

基于现场实测的炒菜类餐饮废气排放及静电净化效率评测

何万清¹⁻³, 聂磊¹⁻³, 曲松¹⁻³, 邵霞¹⁻³, 朱利军¹⁻³, 石爱军¹⁻³

- (1. 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037;
2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037;
3. 北京市城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用重点实验室, 北京 100037)

摘要: 为了解静电净化技术对炒菜类餐饮废气的净化效果及随运行时间的变化, 该研究选取一家典型餐饮企业对炒菜灶头进行废气净化改造, 不定期现场跟踪检测净化设备使用前后颗粒物、非甲烷总烃 (NMHC) 和 VOCs 组分的浓度变化。结果表明, 定期清洗维护状态下, 静电净化设备对颗粒物净化效率变化范围为 55.7%~97.3%, 平均净化效率为 85.9%, 净化后平均排放浓度降至 4.0 mg/m³, 颗粒物净化效率稳定且达标; 静电净化设备对 NMHC 的净化效率不稳定, 总体净化效率低于 25%, 净化后 NMHC 的平均排放浓度为 26.0 mg/m³, 仍超过排放标准, 其不是去除餐饮 NMHC 的有效手段, 需要加装其他 NMHC 净化设备; 在组分净化效率方面, 各组分的净化效率变化和差异很大, 这可能与餐饮企业排放过程风速湿度波动大, 产生的污染物浓度组分不稳定以及静电净化器工作过程高压电源产生的臭氧等有关, 需要进一步研究。

关键词: 餐饮; 颗粒物; 非甲烷总烃 (NMHC); 静电净化设备; 净化效率

中图分类号: X511

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022.02.019

Study on emissions from typical cooking catering restaurant and electrostatic purification efficiency evaluation based on field testing

HE Wanqing¹⁻³, NIE Lei¹⁻³, QU Song¹⁻³, SHAO Xia¹⁻³, ZHU Lijun¹⁻³, SHI Aijun¹⁻³

- (1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Center, Beijing 100037, China; 3. Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing 100037, China)

Abstract: In order to understand the effect of electrostatic purification technology on cooking fume and its variations with operating time, this study selected a typical restaurant for the exhaust gas purification transformation, and tested the concentrations of particulates, non-methane total hydrocarbons (NMHC) and VOCs components before and after purification. The results showed that the purification efficiency of the electrostatic purification equipment for particulates varied from 55.7% to 97.3%, and the average purification efficiency was 85.9% under regular cleaning and maintenance. The average emission concentration of particulates after electrostatic purification was 4.0 mg/m³. The concentration of particulates after purification could stably meet the standard emission limit value. The purification efficiency of electrostatic equipment for NMHC was unstable, and the overall purification efficiency was less than 25%. The average emission concentration of NMHC after electrostatic purification was 26.0 mg/m³, which still exceeded the emission standard requirement. Electrostatic purification technology was not effective for removing NMHC, the other NMHC purification equipment was needed. The purification efficiency for each component was different. That was because the ozone generated by the static electricity had different oxidation capabilities for different types of VOCs. It required more research in the future.

Keywords: restaurant; particulates; non-methane Hydrocarbons (NMHC); electrostatic purification equipment; purification efficiency

CLC number: X511

近年来, 随着我国产业升级和经济转型发展的持续推进, 餐饮业作为我国第三产业中的重要组

成, 其产业规模的发展态势逐年高涨^[1-2], 但经济效益增加的同时也衍生出了不容小觑的环境问题。

收稿日期: 2021-01-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0211504)

作者简介: 何万清(1983-), 女, 硕士、高级工程师。研究方向: 大气污染控制。E-mail: hewanqing@cee.cn

通信作者: 石爱军(1972-), 男, 硕士、正高级工程师。研究方向: 环境监测与污染控制。E-mail: shiaijun@cee.cn

引用格式: 何万清, 聂磊, 曲松, 等. 基于现场实测的炒菜类餐饮废气排放及静电净化效率评测 [J]. 环境保护科学, 2022, 48(2): 96-101.

