

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价铈在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李鑫,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散

李双德¹, 徐俊波¹, 莫胜鹏^{1,2}, 李文辉^{1,2}, 高佳佳³, 曹亚裙³, 陈运法^{1*}

(1. 中国科学院过程工程研究所, 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190; 3. 浙江省健康智慧厨房系统集成重点实验室, 宁波 315336)

摘要: 烹饪油烟颗粒物粒径分布与扩散特性研究有助于解析其对室内空气质量和居民健康的影响, 采用电子低压撞击器 (ELPI) 实时监测了油烟机开启和关闭状态下, 模拟烹饪油烟发生处和 3 m 外位置处, 0.03 ~ 10 μm 范围内油烟颗粒数浓度和质量浓度随粒径分布. 油烟颗粒主要以 655 nm 以下的细颗粒为主. 油烟机能够显著降低室内油烟浓度, 开启油烟机后, 油烟发生处颗粒数浓度从 2.8×10^6 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 降低到 2.3×10^5 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒) 质量浓度从 $85.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到 $6.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 油烟机对 PM_{10} 的净化效率高于 $\text{PM}_{2.5}$. 油烟迅速从发生处扩散到 3 m 外, 无通风状态下, 总颗粒数浓度衰减达 65%, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度衰减达 75%. 计算流体动力学 (CFD) 模拟了油烟机对油烟 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度场扩散分布影响. 红外摄像机监测了油烟温度场分布扩散, 以扇形向外扩散, 伴随着油烟温度梯度降低.

关键词: 油烟颗粒物; 电子低压撞击器 (ELPI); 粒径分布; 油烟扩散; 温度场

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0033-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201605110

Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume

LI Shuang-de¹, XU Jun-bo¹, MO Sheng-peng^{1,2}, LI Wen-hui^{1,2}, GAO Jia-jia³, CAO Ya-qun³, CHEN Yun-fa^{1*}

(1. State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Key Laboratory of Healthy & Intelligent Kitchen System Integration, Ningbo 315336, China)

Abstract: Studying particle size distribution and dispersion characteristics of cooking oil fume can help to analyze the influence of the particles on indoor air quality and the health of the residents. Electrical low pressure impactor (ELPI) was employed to measure the number and mass concentration of the particles size range of 0.03-10 μm at two different locations in the kitchen space with smoke exhaust on and off, respectively. The cooking particles were mostly located at below 655 nm. The smoke exhaust with open condition could remarkably decrease the kitchen's cooking fume. The number concentration of particles decreased from $2.8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ to $2.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, and $\text{PM}_{2.5}$ (aerodynamics diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$ particulate matter) mass concentrations decreased from $85.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ to $6.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. The sucking efficiency of smoke exhaust for PM_{10} was higher than $\text{PM}_{2.5}$. The number concentration of particles could be declined by 65%, and the cooking fume of $\text{PM}_{2.5}$ could be declined by 75% during the diffusion process detected at the area of 3 m far away from the area where cooking took place. The distribution of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration field of oil fume was simulated by computational fluid dynamics. The temperature field distribution of oil fume was monitored by infrared camera, presenting sector diffusion with the temperature decreasing from 70 $^{\circ}\text{C}$ to room temperature.

Key words: cooking fume particles; electrical low pressure impactor (ELPI); particle size distribution; fume diffusion; temperature field

除了大量挥发性有机物 (VOCs) 外^[1-5], 烹调油烟中含有高浓度的颗粒有机物^[6-11], 不但引起严重的室内空气污染, 而且排放到大气中加剧了大气灰霾的产生^[12,13]. Huang 等^[14]调查了北京、上海、广州以及西安等地在 2013 年 1 月的重污染天气中, 通过源解析发现烹饪对当地 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献占 0.6% ~ 1.6%. 逐渐地, 研究发现烹饪产生的颗粒物中很大比例的颗粒尺寸低于 $\text{PM}_{2.5}$ (指大气中动力学直径小于或等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物), 可以被吸入肺中, 引起肺部疾病, 严重的甚至可以引起肺癌^[15,16].

国内外许多研究人员基于实际烹饪和模拟烹饪研究了烹调方式、烹调用油对颗粒有机物排放浓度和化学组分的影响. Schauer 等^[17]调查发现豆油和

芥花籽油炒蔬菜产生的细颗粒物浓度为 $21.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $29.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中含量最高的是硬脂酸和棕榈酸. He 等^[18]调查了深圳南湖和广东两家餐馆的细颗粒质量浓度分别为 $1.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其主要化学成分包括烷烃、脂肪酸、二羧酸、内酯类、多环芳烃、链烷酮和甾醇. 温梦婷等^[19]考察了 4 家北京餐馆, 家常菜餐馆源排放颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $4053 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于营业规模更

收稿日期: 2016-05-18; 修订日期: 2016-08-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB05050300); 国家自然科学基金项目 (21306199)

作者简介: 李双德 (1984 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向大气环境污染净化技术及应用, E-mail: sdli@ipe.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yfchen@ipe.ac.cn

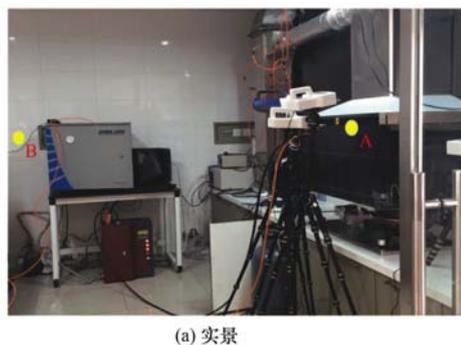
大的杭州菜餐馆 $1\ 563\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,川菜与烧烤的排放 $1\ 497\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1\ 385\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与杭州餐馆接近.有研究表明油烟中颗粒物排放数量一般是背景值的 $1.5\sim 27$ 倍,约 $10^4\sim 10^5$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$.Zhang等^[20]研究了烘烤鸡翅产生的超细粒子(粒径小于 $100\ \text{nm}$)和 $\text{PM}_{2.5}$ 分别为 $1.34\times 10^4\sim 6.04\times 10^5$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $10.0\sim 230.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.Abdullahi等^[21]总结归纳了烹饪对室内颗粒物及其化学组分的影响.Wan等^[22]调查发现 $14\sim 100\ \text{nm}$ 超细颗粒物和 $100\sim 660\ \text{nm}$ 细颗粒物的平均数浓度分别超出厨房背景值的10倍和 $20\sim 40$ 倍.

