ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第5期
2017年5月15日

目 次

南京工业区夏冬季节二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 …… 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭(1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 …… 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇(1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 …… 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡(1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃 …… 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华(1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 …… 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合(1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 …… 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邬晓东(1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 …… 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗(1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 …… 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧(1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 …… 武媛媛, 李如梅, 彭林,端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲(1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 …… 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺(1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 …… 董小芳, 邓黄月,张峦,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 …… 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远(1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 …… 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟(1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 …… 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南(1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 …… 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼(1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 …… 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇(1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 …… 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业(1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 …… 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超(1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 …… 陈成龙, 高明,倪九派, 谢德体,邓华(1889)
NO_3^--N负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 …… 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌(1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 …… 李薛晓,程思超,方舟,李先宁(1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 …… 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安(1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 …… 刘海龙,付晶淼,郭雪峰,柴建恬,张忠民(1918)
紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 …… 徐丽梅,张崇淼,王晓昌,吉铮,周进宏(1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化锆对水中磷酸盐的吸附作用 …… 王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣(1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 …… 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华(1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 …… 朱培颖,李大鹏,于胜楠(1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 …… 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康(1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 …… 周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华(1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 …… 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉(1982)
$Fe^{(0)}$-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 …… 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊(1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 …… 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨(1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 …… 闾刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷,Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 …… 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙(2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 …… 杨波,徐辉, 冯修平,李方,田晴,马春燕(2021)
喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 …… 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣(2030)
锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 …… 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰(2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 …… 周同,于德爽,李津,吴国栋,王骁静(2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 …… 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波(2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 …… 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易(2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 …… 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓(2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 …… 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊(2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N_2O 排放的影响 …… 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇(2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N_2O 的排放特征 …… 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 …… 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛(2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 …… 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静(2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 …… 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周(2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 …… 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强(2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 …… 李秋言,赵秀兰(2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 …… 吴志娟,毕二平(2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 …… 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌(2161)
牛粪源蚓粪及其生物炭对 Pb^{2+}、Cd^{2+} 的吸附特性 …… 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐, 坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖(2172)
C_3N_4/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 …… 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥(2182)
《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征

梁云平,张大伟*,林安国,马召辉,邬晓东
(北京市环境保护监测中心,大气颗粒物监测技术北京市重点实验室,北京 100048)

摘要: 以北京远郊农村居民常用的蜂窝煤、煤球、烟煤散煤为实验用煤,开展燃烧实验. 研究了烟气无机污染物排放因子、VOCs 释放情况. 结果表明在充分燃烧的条件下,蜂窝煤、煤球、烟煤气态污染物 SO_2 排放因子分别为 1.50、1.91、1.62 kg·t^{-1};NO_x 排放因子分别为 0.420、0.901、2.20 kg·t^{-1};CO 排放因子分别为 22.4、37.3、87.3 kg·t^{-1}. 燃烧排放的 NO_x 和 CO 的排放因子顺序关系为:烟煤 > 煤球 > 蜂窝煤;SO_2 的排放因子大小顺序分别为:煤球 > 烟煤 > 蜂窝煤. 获得了北京市 2014 年 3 种民用煤燃烧排放的气态污染物的排放清单,烟煤散煤排放的 SO_2 超过了 0.55 万 t,NO_x 超过了 0.75 万 t,CO 超过了 29 万 t. 3 种煤质燃烧过程中点火和封火阶段 VOCs 排放浓度相对较高,各阶段 VOCs 排放因子为点火阶段最高,封火阶段次之.

关键词:民用燃煤;烟气;排放特征;排放因子;排放清单
中图分类号: X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)05-1775-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201608142

Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing

LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei*, LIN An-guo, MA Zhao-hui, WU Xiao-dong
(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Protection Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: Honeycomb briquet, biomass briquettes and bituminous coal from suburb of Beijing were chosen as testing samples to carry out combustion experiments. The characteristics of inorganic pollutant emission factors and VOCs emission factors released from the flue gas were studied. The results showed that under the condition of sufficient combustion, the average emission factors of SO_2 from these three types of coal respectively were 1.50, 1.91, 1.62 kg·t^{-1}; NO_x 0.420, 0.901, 2.20 kg·t^{-1}; CO 22.4, 37.3, 87.3 kg·t^{-1}. Combustion emission factors of gaseous pollutants for NO_x and CO were in the order of bituminous coal > biomass briquettes > honeycomb briquet. SO_2 emission factors were in the order of biomass briquettes > bituminous coal > honeycomb briquet. The 2014 emissions inventory of the three civil coal combustion pollutants in Beijing was obtained. Bituminous coal emissions of SO_2 was more than 5.5×10^3 tons, NO_x was more than 7.5×10^3 tons, CO was more than 290×10^3 tons. All these coal types released more kinds and higher concentrations of volatile organic compounds in ignition phase and damp down stage. VOCs emission factor was the highest during ignition phase, followed by damp down phase.

Key words: residential coal combustion; flue gas; emission characteristics; emission factor; emission inventory

煤炭燃烧会产生大量的污染物已毋庸置疑,为加快防治大气污染工作,北京市启动新一轮压减燃煤工作,根据《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》要求,经过 5 a 的努力,北京市煤炭消耗要控制在1 000万 t 以内,煤炭比重要降到 7.4%[1].