我国餐饮业的经营多集中在城市的中心城区, 烹饪高峰期产生的餐饮废气严重影响着城市的空气环境及附近居民的身体健康^[3-4]。随着以北京、上海为代表的大城市近年来对工业大气污染治理、机动车污染控制和清洁能源替换等政策推进力度的稳步增强, 餐饮废气污染已然成为城市区域颗粒物和挥发性有机物的主要排放源之一, 是与工业废气及汽车尾气一起导致城市空气污染的重要“元凶”^[5-8]。

餐饮废气是食物烹饪过程中挥发的油脂、有机质及其加热分解或裂解的气、液、固三相混合物^[9]。烹饪过程中产生的液态油滴和固态颗粒物不仅会导致城市雾霾^[10-11], 也会诱发人体产生过敏性鼻炎和其他的呼吸道疾病, 生成的气态挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)中还含多种有毒的化学成分, 对人体健康的危害极大, 长期接触甚至有患癌的风险^[12-15]。因此, 必须对餐饮废气污染进行有效的治理。现有的餐饮油烟净化技术主要包括机械分离、静电沉积、湿式洗涤、过滤吸附和UV光解等, 其中静电及以静电为主的复合式为市场的主流技术, 占市场份额的80%以上^[16-19]。然而, 国内尚未对静电净化设备的油烟颗粒物和VOCs的实际净化效果, 以及净化效果与运营维护的变化规律进行研究。

本研究选取北京市一家典型的餐饮企业, 进行不定期的跟踪评测, 研究静电净化设备对实际餐饮颗粒物、非甲烷总烃(non-methane hydrocarbons, NMHC)和VOCs净化效率以及随时间的变化情况。通过掌握静电净化设备对餐饮烟气处理效果和治理前后的组分特征, 以为餐饮企业的净化器选型和清洗维护周期提供依据, 为餐饮烟气控制技术的筛选提供支撑。

1 材料与方法

1.1 餐馆现场情况介绍

本研究选取了一家典型的清真菜馆进行净化设备改造和评测。该餐馆主营各式拉面、盖饭、炒菜和炭火烧烤, 客流量较大。该餐馆后厨分为炒菜厨房和烧烤间2个独立操作间, 烧烤间位于1楼, 炒菜厨房位于2楼, 炒菜厨房和烧烤间排口在3楼顶, 2个厨房的烟气分别独立排放, 楼顶有较开阔的管道设备放置空间和采样平台。本研究仅对炒菜厨房烟气排口的改造进行跟踪评测。炒菜厨房有爆炒小灶2个, 汤灶1个, 烟罩长度3 m, 按照1个

灶头2 000 m³/h标准风量计算, 考虑到管道弯头等阻力以及保证厨房排烟通畅, 最终设计风量为8 000 m³/h, 该厨房选取静电净化技术进行改造, 其设备型号为T1800、风量为8 000 m³/h、设备尺寸为1 316 mm×818 mm×645 mm、电离箱尺寸为365 mm×695 mm×465 mm、高压12 000 V、低压6 000 V、截面风速4 m/s、极板间距7 mm、电离区材质为不锈钢、集尘区材质为航空铝、极板数量2个、高压产生器TW450、绝缘材料为特氟龙。

1.2 设备与材料

设备: QC-2 大气采样仪(北京市劳动保护科学研究所); 大气烟尘气采样仪(青岛崂应环保科技有限公司); 十万分之一电子天平(Mettler Toledo, 瑞士); GC8600 型气相色谱(北京北分瑞利分析仪器有限公司), 甲烷柱为以GDX-502 高分子多孔微球为填料的色谱柱, 长3 m, 内径3 mm; 总烃柱为以硅烷化玻璃微珠为填料的色谱柱, 柱长1 m, 内径3 mm; EM-300 小流量恒流采样器; TD20 热脱附仪(日本岛津); QP2020 Ultra 气相色谱/质谱联用仪(日本岛津)。材料: 特氟龙气袋, 餐饮专用颗粒物滤芯, Carboxen1000D 的组合吸附管。

