煤无烟煤该比值为 1.17~55，块煤烟煤该比值为 0.32~21.37，块煤无烟煤该比值为 1.49~100。本研究所得结果基本在此范围内。由此可以看出，在应用 OC/EC 比值判断二次有机气溶胶时，需考虑采样点周围是否有明显的民用燃煤源。

### 3 排放因子粒径分布特征

#### 3.1 颗粒物粒径分布

本研究中 7 种燃煤排放的颗粒物具有相似的粒径分布特征，为双峰或三峰型。蜂窝煤明烧时峰值粒径位于 0.43~0.65、2.1~3.3、4.7~5.8 μm，分别占到总排放质量的 12.4%、18.0% 和 19.6%；闷烧时同样表现为三峰，峰值粒径位于 0.43~0.65、1.1~2.1、4.7~5.8 μm，分别占到总排放质量的 10.3%、14.1% 和 14.7%。不同地区的块煤排放颗粒粒径分布差异较大：NM 块煤燃烧排放颗粒物中细粒子比重较大，而 HB 块煤燃烧排放颗粒物则集中分布在粗粒子段。民用煤燃烧排放颗粒物粒径分布特征如图 3 所示，蜂窝煤明烧时 3 种蜂窝煤排放 PM<sub>2.1</sub> 占 PM<sub>10</sub> 质量的 36.27%~

50.05%，闷烧时为 27.30%~61.72%；当燃烧条件为闷烧时，HB 和 NM 蜂窝煤燃烧排放  $PM_{2.1}$  质量分数减小，GZ 蜂窝煤燃烧排放  $PM_{2.1}$  质量分数增加。不同地区的煤样组成和原煤加工工艺等都会造成颗粒物排放差异。块煤中除去 HB(K) 的细粒子质量分数为 9.88%，其余 3 种块煤排放颗粒物细粒子均占有较高比重 (46.02%~67.15%)。  $PM_{1.1}$  占  $PM_{10}$  的比重上，块煤的质量分数 (31.3%) 大于蜂窝煤 (28.2%)。

质量中值粒径 (mass median diameter, MMD) 指大于或小于该粒径的颗粒物质量占总颗粒物质量 50% 时的粒径，常被用于粒径分布分析和人体健康风险评价。对颗粒物累积质量分数进行线性回归拟合得到拟合方差 ( $R^2$ )，质量中值粒径和离散度 ( $\delta_g$ ) 如表 4 所示。NM(K)、GZ(S) 和 HB(F) 的 MMD 分别为 1.26、1.62 和 1.76  $\mu\text{m}$ ，表明其燃烧排放超过 50% 的烟尘颗粒可以直接进入人体肺部，因而造成人体极大的健康危害。

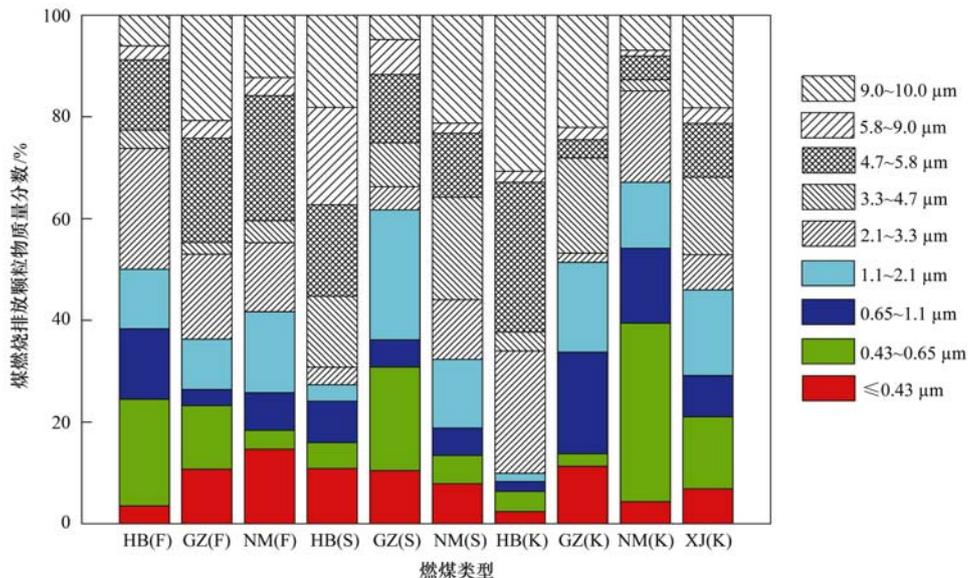


图 3 民用煤燃烧排放  $PM_{10}$  中颗粒物粒径分布

Fig. 3 Size distribution for particles in  $PM_{10}$  from domestic coal combustion