从措施效果看,目前北京市工业用煤、集中供暖用煤污染物排放已逐步得到有效控制,民用燃煤散烧,由于数量多、分布广、低空排放、直燃直排及燃烧效率低等特点[2],将是北京市下一阶段大气污染控制的重点治理对象. 根据北京市的调研结果,城市发展新区、城市功能拓展区和生态涵养发展区生活用煤比例为 51∶23∶26[3]. 2014 年底,北京市城区除少量零星散户外,在城乡结合部和广大农村地区约有 140 万户居民使用煤炭用于炊事采暖,年耗煤约 430 万 t,约占北京市总用煤量的 20%. 由于无烟煤点火较为困难,北京市很少有居民使用,民用燃煤中烟煤散煤约占 80%,型煤约占 20%.

目前北京地区的民用燃煤,很多来自非正规渠道,质量没有保证,居民生活使用的煤炭经常出现劣质煤、高硫煤. 市场上的不法商贩恶性竞争,扰乱市场秩序,使得大量不合格煤炭无证销售[4]. 有研究指出,职责体系不完善、技术规范和标准体系不健全、民用型煤供应体系不完善、监管难度大、政府补贴难以持续成为我国散煤治理的主要难点[5]. 近几年,研究者针对民用燃煤燃烧烟气开展了大量研究工作,认为民用煤炉黑炭排放因子比工业锅炉

收稿日期: 2016-08-21; **修订日期**: 2016-12-06
基金项目: 北京市科技计划课题项目(Z131100006113009);环境保护公益性行业科研专项(201409005, 20140914);国家科技支撑计划项目(2013BAC17B01)
作者简介: 梁云平(1975~),女,硕士,主要研究方向为环境与污染源监测,E-mail:lyp2005@163.com
* 通信作者,E-mail:zhangdawei@bjmemc.com.cn

高出 3 个数量级,是黑炭的主要排放源[6~9]. 民用燃煤废气中一氧化碳(CO)的排放量明显偏高[10],其污染物排放因子是工业燃煤锅炉的 100 倍之多[11],采暖季民用燃煤的二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、PM_{10}、$PM_{2.5}$日排放强度约为电力行业的 7、1.2、8 和 5 倍[12]. 家用炉灶中煤燃烧在压煤燃烧模式下排放的挥发性有机物远大于燃烧模式下,苯系物在烟气排放挥发性有机物中所占组成比例较大,该类污染物如果直接排入室内会污染室内空气环境,从而危害居民健康[13]. 海婷婷等[14]利用全流稀释采样系统对 5 种不同熟读的煤种燃烧烟气进行分析,得出在民用燃煤的 PAHs 排放因子的各种影响因素中,煤的地质成熟度起主导作用,不同成熟度的 PAHs 排放因子差异幅度高达 1~2 个数量级. 家用燃煤炉灶燃烧过程中释放烟气中单环芳烃浓度远超过燃煤电站和生物质燃烧释放烟气中浓度,其单环芳烃以苯和甲苯为主,平均浓度分别达到1 672.3 $\mu g \cdot m^{-3}$和1 631.3 $\mu g \cdot m^{-3}$[15].

目前北京市民用燃煤煤质、炉具、燃烧方式相比以往均发生了较大变化,已有的研究成果和检测手段不能适用于当前环境管理工作需要,鉴于当前的环境形势及存在的问题,本文将结合北京市当前民用煤使用情况,对其烟气排放特征加以研究,以期为大气源解析研究提供科学依据,并为推进北京空气质量持续改善、加强空气质量管理提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 燃烧实验

选取北京市居民取暖用的主要煤种,型煤(蜂窝煤、煤球)、烟煤散煤进行燃烧实验. 其中,蜂窝煤、烟煤散煤从北京金泰集团有限公司购买,该公司是北京市最大的蜂窝煤生产、供应商,北京市正规渠道销售的蜂窝煤约 90% 由该公司提供;煤球从北京文新德隆洁净煤有限责任公司购买,该公司是北京市最大的煤球生产、供应商,约占北京市煤球供应量的 80%. 实验用的煤种煤质检测结果见表 1.

表 1 煤质检测结果

Table 1 Coal quality test results

检测项目	蜂窝煤		煤球		烟煤散煤	
	检测结果	标准限值[16]	检测结果	标准限值[16]	检测结果	标准限值[16]
灰份(A_d)/%	28.0	≤31.0	27.4	≤25.0	4.22	≤16.0
挥发份(V_{daf})/%	4.82	≤10.0	10.2	≤12.0	31.9	≤10.0
全硫($S_{t,d}$)/%	0.220	≤0.40	0.310	≤0.40	0.170	≤0.40
发热量($Q_{gr,d}$)/MJ·kg^{-1}	22.9	≥21.0	22.8	≥24.0	29.9	—

从表 1 可以看出,所选煤种除了煤球的灰分及发热量、烟煤散煤的挥发分指标不符合《低硫散煤及制品》(DB 11/097-2014)要求外,其余指标均符合该标准要求. 煤球的发热量偏低,蜂窝煤及煤球的挥发分含量相对烟煤散煤较低,原因可能为本研究使用的蜂窝煤和煤球一般采用无烟煤和部分添加剂加工而成,所以挥发分含量相对较少. 但两者灰分含量相比烟煤散煤要高,均接近 30%.

采样系统如图 1 所示,由燃烧段、混流段、颗粒物采样段、过滤段、动力段、气态污染物采样和排放段构成. 通过大流量风机的引风作用将环境空气与高浓度烟气一同吸入烟气集气罩中,在烟道内混合均匀后,中间段作为监测采样段.

