

# 餐饮油烟排放特征与净化技术研究进展

张 星<sup>1,2</sup> 钱振清<sup>3</sup> 张德峰<sup>3</sup> 竹 涛<sup>1,2\*</sup> 袁前程<sup>1</sup> 叶泽甫<sup>4</sup>

( 1.中国矿业大学( 北京) 大气环境管理与污染控制研究所 北京 100083; 2.国家环境保护恶臭污染控制重点实验室 天津 300191;  
3.江苏保丽洁环境科技股份有限公司 江苏 苏州 215625; 4.山西格盟中美清洁能源研发中心有限公司 太原 030082)

摘要:餐饮油烟不仅对当前大气质量产生多重环境效应,而且严重危害人体健康和人类生存空间。针对餐饮油烟污染控制难题,结合餐饮油烟化学性质进行排放特征分析,论述了传统油烟净化技术和 VOCs 控制技术各自的优缺点,提出了油烟净化组合工艺的技术展望,即传统油烟净化技术与 VOCs 控制技术的有机结合,最后结合法律法规和排放标准对餐饮油烟减排提出了可行性建议。

关键词:餐饮油烟;挥发性有机物;排放特征;净化技术;减排

DOI: 10. 13205/j.hjgc.202001005

## RESEARCH PROGRESS OF COOKING FUME EMISSION CHARACTERISTICS AND PURIFICATION TECHNOLOGIES

ZHANG Xing<sup>1,2</sup>, QIAN Zhen-qing<sup>3</sup>, ZHANG De-feng<sup>3</sup>, ZHU Tao<sup>1,2\*</sup>, YUAN Qian-cheng<sup>1</sup>, YE Ze-fu<sup>4</sup>

( 1. Institute of Atmospheric Environmental Management and Pollution Control, China University of Mining & Technology ( Beijing ), Beijing 100083, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Odor Pollution Control, Tianjin 300191, China;  
3. Jiangsu Polygee Environmental Technology Co., Ltd, Suzhou 215625, China; 4. Shanxi Gemeng US-China Clean Energy R&D Center Co., Ltd, Taiyuan 030082, China)

**Abstract:** Cooking fume not only has multiple environmental impact on the atmospheric quality, but also endangers health and living space of human beings. Firstly, we analyzed the emission characteristics and chemical properties of cooking fume, aiming at the problem of cooking fume pollution. Secondly, we discussed the traditional cooking fume purification and VOCs control technologies, summarized their advantages and disadvantages, and introduced the technical prospects which featured combining traditional fume purification technologies together with VOCs control technologies. Finally, we put forward suggestions on the emission reduction of cooking fume, based on the actual laws and emission standards in China.

**Keywords:** cooking fume; volatile organic compounds; emission characteristics; purification technology; emission reduction

## 0 引 言

餐饮油烟是指食物烹饪和食品加工过程中挥发的油脂、有机物以及热氧化和裂解产生的固、液、气三相混合物,既包括固态颗粒物和液态油滴,又包括烷烃、醇类、醛酮、杂环胺、多环芳烃等挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs),其中固态颗粒物和液态油滴黏性强,不溶于水且极性小<sup>[1]</sup>。据统计,收稿日期:2019-04-12

基金项目:山西省科技重大专项(20181102017);国家环境保护恶臭污染控制重点实验室开放基金(201903103);中央高校基本科研业务费(2009QH03)。

第一作者:张星(1992-),男,博士,主要研究方向为大气污染控制。zhangxingcumtb@163.com

\* 通信作者:竹涛(1979-),男,博士,教授,主要研究方向为大气污染控制与固废资源化。bamboozt@cumtb.edu.cn

餐饮油烟中 PM<sub>2.5</sub> 和 VOCs 占比分别达到 11% 和 3.4%,已成为继工业排放和机动车尾气排放的重要大气污染源,餐饮油烟净化与减排亟待解决<sup>[2]</sup>。

餐饮油烟排放呈量大、面广、分散的特点,其在环境介质中通常以气态或气溶胶状态存在,油烟中的 VOCs 作为 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 重要前体物和参与物,不仅能与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等发生光化学反应形成光化学烟雾,也

