

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峥, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

餐饮业油烟的颗粒物分析

谭德生¹, 邝元成¹, 刘欣², 戴飞鸿²

(1. 深圳市罗湖区环境保护和水务局, 深圳 518003; 2. 深圳市力德环保工程有限公司, 深圳 518109)

摘要: 利用显微镜照相技术和电低压冲击式采样器分别对餐饮业油烟中 $10\ \mu\text{m}$ 以上和 $10\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒物进行分析, 得出餐饮业油烟颗粒物的粒径分布状况。结果表明, 厨房内油烟中可沉降颗粒的粒径主要分布在 $10\sim 400\ \mu\text{m}$ 之间, 数量浓度峰值粒径集中在 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间; 油烟中可吸入颗粒粒径主要分布在 $1\ \mu\text{m}$ 以下, 数量浓度峰值粒径集中在 $0.063\sim 0.109\ \mu\text{m}$ 之间, 质量浓度峰值粒径在 $6.560\sim 9.990\ \mu\text{m}$ 之间。通过对餐饮业油烟颗粒物物理特性的全面分析, 找出特征值, 确定油烟监测的标志物, 为餐饮业油烟的治理和监测提供科学依据。

关键词: 餐饮业油烟; 可沉降颗粒; 可吸入颗粒; 标志物; 特征值

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1958-06

Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission

TAN De-sheng¹, KUANG Yuan-cheng¹, LIU Xin², DAI Fei-hong²

(1. Shenzhen Luohu Environmental Protection and Water Authority, Shenzhen 518003, China; 2. Shenzhen Leader Environmental Engineering Co. Ltd., Shenzhen 518109, China)

Abstract: By measuring the particulate matter of oil fume which is over $10\ \mu\text{m}$ or below $10\ \mu\text{m}$ separately and using microradiography and Electrical Low Pressure Impactor (ELPI), it is found out the distributing characteristic of oil fume particles in catering industry cooking emission. The result shows that the diameter of the oil fume particles which was sedimentated in the kitchen is between $10\sim 400\ \mu\text{m}$, the concentration peak value is between $10\sim 100\ \mu\text{m}$. The diameter of oil fume aerosol is mostly smaller than $1\ \mu\text{m}$, while the concentration peak value is between $0.063\sim 0.109\ \mu\text{m}$. In addition, the mass concentration peak value is between $6.560\sim 9.990\ \mu\text{m}$. Through the analysis to the physical characteristics of oil fume from catering industry cooking emissions, the eigenvalue of the oil fume has been found and the feature matter for monitoring the oil fume has been discovered to provide a reasonable standard for controlling and monitoring the catering industry cooking emission.

Key words: catering industry cooking emission; subsiding particulate; inhalable particulate; feature matter; eigenvalue

中餐因其烹饪方式的特殊性在烹饪过程中会产生大量的油烟, 无论烹饪何种菜式, 其过程基本上都是热锅、下油、热油、下食材、翻炒、调味及上菜, 其中产生油烟量最大的为下食材、翻炒和出锅这3个步骤。整个炒菜过程产生的油烟污染物物理形态大致可以分为3类: 第一类为可沉降颗粒, 其粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 以上, 此类污染物受到地球重力的影响, 能够克服空气浮力作用而沉降到地面^[1], 不会对大气造成持久性污染; 第二类为可吸入颗粒, 其粒径在 $0.01\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间, 该类污染物进入大气后由于受到的地球引力不能克服的空气浮力, 在空气中呈漂浮状态而长期存在^[2~4]; 第三类为气体分子基团。其中, 第二类随着空气的上下对流、水平和湍流而到处漂浮^[1], 对环境和人体具有极大的危害^[5~7], 是造成非吸烟女性过敏性鼻炎和其他呼吸系统症状的危害因素, 并对肺功能有影响^[8,9]; 第三类物质主要为有机气体污染物, 国内外许多研究表明油烟中含有多种有毒化学成分, 对机体的免疫性、遗传性等均存在危害^[10~12]。

