



中图分类号: X511

密级: 公开

UDC: 504

学校代码: 10082

# 河北科技大学

HEBEI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 硕士学位论文

### 餐饮业油烟中 VOCs 的 排放特征及其治理技术的研究

论 文 作 者: 郑少卿

指 导 教 师: 段二红 副教授

企业指导教师: 张灵芝 正高工

申请学位类别: 工程硕士

学 科、领 域: 环境工程

所 在 单 位: 环境科学与工程学院

答 辩 日 期: 2017 年 12 月

Classified Index: X511

Secrecy Rate: Publicized

UDC: 504

University Code: 10082

Hebei University of Science and Technology

## Dissertation for the Master Degree

Study on the Emission Characteristics and  
Control Technologies of VOCs from the Cooking Oil Fume

<b>Candidate:</b>	Zheng Shaoqing
<b>Supervisor:</b>	Professor Duan Erhong
<b>Enterprise-based Co-supervisor:</b>	Senior Engineer Zhang Lingzhi
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Speciality:</b>	Environmental Engineering
<b>Employer:</b>	School of Environmental Science and Engineering
<b>Date of Oral Examination:</b>	Dec, 2017



## 摘要

近年来，餐饮油烟污染日趋严重，逐渐成为人们关注的热点。餐饮油烟中除了颗粒物以外，还含有挥发性有机物(VOCs)。研究发现餐饮油烟污染是细颗粒物( $PM_{2.5}$ )的来源之一，且油烟中 VOCs 成分复杂。这不仅直接威胁厨房工作人员的健康状况，而且对区域大气环境质量产生明显影响。因此，开展餐饮油烟中 VOCs 的排放特征及治理技术研究具有重要的意义。

本实验选取石家庄市餐饮业中 5 种典型菜系作为研究对象，对各菜系排放油烟进行采样，分析研究了当前餐饮油烟的排放特征和处理技术现状，并进行了进一步调研，提出了具体的餐饮油烟净化思路。研究的主要结论如下：

本次采样的 5 种菜系油烟中的 VOCs 排放浓度换算成单个灶头基准风量浓度后，浓度最高的是烧烤，为  $12909.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其他从大到小依次为川菜、西式快餐、上海菜、中式快餐，浓度分别为  $7955.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6114.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4141.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3686.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。烧烤油烟中 VOCs 的主要成分为 1-丁烯、丙烯和正丁烷，其排放浓度都超过了  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。非烧烤类菜系中 VOCs 的最主要成分为乙醇（尤其是川菜，其乙醇浓度超过了  $5000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ），其次浓度比较高的成分是戊醛、丙酮、丙烯醛等，它们的浓度都较低。烧烤排放的 VOCs 主要组分是烯烃、烷烃、芳香烃，还有醛酮类化合物，川菜、上海菜和中式快餐所排油烟中的 VOCs 组成比较相似，它们的主要排放组分都是醇类有机物，西式快餐油烟中 VOCs 的主要组分所占比例从高到低依次是醛酮类、醇类和烷烃。

本次采样的 5 种菜系的最终油烟排放浓度均小于  $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，为达标排放。各个菜系餐厅的去除率均达到标准中的要求，且去除率都较高，其从高到低依次为上海菜、西式快餐、中式快餐、川菜、烧烤，其去除率分别为 95.76%、92.29%、92.18%、91.71% 和 87.64%。根据各菜系油烟中 VOCs 成分及排放浓度还有油烟浓度及去除率的分析，可以确定烧烤油烟对周围环境的污染比较严重，是城市油烟污染的重点，应该加强对烧烤类餐厅的管控。其次，是川菜。

通过大范围餐饮业油烟治理及排放情况的调研，发现石家庄主城区及其周边区域大部分餐饮企业均安装了油烟净化设备/净化器，餐饮油烟均经过净化后排放，其中静电油烟净化技术应用较多。但却呈现出净化设备老旧、缺乏维护、上新率低、安装风机的风量和厨房灶头实际所需不匹配等的现象。根据现实需要，提出了一种可与静电油烟净化技术联用的方法以同时去除油烟中的颗粒物与 VOCs 的净化思路。