能与大气中 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_3$ 等强氧化剂反应生成二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)对区域大气质量产生多重环境效应<sup>[3]</sup>。此外,由于多数VOCs具有“三致”效应(致癌、致畸、致突变),其毒性、持久性和难降解性严重威胁人体健康和人类生存空间<sup>[4]</sup>。随着生态文明建设逐步推进和大气污染治理深入开展,餐饮油烟净化与减排引起广泛关注。针对餐饮油烟污染控制难题,本文结合餐饮油烟化学性质分析了排放特征,论述了传统油烟净化技术和VOCs控制技术并对其优缺点进行比较总结,介绍了油烟净化组合工艺,最后结合法律法规和排放标准对餐饮油烟减排工作提出建议。

## 1 餐饮油烟性质与排放分析

### 1.1 性质分析

餐饮油烟形成分为以下阶段:当温度达到50~100℃时,低沸点物质和水分汽化,油层表面有热气产生;当温度上升至100~270℃时,较高沸点物质逐渐汽化形成油烟;当温度>270℃时,高沸点物质急剧汽化形成大量油烟雾。上述各阶段产生的混合气体在上升过程中与空气剧烈碰撞,温度迅速下降到60~80℃形成含冷凝物的气溶胶,最终水气、烟尘、食用油和食品高温分解产生的VOCs逸散至大气中,由于其自然沉降速度较慢,因此可长时间在空气中悬浮<sup>[5]</sup>。郑少卿<sup>[6]</sup>选取烧烤、川菜、西式快餐、上海菜、中式快餐5类菜系作为研究对象,经采样检测得出油烟浓度依次为15.28,13.72,9.58,8.97,11.03 mg/m<sup>3</sup>,利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对油烟中VOCs进行定性定量分析,并将实测排放浓度换算为单个灶头基准风量,结果表明,不同菜系对应VOCs浓度依次为12.91,7.96,6.11,4.14,3.69 mg/m<sup>3</sup>。由此可知,不同菜系油烟浓度及VOCs排放水平与食物原料、烹饪方式和翻炒频率等因素密切相关。

### 1.2 排放特征

由于我国大部分城市未对餐饮单位进行科学规划和合理布局,中小型餐饮单位集中分布在人口密集区域,尤其是商场沿街两侧和居民楼底层,且多数餐饮单位为个体经营,具有散、乱、小等特点,普遍存在设施简陋和油烟无序排放等问题。此外,餐饮油烟呈现间歇性排放,具有排放量大、分布面广、高度分散等特征,由于排气筒高度偏低导致低空扩散性较强,因此局部区域污染较为严重<sup>[7]</sup>。

餐饮油烟是PM<sub>2.5</sub>直接排放源,由于餐饮油烟多

属于低空排放,部分固态颗粒物和低沸点液态油滴在排放口直接冷凝形成PM<sub>2.5</sub><sup>[8]</sup>。张腾等<sup>[9]</sup>分别对山西省晋城市餐饮3处无组织排放源和10处有组织排放源细颗粒物采样检测,分析表明,油烟中PM<sub>2.5</sub>排放浓度顺序为露天烧烤(5.6598 mg/m<sup>3</sup>)>大中型餐馆(10处有组织排放源算术平均值为2.7336 mg/m<sup>3</sup>)>火锅店(0.6659 mg/m<sup>3</sup>)>街边小吃(0.4095 mg/m<sup>3</sup>),分别是大气PM<sub>2.5</sub>背景值(0.1325 mg/m<sup>3</sup>)的42.7,20.6,5.0,3.1倍,可知餐饮行业是细颗粒物重要排放源;此外,通过对各类油烟中多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)统计发现,其含量顺序为露天烧烤(5.677 μg/m<sup>3</sup>)>大中型餐馆(0.165 μg/m<sup>3</sup>)>火锅店(0.066 μg/m<sup>3</sup>)>街边小吃(0.048 μg/m<sup>3</sup>),且在各类餐饮源PAHs中,菲(PHE)、芘(PYR)、荧蒽(FLT)的质量分数普遍较高,分别达到13.8%~21.6%,9.2%~26.5%,6.9%~22.0%。由此可知,餐饮源细颗粒物中含有大量有毒有害物质。