根据文献[13], 我国现行油烟采样器的采样头

为不锈钢金属丝滤筒, 滤筒内金属丝的间隙对可吸入颗粒物的过滤效率较低, 而油烟中可吸入颗粒正是目前餐饮业环保投诉的首要原因, 这样就导致了“检测结果达标, 目测却还有很浓烟雾”和周围居民投诉不断的矛盾频现。任谊平等^[14]和杜晓斌^[15]曾对文献[16]存在的缺陷做了相关的研究, 由研究可以看出油烟监测与油烟实际排放存在的矛盾之处。

随着社会的发展, 国内餐馆的数量急剧增加, 餐饮业油烟问题在环保问题中已占有非常大的比例, 加上人们对生活质量的要求也越高, 特别是在一些经济发达的城市, 居民对于油烟治理的要求已经不仅仅局限在不冒浓烟, 而是要求目测无油烟, 甚至没有一点气味。为此, 更高效地处理油烟污染、出台更严格的排放标准和监测方法已经刻不容缓。

此前, 国内外许多学者对餐饮业油烟成分进行

收稿日期: 2011-08-03; 修订日期: 2012-02-13

基金项目: 深圳市环境科研项目

作者简介: 谭德生 (1963~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境在线监测、环保信息化, E-mail: sztds@126.com

了不同层次的研究,而对其进行全面、系统的研究基本没有.国外由于饮食习惯及烹饪的差异,油烟的产生量较少,相关的研究基本集中在油烟的化学成分及其对人体的危害上^[10,17];国内餐饮业油烟问题虽然严重,但其研究同样是集中在油烟的化学成分上^[18~20],对油烟颗粒物的研究^[2,21]极少,温梦婷等^[22]曾对餐饮业油烟颗粒理化特性做过研究,而对油烟可吸入颗粒研究比较深入的是香港的 Yeung 等^[23]和台湾的林嘉明^[24].本研究对油烟进行了全面的分析,侧重找出油烟中可沉降颗粒及可吸入颗粒的粒径分布规律,并找出两者的特征值,以期为油烟的治理和在线油烟监测提供科学的依据.

1 材料与方法

餐饮业油烟中可沉降颗粒主要产生阶段是在下食材、翻炒和调味这 3 个过程,产生后大部分受到重力作用自由沉降下来,少部分被风机抽到烟道,故采样地点选择在厨房内部.

餐饮业油烟中可吸入颗粒产生阶段是热油、下食材、翻炒、调味和上菜过程,其中下食材,翻炒及上菜产生的量最多,油烟中可吸入颗粒由于重力小,基本被风机抽走,故采样地点选择在尾气排放口.

1.1 可沉降颗粒

使用血细胞计数板(XB-K-25 型,求精医用仪器厂)分别对湘菜、快餐、粤菜这 3 个菜系烹饪时产生的 10 μm 以上的可沉降颗粒进行采样.血细胞计数板在采样前先用四氯化碳清洗干净,之后固定于自制不锈钢托盘(480 mm×230 mm×35 mm)内,距托盘边缘 0 cm、15 cm、30 cm 处各放 3 个平行样,盖好盖子,等待采样.

采样时,将不锈钢托盘置于距离炒锅边缘 15 cm 处,则 3 组平行样分别距离炒锅边缘 15、30、45 cm.厨师开始炒菜时揭开不锈钢托盘的盖子,鉴于炒菜还有中间停顿过程,采样时长定为厨师炒 3 个菜为止.采样完毕后盖上盖子,样品带回实验室等待分析.

1.2 可吸入颗粒

选择在 2010-04-14~2010-04-15 对北京市海淀区某大学食堂、烧烤、麻辣火锅、快餐及西餐餐馆烹饪时产生的油烟可吸入颗粒进行采样,采样仪器为电低压冲击式采样器[Electrical Low Pressure

Impactor (ELPI),芬兰 Dekati 公司],流量为 30 L·min⁻¹.采样时,除烧烤店的采样是直接 在烤炉边上与厨师脸部齐高处采样外,其他 4 家餐馆的采样位置均位于油烟净化设备尾气排放口,采样管置于排烟口末端,紧挨采样口边缘,按照各个餐馆及在线分析数据的实际情况,采样时间为 10~30 min.