表 4 7 种煤炭排放的颗粒物的质量中值粒径和离散度

Table 4 MMD and dispersion of emission particles from the seven kinds of coal

项目	HB(F)	GZ(F)	NM(F)	HB(S)	GZ(S)	NM(S)	HB(K)	GZ(K)	NM(K)	XJ(K)
$R^2$	0.98	0.91	0.93	0.79	0.98	0.92	0.78	0.95	0.91	0.97
MMD/ $\mu\text{m}$	1.76	2.48	2.22	3.27	1.62	2.74	4.12	2.19	1.26	2.24
$\delta_g$	3.17	3.90	3.55	4.02	3.52	3.40	3.47	3.70	3.61	3.57

### 3.2 碳组分粒径分布

民用燃煤排放颗粒物中含碳组分的粒径分布如图 4 所示。OC 主要在细粒子中的含量占到总质量的 43.5%~59.7%。NM 块煤燃烧排放的 OC，93.4% 集中在  $PM_{2.1}$  上，远高于其它煤型燃烧排放，12.83% 的水分降低了其燃烧效率产生了更多的 OC 排放，高达 28.54% 的挥发分使更多的 OC 污染物以细颗粒物的形式排放。蜂窝煤与块煤粒径分布分为两类，其中蜂窝煤的明烧与闷烧条件下 OC 排放以  $\leq 0.43 \mu\text{m}$  粒径段为主，在不同粒径段的归一化质量分数中占到总量的 23.6%；块煤分布则是以  $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$  为主，归一化峰值粒径段质量占总

质量的 20.1%，其中以 NM 块煤该比重最高，为 42.6%。7 种煤型的 EC 在细颗粒物中的含量以 HB 块煤和 NM 块煤燃烧排放最高，分别占总质量的 83.9% 和 78.2%。NM 块煤的水分和挥发分使其 EC 污染物多以细颗粒物形式存在；HB 块煤则由于其较高的固定碳，在外形上相较于其它煤型更加细碎，这些特征则诱导其在燃烧过程中产生了更多的 EC 细颗粒物。其中 HB 块煤燃烧排放 EC 分布集中在  $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ，占总质量的 74.2%；NM 块煤燃烧排放 EC 集中在  $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$  和  $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ ，各占总质量的 36%；蜂窝煤燃烧排放的 EC 有 40% 左右集中在细颗粒物中，低于相应的块煤燃烧排放

细颗粒物中 EC 的比例。减少块煤的燃烧排放对于含碳细颗粒物的减排具有重要意义。

7 种民用煤燃烧排放的 OC、EC 的质量中值粒径和离散度见表 5。碳质颗粒物的质量中值粒径几乎全部小于 2.5 μm，燃煤排放碳颗粒在肺泡与支

气管区沉积率最高，大量的致癌有机物进入人体。胡珊等<sup>[58]</sup>的研究发现，燃煤源为致癌风险的最大贡献源；蔡婧<sup>[59]</sup>认为 BC 对儿童呼吸道疾病有显著相关性。改善与控制煤尤其是块煤的燃烧排放有助于降低民用煤碳质颗粒物排放产生的健康风险。