为较真实地模拟居民用煤情况,选用市场上常见的家庭用炉,即原煤燃烧炉和蜂窝煤燃烧炉,放置在采样系统的喇叭形烟罩下方,对煤种(蜂窝煤、煤球、烟煤散煤)进行燃烧模拟实验,在实验过程中保证煤炭自然燃烧. 燃烧前准备待测煤品,称重并做好记录. 模拟民用煤实际使用过程:06:00 加煤,保持旺火,08:00 加煤封火;18:00 加煤,保持旺火,22:00加煤封火.

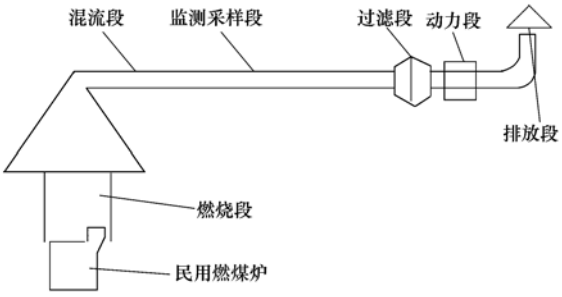

图 1 采样系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the sampling system

1.2 样品采集与分析

为了保证烟气流量的测量,采用动力系统排出烟道气,采样系统动力段烟气的工作流速远大于煤

燃烧烟气实际排放速率，所以在监测采样段测试的烟气混入了室内数倍的空气，对烟气进行稀释和降温. 采样工作是在一间全封闭的装有空气净化系统的实验室进行，以降低室内空气污染物的本底值.

在监测采样段每隔 10 min，使用青岛崂应生产的烟尘测试仪测试烟气流速；使用北京雪迪龙公司生产的非分散红外烟气分析仪对烟气温度、无机气态污染物（CO、SO_2、NO_x）浓度进行测试；分别在不同燃烧阶段，用苏马罐采集烟气挥发性有机气体（VOCs）样品 5 个，使用美国安捷伦公司气相色谱-质谱仪（GC-MS）分析 VOCs. 监测过程涵盖煤炭的整个燃烧阶段.

2　结果与讨论

2.1　无机气态污染物排放特征

2.1.1　排放因子确定

根据烟气污染物单位时间排放量、耗煤量及烟气中 SO_2、NO_x、CO 质量浓度，用每消耗 1t 燃煤产生大气污染量的排放程度表示烟气污染物排放因子.

根据实验检测结果和数据统计分析，最终获得 3 种民用煤烟气排放因子，见表 2.

表 2　民用燃煤排放因子/kg·t^{-1}

Table 2　Civil coal emission factor/kg·t^{-1}

分类	SO_2	NO_x	CO
蜂窝煤	1.50 ± 0.09	0.420 ± 0.08	22.4 ± 0.16
煤球	1.91 ± 0.11	0.901 ± 0.07	37.3 ± 0.13
烟煤散煤	1.62 ± 0.12	2.20 ± 0.13	86.3 ± 0.15

由表 2 可以看出 NO_x 和 CO 排放因子显示了一定差异，明显看到 3 种煤炭的 CO 排放因子最高. 燃料的不完全燃烧会产生大量 CO，民用燃煤因燃烧效率不高造成 CO 排放量过高；SO_2 的排放因子相差不大，这可能与 3 种燃料的全硫含量较为接近有关. 燃烧相同质量的民用煤，烟煤 NO_x 和 CO 排放因子均高于其它类型煤，烟煤 NO_x 排放因子约是蜂窝煤的 5.5 倍、煤球的 2.4 倍；CO 排放因子约是蜂窝煤的 3.9 倍、煤球的 2.3 倍. 可能是燃烧时各煤种的结构、组分含量、密度和燃烧工况差异导致.

对比已有的研究，如表 3 所示，研究的年代不同、煤质与燃烧方式不同，导致燃烧后污染物的排放因子差异较大，尤其是 CO 排放因子相差了 100 倍以上.

姚渭溪等[17]对比了烟煤和烟煤成型为蜂窝煤燃烧实验，发现烟煤成型为蜂窝煤后，采用上点燃的方式可使排污量急剧下降，达到无烟或少烟的目的，由此测得的烟煤蜂窝煤排放因子中 CO 为 36.26 kg·t^{-1}，NO_x 为 0.20 kg·t^{-1}，SO_2 为 4.08 kg·t^{-1}. 但相比本研究使用的无烟煤蜂窝煤测试结果，除了 NO_x 排放因子比本研究略低外，其余结果均高于本研究，可见煤质不同对测试结果影响较大.

表 3　文献报道的民用燃煤排放因子/kg·t^{-1}

Table 3　Civil coal emission factor in literatures/kg·t^{-1}

分类	SO_2	NO_x	CO	文献
蜂窝煤	1.47	0.50	78.05	[21]
煤球	3.23	0.31	—	[25]
烟煤散煤	4.36	0.65	—	[25]
烟煤蜂窝煤	4.08	0.20	36.26	[17]
蜂窝煤	3.12	0.39	0.63	[17]
煤球	7.61	0.41	38.58	[18]
烟煤散煤	15.89	0.52	44.84	[18]
民用燃煤平均	—	—	48.33	[11]
民用燃煤平均	—	1.88	—	[19]
型煤	11.54	—	—	[20]
烟煤散煤	8.62	1.88	52.3	[22]
民用燃煤平均	—	1.88	—	[24]
烟煤散煤	—	1.88	52.3	[23]
蜂窝煤	0.18	0.070	—	[26]
其它型煤	0.31	0.094	—	[26]
蜂窝煤	0.038	0.598	—	[27]
其它型煤	0.31	0.615	—	[27]
型煤	$6.8S_{t,d}$ = 1.80	0.8	72.8	[28]
烟煤散煤	$7.4S_{t,d}$ = 1.26	1.6	140.1	[28]
蜂窝煤	1.50	0.420	22.4	本研究
煤球	1.91	0.901	37.3	本研究
烟煤散煤	1.62	2.20	86.3	本研究