1.3 采样方案

选取该餐馆营业高峰时段11:30~13:30和18:00~20:00进行采样, 在新安装净化设备的前端和后端的平直管段同时采样, 采样口的设置满足《餐饮业大气污染物排放标准: DB11/1488—2018》^[20]的相关要求。为评估净化设备的净化效率随使用时间的变化, 以及清洗维护对净化设备效率的影响, 本研究在改造后4个月内不定期进行颗粒物和NMHC的排放浓度及净化设备净化效率的评测, 具体的不定期检测方案, 见表1。

1.4 样品采集与分析

颗粒物、NMHC和VOCs组分同时同点采样。颗粒物采用等速采样法, 采集和分析方法参照《餐饮业颗粒物的测定手工称重法: DB11/T 1485—2017》^[21]标准进行, 每个样品采集15 min, 连续采集3个样品作为1组, 取3个样品的平均值作为测试结果。NMHC的采集参照《固定污染源废气挥发有机物的采样气袋法: HJ732—2014》^[22]标准进行, 每个样品采集15 min, 采样体积为10 L, 连续采集3个样品, 以3个样品的平均值作为测试结果。NMHC的分析方法为《固定污染源总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定气相色谱法: HJ38—2017》^[23]。

表 1 静电净化设备评测的不定期检测方案

<i>t</i>	测试项目
第1天	颗粒物和NMHC
第4天	颗粒物
第11天	颗粒物和NMHC
第21天	颗粒物、NMHC和VOCs组分
第31天	颗粒物、NMHC和VOCs组分
第46天	设备清洗维护
第70天	颗粒物和NMHC
第71天	设备清洗维护
第77天	颗粒物
第107天	颗粒物和NMHC
第108天	设备清洗维护
第111天	颗粒物和NMHC
第114天	颗粒物和NMHC

VOCs 组分的采样方法同 NMHC, 其定量分析方法参照《固定污染源废气挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法: HJ734—2014》^[24] 标准进行。现场采集的 VOCs 气袋样品送回实验室后, 在 8 h 内用 EM-300 小流量恒流采样器以 50 mL/min 的流量将气体样品通入内装 Carbopack C+Carbopack B+Carboxen1000D 的组合吸附管 10 min, 加入内标, 装入热脱附仪经气相色谱/质谱联用仪进行定量分析。定量分析的标准物质分别为甲醇中 22 种 VOCs 混标(上海安谱)、乳酸乙酯色标(上海安谱)、苯甲醛色标(Dr.Ehrenstorfer GmbH)和 TO-15 混合标气(美国 Linda, 用到其中的 29 种)。

热脱附仪条件: 一次解析温度 200 ℃, 氦气流量 30 mL/min, 解析时间 5 min, 冷阱聚焦温度-25 ℃, 解析温度 280 ℃, 解析时间 5 min, 传输线温度 200 ℃。色谱条件: 色谱柱 DB-5MS, 60.0 m×0.32 mm×1.0 μm; 载气为高纯氦气, 流速 1.5 mL/min, 分流比 50.0; 进样口温度 200 ℃, 程序升温: 初始温度 35 ℃保持 5 min, 以 6 ℃/min 升温至 140 ℃, 再以 15 ℃/min 升温至 220 ℃, 保持 3 min。质谱条件: 电子轰击源, 电压 70 eV, 全扫描模式, 扫描范围: 35 ~ 300 u, 扫描速度为 1.44 scan/s。四级杆温度 150 ℃; 离子源温度 200 ℃, 传输线温度 280 ℃。