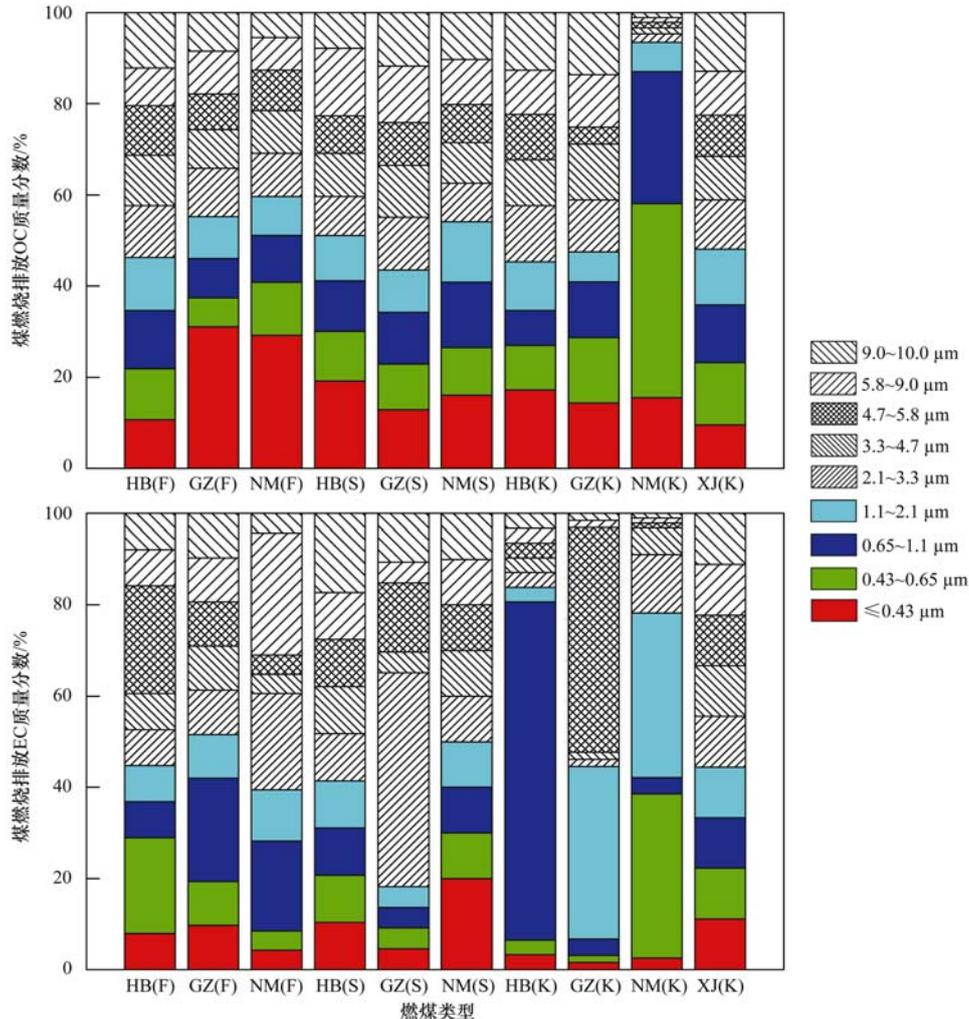


图 4 民用煤燃烧排放 PM<sub>10</sub> 中碳质颗粒物 (OC、EC) 粒径分布特征

Fig. 4 Size distribution of carbonaceous particles in PM<sub>10</sub> from domestic coal combustion

表 5 7 种煤炭排放的 OC、EC 的质量中值粒径和离散度

Table 5 MMD and dispersion for OC and EC emitted from burning of the seven kinds of domestic coal

项目	煤型	HB(F)	GZ(F)	NM(F)	HB(S)	GZ(S)	NM(S)	HB(K)	GZ(K)	NM(K)	XJ(K)
OC	$R^2$	0.98	0.97	0.99	0.97	0.98	0.99	0.96	0.97	0.66	0.98
	MMD/ $\mu\text{m}$	2.04	1.28	1.13	1.70	2.20	1.72	1.93	1.85	0.54	2.02
	$\delta_g$	3.61	5.09	4.92	4.20	4.17	3.95	4.03	4.12	5.13	3.68
EC	$R^2$	0.93	0.98	0.97	0.95	0.90	0.97	0.74	0.88	0.89	0.97
	MMD/ $\mu\text{m}$	2.03	1.89	2.40	2.35	2.55	1.70	1.25	2.63	1.24	2.10
	$\delta_g$	3.67	3.55	3.11	3.82	2.86	4.21	3.19	2.72	3.16	3.64