餐饮油烟中多种VOCs可与NO<sub>x</sub>反应增强大气氧化性,其作为O<sub>3</sub>重要前体物和参与物将会导致以O<sub>3</sub>超标为特征的光化学烟雾污染并加速形成二次颗粒物<sup>[10]</sup>。崔彤等<sup>[11]</sup>对北京市烧烤、中式快餐、西式快餐、川菜和浙菜5种典型菜系油烟中VOCs排放特征进行研究,检测结果按基准风量折算后显示,烧烤油烟中VOCs含量高达12.22 mg/m<sup>3</sup>,其他菜系介于3.93~5.79 mg/m<sup>3</sup>。由此可知,餐饮行业是VOCs重要排放源,且烧烤VOCs排放水平最高。王秀艳等<sup>[12]</sup>对天津市某中型餐馆冬、夏两季油烟中VOCs实地监测,通过GC-MS分析共检测出66种VOCs,其中乙醇和丙烷含量相对较高,含氧有机物比例超过55%,采用VOCs与 $\cdot\text{OH}$ 反应速率( $L^{\text{OH}}$ )衡量油烟中VOCs化学活性,发现含氧有机物和烯烃对油烟光化学活性具有主要贡献,同时以阈值稀释倍数作为衡量污染物对源臭气强度贡献指标发现,醛类是影响油烟排放源臭气指数的主要污染物,且夏季油烟平均嗅阈值与丁醛嗅阈值相当。综上可知,餐饮油烟VOCs对大气质量产生多重环境效应。最后根据RAIS子系统IRIS对油烟中污染物致癌毒性效应分类发现,1,3-丁二烯致癌风险(LCR)超过10<sup>-4</sup>限值,表明其存在较大潜在致癌风险,其次苯致癌风险介于10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup>,存在潜在风险。油烟中污染物致癌风险如表1所示,可见餐饮油烟对人体健康存在较大危害。

表 1 油烟中污染物致癌风险  
Table 1 Carcinogenic risk of the selected pollutants  
in cooking fume

污染物	IRIS 类别	终生致癌风险 (lifetime cancer risk, LCR)
苯	A	$1.6\times10^{-5}$
二氯甲烷	B2	$2.8\times10^{-6}$
三氯甲烷	B2	$2.5\times10^{-6}$
1,3-丁二烯	B2	$1.3\times10^{-4}$

注: A 类为对人致癌性证据充分; B2 类为对人致癌性证据有限,但对动物致癌性证据充分。

2 餐饮油烟净化技术

2.1 净化技术分析

针对餐饮油烟净化应采取源头削减、过程控制和末端治理全过程手段实现油烟减排目标,并将油烟中主要污染物的排放浓度纳入监测网络,控制方案如图 1 所示<sup>[13]</sup>。源头削减即在食物烹饪和食品加工前端减少油烟产生量,降低各类污染物的排放浓度,加强源头防控,减轻末端处理设备的净化压力。过程控制即将餐饮单位烹饪操作产生的油烟通过集气罩充分收集,保证集气罩投影面积大于烹饪作业区,避免其泄漏,并将无组织排放部分收集为有组织然后统一处理<sup>[14]</sup>。末端治理即减少或阻止油烟排放,降低其对环境破坏程度,各餐饮单位根据油烟污染物实际工况条件综合分析,选择运行成本低、稳定可控的最佳净化技术<sup>[15]</sup>。