掌握颗粒排放粒径分布准确信息,有助于评价不同尺度油烟颗粒对身体的危害,有助于了解不同大小颗粒的扩散特征.虽然国内外已经研究了油烟颗粒物浓度和组分特点,但针对油烟颗粒物的粒径分布特点及其扩散特性研究较少,以及有无强制通风对室内油烟颗粒物浓度影响关注较少.本文通过加热菜籽油模拟烹饪油烟,通过ELPI监测厨房两不同空间上油烟颗粒物分布特点,评价了油烟机对油烟颗粒粒径分布的影响及油烟颗粒的扩散性质.同时,通过计算流体动力学(CFD)模拟计算了油烟机开启状态下的油烟浓度场分布.

1 材料与方法

1.1 样品采集

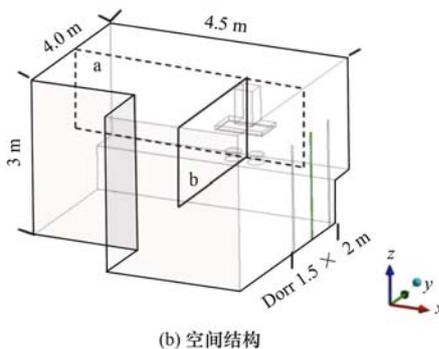
本实验厨房如图1所示,尺寸长 \times 宽 \times 高为



(a) 实景

$4.5\ \text{m}\times 4.0\ \text{m}\times 3\ \text{m}$,靠门缝自然通风,门尺寸为 $1.5\ \text{m}$ 宽, $2\ \text{m}$ 高,留有中间1道和左右两侧2道门缝,中间缝宽 $7\ \text{mm}$,两边缝宽 $4\ \text{mm}$.炒锅选用市场上买的直径 $30\ \text{cm}$ 不沾油锅,材质合金,食用油选用菜籽油,加热方式为液化气燃气灶加热.测试仪器为电子低压撞击器 Dekati ELPI,采样流速 $10\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$.ELPI把颗粒物分成13级,从 $0.03\sim 10\ \mu\text{m}$,13级分别为 0.030 、 0.063 、 0.109 、 0.173 、 0.267 、 0.407 、 0.655 、 1.021 、 1.655 、 2.520 、 4.085 、 6.560 和 $9.990\ \mu\text{m}$,组成了12个不同粒径范围的采集通道,能够对12个通道的颗粒数目和质量进行瞬态记录.预采集样品气被动吸入后,经过荷电器时样气中的颗粒被带电.低压撞击器将带电颗粒根据其空气动力学直径进行分级.记录收集在各撞击器级中的带电颗粒的电流而计算出各级粒径范围内的颗粒数浓度及质量浓度.

ELPI探头分别放置在2个位置,位于油烟机外沿中心A点处,距离油烟机外沿 $0\ \text{m}$ 和距离A点水平 $3\ \text{m}$ 外的B点处[图1(a)],探测点距离地面高度约 $1.45\ \text{m}$.通过液燃气加热 $300\ \text{mL}$ 菜籽油于不沾油锅内至 $265\ ^\circ\text{C}$ 后,自动滴水装置滴水 $2\ \text{s}$,间隔 $8\ \text{s}$,共滴水2次,每次滴水 $5\ \text{mL}$ 后,关闭燃气停止加热.K型热电偶温度探头位于油锅底部实时监测油温变化.ELPI测试时间从开始加热至加热停止约 $5\ \text{min}$ 后结束.测试过程中,门处于关闭状态,只有操作者一人在厨房内.



(b) 空间结构

图1 厨房的实景及空间结构示意图

Fig. 1 Real and diagram of kitchen room

1.2 油烟数值模拟

油烟模拟的厨房空间结构如图1(b)所示.运用CFD技术^[23],采用Fluent软件,标准 $k-\varepsilon$ 方程模型,假定流体为不可压缩流体且符合Boussinesq假设,所要求解的控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程和组分方程.对速度-压力耦合问题的求解采用SIMPLE算法,对压力采用标准格式离

散,组分方程、动量方程和能量方程采用一阶迎风格式进行空间离散.空间结构采用四面体的非结构网格进行网格划分,从网格无关性和计算效率两方面考虑,网格数确定13万左右.

油烟中的成分复杂,模拟无法与实际体系完全一致,从水溶性、分子量等方面综合考虑,本研究选择苯作为模型化合物表征油烟污染物^[24].假定锅

内蒸发的油烟为水蒸汽和苯(C_6H_6)的混合物, 油烟入口为直径等于 0.3 m 的圆面, 入口速度根据实验测量数据近似为 $0.06\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 根据 $PM_{2.5}$ 产生速率 $1.2\text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$, 估算入口苯的质量分数约为 2.31×10^{-4} . 出口边界为速度出口, 排风速度根据排风口面积和排风量 $15\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 确定, 约为 $0.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 门缝换气采用压力出口, 壁面采用绝热、无渗透、无滑移边界, 对厨房开启油烟机油烟颗粒物 $PM_{2.5}$ 空间排放浓度分布进行建模和稳态数值模拟.