### 3.3 碳质颗粒物的九级粒径段排放因子

图 5 列出了民用煤排放 OC、EC 颗粒物的平均排放因子。蜂窝煤 OC 排放因子的分布特征并未随燃烧条件的改变发生变化，主要分布在细粒径段，

各粒径段闷烧的排放因子大于明烧；EC 的排放因子粗粒子段较高，相比于蜂窝煤闷烧，明烧更易排放出 EC 细粒子。块煤的排放因子远高于蜂窝煤，OC 与 EC 均在 0.43 ~ 0.65 μm 有一个排放因子的

高值峰, EC 与 OC 的差别在于 EC 排放因子呈现双峰型, 在 1.1 ~ 2.1  $\mu\text{m}$  存在第二个峰值, 块煤排放的 OC 与 EC 颗粒物均以细粒子为主. 蜂窝煤与块煤的 OC 排放因子粒径分布型相似.

沈国峰<sup>[55]</sup>认为煤炭的残渣特征(CRC)与其排放因子的分布有关, CRC 是一个表征煤炭黏度的参数, CRC 值较小时排出的细颗粒物相对较多, CRC 值较大时排出的颗粒物粒径也相对较大. 本研究中蜂窝煤具有较小的黏度值而块煤的黏度值相对较大, 以 CRC 值来区分煤炭的排放, 发现低 CRC 值的蜂窝煤 OC 排放因子在  $\leq 0.43 \mu\text{m}$  段较大, 高 CRC 值的块煤 OC 排放因子高值段则处于 0.43 ~ 0.65  $\mu\text{m}$  段.

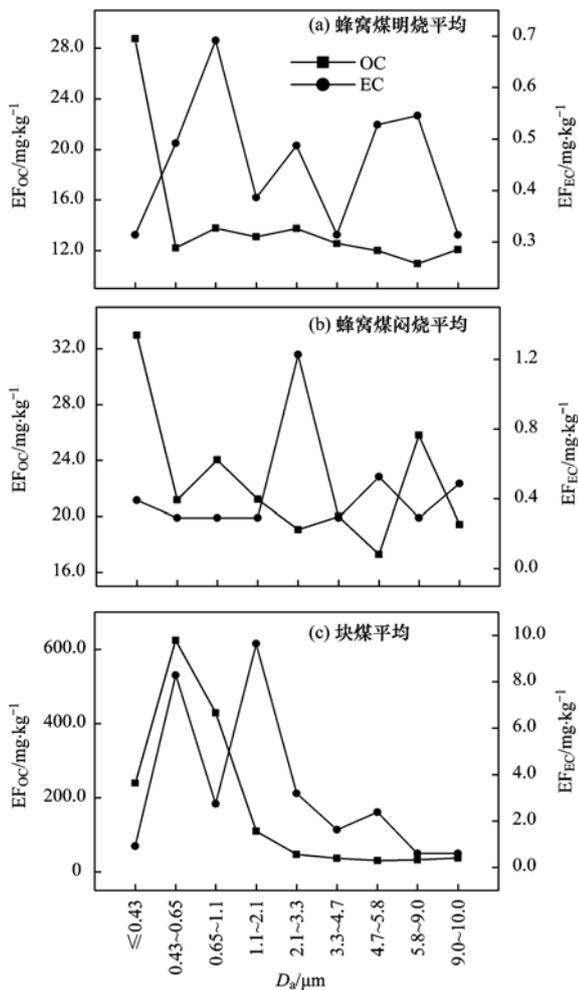


图 5 民用煤排放的九级碳颗粒物排放因子粒径分布

Fig. 5 Size distribution of emission factors of carbonaceous particles in  $\text{PM}_{10}$  from residential coal combustion