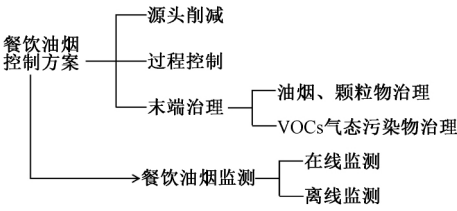


图 1 餐饮油烟控制方案

Figure 1 Current control scheme of cooking fume

2.2 传统油烟净化技术

传统油烟净化技术主要包括催化燃烧、机械分离、过滤吸附、静电沉积、湿式洗涤等,工作原理和性能比较如表 2 所示。其中,静电沉积相比其他技术方法净化效率较高,可以对油烟和颗粒物进行有效去除,但无法控制 VOCs 气态污染物<sup>[16]</sup>。程婧晨等<sup>[17]</sup>对北京市 8 家餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征进行研究,检测结果显示,醛酮类化合物(C1—C9)排放水平介于  $115.47\sim1035.99\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,并发现高压静电式油烟净化器对醛酮类化合物去除效果十分有限。相反,部分 VOCs 气体浓度有一定幅度增加,这是因为一方面在高压放电过程中存在一定概率使得油烟中大分子有机物被分解生成小分子有机物;另一方面放电过程中产生的  $\text{O}_3$  可能与大分子有机物反应生成 VOCs。与静电沉积类似,其他传统油烟净化技术也难以对 VOCs 气态污染物进行有效控制。

表 2 传统油烟净化技术工作原理和性能比较<sup>[18]</sup>

Table 2 Purification principle and performance comparison of traditional cooking fume control technologies

净化技术	工作原理	优点	缺点	应用现状
催化燃烧	利用催化剂降低氧化反应活化能和起燃温度,促进反应物完全氧化生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ,从而达到油烟净化目的	可以协同净化 VOCs 气态污染物,处理能力强,无二次污染,产生的热量可以回收利用	由于油烟黏性强,催化剂孔径容易堵塞失活,再生困难更换成本高,该技术难以适应餐饮油烟间歇性排放特征且运行费用较高	适用于大型食品加工企业,普通餐饮单位应用少
机械分离	利用惯性碰撞或旋风分离去除油烟中大颗粒物,常用的机械分离设备有动态拦截器和旋风分离器	设备结构简单,维护方便,投资少,运行费用低	对粒径较小的细颗粒物去除效率低,不能去除 VOCs 气态污染物,需要经常清洗,清洗液易形成二次污染	通常与其他方法组合使用,作为净化工艺中预处理
过滤吸附	油烟在亲油性高分子过滤材料(纤维、滤布等)碰撞、拦截作用下被去除,前端通常采用一定数目金属网格和格栅截留大颗粒污染物来达到净化目的	净化效率高,运行稳定可靠,维修方便	仅能截留油烟中颗粒物,对 VOCs 气态污染物没有去除效果,滤料易堵塞,压降增大,需要定期更换滤材,运行费用高	风机功率大易产生噪声污染,使用较少
静电沉积	油烟在高压电场中发生电离使细颗粒物荷电,在电场力作用下向集尘极运动并在集尘极凝聚沉积,使油烟得到净化	设备紧凑占地面积小,净化效率高,通常可达 90% 以上,压降较小	长期使用,集尘极表面形成油膜,层阻碍放电,净化效率降低,集尘极需要清洗	净化效率高且技术成熟,应用广泛,市场占有率高
湿式洗涤	将油烟通过气体分布装置使其与吸收液充分接触,将油烟中污染物从气相转移到液相达到净化目的,根据气液接触方式不同可分为液膜式、喷淋式和冲击式	净化效率较高,通过加入化学药剂可吸收部分 VOCs 气态污染物,同时可去除部分刺激性气味	投资与运行成本较高,需要频繁加药换水,洗涤液处理不当易产生二次污染	耗水耗电耗药剂,维护不便,洗涤液需要定期处理,应用较少

2.3 VOCs 控制技术

VOCs 控制技术主要分为回收和销毁两类,回收

技术是采用物理方法,通过改变温度、压力或使用吸附剂、渗透膜等方式富集分离 VOCs,经过回收的

VOCs 可直接或经过简单纯化后返回工艺流程再次利用,减少原材料消耗,或者集中进行提纯分离;销毁技术是通过化学或生化反应将 VOCs 氧化分解为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等无毒无害小分子化合物<sup>[19]</sup>。针对餐饮油烟 VOCs 治理,普遍使用吸收、吸附、UV 光解和低温等离子体技术,其技术原理和性能比较如表 3 所示。