2 结果与讨论

2.1 油烟机对室内油烟颗粒浓度影响

评价油烟中颗粒物的数浓度及质量浓度随粒径分布特点以及油烟机开关状态对油烟浓度分布影响, 可为家庭主妇及居民身体健康危害提供数据支持, 一定程度上引导居民减少油烟产生的危害. 位于图 1(a) 中的油烟发生 A 点监测位置处, 油烟机关和开状态下的油烟数浓度的粒径分布见图 2(a) 和 2(c). 可以看出, 关和开油烟机状态下, 油烟颗粒随粒径分布趋势一致: 粒径从 30 nm 增加到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 过程中, 油烟颗粒数浓度均呈现下降, 粒径从 $1\text{ }\mu\text{m}$ 继续增大到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 之间的颗粒数浓度显著低于小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒数浓度. 油烟中超细颗粒 $30\sim 63\text{ nm}$ 的数浓度最大, 关油烟机时其值为 1×10^6 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ [图 2(a)], 而开油烟机后该值显著降低为 8×10^4 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ [图 2(c)]. 表 1 中列举了 $0.03\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的颗粒数浓度关和开油烟机时分别为 2.8×10^6 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 2.3×10^5 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, 开油烟机后净化效率

明显, 约 92% 的颗粒物被抽排到室外. 图 3(a) 和 3(c) 显示了 12 个粒径范围通道内的数浓度占总颗粒数浓度的比值, 是根据图 2(a) 和 2(c) 的数据计算得出. 可以看出关闭和开启油烟机状态下, 12 个粒径通道内的颗粒数浓度占比基本保持一致. 例如 $30\sim 63\text{ nm}$ 粒径内的颗粒数浓度占总颗粒数浓度的值最大, 均为 35% 上下, 可以认为开启油烟机仅是显著降低了 12 个不同粒径范围通道内的颗粒数浓度, 但对 12 个通道的颗粒数浓度分布趋势影响不大. 图 3(a) 和 3(c) 还可以计算出, $1\sim 7$ 粒径通道内的 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下的油烟颗粒数浓度占监测到的总颗粒数浓度的 99% 以上.

图 2(b) 和 2(d) 显示了油烟颗粒质量浓度随颗粒粒径的分布, 可以看出质量浓度随着颗粒粒径增大而逐渐增大, 655 nm 以下的细颗粒的质量浓度非常小, 当粒径大于 $6.56\text{ }\mu\text{m}$ 后其质量浓度迅速攀升. 以关油烟机为例, $30\sim 63\text{ nm}$ 内的超细颗粒质量浓度仅为 $0.05\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 而 $6.56\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 间的颗粒质量浓度最大为 $120\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 这是因为质量浓度与颗粒半径的三次方成正比, 虽然大粒径颗粒数浓度明显小于小粒径的颗粒, 却具有非常高的质量浓度. 图 3(b) 和 3(d) 显示了不同粒径颗粒的质量浓度占总颗粒质量浓度的比重, 可以看出 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下颗粒, 即其中标号 1~9 粒径通道内颗粒, 在关油烟机时的比重低于开油烟机时的比重. 而 $2.5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 间的颗粒, 及标号 10~12 的粒径通道内颗粒, 在关油烟机时的比重明显高于开油烟机时的比重. 例如 $6.56\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 的油烟颗粒浓度比重在关油烟机时为