#### 4 结论

(1) 蜂窝煤与块煤排放出的颗粒物以细颗粒物为主, 蜂窝煤明烧排放  $\text{PM}_{2.1}$  占全部颗粒物质量的

50% 以上, 闷烧排放的颗粒物在细粒径段有所下降, 其中  $\text{PM}_{2.1}$  占  $\text{PM}_{10}$  比重最大的是 NM(K), 为 67.2%, 最小是 HB(K), 为 9.9%. 烟煤的排放因子高于无烟煤, 块煤的排放因子高于蜂窝煤, 蜂窝煤明烧排放的颗粒物略高于闷烧排放. NM(K) 的排放因子最高, 其  $\text{PM}_{1.1}$ 、 $\text{PM}_{2.1}$  和  $\text{PM}_{10}$  的排放因子分别为 27.0、33.52 和 49.91  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

(2) OC 排放因子最高为 NM(K), 对应的  $\text{PM}_{1.1}$ 、 $\text{PM}_{2.1}$  和  $\text{PM}_{10}$  中其排放因子分别为 4 914.05、5 276.84 和 5 647.15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 其次为 XJ(K), 无烟煤块煤与蜂窝煤明烧的排放相当, 蜂窝煤闷烧排放高于明烧, NM 蜂窝煤明烧排放最低. EC 排放因子最高为 NM(K), 对应的  $\text{PM}_{1.1}$ 、 $\text{PM}_{2.1}$  和  $\text{PM}_{10}$  中其排放因子分别为 37.00、68.67 和 87.80  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 是相同粒径的块煤无烟煤排放因子的 10 倍.

(3) 蜂窝煤闷烧排放的颗粒物碳组分含量高于明烧, 为 1.42% ~ 4.56%, 是明烧的 1 ~ 3 倍. 不同块煤排放的颗粒物碳组分含量差异较大, NM(K) 是 XJ(K) 的 7.9 倍. 随着煤燃烧排放颗粒物粒径减小, 碳组分在颗粒物中的比重增加.

(4) 使用蜂窝煤代替块煤可以有效地降低颗粒物中碳质组分的排放, 对防范健康风险具有重要意义. 民用燃煤污染物排放因子受多种因素影响, 后续仍需要开展更多实测研究进行补充完善.

#### 参考文献:

- [1] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle [J]. *Science*, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [2] Rosen H, Hansen A D A, Gundel L, *et al.* Identification of the optically absorbing component in urban aerosols [J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(24): 3859-3861.
- [3] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, *et al.* Indian ocean experiment: an integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D22): 28371-28398.
- [4] Ramanathan V, Crutzen P J. New directions: atmospheric brown "clouds" [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(28): 4033-4035.
- [5] Rasch P J, Collins W D, Eaton B E. Understanding the Indian Ocean Experiment (INDOEX) aerosol distributions with an aerosol assimilation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D7): 7337-7355.
- [6] Ramanathan V, Chung C, Kim D, *et al.* Atmospheric brown clouds; impacts on South Asian climate and hydrological cycle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(15): 5326-5333.
- [7] Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G, *et al.* Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption [J]. *Nature*, 2007, **448**(7153): 575-578.
- [8] Jones G S, Christidis N, Stott P A. Detecting the influence of