2 结果和讨论

2.1 颗粒物的排放及净化效率分析

炒菜厨房排口静电设备净化前后颗粒物的浓度变化, 见图 1。

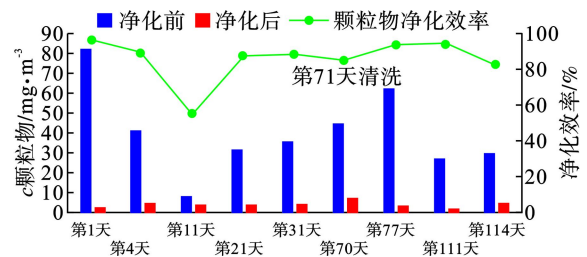


图 1 静电设备净化前后颗粒物的浓度及净化效率

在改造 4 个月内的不定期检测结果中, 净化前颗粒物的浓度变化范围为 8.8 ~ 83.6 mg/m³, 平均为 40.0 mg/m³, 大于文献 [8] 和 [9] 中各菜系颗粒物的平均排放浓度。可见, 未经净化的该餐饮企业炒菜厨房直接排放的颗粒物浓度很高, 全部超出了《北京市餐饮业大气污染物排放标准》^[20] 规定的颗粒物 5.0 mg/m³ 的排放限值, 该餐饮为颗粒物重污染排放企业, 必须安装净化设备。图 1 中第 11 天净化前颗粒物浓度最低, 只有 8.8 mg/m³, 显著低于其他测试时间, 这恰好与当时客流量少炒菜频率低的情况相对应, 可见净化前颗粒物排放浓度受采样时段客流量的影响较大。净化后颗粒物的浓度变化范围为 1.4 ~ 7.1 mg/m³, 平均为 4.0 mg/m³。除第 70 天净化后的颗粒物排放浓度为 7.1 mg/m³ 超出排放限值外, 其他测试时间净化后的颗粒物浓度均低于排放限值。该静电净化设备的应用对颗粒物的净化效果显著, 餐饮企业安装净化设备非常必要。

在颗粒物净化效率方面, 改造后 4 个月内不定期跟踪测试获得静电净化设备对颗粒物的净化效率变化范围为 55.7% ~ 97.3%, 平均净化效率为 85.9%。安装使用第 1 天, 净化效率最高, 达 97.3%, 第 11 天净化效率较低与当天初始浓度较低相关。除第 11 天外, 该静电净化设备对颗粒物的净化效率保持在 83.5% 以上。该净化设备在第 46 天、第 71 天和第 107 天分别由净化设备厂家对净化设备进行专业清洗, 可见该净化设备在 4 个月的跟踪测试期间, 定期清洗的条件下净化效率比较稳定。

为进一步评估净化设备运营维护清洗情况对净化设备的颗粒物净化效率和达标情况的影响, 本研究在第 70 天现场检测发现末端排放超标, 于第 71 天由净化设备厂家专业清洗, 图 1 可知, 清洗前后净化设备对油烟颗粒物的净化效率显著提高, 由 84.2% 升至 94.4% 左右, 颗粒物能够达到新标准规定的排放限值要求。可见, 定期的清洗维护对静电净化设备净化效率的保持至关重要, 根据不定期跟

踪测试结果推荐运维周期为1个月。

2.2 NMHC的排放及净化效率分析

炒菜厨房排口静电设备净化前后 NMHC 的浓度变化, 见图2。

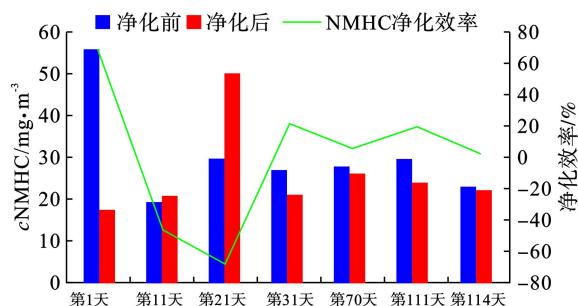


图2 静电设备净化前后 NMHC 的浓度及净化效率

在改造4个月内的不定期检测 results 中, 净化前 NMHC 的浓度变化范围为 $19.7 \sim 55.7 \text{ mg/m}^3$, 平均排放浓度为 30.3 mg/m^3 , 净化后 NMHC 的浓度变化范围为 $18.1 \sim 49.7 \text{ mg/m}^3$, 平均值为 26.0 mg/m^3 , 大于文献[8]和[9]中各菜系 NMHC 的平均排放浓度, 均超出了《北京市餐饮业大气污染物排放标准》[20]规定的 NMHC 10.0 mg/m^3 的排放限值, 可见该餐饮同时为 NMHC 重污染排放企业, 应安装 VOCs 的净化设备。