2 样品分析

2.1 可沉降颗粒

采样后的血球计数板带回实验室,用金像显微镜(L3230,深圳市叁诺西努科技有限公司)放大 5 倍观测血球计数板方网格内的可沉降颗粒,通过金像显微镜附属的数字摄像机和实时影像测量软件测量可沉降颗粒粒径的大小及拍摄照片.在显微镜下,通过方格网分区域人工统计可沉降颗粒个数.方格网的面积为 3 mm×3 mm=9 mm²,用方格网内的可沉降颗粒总个数除以方格网的面积得出每 mm² 含有可沉降颗粒的个数.

血细胞计数板上可沉降颗粒基本集中在 300 μm 以下,可沉降颗粒的直径最大可以达到 1 mm,>400 μm 的可沉降颗粒的数量极少,且这部分油滴落在血细胞计数板上后可沉降颗粒呈不规则形状分布,为此本实验将不统计直径>400 μm 的可沉降颗粒.

2.2 可吸入颗粒

餐饮业油烟中可吸入颗粒粒径分布和浓度使用 ELPI 测量.ELPI 的工作原理^[25,26]是将被测粒子带电,然后测量进入低压串级实采样器的粒子所带电荷,即可获得不同粒径的粒子浓度.ELPI 按照各级的切割粒径切割可吸入颗粒,可吸入颗粒在各级产生一定的电流并被静电计通道实时记录下来,通过电脑记录结果.

ELPI 有 12 个配有电流识别器的级,再加上一个上限切割直径为 10 μm 的级.各个级对应的切割直径如表 1 所示.

3 结果与讨论

3.1 可沉降颗粒

如表 2 所示,距离炒锅边缘越近,可沉降颗粒的浓度越高;在相同距离的采样位置,湘菜的数量浓度最高,快餐次之,粤菜最少.由于湘菜在烹饪时用

表 1 ELPI 各级的切割粒径范围

Table 1 Incision distance range of ELPI

级数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
粒径/μm	0.030	0.063	0.109	0.173	0.267	0.407	0.655	1.021	1.655	2.520	4.085	6.560	9.990

油量较大,且火势猛,翻炒力度大,频率高,可沉降颗粒的产生数量高于快餐和粤菜. 快餐讲究速度,主食材在烹饪前一般已经加工完善,烹饪时再加入配菜进行快速翻炒,最后加调料即可上碟,整体上快餐的一道菜的烹饪时间短于湘菜的一道菜的烹饪时间. 粤菜烹饪比湘菜复杂、讲究,但由于其侧重于生猛鲜活,清淡适口,烹饪时不会加入过多的油,且火势适中,翻炒力度缓和,使得其油烟的产生量少于湘菜和快餐的油烟产生量.

表 2 血细胞计数板方格网内的可沉降颗粒的数量浓度/ $\text{num} \cdot \text{mm}^{-2}$

Table 2 Number concentration of subsiding particulate in the CBC/ $\text{num} \cdot \text{mm}^{-2}$

菜系	位置		
	15 cm	30 cm	45 cm
湘菜	21.02	12.48	7.26
快餐	14.24	7.00	3.44
粤菜	7.11	4.44	2.55

对 3 家餐馆油烟中的可沉降颗粒形貌研究后发现,颗粒物呈现多种形貌,但在不同餐馆之间其形貌基本没有差别,如图 1 所示,主要有常规圆形(A)、油包食材渣(B)、油水混合(C)、水包油(D)、较大油水混合颗粒沉降后水膜破裂后大油滴周边出现的小油滴(E)、油包水(F)等,除此之外还有在烹饪过程中碎裂经高温碳化后沉降下来的食材渣(G). 由此可见,油烟颗粒物中包含食物烹饪、加工过程中挥发的油脂、有机质及其加热分解或者裂解的产物. 而文献[13]对油烟的分析方法为红外分光光度法,该方法排除了除油脂以外的油烟颗粒物,周亚美等^[21]将食用油恒温加热,得出用可吸入颗粒物自动采样器测得的颗粒物浓度与用紫外可见分光光度计测得的油烟浓度相差近 2 个数量级,为此使用红外分光光度法测油烟浓度忽视了油烟中其他颗粒物对环境的污染.