- fossil fuel and bio-fuel black carbon aerosols on near surface temperature changes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(2): 799-816.
- [9] Spracklen D V, Carslaw K S, Pöschl U, *et al.* Global cloud condensation nuclei influenced by carbonaceous combustion aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(17): 9067-9087.
- [10] Meehl G A, Arblaster J M, Collins W D. Effects of black carbon aerosols on the Indian monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2008, **21**(12): 2869-2882.
- [11] Wang C. The sensitivity of tropical convective precipitation to the direct radiative forcings of black carbon aerosols emitted from major regions [J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(10): 3705-3711.
- [12] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [13] 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.
- [14] Ming J, Cachier H, Xiao C, *et al.* Black carbon record based on a shallow Himalayan ice core and its climatic implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(5): 1343-1352.
- [15] Ming J, Xiao C D, Cachier H, *et al.* Black carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **92**(1): 114-123.
- [16] Xu B Q, Cao J J, Hansen J, *et al.* Black soot and the survival of Tibetan glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(52): 22114-22118.
- [17] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**(2): 423-428.
- [18] Yasunari T J, Bonasoni P, Laj P, *et al.* Estimated impact of black carbon deposition during pre-monsoon season from Nepal Climate Observatory-Pyramid data and snow albedo changes over Himalayan glaciers [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(14): 6603-6615.
- [19] Andreae M O. The dark side of aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409**(6821): 671-672.
- [20] Chameides W L, Bergin M. Soot takes center stage [J]. *Science*, 2002, **297**(5590): 2214-2215.
- [21] Hansen J E, Sato M. Trends of measured climate forcing agents [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, **98**(26): 14778-14783.
- [22] Hansen J, Sato M, Ruedy R, *et al.* Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, **97**(18): 9875-9880.
- [23] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [24] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D19): 4410.
- [25] Penner J E, Hegg D, Leitch R. Peer reviewed: unraveling the role of aerosols in climate change [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(15): 332A-340A.
- [26] Streets D G, Aunan K. The importance of China's household sector for black carbon emissions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(12): L12708.
- [27] Künzli N, Kaiser R, Medina S, *et al.* Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment [J]. *The Lancet*, 2000, **356**(9232): 795-801.
- [28] Hamilton R S, Mansfield T A. Airborne particulate elemental carbon: its sources, transport and contribution to dark smoke and soiling [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(3-4): 715-723.
- [29] Durant J L, Laffleur A L, Busby Jr W F, *et al.* Mutagenicity of C<sub>24</sub>H<sub>14</sub> PAH in human cells expressing CYP1A1 [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 1999, **446**(1): 1-14.
- [30] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [31] BP. BP 世界能源统计年鉴 [R]. 北京: BP, 2017.
- [32] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D14): D14203.
- [33] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, *et al.* Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(11): 5380-5552.
- [34] Cooke W F, Liousse C, Cachier H, *et al.* Construction of a 1° × 1° fossil fuel emission data set for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D18): 22137-22162.
- [35] Cooke W F, Wilson J J N. A global black carbon aerosol model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D14): 19395-19409.
- [36] Liousse C, Penner J E, Chuang C, *et al.* A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D14): 19411-19432.
- [37] Penner J E, Eddleman H, Novakov T. Towards the development of a global inventory for black carbon emissions [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, **27**(8): 1277-1295.
- [38] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(25): 4281-4296.
- [39] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D21): 8809.
- [40] Wang R, Tao S, Wang W T, *et al.* Black carbon emissions in China from 1949 to 2050 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(14): 7595-7603.
- [41] 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.
- [42] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(20): L20815.
- [43] Zhi G R, Chen Y J, Feng Y L, *et al.* Emission characteristics of carbonaceous particles from various residential coal-stoves in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(9): 3310-3315.
- [44] 孔少飞, 白志鹏, 陆炳. 民用燃料燃烧排放 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中碳组分排放因子对比[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(11): 2749-2756.
- Kong S F, Bai Z P, Lu B. Comparative analysis on emission factors of carbonaceous components in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> from domestic fuels combustion[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2749-2756.
- [45] Shen G F, Xue M, Wei S Y, *et al.* Influence of fuel moisture, charge size, feeding rate and air ventilation conditions on the emissions of PM, OC, EC, parent PAHs, and their derivatives from residential wood combustion[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(9): 1808-1816.
- [46] Shen G F, Xue M, Wei S Y, *et al.* Influence of fuel mass load, oxygen supply and burning rate on emission factor and size distribution of carbonaceous particulate matter from indoor corn straw burning[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(3): 511-519.
- [47] 刘源, 张元勋, 魏永杰, 等. 民用燃煤含碳颗粒物的排放因子测量[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(9): 1409-1416.
- Liu Y, Zhang Y X, Wei Y J, *et al.* Measurement of emission factors of carbonaceous aerosols from residential coal combustion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(9): 1409-1416.
- [48] Zhang Y X, Schauer J J, Zhang Y H, *et al.* Characteristics of particulate carbon emissions from real-world Chinese coal combustion[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(14): 5068-5073.
- [49] Shen G F, Yang Y F, Wang W, *et al.* Emission factors of particulate matter and elemental carbon for crop residues and coals burned in typical household stoves in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(18): 7157-7162.
- [50] Shen G F, TAO S, Wei S Y, *et al.* Field measurement of emission factors of PM, EC, OC, parent, nitro-, and oxy-polycyclic aromatic hydrocarbons for residential briquette, coal cake, and wood in rural Shanxi, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(6): 2998-3005.
- [51] Shen G F, Xue M, Chen Y C, *et al.* Comparison of carbonaceous particulate matter emission factors among different solid fuels burned in residential stoves [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 337-345.
- [52] 黄卫, 毕新慧, 张国华, 等. 民用蜂窝煤燃烧排放颗粒物的化学组成和稳定碳同位素特征[J]. *地球化学*, 2014, **43**(6): 640-646.
- Huang W, Bi X H, Zhang G H, *et al.* The chemical composition and stable carbon isotope characteristics of particulate matter from the residential honeycomb coal briquettes combustion [J]. *Geochimica*, 2014, **43**(6): 640-646.
- [53] Chen Y J, Tian C G, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors of PM<sub>2.5</sub>, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **109**: 190-196.
- [54] 陈颖军. 家用蜂窝煤燃烧烟气中碳颗粒物和三环芳烃的排放特征[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2004.
- Chen Y J. Emission characteristics of carbonaceous particulate and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential honeycomb-coal-briquette combustion[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [55] 沈国锋. 室内固体燃料燃烧产生的碳颗粒物和三环芳烃的排放因子及影响因素[D]. 北京: 北京大学, 2012.
- Shen G F. Emission factors of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential solid fuel combustions[D]. Beijing: Peking University, 2012.
- [56] Butcher S S, Ellenbecker M J. Particulate emission factors for small wood and coal stoves[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1982, **32**(4): 380-384.
- [57] Bond T C, Covert D S, Kramlich J C, *et al.* Primary particle emissions from residential coal burning; optical properties and size distributions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D21): 8347.
- [58] 胡珊. 珠三角地区大气颗粒有机物致癌风险及来源解析[D]. 北京: 北京大学, 2009.
- [59] 蔡婧. 城市个体黑碳暴露特征与儿童呼吸道健康效应关系研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- Cai J. Characterization of personal exposure to black carbon in urban settings and airway response in children[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.