在 NMHC 净化效率方面, 静电净化设备对 NMHC 的净化效率变化很大, 变化范围为 $-68.8\% \sim 67.6\%$, 除了安装使用第1天测得 NMHC 净化效率最高 67.6% 之外, 其他时间测得的净化效率均 $<25\%$, 有时甚至净化效率低至 -68.8% 。可见, 静电净化设备对 NMHC 的净化效率很不稳定, 有时能够降低 NMHC 浓度, 有时反而增加 NMHC 的排放, 分析其中原因可能有以下几个方面。

(1) 随着静电净化设备的使用, 油滴在极板上聚集增多, 某些油滴有可能发生挥发分解作用, 导致气态污染物增多。

(2) 可能与污染物的排放浓度组分、风速风量变化以及静电净化器工作过程高压电源产生的臭氧等都有关系。有研究表明, 静电净化器的电离能力和产生臭氧的量与电源电压变化和风速变化均有关[25]。静电净化设备的工作原理是通过高压放电产生正负离子, 颗粒物在高压电场的作用下荷电, 然后被极性相反的电极捕获, 从而去除油烟颗粒物[18]。同时, 静电净化器由于高压电源的使用, 会使气体产生电离, 一方面一些大分子的挥发性有机物可能在正负离子作用下断链或氧化分解成小分子有机物, 导致非甲烷总烃浓度升高, 另一方面空气有可能被电离产生臭氧[26], 生成的臭氧会与水分

子发生反应产生羟基自由基, 臭氧和羟基自由基都是强氧化物, 会与 VOCs 发生氧化分解反应[27]。但由于反应机理复杂, 具体反应的产物受臭氧浓度、VOCs 组分和温湿度流速等条件影响, 有可能分解生成小分子有机物增加了 NMHC 的浓度, 也可能彻底氧化分解成 CO_2 和 H_2O , 降低了 NMHC 的浓度。餐饮企业工况不稳定, 排放的污染物浓度组分、风速等都是实时变化, 因此静电净化设备对 NMHC 的净化效率变化较大。

此外, 由于 VOCs 组分非常多, 现有的测试条件仅能测试其中一部分组分, 测试的 VOCs 组分数有限, 有可能存在一部分 VOCs 组分氧化分解成未能测到的组分, 而这部分组分在非甲烷总烃测试时有响应, 导致 NMHC 升高。

2.3 VOCs 组分变化分析

为了解静电净化设备对具体 VOCs 组分的净化作用, 本研究特选取了其中2d单独进行 VOCs 组分采样分析。第21天和第31天静电设备净化前后 VOCs 的组分浓度及占比变化, 见图3。

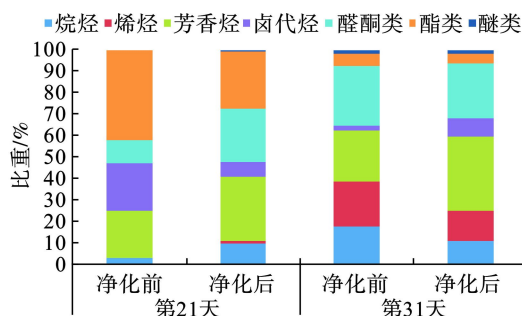


图3 不同时间静电设备净化前后 VOCs 组分占比变化

这2天测得的 VOCs 初始浓度相差不大为 5683 和 $5328 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 但组分构成相差较大。第21天测得净化设备前端 VOCs 组分以酯类、卤代烃、芳香烃和醛酮类为主, 浓度分别为 2367 、 1259 、 1248 和 $607 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 占比分别为 41.6% 、 22.2% 、 22.0% 和 10.7% , 占总浓度的 96.4% ; 而第31天测得的净化前端 VOCs 组分以醛酮类、芳香烃、烯烃和烷烃为主, 浓度分别为 1476 、 1241 、 1119 和 $968 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 占比分别为 27.7% 、 23.3% 、 21.0% 和 18.2% , 占总浓度的 90.2% 。2次测试芳香烃的排放浓度和占比基本一致, 表明芳香烃是餐饮排放 VOCs 较为稳定的排放组分。第21天排放浓度较高的酯类和卤代烃在第31天时浓度仅为 319 和 $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 为第21天测出浓度的 13.5% 和 10.2% 。第31天的主要排放组分烯烃和芳香烃, 在第21天时仅为 7 和 $184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可见, 餐饮企业 VOCs 的组分复杂多变, 不同时间不同工况条件下测得组分组成和浓度均有所差异。