表 3 VOCs 控制技术原理和性能比较<sup>[20]</sup>

Table 3 Purification principle and performance comparison of VOCs control technologies				
处理方法	工作原理	优点	缺点	
回收技术	吸收	VOCs 与吸收剂发生化学反应,吸收去除	可回收 VOCs 中有用成分,针对性较强	吸收范围有限,吸收后的溶液需进一步处理,易产生二次污染,处理费用较高
	吸附	利用活性炭、分子筛、吸附树脂、硅胶等多孔性材料去除 VOCs	对低浓度 VOCs 处理效率较高,可回收 VOCs 中有用成分,操作方便	吸附剂用量大、投资高、占地面积大、吸附后需要定期再生处理和更换,而且存在 VOCs 逸散风险
销毁技术	UV 光解	在紫外线照射下产生氧化还原能力,将 VOCs 转变生成 CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O 等	简单易行,运行稳定,适用范围广	紫外线易衰减,净化效率降低
	低温等离子体技术	在外加电场作用下产生高能离子轰击 VOCs,利用放电产生的·OH 等活性粒子将其氧化生成 CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O 等	高效便捷,对多种污染物适用性强,设备结构简单,占地面积小	仅适用于处理中低浓度 VOCs

2.4 技术展望

为有效控制餐饮油烟中各类污染物,传统油烟净化技术需要与 VOCs 控制技术形成组合工艺,通过技术耦合和过程强化实现对餐饮油烟中各类污染物的综合治理。鉴于对上述传统油烟净化技术和 VOCs 控制技术的分析总结,静电沉积和低温等离子体技术对餐饮油烟中固、液、气相污染物具有较高去除效率,可将 2 项技术耦合形成净化组合,如图 2 所示,该工艺能有效控制餐饮油烟中各类污染物。餐饮油烟首先经过滤网进入电离区,在电离区通过施加高压直流电使油烟粒子荷电,然后带电粒子进入吸附区,在库仑力作用下被吸引到两侧极板。此时,油烟中固态颗粒物和液态油滴被集尘极捕集,其余 VOCs 气态污染物进入等离子体反应区,通过气体放电方式产生大量·OH、O<sub>3</sub> 等高能粒子,在高能离子撞击和氧化作用下达到去除污染物的目的。

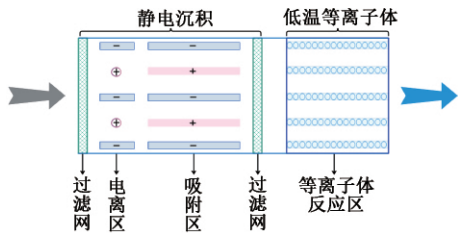


图 2 静电沉积与低温等离子体技术组合工艺示意

Figure 2 Schematic diagram of the combined process of electrostatic deposition and low temperature plasma technology

3 管控机制

3.1 法律法规

2018 年新版《中华人民共和国大气污染防治法》第八十一条第一款明确规定“排放油烟的餐饮服务

业经营者应当安装油烟净化设施并保持正常使用,或者采取其他油烟净化措施,使油烟达标排放,并防止对附近居民的正常生活环境造成污染。”该项法律条款强制约束餐饮单位安装油烟净化设施,其将有效推动餐饮油烟减排。此外,生态环境部于 2018 年 1 月发布《排污许可管理办法(试行)》,该项规定将构建以排污许可为核心的环境管理制度体系。餐饮行业分布面广,数量众多,油烟呈间歇性排放特征,且污染物浓度波动较大,因此需要结合餐饮油烟污染特征有针对性地制定排污许可制度。未来排污许可制度将开展环评与排污许可融合试点,此举将为我国环境治理实施总量控制和建立长效机制提供支撑,有效推进餐饮行业环境精细化管理,推动油烟减排和达标排放目标,促进餐饮行业环保升级<sup>[21]</sup>。

3.2 排放标准

针对餐饮油烟污染治理,我国于 2002 年 1 月 1 日实施 GB 18483—2001《饮食业油烟排放标准》,该项标准根据餐饮单位规模规定了油烟最高允许排放浓度和油烟净化设施最低去除效率,内容如表 4 所示。国家标准在餐饮油烟污染防治方面发挥了巨大作用,有力推动了油烟净化产业的进步和发展,但随着《大气污染防治法》《重点行业挥发性有机物削减行动计划》等一系列政策法规出台,现有餐饮油烟排放标准未将颗粒物和 VOCs 排放限值纳入,其难以适应当前对 VOCs 排放监管需求,新版国家标准将会适时更新颁布<sup>[22]</sup>。