周伯俞等[18]测得的蜂窝煤、煤球、烟煤散煤的 NO_x 排放因子较为接近，但相应 SO_2、CO 排放因子差异较大，测得的各种型煤排放系数都低于散煤，指出燃用蜂窝煤比煤球不但节煤 10%，还减少污染物的排放量，证明了同为型煤，蜂窝煤优于煤球. 相比本研究，SO_2 排放因子均高于本研究，这可能与北京市对民用燃煤含硫份限值较为严格有关；NO_x 排放因子均低于本研究，其中蜂窝煤 NO_x 排放因子为 0.39 kg·t^{-1}，与本研究的 0.4 kg·t^{-1} 比较接近；CO 排放因子与本研究差异较大，也可能为各自煤质燃烧方式、测试样品的代表性导致.

王丽涛等[10]引用北京大学 2001 年《北京市大气污染控制战略研究报告》[19]民用燃煤的 CO 排放因子为 75 kg·t^{-1}，结合其他民用燃料估算了 2001 年中国大陆民用燃料 CO 排放量为4 823.64万 t，指出居民生活源对 CO 排放的贡献最大，占总排放量的近 1/3.

孙庆贺等[20]采用自下而上的方法对国内 NO_x 的排放因子进行了估算,得出乡村民用燃煤 NO_x 的排放因子为 1.88 kg·t^{-1},与本研究 NO_x 平均排放因子最为接近.

孙竹如等[21]利用"黑箱原理"和物料衡算原理,通过测算二氧化硫转化率计算得出民用型煤 SO_2 排放因子为 11.54 kg·t^{-1}. 该测算方法结果与煤质含硫率呈正相关,与灰渣中含硫率呈负相关. 文献[21]中实验用煤含硫率高达 0.965%,约是本研究煤质含硫率最高的煤球含硫率的 3 倍以上. 煤中硫的含量及其存在形式不同,转化温度的差异,均会导致硫的不同转化率,从而与本研究结果之间的差异.

陈建华等[22]选用蜂窝煤,验证了不同燃烧工况排放因子,根据工况排放因子和相应工况在实际使用中所占的时间比例按加权计算的方法得出蜂窝煤 SO_2、NO_x、CO 的综合排放因子分别为 1.47、0.50、78.05 kg·t^{-1}. 除了 CO 排放因子与本研究差异较大之外,其余两个排放因子与本研究一致性较好.

赵斌等[23]、李瑞芃等[24]、田贺忠等[25]在对国内、外排放因子进行分析对比之后,直接引用了大量能反映国内状况的排放因子用于研究工作中. 张琦等[26]采用箱式稀释采样系统,从燃料点火开始到燃料燃尽结束,测试了 12 种常见民用煤,得出煤球、烟煤散煤 SO_2 排放因子分别为 3.23 kg·t^{-1}、4.36 kg·t^{-1},相比本研究要偏高,NO_x 排放因子相比本研究偏低. 其余研究人员[27,28],由于煤质不同、燃烧方式等方面的差异,给出的相应排放因子与本研究差异较大,其中环境保护部《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南》(试行)[29]给出的型煤、烟煤散煤排放因子中除 CO 与本研究相差较大外,其余排放因子与本研究有较好的一致性.

煤燃烧是一个复杂的化学过程,涉及到高温分解、键裂、煤焦油形成以及进一步热氧化等诸多过程[30,31]. 上述研究表明,民用燃煤在不同燃烧阶段排放因子有很大区别,此外煤质组成、采样测试方法等也会对结果造成较大影响.

2.1.2 排放清单估算

按照 2014 年北京地区采暖季大约消耗 430 万 t 民用煤计算,其中型煤(蜂窝煤和煤球)占比约为 20%,烟煤散煤占比约为 80%. 结合本实验所得的 SO_2、CO 和 NO_x 的排放因子,估算了 2014 年型煤、烟煤散煤燃烧排放的气态污染物 SO_2、CO 和 NO_x 的总量,如表 4 所示.

表 4 2014 年民用燃煤污染物排放清单/万 t

Table 4 Inventory of pollutant discharge of civil coal in 2014/10^4 t

分类	SO_2	NO_x	CO
型煤	0.146	0.055 9	2.57
散煤	0.550	0.757	29.7
合计	0.696	0.813	32.3

根据表 4 计算结果可知:在 2014 年民用燃煤燃烧产生的污染物中,烟煤散煤对民用燃煤 NO_x、CO 的贡献均超过了 90%,SO_2 贡献接近 80%. 赵文慧等[32]基于 2013 年北京市环境保护局燃煤散烧调查结果进行耗煤量的估算,采用虞江萍等[33]给出的 SO_2、NO_x 的排放因子,分别为 3.52 kg·t^{-1}、1.88 kg·t^{-1},再通过计算得出 2013 年北京市平原区居住平房燃煤消耗产生的 SO_2、NO_x 排放量分别为 1.42 万 t、0.76 万 t. 将本研究获得的数据与文献[32]对比发现,文献[32]估算的 2013 年 SO_2 排放量是本研究实测 SO_2 总排放量的 2 倍多,NO_x 排放量低于本研究相应结果. 原因可能为文献[32]引用的排放因子为 2005 年数据,而本研究为最新的实测数据;文献[32]研究的是北京市平原区范围,不包含首都功能核心区,而本研究范围覆盖北京市全市区.