不同时间静电设备净化前后 VOCs 组分及浓度变化, 见图 4。

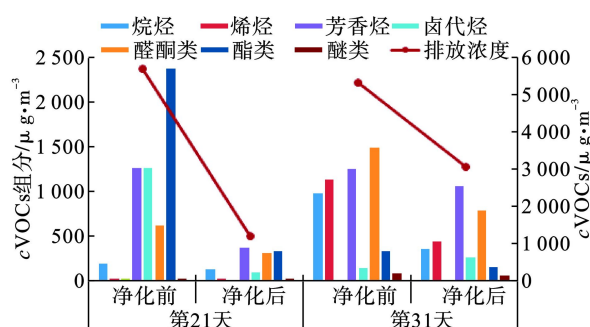


图 4 不同时间静电设备净化前后 VOCs 组分及浓度变化

在组分净化效率方面, 第 21 天净化设备对主要组分的净化效率明显高于第 31 天净化设备对主要组分的净化效率。第 21 天净化设备对总 VOCs 浓度、芳香烃、醛酮类、酯类和卤代烃的净化效率分别为 78.8%、71.0%、50.2%、86.3% 和 93.7%, 而第 31 天净化设备对总 VOCs 浓度、醛酮类、芳香烃、酯类和卤代烃的净化效率分别为 42.7%、47.6%、14.9%、53.3% 和 -95.7%。第 31 天排放的主要组分烯烃和烷烃净化效率分别为 61.2% 和 64.6%, 而第 21 天这 2 类组分的排放很低, 净化效率也很低分别为 -42.8% 和 33.2%。可见, 2 次测试不同组分净化效率差异很大。分析原因可能是不同种类的 VOCs 与臭氧和羟基自由基的反应速率不同^[26], 并且臭氧和羟基自由基对不同组分的氧化反应具有选择性。2 次测试工况条件不完全相同, 温湿度臭氧浓度以及 VOCs 组分浓度不同, 不同 VOCs 氧化分解的程度和产物不同, 从而导致净化效率的差异和变化。

3 结论

(1) 本研究选取的餐饮企业净化前颗粒物浓度变化范围为 8.8 ~ 83.6 mg/m³, 平均浓度为 40.0 mg/m³; 净化前 NMHC 浓度变化范围为 19.7 ~ 55.7 mg/m³, 平均排放浓度为 30.3 mg/m³, 均超过了《北京市餐饮业大气污染物排放标准》的颗粒物和 NMHC 排放限值, 该餐饮企业是颗粒物和 NMHC 重污染排放企业, 是重点改造对象。

(2) 本研究首次对新改造餐饮企业的排放情况进行跟踪检测, 结果表明, 静电净化后颗粒物的浓度变化范围为 1.4 ~ 7.1 mg/m³, 平均值为 4.0 mg/m³, 达到排放标准要求; 静电净化后 NMHC 的浓度变化范围为 18.1 ~ 49.7 mg/m³, 平均值为 26.0 mg/m³, 仍超过排放标准要求, 需要加装其他 VOCs 净化设备

才能达到排放标准要求。

(3) 本研究对新改造静电净化设备进行 4 个月的不定期净化效率跟踪评测, 静电净化设备对颗粒物净化效率变化范围为 55.7% ~ 97.3%, 平均净化效率为 85.9%, 表明静电净化设备对颗粒物的净化效果较好, 定期的清洗维护能确保净化效率稳定, 净化后颗粒物能够稳定达标。