随着大气污染治理深入开展,上海、天津、深圳和北京等地政府和环保部门陆续出台餐饮油烟整治措施,上述 4 市将油烟排放限值设为 1 mg/m<sup>3</sup>,严于现

表 4 GB 18483—2001《饮食业油烟排放标准》  
Table 4 Emission Standards of Cooking Fume from Catering Industry (GB 18483—2001)

规模	小型	中型	大型
基准灶头数	≥1, <3	≥3, <6	≥6
对应灶头总功率/(10 <sup>8</sup> J/h)	≥1.67, <5.00	≥5.00, <10	≥10
对应排气罩灶面总投影面积/m <sup>2</sup>	≥1.1, <3.3	≥3.3, <6.6	≥6.6
最高允许排放浓度/(mg/m <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.0
净化设施最低去除效率/%	60	75	85

有国家标准 2 mg/m<sup>3</sup>, 其中北京市 DB 11/1488—2018《餐饮业大气污染物排放标准》对颗粒物和 非甲烷总 烃的最高排放浓度做出严格限定, 目前这 2 项尚未被 列入国家标准, 并要求非甲烷总烃排放限值自 2020 年 1 月 1 日起全面执行, 北京市餐饮油烟污染物排 放限值和去除要求分别如表 5 和表 6 所示<sup>[23]</sup>。目前, 北京市各区均已制定工作计划, 细化工作内容, 并为 落实各餐饮单位环保主体责任, 现已将烧烤、烤鸭、川 湘菜等高强度排放餐饮单位列为重点改造对象。该 项标准的实施将促进餐饮单位改造更换新型高效净 化设备或加装 VOCs 去除装置, 引导餐饮单位采取相 应措施控制餐饮行业颗粒物和 VOCs 排放, 此举将有 效改善北京市大气环境质量。

表 5 DB 11/1488—2018《餐饮业大气污染物排放标准》限值  
Table 5 Emission Limits of Standards of Air Pollutants for Catering Industry in Beijing (DB 11/1488—2018)

污染物项目	最高允许排放浓度/(mg/m <sup>3</sup> )
油烟	1.0
颗粒物	5.0
非甲烷总烃	10.0

注: 最高允许排放浓度是指任何 1 h 浓度均值不得超过的浓度。

表 6 DB 11/1488—2018 中餐饮业大气污染物去除要求  
Table 6 Removal requirements of cooking fume pollutants in DB 11/1488—2018

规模	小型	中型	大型
基准灶头数	≥1, <3	≥3, <6	≥6
对应灶头总功率/(10 <sup>8</sup> J/h)	≥1.67, <5.00	≥5.00, <10	≥10
对应排气罩灶面总投影面积/m <sup>2</sup>	≥1.1, <3.3	≥3.3, <6.6	≥6.6
经营场所使用面积/m <sup>2</sup>	≤150	>150, ≤500	>500
就餐座位数/座	≤75	>75, ≤250	>250
油烟去除效率/%	≥90	≥90	≥95
颗粒物去除效率/%	≥80	≥85	≥95
非甲烷总烃去除效率/%	≥65	≥75	≥85

注: 净化设备的污染物去除效率是指实验室检测的去除效率。

4 减排建议

当前, 为进一步践行绿色发展理念, 促进大气环 境质量持续改善, 餐饮油烟减排应从以下几个方面落 实管控, 实现餐饮油烟减排目标。

1) 在油烟治理方面, 开发运行成本低、稳定可控 的协同净化组合工艺, 建立餐饮行业多污染物联合防 治体系, 并针对不同餐饮单位的污染物排放特征和性 质开发出模块化集成净化装置, 为各类餐饮单位提供 菜单化选择, 从源头提高净化装备整体技术水平。

2) 在管控改造方面, 督促餐饮单位采取源头削 减、过程控制和末端治理全过程控制手段, 针对无组 织排放产生的油烟要进行充分收集, 保证集气罩投影 面积大于烹饪作业区避免其泄漏, 并确保最佳净化 效果, 油烟净化器安装在距离集气罩 3 m 以上排烟管 位置。