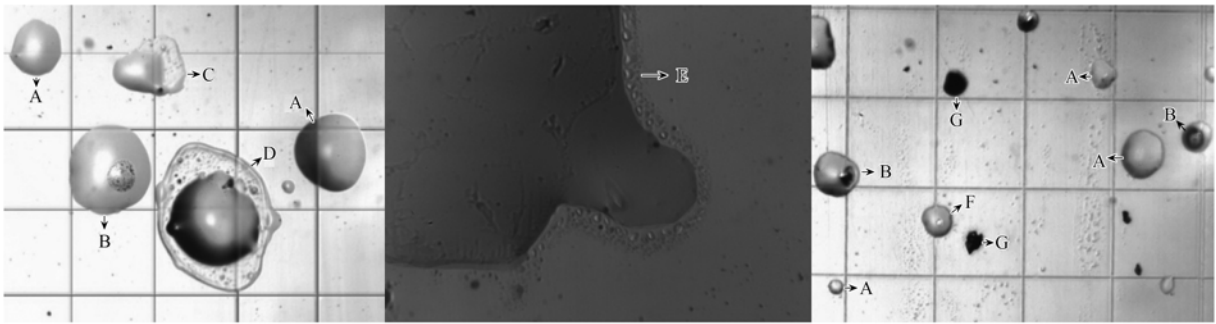


图 1 显微镜下油烟中可沉降颗粒的形态

Fig. 1 Form of subsiding particulate in Microradiography

血细胞计数板方格网的面积为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} = 9 \text{ mm}^2$,用方格网内的油滴总个数除以方格网的面积得出每 mm^2 含有油滴的个数. 如表 3~5 所示,距离炒锅边缘越近,可沉降颗粒的数量越多,数量峰值在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 处. 可沉降颗粒由于重力作用,在近炉头处数量较多,沉降后基本趋近于圆形,当颗粒粒径或颗粒的初速度过大时,沉降下来便会呈不规则形状分布,当可沉降颗粒数量较大时,部分油滴会有油滴重叠现象发生. 粤菜由于烹饪方式较温和,用油量较少,沉降在计数板上的可沉降颗粒粒径基本集中在 $100 \mu\text{m}$ 以下, $>100 \mu\text{m}$ 的数量极少. 而湘菜及快餐因为烹饪时速度较快,火势较猛,用油量较多,产生的可沉降颗粒数量多于粤菜. 由此可以说明油烟中可沉降颗粒的浓度和直径大小与烹饪时的用油量和烹饪方式具有极大的关系.

3.2 可吸入颗粒

表 3 采样位置距炒锅边缘 15 cm 处油烟中可沉降颗粒的数量浓度/ $\text{num} \cdot \text{mm}^{-2}$

Table 3 Number concentration of subsiding particulate when sampling distance away the cauldron 15 cm/ $\text{num} \cdot \text{mm}^{-2}$

菜系	10 ~ 100 μm	100 ~ 200 μm	200 ~ 300 μm	300 ~ 400 μm
湘菜	312	50	12	5
快餐	84	28	16	4
粤菜	64	0	0	0

表 4 采样位置距炒锅边缘 30 cm 处油烟中可沉降颗粒的数量浓度/ $\text{num} \cdot \text{mm}^{-2}$

Table 4 Number concentration of subsiding particulate when sampling distance away the cauldron 30 cm/ $\text{num} \cdot \text{mm}^{-2}$

菜系	10 ~ 100 μm	100 ~ 200 μm	200 ~ 300 μm	300 ~ 400 μm
湘菜	168	40	11	6
快餐	40	14	4	2
粤菜	40	0	0	0

表 5 采样位置距炒锅边缘 45 cm 处油烟中可沉降
颗粒的数量浓度/ $\text{num}\cdot\text{mm}^{-2}$

Table 5 Number concentration of subsiding particulate when
sampling distance away the cauldron 45 cm/ $\text{num}\cdot\text{mm}^{-2}$

菜系	10 ~ 100 μm	100 ~ 200 μm	200 ~ 300 μm	300 ~ 400 μm
湘菜	92	29	8	2
快餐	25	4	2	0
粤菜	23	0	0	0