2.2 烟气挥发性有机物 VOCs 排放特征

2.2.1 VOCs 的含量及分类

将 3 种煤在不同的燃烧阶段烟气进行取样与检测,共检出 103 种 VOCs,主要为烷烃类、烯烃类、卤代烃、芳香烃、含氧有机物,各燃烧阶段排放的 VOCs 种类及各类所占质量分数如表 5 所示. 烟煤散煤仅检测了点火阶段及旺火阶段 VOCs 排放情况.

将每一种煤燃烧排放的各类 VOCs 物种的排放浓度除以总的 VOCs 排放浓度,归一化得到各物种的质量分数,各物种的分布关系如图 2 所示.

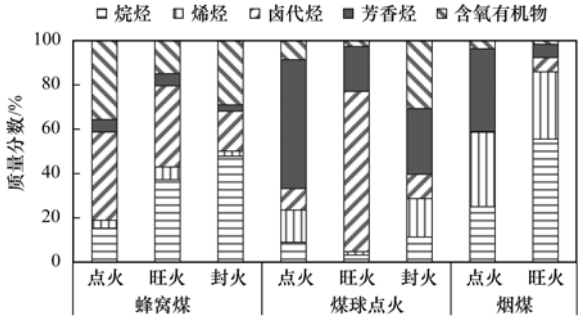

图 2 煤种燃烧 VOCs 排放物种分布

Fig. 2 VOCs species distribution from coal combustion

各煤种不同燃烧阶段排放浓度较高的物质分类如表 6 所示.

表 5　VOCs 种类及各类所占百分比

Table 5　Types and percentages of VOCs

VOCs	项目	蜂窝煤			煤球			烟煤散煤	
		点火	旺火	封火	点火	旺火	封火	点火	旺火
烷烃	种类	28	28	28	27	8	26	29	28
	质量分数/%	15.4	37.2	47.9	9.00	3.20	11.4	25.0	55.6
烯烃	种类	6	8	8	10	3	10	10	9
	质量分数/%	3.50	5.80	2.20	14.5	1.50	17.4	33.6	30.3
卤代烃	种类	24	21	16	23	12	13	5	14
	质量分数/%	39.9	36.6	18.1	9.70	72.3	10.9	0.300	6.40
芳香烃	种类	14	15	13	17	7	17	17	16
	质量分数/%	5.60	5.50	2.80	58.2	20.2	29.6	37.4	6.00
含氧有机物	种类	10	8	8	9	5	8	9	6
	质量分数/%	35.6	14.9	29.0	8.60	2.70	30.7	3.70	1.70

表 6　排放浓度较高的物质

Table 6　Substances with relatively high emission levels

煤种	燃烧阶段	排放浓度较高的前两类	排放浓度较高的前 5 种物质
蜂窝煤	点火	卤代烃、含氧有机物	丙酮、二氯甲烷、氯乙烯、FREON12、三氯甲烷
	旺火	烷烃、卤代烃	二氯甲烷、己烷、丁烷、氯乙烯、FREON12
	封火	烷烃、卤代烃	己烷、丙酮、二氯甲烷、3-甲基戊烷、丁烷、
煤球	点火	烯烃、芳香烃	苯、甲苯、丙烯、氯乙烯、丁烷
	旺火	卤代烃、芳香烃	二氯甲烷、苯、溴甲烷、四氯乙烷、氯乙烷
	封火	芳香烃、含氧有机物	丙酮、苯、甲苯、2-丁酮、2-丙醇
烟煤散煤	点火	烯烃、芳香烃	顺二丁烯、苯、丁烷、丙烯、甲苯
	旺火	烷烃、烯烃	顺二丁烯、丁烷、己烷、1,2-二氯乙烷、环己烷

从表 5 和图 2 可以看出，蜂窝煤和煤球燃烧后烟气中氯代烃含量较高，而烟煤散煤燃烧后氯代烃相对含量较低. 刘泽常等[34]在研究煤中氯在燃烧过程中的释放特性和机制讨论时指出，中国煤中氯含量一般较低，一般为 0.01% ~0.05%，本研究未对煤质中氯的含量进行分析，所以此种现象可能为煤质本身氯含量较高所致，也可能添加了其他含氯化合物导致. 对于蜂窝煤和煤球在加工过程中会添加 20% 左右的黄泥作为粘结剂，也可能为粘结剂的成分中含有一定量的含氯化合物造成氯代烃含量较高.

从表 6 可以看出相对来说，各煤种在点火阶段及封火阶段产生的 VOCs 种类较多，旺火阶段 VOCs 种类较少. 烟煤以烯烃及烷烃居多，尤其是旺火阶段，其烯烃及烷烃占比超过了 80%，各煤种在旺火阶段含氧有机物产生的种类相对较少. 晏蓉等[35]在研究煤燃烧排放有机污染物实验时发现，脂环烃含量随着烟气燃烧温度升高而降低，且种类数和含量在几种有机物中都属最少. 王杰等[36]在研究大同煤在不同温度下快速热解反应时指出，在较高温度下，脂环烃开始发生开环反应，可以生成乙烯、丁烯或丁二烯，由此也可解释在旺火阶段. 煤炭燃烧充分，含氧有机物种类产生得较少. Feng 等[37]对 5 种成熟度不同的煤种(4 种烟煤和 1 种无烟煤)以蜂窝煤形式燃烧产生的烟气进行采集，检出了 20 种 VOCs 和 20 种羰基化合物，其中甲醛、乙醛和芳香烃化合物在烟煤烟气检测中浓度较高，烟煤燃烧后可产生大量的煤焦油，而煤焦油与此类 VOCs 排放浓度有直接关系，而本研究蜂窝煤中原料主要为无烟煤，燃烧后烟气中煤焦油含量相对来说要低.