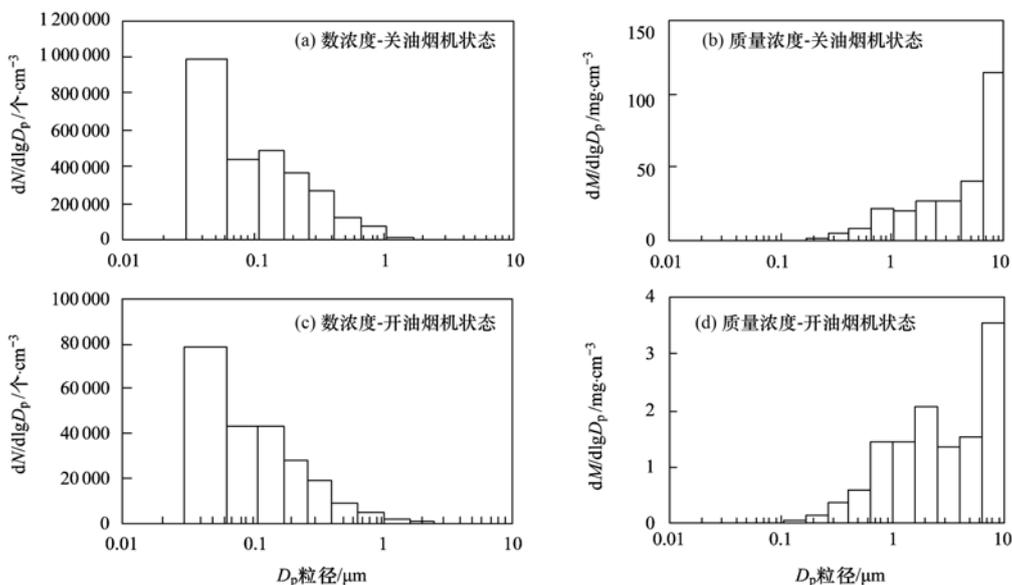
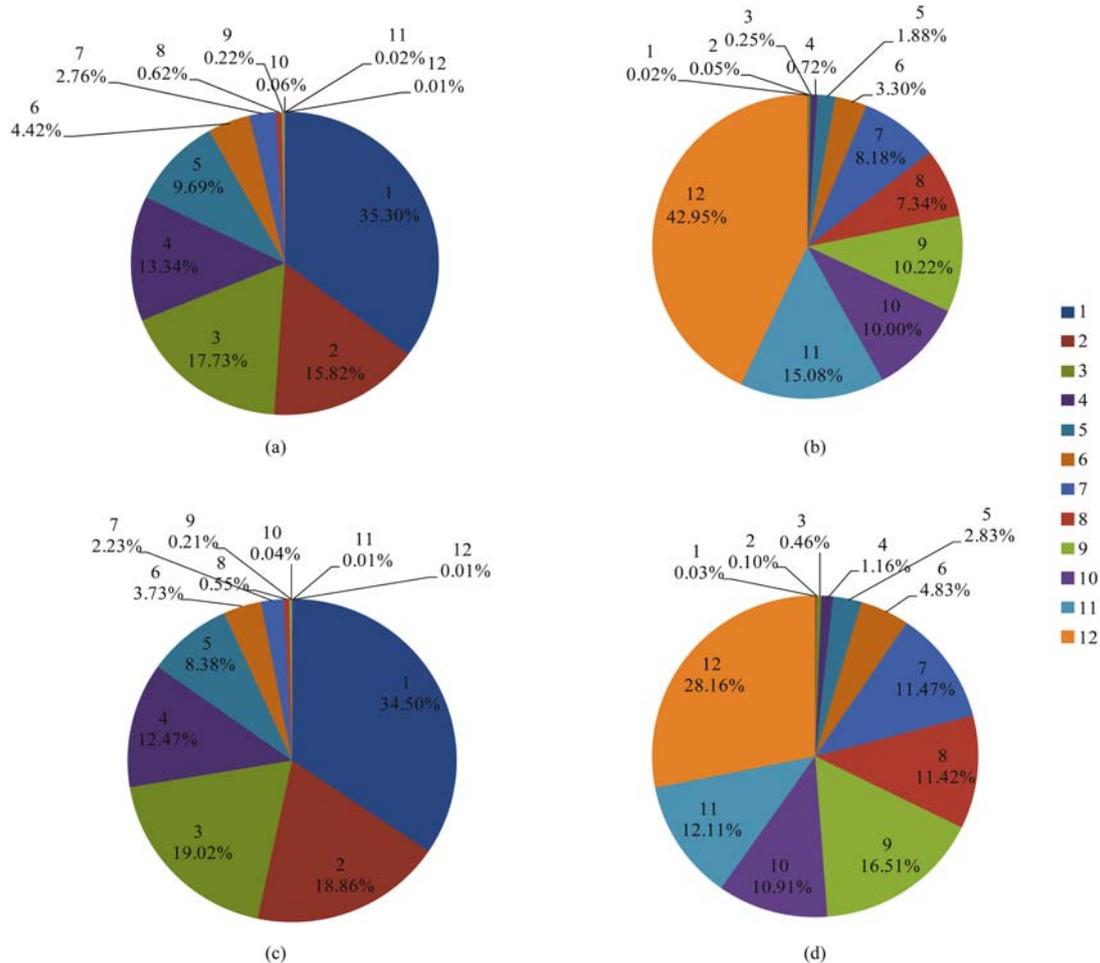


图 2 位于图 1(a) 中 A 点监测处油烟机关和开启状态下的油烟数浓度和质量浓度随粒径分布

Fig. 2 Number and mass concentration of oil fume dependent on particle size with kitchen ventilator under shut and open conditions

43%,要明显高于开油烟机时的 28%。以上现象说明了油烟机对 2.5 μm 以上大颗粒的抽排到室外能力要优于小颗粒。通过表 1 的统计也可以看出,关油烟机时 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 值为 32.0%,要高于开油烟机

时的 48.8%。同时表 1 中结果显示油烟机对 PM_{10} 的净化效率高与 $\text{PM}_{2.5}$,分别达到 95.3% 和 92.8%,这进一步表明了开启油烟机对大颗粒的抽排效果相对高于细颗粒。



(a) 数浓度-关油烟机状态; (b) 质量浓度-关油烟机状态; (c) 数浓度-开油烟机状态; (d) 质量浓度-开油烟机状态
1 ~ 12 数字分别代表监测的油烟颗粒的 12 个粒径范围: 0.030 ~ 0.063、0.063 ~ 0.109、0.109 ~ 0.173、0.173 ~ 0.267、0.267 ~ 0.407、0.407 ~ 0.655、0.655 ~ 1.021、1.021 ~ 1.655、1.655 ~ 2.520、2.520 ~ 4.085、4.085 ~ 6.560、6.560 ~ 9.990 μm

图 3 位于图 1(a) 中 A 点监测处油烟机关和开启状态下, 数浓度和质量浓度分别占总油烟颗粒数浓度和质量浓度的比例

Fig. 3 Ratio of cooking fume particles' number and mass concentration to total fume particles' number and mass concentration, respectively

2.2 室内油烟颗粒分布与扩散

为了考察烹饪过程中, 排放的油烟颗粒在厨房空间尺度上的分布与扩散特点, 以及油烟机状态对油烟分布与扩散的影响, 本研究监测了距离油烟发生 A 点位置平行移动 3m 外的 B 点位置处的油烟浓度。实验条件与 A 点测试完全一样, 测试结果如图 4 和 5 及表 1 所示。图 4 为 B 点位置处的油烟颗粒浓度在油烟机关闭和开启状态下的粒径分布。图 4(a) 记录了关闭油烟机时的颗粒数浓度随粒径分布, 可以发现虽然 30 ~ 63 nm 间的超细颗粒数浓度仍然最多, 值为 2.5×10^5 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, 但 63 ~ 407 nm