3) 在污染监测方面, 基于物联网云技术等现代 化网络通信建立油烟智能监测与快速动态溯源平台, 通过采用一主机多探头模式对餐饮油烟多污染物排 放浓度进行实时在线监测。此外, 为确保油烟净化装 置稳定运行, 可以设置不正常运行和安全异常报警系 统, 并将油烟治理与监控纳入日常生产管理体系, 建 立管理台账, 提高末端管理水平。

4) 在法律法规方面, 完善各项法律体系, 推行排 污许可等环境管理制度, 并建立激励约束机制。通过 在餐饮行业执行排污许可制度推动餐饮油烟减排和 达标排放, 积极引导餐饮单位主动减排并调动其治污 减排积极性, 促进餐饮行业绿色发展。

5) 在排放标准方面, 结合餐饮油烟污染物排放 特征和理化性质, 科学合理制定餐饮行业油烟排放标 准, 细化各类污染物排放指标, 相关部门应加强管理 力度, 建立责任机制, 督促餐饮单位达标排放。

参考文献

[1] 柴美彤, 张润铎. 餐饮油烟催化净化技术的研究进展[J]. 工业催化, 2018, 26(5): 12-19.  
[2] 黄丹雯. 烹饪油烟影响 PM<sub>2.5</sub>? [J]. 环境, 2013(11): 69-71.  
[3] HAN D M, WANG Z, CHENG J P, et al. Volatile organic compounds (VOCs) during non-haze and haze days in Shanghai: characterization and secondary organic aerosol (SOA) formation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(22): 18619-18629.  
[4] 艾明. 挥发性有机物 VOCs 排放源谱和控制技术评价及臭氧污 染防治策略研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.  
[5] 刘贤博. 催化臭氧氧化餐饮油烟中 VOCs 的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
[6] 郑少卿. 餐饮业油烟中 VOCs 的排放特征及其治理技术的研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.  
[7] 程璟涛. 建筑布局对商业餐饮油烟排放扩散影响的研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2014.

(下转第 20 页)