2.2.2　VOCs 在不同燃烧工况下释放情况

对比分析了不同燃烧阶段烟气中 VOCs 排放情况(封火阶段烟煤散煤 VOCs 样品未检测)，如表 7 所示，在 3 种煤质燃烧过程中点火和封火阶段 VOCs 排放浓度相对较高，烟煤点火阶段 VOCs 浓度最高，达到 32.8 $mg\cdot m^{-3}$，是蜂窝煤 VOCs 排放浓度的 30 倍之多，煤球次之. 旺火阶段 VOCs 排放浓度最低. 各阶段 VOCs 排放因子为点火阶段最高，封火阶段次之.

煤中挥发分含量是影响煤燃烧排放有机污染物总量的一个重要因素. 范志威[38]指出，煤燃烧过程中有机污染物排放量和煤种挥发分含量具有极强的相关性(相关系数 R^2 达到 0.999). 有机污染物排放总量随着挥发分含量的增加而增加，其原因可能

是因为煤中挥发分含量越高,在高温燃烧条件下产生的有机自由基数量也越大,从而导致燃烧排放的有机污染物总量也越多. Bond 等[39]对烟煤的采样实验也发现,封火燃烧造成的污染比大火燃烧高出 2~8 倍. 上述研究结论可以解释本研究实验中,烟煤散煤挥发分含量最高,因此其 VOCs 含量及排放因子也相对较高. 旺火阶段燃烧温度最高,有机物分解得最充分,排放出来的 VOCs 相对较低,封火阶段煤炭燃烧缺氧,燃烧不充分,有机物不能充分分解,VOCs 排放量相对旺火阶段要高.

表 7 不同燃烧阶段 VOCs 释放情况

Table 7 VOCs release in different stages of combustion

项目	蜂窝煤			煤球			烟煤散煤	
	点火	旺火	封火	点火	旺火	封火	点火	旺火
质量浓度/mg·m^{-3}	1.12	0.660	1.80	18.1	0.450	2.47	32.8	1.96
排放因子/kg·t^{-1}	8.09	0.480	6.49	1.30×10^{2}	0.330	8.91	1.77×10^{2}	1.37

3 结论

(1)确定了 3 种散烧民用煤(蜂窝煤、煤球、烟煤) 燃烧排放的无机气态污染物的排放因子. 在充分燃烧的条件下,蜂窝煤、煤球、烟煤气态污染物 SO_2 排放因子分别为 1.50、1.91、1.62 kg·t^{-1};NO_x 排放因子分别为 0.420、0.901、2.20 kg·t^{-1};CO 排放因子分别为 22.4、37.3、87.3 kg·t^{-1}. 燃烧排放的 NO_x 和 CO 的排放因子顺序关系为:烟煤 > 煤球 > 蜂窝煤.

(2)获得了北京市 2014 年 3 种散烧民用煤燃烧排放的气态污染物的排放清单. 烟煤散煤排放的 SO_2 超过了 0.55 万 t,NO_x 超过了 0.75 万 t,CO 超过了 29 万 t,其对民用燃煤 NO_x、CO 的均贡献超过了 90%,SO_2 贡献接近 80%.

(3)各煤种在点火阶段及封火阶段产生的挥发性有机物种类较多,旺火阶段挥发性有机物种类较少,尤其是含氧有机物.

(4)3 种煤质燃烧过程中点火和封火阶段 VOCs 排放浓度相对较高. 烟煤点火阶段 VOCs 浓度最高,达到 32.8 mg·m^{-3},煤球次之;旺火阶段 VOCs 排放浓度最低. 各阶段 VOCs 排放因子为点火阶段最高,封火阶段次之.

参考文献:

[1] 易爱华, 丁峰, 胡翠娟, 等. 我国燃煤大气污染控制历程及影响分析[J]. 生态经济, 2014, **30**(8): 173-176.
Yi A H, Ding F, Hu C J, *et al*. Analysis of coal-burning air pollution control process and impact in China[J]. Ecological Economy, 2014, **30**(8): 173-176.

[2] 王东升, 刘明锐, 白向飞, 等. 京津冀地区民用燃煤使用现状分析[J]. 煤质技术, 2016, (3): 47-49, 46.
Wang D S, Liu M R, Bai X F, *et al*. The situation analysis of civil coal in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Coal Quality Technology, 2016, (3): 47-49, 46.

[3] 北京市环境保护局. 2015 年北京市环境状况公报[EB/OL]. http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/resource/cms/2016/04/2016041514503583104.pdf.

[4] 钟连红, 刘晓, 李志凯, 等. 北京居民生活用煤大气污染控制思路与对策[J]. 环境保护, 2015, **43**(3): 77-78.
Zhong L H, Liu X, Li Z K, *et al*. The thoughts and control countermeasures of air pollution caused by coal products consuming from Beijing residents[J]. Environmental Protection, 2015, **43**(3): 77-78.