间的颗粒数浓度值为 $1.3 \sim 2.1 \times 10^5$ 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, 其与 30 ~ 63 nm 间的颗粒数浓度值的差距相比 A 点处的相对应的颗粒数浓度值的差距已经明显减少[图 2(a)]。可以进一步从不同粒径颗粒数浓度占总颗粒数浓度的比重图 5(a) 观察到该现象。30 ~ 63 nm 间颗粒数浓度占总颗粒数浓度 24.8%, 而图 3(a) 中该比重为 34.5%。63 ~ 407 nm 间的颗粒即图 5(a) 中标记 2、3、4、5 的 4 个通道, 其数浓度比重值均高于图 3(a) 中相应通道的值。可以说明油烟机关闭且无强制通风情况下, 产生的油烟在漂移过程中 30 ~ 63 nm 的颗粒发生了聚集, 聚集成比较大的颗

粒,可能是造成 30 ~ 63 nm 粒径范围颗粒数浓度比重降低,而 63 ~ 407 nm 颗粒数浓度比重增加的主要原因,进而影响到 63 ~ 407 nm 粒径范围内的颗粒质量浓度的增加. 因此图 5(b)中 2 ~ 5 的 4 个通道内的质量浓度占比要高于图 3(b)中相应通道的值.

相反对于开启油烟机强制通风情况下,比较图 3(c)和图 5(c)可以看出,30 ~ 63 nm 粒径范围颗粒数浓度比重仅降低了约 2%,63 ~ 407 nm 的颗粒数浓度只是有微弱的比重增加. 这说明开启油烟机通风情况下,颗粒的聚集现象不如关闭油烟机时候明显.

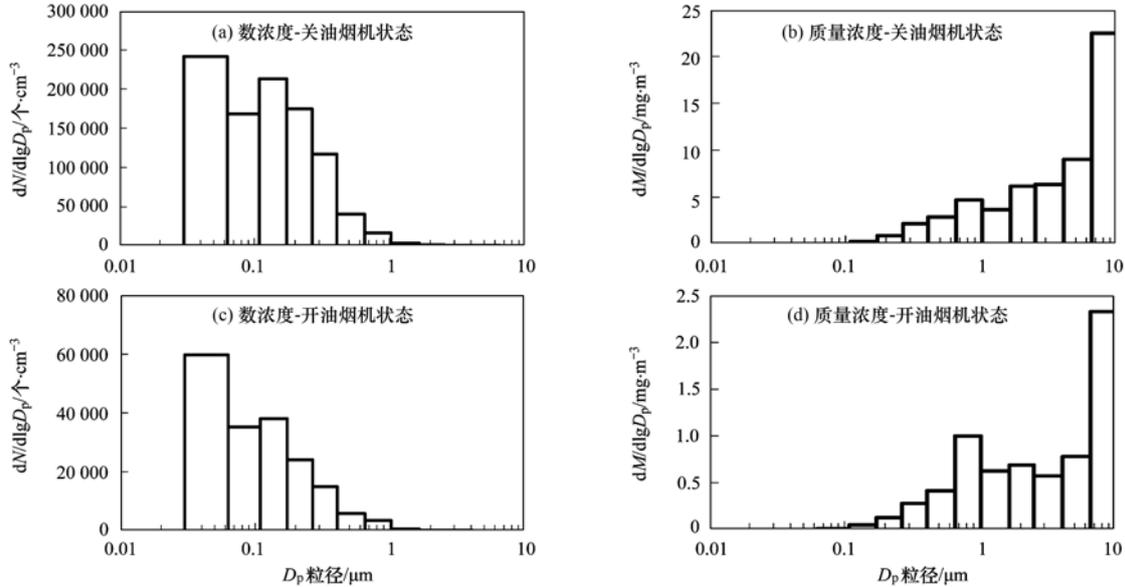


图 4 位于图 1(a)中 B 点监测处油烟机关和开启状态下的油烟数浓度和质量浓度随粒径分布

Fig. 4 Number and mass concentration of oil fume dependent on particle size with kitchen ventilator under shut and open conditions

通过比较表 1 中列举 A 和 B 点监测位置的颗粒总数浓度和质量浓度值的变化计算了油烟室内扩散衰减率. 不管是关或开油烟机时,B 点均监测到了相当多数量的油烟颗粒,表明了油烟能够迅速扩散到整个厨房空间. 关油烟机时,B 点处 0.03 ~ 10 μm 间的数浓度由 A 点处的 2 785 851 降低到 976 443 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,数浓度扩散衰减率为 64.9%. $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度从 A 点处的 85.93 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到 20.90 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度衰减率为 75.7%. 而开油烟机时候,数浓度衰减率仅为 19.7%,质量浓度衰减率为 48.1%. 这表明关闭油烟机时,发生的油烟都在室内漂浮,因此扩散衰

减率大,而开启油烟机后,发生的油烟被抽排到室外,导致室内剩余油烟衰减率降低.

另一方面,从表 1 的分析结果还可以总结出油烟机近距离吸烟效果明显. 开启油烟机后,B 点位置的总油烟颗粒数浓度净化效率为 81.3%,低于 A 点处的 91.8%. $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的净化效率在 84% ~ 87% 上下,低于 A 点处的 92% 以上. 另外 B 点处开油烟机时候 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比重 46.5% 要高于关油烟机时候的 35.6%,与 A 点结果一致,说明不管是距离油烟发生的近处还是远处位置,开启油烟机时候,对大颗粒 PM_{10} 的抽排效率要高于 $\text{PM}_{2.5}$.