3.2.1 可吸入颗粒数量浓度分析

根据 Whitby 模型^[25],环境大气中的可吸入颗粒根据其粒度分布被描述成了 3 个模态分布,包括 0.005 ~ 0.1 μm 的核模态, 0.1 ~ 0.2 μm 的积聚模态及 > 2 μm 的粗粒子模态. 核模态是由大气中气体的光化学反应和燃烧形成的; 积聚模态粒子主要由燃烧(如人为排放)产生; 粗粒子模态的形成方式繁多. 由图 2 可以看出北京市环境背景的可吸入颗粒数量浓度谱呈双峰型结构, 2 个峰值分别集中在 0.063 ~ 0.109 μm 和 0.407 ~ 0.655 μm 之间,正好落在核模态范围,可见北京市大气中的可吸入颗粒主要为核模态.

由图 3 ~ 7 可见,餐饮业油烟可吸入颗粒数量浓度谱成单峰型结构,峰值集中在 0.063 ~ 0.109 μm ,同样为核模态. 比较图 3 ~ 7,油烟中可吸入颗粒物数量浓度最高的是快餐,高达 $5.43 \times 10^6 \text{ num}\cdot\text{cm}^{-3}$,而西餐厨房内油烟中可吸入颗粒数量浓度峰值为 $5.21 \times 10^4 \text{ num}\cdot\text{cm}^{-3}$. 参照 Yeung 等^[23]在模拟厨房内烹制各种扒类食物的数据,两者数量浓度最高值的粒径分布范围基本吻合.

食堂、火锅、快餐三者使用煤气炉明火烹饪食材,烧烤使用炭烧炉,油烟处理方式上四者均使用静电式油烟净化设备处理油烟. 由图 3 ~ 7 可见,食堂、火锅、快餐及烧烤的油烟中可吸入颗粒数量浓度跟西餐一样都集中在 0.063 ~ 0.109 μm 之间,数量浓

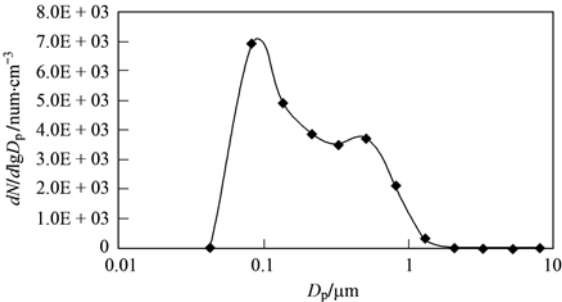


图 2 环境背景可吸入颗粒数量浓度分布
Fig. 2 Number concentration of inhalable
particulate in background aerosols

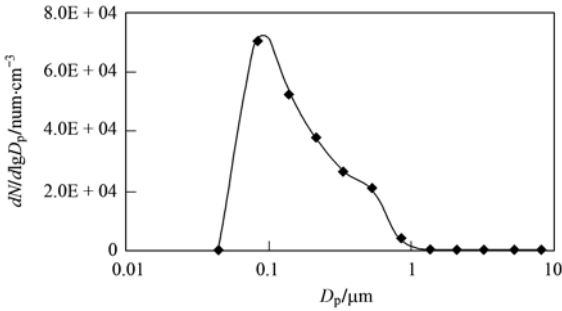


图 3 西餐油烟中可吸入颗粒数量浓度分布
Fig. 3 Number concentration of inhalable particulate
in Western-style food cooking

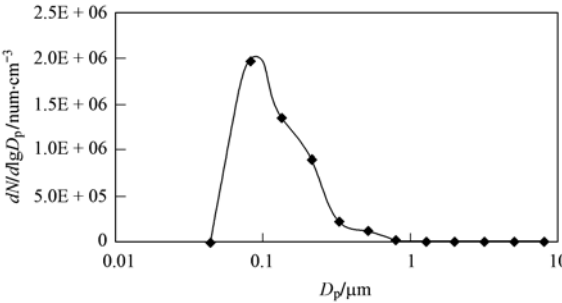


图 4 某大学食堂油烟中可吸入颗粒数量浓度分布
Fig. 4 Number concentration of inhalable particulate
in one university cooking