[5] 别凡. 散煤治理需破解五大难题[J]. 化工管理, 2016, (28): 50-51.
Bie F. Scattered coal governance need to crack the five problems [J]. Chemical Enterprise Management, 2016, (28): 50-51.

[6] 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.

[7] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al*. Measurements of black and organic carbon emission factors for household coal combustion in China: implication for emission reduction[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(24): 9495-9500.

[8] 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.

[9] 陈颖军, 姜晓华, 支国瑞, 等. 我国民用燃煤的黑碳排放及控制减排[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, **39**(11): 1554-1559.
Chen Y J, Jiang X H, Zhi G R, *et al*. Black carbon emissions from residential coal combustion and reduction stategy [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, **39**(11): 1554-1559.

[10] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆 CO 人为源排放清单[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1580-1585.
Wang L T, Zhang Q, Hao J M, *et al*. Anthropogenic CO emission inventory of mainland China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, **25**(12): 1580-1585.

[11] Li Q, Li X H, Jiang J K, *et al*. Semi-coke briquettes: towards reducing emissions of primary $PM_{2.5}$, particulate carbon, and carbon monoxide from household coal combustion in China[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 19306.

[12] 潘涛, 薛亦峰, 钟连红, 等. 民用燃煤大气污染物排放清单的建立方法及应用[J]. 环境保护, 2016, (6): 20-24.
Pan T, Xue Y F, Zhong L H, *et al*. The methodology for air pollutants emission inventory from residential coal combustion and

its application[J]. Environmental Protection, 2016, (6): 20-24.

[13] 刘成堂, 张成龙, 张圆圆, 等. 家用炉灶不同燃煤模式下挥发性有机污染物释放初步研究[A]. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第16届学术年会论文摘要集(2)[C]. 长春: 中国矿物岩石地球化学学会, 2015.

[14] 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 等. 民用燃煤烟气中甲基多环芳烃的排放特征[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(6): 979-984.
Hai T T, Chen Y J, Wang Y, *et al*. Characteristics of alkyl-PAHs emitted from combustion of domestic coals[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(6): 979-984.

[15] 何秋生, 范晓周, 王新明, 等. 家用炉灶燃煤过程单环芳香烃释放初步研究[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(4): 16-19.
He Q S, Fan X Z, Wang X M, *et al*. Preliminary study of monocyclic aromatic hydrocarbons in smoke from coal-fired house stoves[J]. Environmental Monitoring in China, 2006, **22**(4): 16-19.

[16] DB 11/097-2014, 低硫散煤及制品[S].

[17] 姚渭溪, 沈迪新, 李玉琴, 等. 烟煤作民用燃料可行性的探讨[J]. 环境科学, 1984, **5**(4): 83-87.
Yao W X, Shen D X, Li Y Q, *et al*. Feasibility of bituminous coal as a civil fuel[J]. Environmental Science, 1984, **5**(4): 83-87.

[18] 周伯俞, 胡经政, 袁镇杰, 等. 906 型节煤炉具的研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 1992, (1): 29-33.
Zhou B Y, Hu J Z, Yuan Z J, *et al*. Study on 906 type coal stoves[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1992, (1): 29-33.

[19] 北京大学环境科学中心. 北京市大气污染控制战略研究报告[R]. 北京: 北京大学, 2001.

[20] 孙庆贺, 陆永琪, 傅立新, 等. 我国氮氧化物排放因子的修正和排放量计算: 2000 年[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, **5**(2): 90-94.
Sun Q H, Lu Y Q, Fu L X, *et al*. Adjustment on NO_x emission factors and calculation of NO_x emissions in China in the year 2000 [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, **5**(2): 90-94.

[21] 孙竹如, 吴依平. 上海市燃煤二氧化硫排放因子的研究[J]. 上海环境科学, 1988, **7**(12): 15-18.
Sun Z R, Wu Y P. Study of emission factor of SO_2 duo to coal-burning in Shanghai [J]. Shanghai Environmental Sciences, 1988, **7**(12): 15-18.

[22] 陈建华, 薄以匀, 李培省, 等. 北京市民用小煤炉大气污染物排放特征研究[A]. 见: 第十届全国大气环境学术会议论文集[C]. 南宁: 中国环境科学学会, 2003. 303-307.

[23] 赵斌, 马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 368-375.
Zhao B, Ma J Z. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(2): 368-375.

[24] 李瑞芃, 吴琳, 毛洪钧, 等. 廊坊市区主要大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3527-3534.
Li R P, Wu L, Mao H J, *et al*. Establishment of an air pollutant emission inventory for Langfang urban area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3527-3534.

[25] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(6): 493-497.
Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, *et al*. Inventories and distribution characteristics of NO_x emissions in China [J]. China Environmental Science, 2001, **21**(6): 493-497.

[26] 张琦, 李庆, 蒋靖坤, 等. 一套民用固体燃料燃烧大气污染物排放测试系统的搭建和评测[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(9): 3393-3399.
Zhang Q, Li Q, Jiang J K, *et al*. A measurement system to characterize air pollutant emissions from residential solid fuel combustion[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(9): 3393-3399.

[27] Ge S, Xu X, Chow J C, *et al*. Emissions of air pollutants from household stoves: honeycomb coal versus coal cake [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(17): 4612-4618.

[28] Zhang J, Smith K R, Ma Y, *et al*. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors[J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(26): 4537-4549.

[29] 环境保护部.《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南》(试行)[S]. 北京: 环境保护部, 2016.

[30] Ledesma E B, Kalish M A, Nelson P F, *et al*. Formation and fate of PAH during the pyrolysis and fuel-rich combustion of coal primary tar[J]. Fuel, 2000, **79**(14): 1801-1814.