表 1 不同状态下,油烟颗粒数浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度及其净化效率

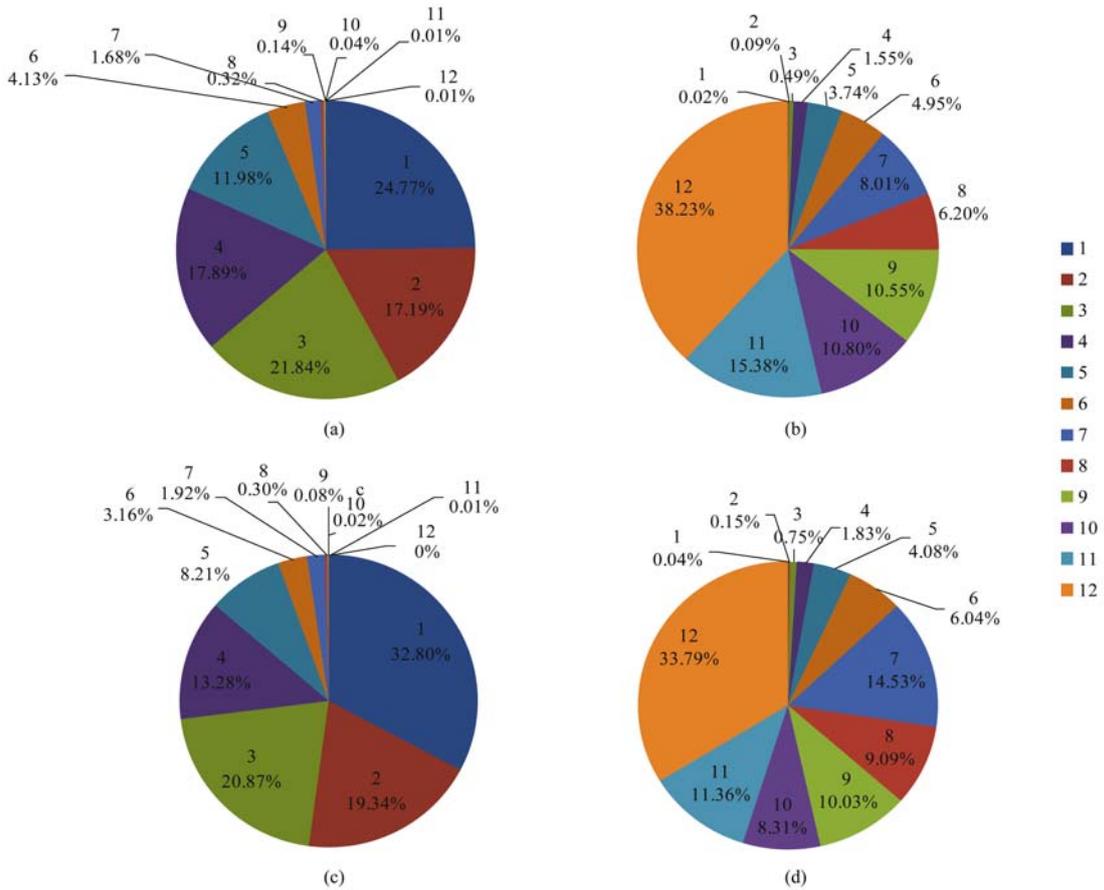
Table 1 List of the values for particle number and mass, ventilation efficiency and $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ under different conditions

监测位置及油烟机状态	0.03 ~ 10 μm 数浓度 /个 $\cdot\text{m}^{-3}$	数浓度净化效率/%	0.03 ~ 10 μm 数浓度扩散衰减率/%	PM_{10} 质量浓度 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	PM_{10} 净化效率 /%	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{PM}_{2.5}$ 净化效率 /%	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度扩散衰减率/%	$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ (质量比) /%
A 点,关	2 785 851			268.78		85.93			31.97
A 点,开	226 880	91.86		12.62	95.30	6.16	92.83		48.82
B 点,关	976 443		64.9	58.71		20.90		75.7	35.59
B 点,开	182 214	81.34	19.7	6.88	88.28	3.20	84.68	48.1	46.54

2.3 油烟颗粒物排放数值模拟

对开启油烟机情况下,产生的油烟烟气的速度场和油烟颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度场进行模拟,可以较为直

观地观察油烟被抽滤时候的速度分布(图 6)及油烟颗粒物的逃逸状态(图 7). 从锅的中心出发,分别取垂直于门和平行于门的两个竖直平面,分别为图



(a) 数浓度-关油烟机状态 (b) 质量浓度-关油烟机状态 (c) 数浓度-开油烟机状态 (d) 质量浓度-开油烟机状态; 1~12 数字分别代表监测的油烟颗粒的 12 个粒径范围: 0.030~0.063、0.063~0.109、0.109~0.173、0.173~0.267、0.267~0.407、0.407~0.655、0.655~1.021、1.021~1.655、1.655~2.520、2.520~4.085、4.085~6.560、6.560~9.990 μm

图 5 位于图 1(a) 中 B 点监测处油烟机机关和开启状态下, 数浓度和质量浓度分别占总油烟颗粒数浓度和质量浓度的比例

Fig. 5 Ratio of cooking fume particles' number and mass concentration to total fume particles number and mass concentration, respectively

1(b) 中的 a($Y=0$) 和 b($X=0$) 的截面所示, 分别代表模拟油烟速度和 $\text{PM}_{2.5}$ 正面和侧面分布. 图 6 显示的烟气速度场正面和侧面分布中可以看出, 油烟上升的速度为从 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增大到 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 靠近烟机吸风口处烟气速度最大. 于梅春等^[24] 对厨房浓度进行数值模拟时, 油烟散发速度为 0.5

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 图 7(a) 显示的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度场正面分布可以看出, 从燃气灶到烟机吸风口处浓度是逐渐降低的, 燃气灶的外围区域浓度与周围本底浓度较为接近. 图 7(b) 显示的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度场侧面分布可以看出, 燃气灶边沿处有微弱的油烟逃逸现象发生. 油烟最高浓度处高达 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 油烟机边沿处