## CONTENTS

An Assessment of PM <sub>2.5</sub> -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities .....	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ...	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM <sub>2.5</sub> Concentration Target Constraint .....	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, et al. (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, et al. (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, et al. (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo .....	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, et al. (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM <sub>2.5</sub> from Open Burning of Municipal Solid Waste .....	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, et al. (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China .....	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, et al. (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian .....	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period .....	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, et al. (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province .....	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, et al. (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents .....	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, et al. (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006 .....	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, et al. (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow .....	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing .....	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, et al. (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project .....	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, et al. (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter .....	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake .....	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, et al. (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall .....	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, et al. (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta .....	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, et al. (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay .....	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, et al. (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors .....	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, et al. (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors .....	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, et al. (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors .....	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, et al. (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal .....	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, et al. (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N <sub>2</sub> O Emissions in Ditches Under Different Land Uses .....	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, et al. (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments .....	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, et al. (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants .....	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, et al. (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /BiVO <sub>4</sub> Composite Photoanode .....	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, et al. (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II) .....	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, et al. (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar .....	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater .....	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, et al. (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control .....	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, et al. (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal .....	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, et al. (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance .....	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, et al. (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process .....	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, et al. (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, et al. (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process .....	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, et al. (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions .....	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, et al. (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge .....	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, et al. (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge .....	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, et al. (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain .....	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, et al. (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil .....	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, et al. (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure .....	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing .....	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, et al. (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil .....	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, et al. (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique .....	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, et al. (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains .....	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria .....	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, et al. (3885)
Effects of Gypsum on CH <sub>4</sub> Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil .....	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles .....	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, et al. (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta .....	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, et al. (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River .....	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, et al. (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate .....	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, et al. (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance .....	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, et al. (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO <sub>2</sub> Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China .....	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, et al. (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water .....	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, et al. (3954)