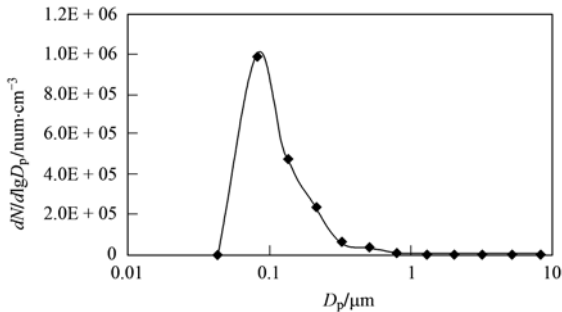


图 5 麻辣火锅油烟中可吸入颗粒数量浓度分布
Fig. 5 Number concentration of inhalable
particulate in pot cooking

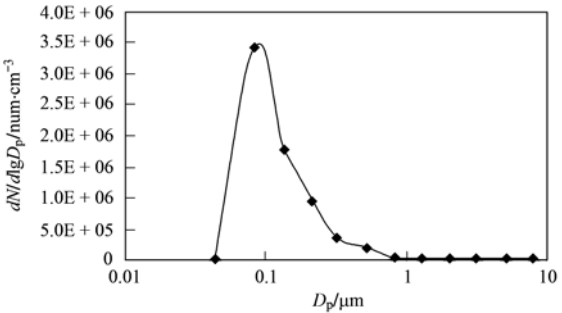


图 6 快餐油烟中可吸入颗粒数量浓度分布
Fig. 6 Number concentration of inhalable particulate
in fast food cooking

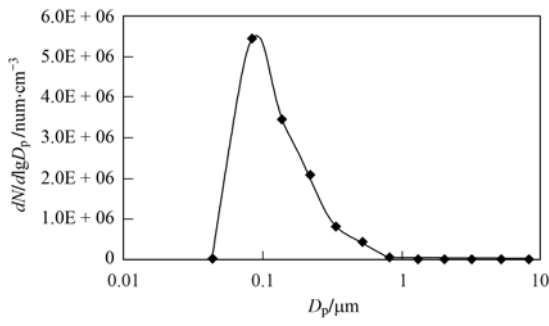


图7 烧烤油烟中可吸入颗粒数量浓度分布
Fig. 7 Number concentration of inhalable particulate in barbecue

度最高值分别为 2.0×10^6 、 1.0×10^6 、 3.5×10^6 、 $5.5 \times 10^6 \text{ num} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。烧烤的浓度较高, 一是因为食材表面涂抹的油脂及食材本身含有的油脂经明火直接烧烤后油烟可吸入颗粒浓度增加, 二是因为烧烤出来的油烟未经过油烟净化器净化便直接采样。对比前三者的烹饪方式可见, 烹饪时火势的大小直接影响油烟中可吸入颗粒的粒径的浓度分布, 当火越旺, 食材被翻炒越迅猛时, $0.063 \sim 0.109 \mu\text{m}$ 区域的油烟可吸入颗粒的数量浓度增加。

通过实测餐饮业厨房烹饪时产生的油烟可吸入颗粒, 研究得出油烟中可吸入颗粒的数量浓度最高值均集中在为 $0.063 \sim 0.109 \mu\text{m}$ 之间。对比类似的研究, 林嘉明^[24]的研究测得的油烟可吸入颗粒粒径峰值为 $0.12 \sim 0.29 \mu\text{m}$; Yeung 等^[23]的研究测得的油烟可吸入颗粒粒径峰值集中在 $0.100 \sim 0.113 \mu\text{m}$ 之间。林嘉明的研究只是对不同油品的油进行恒温加热后采样, 并未炒菜, 缺少实际炒菜中油烟遇高温燃烧的过程; Yeung 等^[23]的研究虽模拟厨房, 但只是测量的煎扒类产生的油烟, 火势较小; 而实际餐饮烹饪时, 火势较旺, 燃烧较厉害。由此可见, 油烟经燃烧后, 油烟中可吸入颗粒粒径会减小, 产生的可吸入颗粒主要为积聚模态, 该模态下的可吸入颗粒正好落在 $\text{PM}_{2.5}$ 范围内, 为可吸入肺颗粒, 对人体的健康具有一定的危害。