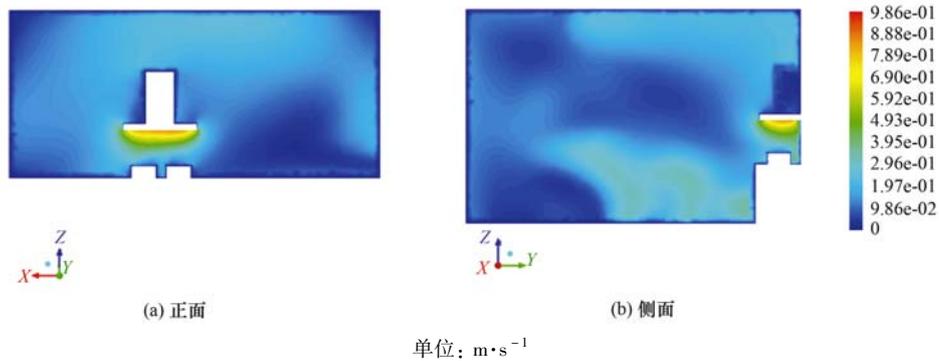


图 6 模拟开油烟机时油烟烟气速度场分布

Fig. 6 Simulation of spatial velocity distribution for fume emission with kitchen ventilation

$0.3 \sim 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 于梅春等^[24]模拟得出, $5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 的油烟机风量, 站在炒菜位置处人呼吸的高度处的油烟浓度大概 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 高丽颖等^[23]通过 CFD 数值模拟计算了不同油烟机风量

下的油烟速度场和浓度场^[25], 评估了油烟机风量对吸烟效果的影响, 油烟机风量从 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 提高到 $7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 油烟机边沿处浓度从 $3.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低到 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

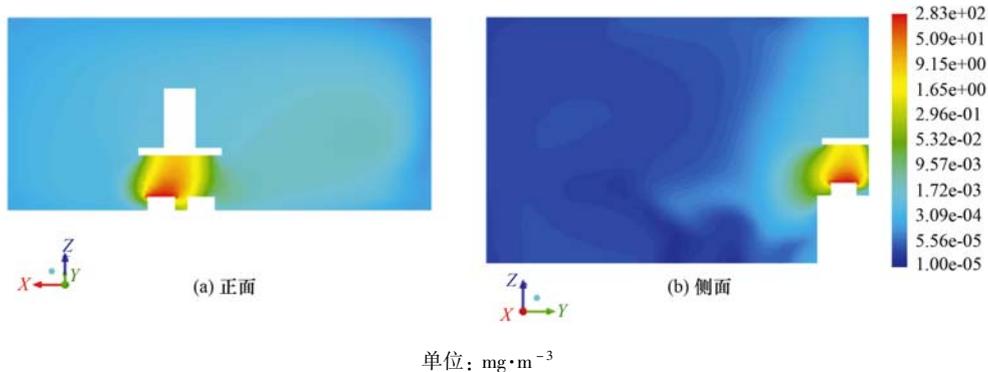


图 7 模拟开油烟机时油烟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度场分布

Fig. 7 Simulation of spatial $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration distribution for fume emission with kitchen ventilation

2.4 油烟温度场红外图像

300 mL 菜籽油加热到 265°C 后, 关闭油烟机情况下, 通过红外摄像机拍摄油烟, 获得油烟的温度场分布, 直观地观察油烟的扩散分布范围. 图 8 中底部白色区域为油锅, 因为温度远超过右侧温度条显示温度, 以白色呈现. 油烟温度形成了 5 个温度梯度, 由内到外以弧形曲线向外扩散. 温度最高的为红色区域, 中心温度为 70°C , 温度稍微低的以黄色区域显示, 温度约为 63°C , 其次是 $50 \sim 60^\circ\text{C}$ 的绿色温度梯度, 向外继续扩散降低到 $38 \sim 45^\circ\text{C}$, 最外层油烟温度无明显清晰边界, 深蓝色显示 $33 \sim 35^\circ\text{C}$, 逐渐融入到外沿室内温度, 约 27°C 的紫色范围内. 可以看出油烟从高温到低温区扩散过程中, 温度梯

度的范围由小逐渐变大, 蓝色区域面积最大. 从红色到蓝色区域垂直高度约 25 cm, 为油烟产生的高度范围.

3 结论

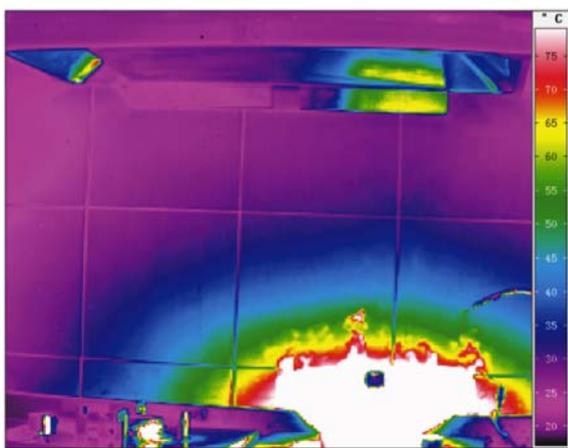
(1) 通过电子低压撞击器监测模拟烹饪油烟颗粒物 $0.03 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内, 颗粒数浓度和质量浓度的粒径分布, 表明颗粒数浓度随着粒径增大显著降低, 655 nm 以下的细颗粒物最多. 而颗粒质量浓度随着粒径增大反而呈现显著增大的趋势, $2.5 \mu\text{m}$ 以上的颗粒质量浓度最大.

(2) 油烟机开启时能够显著降低室内油烟颗粒浓度. 油烟机在油烟发生处的净化效率为 90% 以上, 要高于油烟发生处 3 m 外的位置处的净化效率, 为 80% ~ 90%, 且对大颗粒 PM_{10} 的净化效果要优于小颗粒 $\text{PM}_{2.5}$.