- enhancement in the UV-Vis-IR driven thermocatalytic activity of  $\text{Co}_3\text{O}_4$  mesoporous nanorods [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6: 7194-7205.
- [37] YANG Y, LI Y Z, MAO M Y, et al. UV-Visible-Infrared Light Driven Thermocatalysis for Environmental Purification on Ramsdellite  $\text{MnO}_2$  Hollow Spheres Considerably Promoted by a Novel Photoactivation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(3): 2350-2357.
- [38] MAO M Y, LI Y Z, LV H Q, et al. Efficient UV-vis-IR light-driven thermocatalytic purification of benzene on a  $\text{Pt}/\text{CeO}_2$  nanocomposite significantly promoted by hot electron-induced photoactivation [J]. *Environmental Science-Nano*, 2017, 4: 373-384.
- [39] LAN L, LI Y Z, ZENG M, et al. Efficient UV-vis-infrared light-driven catalytic abatement of benzene on amorphous manganese oxide supported on anatase  $\text{TiO}_2$  nanosheet with dominant {001} facets promoted by a photothermocatalytic synergetic effect [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2017, 203: 494-504.
- [40] REN L, MAO M Y, LI Y Z, et al. Novel photothermocatalytic synergetic effect leads to high catalytic activity and excellent durability of anatase  $\text{TiO}_2$  nanosheets with dominant {001} facets for benzene abatement [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2016, 198: 303-310.
- [41] CHEN J, LI Y Z, FANG S M, et al. UV-Vis-infrared light-driven thermocatalytic abatement of benzene on Fe doped  $\text{OMS}-2$  nanorods enhanced by a novel photoactivation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 332: 205-215.
- [42] YANG Y, LI Y Z, ZHANG Q, et al. Novel photoactivation and solar-light-driven thermocatalysis on epsilon- $\text{MnO}_2$  nanosheets lead to highly efficient catalytic abatement of ethyl acetate without acetaldehyde as unfavorable by-product [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6: 14195-14206.
- [43] ZENG M, LI Y Z, MAO M Y, et al. Synergetic Effect between Photocatalysis on  $\text{TiO}_2$  and Thermocatalysis on  $\text{CeO}_2$  for Gas-Phase Oxidation of Benzene on  $\text{TiO}_2/\text{CeO}_2$  Nanocomposites [J]. *ACS Catalysis*, 2015(5): 3278-3286.
- [44] SHI Z K, LAN L, LI Y Z, et al.  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  Nanocomposite formation leads to improvement in ultraviolet-visible-infrared-driven thermocatalytic activity due to photoactivation and photocatalysis-thermocatalysis Synergetic Effect [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018(6): 16503-16514.
- [45] MA Y, LI Y Z, MAO M Y, et al. Synergetic effect between photocatalysis on  $\text{TiO}_2$  and solar light-driven thermocatalysis on  $\text{MnO}_x$  for benzene purification on  $\text{MnO}_x/\text{TiO}_2$  nanocomposites [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015(3): 5509-5516.
- [46] ZHENG Y, WANG W, JIANG D, et al. Ultrathin mesoporous  $\text{Co}_3\text{O}_4$  nanosheets with excellent photo-/thermo-catalytic activity [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 4(1): 105-112.
- [47] LI Y Z, HUANG J C, PENG T, et al. Photothermocatalytic synergetic effect leads to high efficient detoxification of benzene on  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Pt}/\text{TiO}_2$  nanocomposite [J]. *Chemcatchem*, 2010, 2(9): 1082-1087.
- [48] ZOU N M, CHEN G Q, MAO X W, et al. Imaging catalytic hotspots on single plasmonic nanostructures via correlated super-resolution and electron microscopy [J]. *ACS Nano*, 2018(12): 5570-5579.
- [49] TAN T H, SCOTT J, NG Y H, et al. Understanding plasmon and band gap photoexcitation effects on the thermal-catalytic oxidation of ethanol by  $\text{TiO}_2$ -supported gold [J]. *ACS Catalysis*, 2016(6): 1870-1879.
- [50] CHEN J Y, HE Z G, LI G Y, et al. Visible-light-enhanced photothermocatalytic activity of  $\text{ABO}_3$ -type perovskites for the decontamination of gaseous styrene [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2017, 209: 146-154.

#### (上接第 41 页)

- [8] 吴鑫. 烹饪油烟的排放特征及颗粒物的个体暴露研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [9] 张腾, 彭林, 李颖慧, 等. 餐饮源油烟中  $\text{PM}_{2.5}$  的化学组分特征[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(2): 183-191.
- [10] 陈金胜, 伯鑫, 徐君妃, 等. 我国环境影响评价 VOCs 模拟研究进展[J]. *环境工程*, 2018, 36(3): 143-147.
- [11] 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.
- [12] 王秀艳, 高爽, 周家岐, 等. 餐饮油烟中挥发性有机物风险评估[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(12): 1359-1363.
- [13] 张秀东, 刘有智, 樊光友, 等. 餐饮业油烟净化技术发展及研究现状[J]. *工业安全与环保*, 2010, 36(4): 32-33, 36.
- [14] 缪建玉. 生物滤塔净化餐饮业油烟废气的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [15] 徐敏, 何万清, 聂磊, 等. 传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3139-3145.
- [16] 张金萍, 李德生, 李安桂. 饮食业油烟净化工艺的新探索[J]. *环境工程*, 2005, 23(2): 45-47.
- [17] 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.
- [18] 黄永海, 易红宏, 唐晓龙, 等. 催化燃烧技术用于油烟废气净化的研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(4): 1270-1277.
- [19] 殷冬媛. VOCs 控制与处理技术综述[J]. *化工管理*, 2018, 491(20): 160-161.
- [20] 马超, 薛志钢, 李树文, 等. VOCs 排放、污染以及控制对策[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(2): 103-109.
- [21] 丁瑶. 餐饮业油烟污染的法律问题研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
- [22] 于季红, 王也平, 卞大伟, 等. 饮食业油烟污染排放标准的比较和探讨[J]. *环境保护与循环经济*, 2016, 36(3): 56-60.
- [23] 李洁, 石文静. 浅谈油烟的危害以及相关标准的修订[J]. *环境与可持续发展*, 2015(4): 123-124.