3.2.2 可吸入油烟颗粒质量浓度分析

质量浓度分布图中所示的质量浓度由 ELPI 直接换算出来。

北京市环境背景中可吸入颗粒的质量浓度主要集中在 $0.655 \sim 1.021 \mu\text{m}$ 和 $6.560 \sim 9.990 \mu\text{m}$ 处, 分别是 $0.601 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.797 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。采样的 5 家餐馆所得的质量浓度均出现两个较高的值, 而且均分布在 $0.407 \sim 0.655 \mu\text{m}$ 和 $6.560 \sim 9.990 \mu\text{m}$ 之

间, 5 家餐馆在这两个区间的质量浓度如表 6 所示。从中可以看出, 西餐油烟中可吸入颗粒的质量浓度最小, 烧烤油烟中可吸入颗粒的质量浓度最大。从烹饪方式上可以判断, 西餐的火势最小, 烹饪方式基本为“煎”; 大学食堂属于大锅菜, 火势虽大, 但量也大, 食材入锅后不能进行猛火爆炒; 麻辣火锅只需对材料稍作煎炒后加入汤料即可焖煮; 快餐火势最大, 一般都以猛火快速爆炒; 烧烤直接用明火烧制食物, 油烟成分中还含有较多的炭灰, 增加了其可吸入油烟颗粒的质量浓度。

温梦婷等^[22]对北京餐饮源细颗粒的研究表明, 餐饮源排放细颗粒 $\text{PM}_{1.0}$ 在 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度中约占 50% ~ 85%。表 6 显示 5 家餐馆油烟中的可吸入颗粒的质量浓度均集中在 $6.560 \sim 9.990 \mu\text{m}$ 之间, $0.1 \mu\text{m}$ 与 $10 \mu\text{m}$ 的油烟颗粒的单体质量差 6 个数量级, 油烟中可沉降颗粒的单体质量远远大于可吸入颗粒的单体质量, 为此 $0.407 \sim 0.655 \mu\text{m}$ 区间的数量浓度虽然较大, 但质量浓度小于 $6.560 \sim 9.990 \mu\text{m}$ 区间内可吸入颗粒的质量浓度。

表 6 餐馆油烟中可吸入颗粒质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 6 Mass concentration of inhalable particulate matter in Catering Industry Cooking/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

餐馆	$0.407 \sim 0.655 \mu\text{m}$	$6.560 \sim 9.990 \mu\text{m}$
西餐	1.522	7.297
大学食堂	9.684	65.902
麻辣火锅	2.462	40.606
快餐	14.375	581.585
烧烤	30.189	1452.776

4 结论

(1) 餐饮业油烟的产生量与菜式的烹饪传统习惯有着直接的关联, 用油量越大, 火势越猛, 翻炒越频繁油烟的产生量越多。

(2) 餐饮业油烟中可沉降颗粒产生的数量虽然多, 但由于自身重力作用, 其对环境的污染范围局限于厨房内部及排烟口附近, 不会对大气形成持久性的大范围污染。

(3) 餐饮业油烟中可吸入颗粒可以长期存在于环境中, 数量浓度远远大于可沉降颗粒油滴, 一般餐馆炉头瞬间产生 $0.1 \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒的数量浓度就高达 $10^6 \sim 10^8 \text{ num} \cdot \text{cm}^{-3}$, 随着城市餐馆数量的急剧增加, 单从空气悬浮物角度来看, 可吸入颗粒对环境污染在一些地区可能甚至汽车尾气对环境的污染, 为此可考虑将油烟治理及监测的重点放在可吸入颗粒上。

(4)现行的饮食业油烟排放标准与油烟采样器并不适用于餐饮业油烟中可吸入颗粒,相关部门可考虑提高排放标准并改用适用的油烟采样器和油烟检测设备。

参考文献:

- [1] 李尉卿. 大气气溶胶污染化学基础 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [2] 吴禹, 周向东. 不同来源可吸入颗粒物粒径分布特征 [J]. 环境与职业医学, 2007, **24**(5): 528-529.
- [3] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 4. C₁-C₂₇ organic compounds from cooking with seed oils [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 567-575.
- [4] See S W, Balasubramanian R. Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking [J]. Environmental Research, 2006, **102**(2): 197-204.
- [5] 于仲波, 陈琼姜, 谭玉凤, 等. 烹调油烟颗粒物对 HELF 细胞的氧化应激效应研究 [J]. 癌变·畸变·突变, 2008, **20**(2): 127-130.
- [6] 沈孝兵, 浦跃朴, 王志浩, 等. 烹调油烟对暴露人群的免疫损伤作用 [J]. 环境与职业医学, 2005, **22**(1): 17-19.
- [7] 许斌, 王进援, 朱惠莲, 等. 烹调油烟对职业接触人群血脂水平影响的研究 [J]. 中国公共卫生管理, 2005, **21**(3): 256-258.
- [8] 奉水东, 凌宏艳, 陈锋. 烹调油烟与女性肺癌关系的 Meta 分析 [J]. 环境与健康杂志, 2003, **20**(6): 353-354.
- [9] Metayer C, Wang Z Y, Kleinerman R A, *et al.* Cooking oil fumes and risk of lung cancer in women in rural Gansu, China [J]. Lung Cancer, 2002, **35**(2): 111-117.
- [10] Yang S C, Jenq S N, Kang Z C, *et al.* Identification of benzo[a]pyrene 7,8-diol 9,10-epoxide N2-deoxyguanosine in human lung adenocarcinoma cells exposed to cooking oil fumes from frying fish under domestic conditions [J]. Chemical Research in Toxicology, 2000, **13**(10): 1046-1050.
- [11] 杨天池, 马藻骅. 烹调油烟对暴露人群免疫损伤作用的 Meta 分析 [J]. 现代预防医学, 2007, **34**(15): 2842-2844.
- [12] 于仲波, 吴南翔, 陈琼姜, 等. 烹调油烟挥发性有机物对人胚肺成纤维细胞的氧化应激效应研究 [J]. 生物技术通讯, 2008, **19**(2): 225-228.
- [13] GB 18483-2001, 饮食业油烟排放标准(试行) [S].
- [14] 任宜平, 张焯, 纪家存. 《饮食业油烟排放标准》(试行)需修订 [J]. 中国环境监测, 2002, **18**(4): 48-50.
- [15] 杜晓斌. 《饮食业油烟排放标准》(试行)中存在的若干问题 [J]. 环境科学动态, 2003, (3): 33-34.
- [16] GB 18483-2001, 饮食业油烟排放标准(试行) [S].
- [17] Takeakon G, Perrino Jr C, Buttery R. Volatile constituents of used frying oils [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, **44**(3): 654-660.
- [18] 张宝勇 周才琼. 烹调油烟的组成与危害及防治措施 [J]. 中国油脂, 2006, **31**(7): 44-47.
- [19] 冯艳丽, 黄娟, 文晟, 等. 餐馆排放油烟气中羰基化合物浓度及分布特征 [J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 66-68.
- [20] 张春洋, 马永亮. 中式餐饮业油烟中非甲烷碳氢化合物排放特征研究 [J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1768-1775.
- [21] 周亚美, 翁念农. 食用油烟气中颗粒物分散度及其与油烟浓度关系的分析 [J]. 污染防治技术, 1996, **9**(3): 152-153.
- [22] 温梦婷, 胡敏. 北京餐饮源排放细粒子理化特征及其对有机颗粒物的贡献 [J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2620-2625.
- [23] Yeung L L, To W M. Size distributions of the aerosols emitted from commercial cooking processes [J]. Indoor and Built Environment, 2008, **17**(3): 220-229.
- [24] 林嘉明. 食用油油烟之危害鉴定 [R]. 台北: 国立台湾大学环境卫生研究所, 2001.
- [25] 保罗 A. 巴伦, 克劳斯·维勒克. 气溶胶测量原理、技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 72-75.
- [26] Marjamäki M, Keskenin J, Chen D R, *et al.* Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI) [J]. Journal of Aerosol Science, 2000, **31**(2): 249-261.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人