(3) 油烟发生后迅速扩散到远离发生位置处 3 m 外的空间. 油烟颗粒数浓度自然扩散衰减率为 64.9%, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度自然扩散衰减率为 75.7%.

参考文献:

- [1] 崔彤, 程婧晨, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1523-1529.
Cui T, Cheng J C, He W Q, et al. Emission characteristics of VOCs from typical restaurants in Beijing [J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1523-1529.
- [2] 何万清, 聂磊, 田刚, 等. 基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4605-4611.
He W Q, Nie L, Tian G, et al. Study on the chemical compositions of VOCs emitted by cooking oils based on GC-MS [J]. Environmental Science, 2013, 34(12): 4605-4611.
- [3] Buonanno G, Johnson G, Morawska L, et al. Volatility



单位: $^\circ\text{C}$

图 8 油烟烟气温度分布场的红外图像

Fig. 8 Infrared image for temperature distribution field of cooking fume emission

- characterization of cooking-generated aerosol particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011, **45**(9): 1069-1077.
- [4] 何万清, 田刚, 聂磊, 等. 烹调油烟中挥发性有机物的排放初探[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 2973-2978.
He W Q, Tian G, Nie L, *et al.* Preliminary study concerning emissions of the volatile organic compounds from cooking oils [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 2973-2978.
- [5] 程婧晨, 崔彤, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2743-2749.
Cheng J C, Cui T, He W Q, *et al.* Pollution characteristics of Aldehydes and Ketones compounds in the exhaust of Beijing typical restaurants[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2743-2749.
- [6] 徐幽琼, Yu I T S, 林捷, 等. 不同食用油和烹调方式的油烟成分分析[J]. *中国卫生检验杂志*, 2012, **22**(10): 2271-2279.
Xu Y Q, Yu I T S, Lin J, *et al.* The composition of cooking fumes with different oils'cooking methods and foods[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2012, **22**(10): 2271-2279.
- [7] Torkmahalleh M A, Goldasteh I, Zhao Y, *et al.* PM_{2.5} and ultrafine particles emitted during heating of commercial cooking oils[J]. *Indoor Air*, 2012, **22**(6): 483-491.
- [8] 符海欢, 田娜, 商惠斌, 等. 模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 46-52.
Fu H H, Tian N, Shang H B, *et al.* Size distribution of particle and polycyclic aromatic hydrocarbons in particle emissions from simulated emission sources[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 46-52.
- [9] 谭德生, 邝元成, 刘欣, 等. 餐饮业油烟的颗粒物分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1958-1963.
Tan D S, Kuang Y C, Liu X, *et al.* Analysis on oil fume particles in catering industry cooking emission [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1958-1963.
- [10] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Chemical characteristics of fine particles emitted from different Chinese cooking styles[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(6S): 2357-2366.
- [11] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, *et al.* Chemical compositions of fine particulate organic matter emitted from Chinese cooking[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(1): 99-105.
- [12] Yu K P, Yang K R, Chen Y C, *et al.* Indoor air pollution from gas cooking in five Taiwanese families [J]. *Building and Environment*, 2015, **93**(2): 258-266.
- [13] 姚鑫, 陈猛, 范泽云, 等. 烹饪油烟污染及其控制技术研究进展[J]. *化学工业与工程*, 2015, **32**(3): 53-58.
Yao X, Chen M, Fan Z Y, *et al.* Pollution from cooking emission and progress in its control technology [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2015, **32**(3): 53-58.
- [14] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [15] 梁春梅, 操基玉, 王勇, 等. 油烟中细颗粒物致胎鼠肺泡 II 型上皮细胞 DNA 损伤的研究[J]. *环境与健康杂志*, 2011, **28**(10): 850-853.
Liang C M, Cao J Y, Wang Y, *et al.* Assessment of DNA damage induced by cooking oil fumes particulate in the mice alveolar type II epithelial cells[J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, **28**(10): 850-853.
- [16] Shu Y, Zhu L C, Yuan F, *et al.* Analysis of the relationship between PM_{2.5} and lung cancer based on protein-protein interactions [J]. *Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening*, 2016, **19**(2): 100-108.
- [17] 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.
- [18] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38): 6557-6564.
- [19] 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.
Wen M T, Hu M. Physical and chemical characteristics of fine particles emitted from cooking emissions and its contribution to particulate organic matter in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(11): 2620-2625.
- [20] Zhang Q F, Gangupomu R H, Ramirez D, *et al.* Measurement of ultrafine particles and other air pollutants emitted by cooking activities[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2010, **7**(4): 1744-1759.
- [21] Abdullahi K L, Delgado-Saborit J M, Harrison R M. Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: a review[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 260-294.
- [22] Wan M P, Wu C L, Sze To G N, *et al.* Ultrafine particles, and PM_{2.5} generated from cooking in homes [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6141-6148.
- [23] 高丽颖, 李锐. 家用厨房脱排油烟机的 CFD 数值模拟[J]. *建筑节能*, 2011, **39**(2): 65-67.
Gao L Y, Li R. CFD simulation on range hoods of residential kitchen[J]. *Building Energy Efficiency*, 2011, **39**(2): 65-67.
- [24] 于梅春, 张登春. 套室内厨房油烟浓度的数值模拟[J]. *湘潭师范学院学报(自然科学版)*, 2008, **30**(1): 72-75.
- [25] 朱培根, 朱明亮, 蔡浩, 等. 住宅厨房油烟浓度的数值模拟和实测[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2006, **7**(2): 153-156.
Zhu P G, Zhu M L, Cai H, *et al.* Numerical simulation and test on smoke of residential kitchen[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2006, **7**(2): 153-156.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172