[31] Solomon P R, Hamblen D G, Carangelo R M, *et al*. General model of coal devolatilization[J]. Energy & Fuel, 1988, **2**(4): 405-422.

[32] 赵文慧, 徐谦, 李令军, 等. 北京平原区城乡结合部燃煤散烧及污染物排放量估算[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(6): 869-876.
Zhao W H, Xu Q, Li L J, *et al*. Estimation of air pollutant emissions from coal burning in the semi-rural areas of Beijing plain[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(6): 869-876.

[33] 虞江萍, 崔萍, 王五一, 等. 我国农村生活能源中 SO_2、NO_x 及 TSP 的排放量估算[J]. 地理研究, 2008, **27**(3): 547-555.
Yu J P, Cui P, Wang W Y, *et al*. Estimation on SO_2, NO_x and TSP emissions from energy consumption for non-production purpose in rural areas of China [J]. Geographical Research, 2008, **27**(3): 547-555.

[34] 刘泽常, 赵莹, 李震, 等. 煤中氯在燃烧过程中的释放特性和机理探讨[J]. 山东科技大学学报(自然科学报), 2005, **24**(4): 10-12.
Liu Z C, Zhao Y, Li Z, *et al*. Study on emission characteristics in burning process of chlorine in coal and its mechanism[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2005, **24**(4): 10-12.

[35] 晏蓉, 康忠汉. 煤燃烧排放有机污染物的试验研究[J]. 华中理工大学学报, 1996, **24**(1): 4-7.
Yan R, Kang Z H. An experimental study on the organic pullutants discharged from coal combustion[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1996, **24**(1): 4-7.

[36] 王杰, 王复, 颜涌捷, 等. 大同煤在不同温度下快速热解的液体产物[J]. 燃料化学学报, 1993, **21**(4): 442-448.
Wang J, Wang F, Yan Y J, *et al*. Composition of liquid products from rapid pyrolysis of datong coal at different temperature[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1993, **21**(4): 442-

448.
[37] Feng Y L, Xiong B, Mu C C, *et al*. Emissions of volatile organic compounds and carbonyl compounds from residential coal combustion in China [J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2010, **14**(2): 79-82.
[38] 范志威. 煤燃烧过程中有机污染物的赋存及排放特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Fan Z W. Study on forms and emission characteristics of organic pollutants during coal combustion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
[39] 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, 2002, **107**(D21): 8347.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016 年 10 月 12 日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续 15 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 5

May 15, 2017

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District ····· LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, *et al.* (1733)

Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing ····· LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, *et al.* (1743)

Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province ····· GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, *et al.* (1753)

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhu, Shennongjia, China ····· JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, *et al.* (1760)

Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City ····· DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, *et al.* (1769)

Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing ····· LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, *et al.* (1775)

Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant ····· SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, *et al.* (1783)

Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma ····· JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, *et al.* (1792)

Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng ····· WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, *et al.* (1799)

Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road: A Case Study in Changzhou ····· YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, *et al.* (1807)

Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai ····· DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, *et al.* (1817)

Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle ····· ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, *et al.* (1828)

Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China ····· ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, *et al.* (1835)

Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method ····· WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, *et al.* (1842)

Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China ····· ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, *et al.* (1852)

Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas ····· SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, *et al.* (1863)

Complexation Between Copper(Ⅱ) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill ····· XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, *et al.* (1873)

Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater ····· LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, *et al.* (1881)

Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area ····· CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, *et al.* (1889)

Effects of NO_3^--N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ··· JIANG Ying-he, LI Yao, ZHANG Ying, *et al.* (1898)

Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production ····· LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, *et al.* (1904)

Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells ····· DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, *et al.* (1911)

Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters ····· LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, *et al.* (1918)

Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on *Escherichia coli* and Poliovirus ····· XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, *et al.* (1928)

Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values ····· WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1936)

Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water ····· CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, *et al.* (1947)

Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms ····· ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)

Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network ····· SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, *et al.* (1965)

Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System ····· ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, *et al.* (1972)

Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process ····· JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, *et al.* (1982)

Enhanced Short-cut Denitrification by $Fe^{(0)}$-activated Carbon and Its Influencing Factors ····· LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, *et al.* (1991)

Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies ····· LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, *et al.* (1997)

Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR ····· LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, *et al.* (2006)

Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe ····· FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, *et al.* (2012)

Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater ····· YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, *et al.* (2021)

Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain *Ochrobactrum* sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater ····· XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, *et al.* (2030)

Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium *Arthrobacter* sp. HW-16 ····· WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, *et al.* (2036)

Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria ····· ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (2044)

Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization ····· XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, *et al.* (2052)

Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge ····· CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, *et al.* (2059)

Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region ····· QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, *et al.* (2065)

Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin ····· TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, *et al.* (2074)

Effect of Dicyandiamide on N_2O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping ····· WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, *et al.* (2084)

Characteristics of Biochar-mediated N_2O Emissions from Soils of Different Surface Conditions ····· ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, *et al.* (2093)

Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China ····· XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, *et al.* (2102)

Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China ····· SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, *et al.* (2111)

Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake ····· ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, *et al.* (2125)

Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil ····· WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, *et al.* (2136)

Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil ····· LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)

Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar ····· WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)

Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch ····· WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, *et al.* (2161)

Adsorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar ····· DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, *et al.* (2172)

Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C_3N_4/BiOBr Composite Photocatalyst ····· BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, *et al.* (2182)