(4) 静电净化设备对 NMHC 的净化效率不稳定不理想, 变化范围为 -68.8% ~ 67.6%, 总体净化效率低于 25%。对 VOCs 各组分净化效率的测试发现, 各组分的净化效率变化和差异很大。这可能与餐饮企业排放过程风速湿度波动大, 产生的污染物浓度组分不稳定以及静电净化器工作过程高压电源产生的臭氧等有关, 需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 黄永海. 餐饮油烟中 VOCs 代表物的排放特征及催化氧化研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [2] 王恒嘉, 王旭, 董大伟. 我国餐饮业大气污染问题与对策研究 [J]. 环境科技, 2019, 32(5): 48 - 53.
- [3] LEE C H, YANG S F, PENG C Y, et al. The precancerous effect of emitted cooking oil fumes on precursor lesions of cervical cancer [J]. International Journal of Cancer, 2010, 127(4): 932 - 41.
- [4] 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.
- [5] 彭亮, 肖乡. 广州市饮食业油烟污染状况及其对空气质量影响分析调查 [J]. 化工管理, 2016(10): 115 - 117.
- [6] 温梦婷, 胡敏. 北京餐饮源排放细颗粒物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.
- [7] HE W Q, SHI A J, SHAO X, et al. Insights into the comprehensive characteristics of volatile organic compounds from multiple cooking emissions and aftertreatment control technologies application [J]. Atmospheric Environment, 2020, 240(2020): 117646.
- [8] 何万清, 王天意, 聂磊, 等. 北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2050 - 2056.
- [9] 孙成一, 白画画, 陈雪, 等. 北京市餐饮业大气污染物排放特征 [J]. 环境科学, 2020, 36(5): 1523 - 1529.
- [10] 张腾, 彭林, 李颖慧, 等. 餐饮源油烟中 PM_{2.5} 的化学组分特征 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(2): 183 - 191.
- [11] 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 等. 餐饮行业细颗粒物 (PM_{2.5}) 排放测算方法: 以上海市为例 [J]. 环境科学, 2018, 39(5): 1971 - 1977.
- [12] 吴禹, 周向东. 烹饪油烟颗粒物对大鼠肺损伤作用的研究 [J]. 中国职业医学, 2007(1): 31 - 33.
- [13] 周美龄. COFs 对肝细胞线粒体损伤及能量代谢障碍机制的研究 [D]. 福州: 福建医科大学, 2015.
- [14] 顾天毅. 兰州市室内典型挥发性有机物污染特征及其健康风险评估 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [15] YIN Z H, LI H, CUI Z G, et al. Polymorphisms in pre-miRNA genes and cooking oil fume exposure as well as their interaction

- on the risk of lung cancer in a Chinese nonsmoking female population[J]. *Onco Targets and Therapy*, 2016, 2016(9): 395 – 401.
- [16] 冯铁成, 易红宏, 唐晓龙, 等. 餐饮油烟污染及其净化技术研究进展[J]. *现代化工*, 2017, 37(3): 20 – 23.
- [17] 李亚倩, 李建军, 李海娇. 餐饮油烟废气污染及其净化技术进展[J]. *四川化工*, 2018, 21(1): 13 – 16.
- [18] 张星, 钱振清, 张德峰, 等. 餐饮油烟排放特征与净化技术研究进展[J]. *环境工程*, 2020, 38(1): 37 – 41.
- [19] 中国环境保护产业协会. 油烟净化类产品认证信息[EB/OL]. [2020-10-20]. <http://www.caepi.org.cn/epasp/website/webgl/webglController/toCprzSearch?dwmc=&zsbh=&cpmc>.
- [20] 北京市环境保护局, 北京市质量技术监督局. 餐饮业大气污染物排放标准: DB11/1488—2018[S/OL]. (2018-01-22)[2020-10-20]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/resource/cms/2018/01/2018012214300944367.pdf>.
- [21] 北京市质量技术监督局. 餐饮业颗粒物的测定 手工称重法: DB11/T 1485—2017[S/OL]. (2017-12-28)[2020-10-20]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/resource/cms/2017/12/2017122813300490092.pdf>.
- [22] 国家环境保护部. 固定污染源废气挥发有机物的采样 气袋法: HJ732—2014[S/OL]. (2015-01-15)[2020-10-20]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201501/W020150115565034743613.pdf>.
- [23] 国家环境保护部. 固定污染源 总烃, 甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法: HJ38—2017[S/OL]. (2018-01-08)[2020-10-20]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201801/W020180108566316243797.pdf>.
- [24] 国家环境保护部. 固定污染源废气挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法: HJ734—2014[S/OL]. (2018-01-08)[2020-10-20]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201501/W020150115570838820656.pdf>.
- [25] 柳静献, 韩永杰, 毛宁, 等. 电除尘器内臭氧产生规律实验研究[J]. *中国环保产业*, 2011(12): 42 – 45.
- [26] 柏婧, 刘俊杰. 静电过滤器产生臭氧的实验研究[J]. *暖通空调*, 2003, 33(6): 20 – 22.
- [27] 唐孝炎, 张远航, 邵敏, 等. 大气环境化学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 156 – 175.

(上接第 88 页)

实现, 菌丝球本身对 EE2 的降解作用几乎为零。pH 的变化对菌丝球吸附 EE2 有明显影响, 当水溶液 pH 为中性偏酸性时, 吸附效果最好, pH=5.6 是其最佳吸附 pH。当 pH 高于中性时, 菌丝球吸附 EE2 的效率有明显下降。

菌丝球吸附 EE2 的效率随着 EE2 初始浓度的升高而提高, 当 EE2 初始浓度超过一定浓度时, 由于传质驱动力的降低, 使得菌丝球吸附 EE2 的效率有明显下降。

菌丝球对 EE2 的吸附作用应当是通过对 EE2 的羟基吸附来达成, 磁纳米颗粒在水溶液中与水的配位作用形成—FeOH 与 EE2 产生吸附位点的竞争, 当 pH>6.5 时, 铁磁纳米颗粒的表面带负电荷, 与表面带正电荷的菌丝球相互之间产生静电吸引, 并随着吸附时间的延长, 由于菌丝球与铁磁纳米颗粒的静电吸引和竞争作用, 已被菌丝球吸附的 EE2 被铁磁纳米颗粒从吸附位点上置换出来, 使得菌丝球对 EE2 的吸附效率明显下降。

参考文献

- [1] 赵立军, 马放, 山丹, 等. 曲霉菌丝球 Y3 对细菌的固定化效能[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(5): 446 – 449.
- [2] KAUSHIK P, MALIK A. Fungal dye decolourization: recent advances and future potential[J]. *Environment International*, 2009, 35: 127 – 141.
- [3] TASTAN BE, ERTUGRUL S, DONMEZ G. Effective bioremoval of reactive dye and heavy metals by *Aspergillus versicolor*[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(3): 870 – 876.
- [4] TUNGITTIPLAKORN W, COHEN C, LION L W. Engineered polymeric nanoparticles for bioremediation of hydrophobic contaminants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(5): 1354 – 1358.
- [5] HU J, LO IMC, CHEN G. Comparative study of various magnetic nanoparticles for Cr(VI) removal[J]. *Separation & Purification Technology*, 2007, 56(3): 249 – 256.
- [6] JJEMBA P K. Excretion and ecotoxicity of pharmaceutical and personal care products in the environment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 63(1): 113 – 130.
- [7] CALDWELL D J, MASTROCCO F, HUTCHINSON T H, et al. Derivation of an aquatic predicted no-effect concentration for the synthetic hormone, 17 alpha-ethinyl estradiol[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(19): 7046 – 7054.
- [8] WANG J N, LI A, YANG J X, et al. Mycelial pellet as the biomass carrier for semi-continuous production of biofloculant[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(40): 18414 – 18423.
- [9] 马放, 周家晖, 郭海娟, 等. 磁性活性炭的制备及其吸附性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(2): 50 – 56.
- [10] 王昌稳, 李军, 赵白航, 等. 颗粒活性炭吸附去除水中雌激素的试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(4): 607 – 612.
- [11] 段妹悦. 絮凝剂对菌丝球的改性研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012.
- [12] 林胜红, 田永强, 刘振飞, 等. 复合菌丝球对孔雀绿的吸附脱色研究[J]. *化学与生物工程*, 2018, 35(5): 59 – 62.
- [13] 张斯. 菌丝球生物载体的构建及其强化废水处理效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [14] 张松. Fe₃O₄ 磁性纳米粒子对黄酮类化合物的选择性吸附研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- [15] 刘冰, 王德平, 黄文岳, 等. 柠檬酸在磁性纳米粒子上的吸附及性能表征[J]. *功能材料*, 2007, 38(7): 1074 – 1077.