关键词 VOCs；排放特征；高压静电；餐饮油烟；烧烤

## Abstract

In recent years, the pollution of cooking oil fumes has become serious, and gradually drawing more and more attention. Except for the particulate matter (PM), there is also volatile organic compounds (VOCs) in oil fume. Studies found that cooking oil fume is one of the sources of PM<sub>2.5</sub> and has complicated components of VOCs. This is not only a threat to the health of the kitchen staff, but also has an obvious affection on the quality of regional atmospheric environmental. Therefore, it is of great significance to study the emission characteristics and control technologies of VOCs in cooking oil fume.

The study involved five kinds typical vegetable cuisines, from which oil fumes were sampled in the city of Shijiazhuang. The present situation of emission characteristics and control technology of the cooking oil fume were analyzed. Specific thought of fume purification was proposed. The main conclusions of the study are as follows:

The emission concentration of VOCs in barbecue was the highest, 12909.71  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and others were arranged in order of concentration, the sequence was Sichuan cuisine, western fast food, Shanghai cuisine, and Chinese fast food, concentrations were 7955.32  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 6114.99  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 4141.68  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 3686.23  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. The main ingredients of VOCs in barbecue were 1-butene, propylene and n-butane with a emission concentrations exceeding 1000  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . The main ingredients of VOCs in non-barbecue cuisine were ethanol (especially Sichuan cuisine, with an ethanol concentration of more than 5000  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), and other ingredients were pentoses, acetone and acrolein which were less than ethanol. The main emission components of the VOCs for barbecue were olefins, alkanes and aromatic hydrocarbons as well as aldehydes and ketones compounds. The components of VOCs in Sichuan cuisine, Shanghai cuisine and Chinese fast food were similar in the composition to the former. The main emission components of VOCs of western fast food in the order from high to low were aldehydes and ketones, alcohols and alkanes.

The final emission concentrations of the five cuisines were all less than 2  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , which were all reached the requirements of the emission standard. All the restaurant which were studied had a high oil fume removal efficiency and even met the standard request. According to the removal efficiency of the five cuisines from more to less in proper order were Shanghai cuisine(95.76%), western fast food(92.29%), Chinese fast food(92.18%), Sichuan cuisine(91.71%), and barbecue(87.64%). According to the analysis of the

components of VOCs, emission concentration ,oil fume concentration and removal efficiency, it is concluded that the lampblack of barbecue has a serious impact on the environment, and also the main source of pollution of cooking oil fumes in urban area. It should be strengthen the supervision of barbecue restaurants firstly. Secondly, Sichuan cuisine.

Through a wide range survey of emission and treatment of cooking oil fume in the restaurants, it is found that most of the catering enterprises of the main urban area of Shijiazhuang and its surrounding areas have installed oil fume purifiers, of which electrostatic fume purification technology has been widely used, and all the fume has been released after purification. But there are phenomena in restaurants-agging facilities, lacking of maintenance, upgrading slowly and mismatching of blowing rate of air blower with the practical necessity of the kitchen. According to the actual demand, a purification ideas has been proposed, which combines with electrostatic fume purification technology in order to simultaneously eliminate cooking oil fume such as PM and VOCs.

**Key words** VOCs; Emission characteristics; High voltage electrostatic; Cooking oil fume; Grill

## 目 录

摘要	I
Abstract	III
第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 餐饮油烟及其危害	2
1.2.1 餐饮油烟的形成及组成	2
1.2.2 餐饮油烟的危害	3
1.3 餐饮油烟的控制技术	3
1.3.1 静电沉积法	3
1.3.2 过滤法	4
1.3.3 湿式法	4
1.3.4 氧化焚烧法	5
1.4 餐饮油烟中 VOCs 的控制技术	6
1.4.1 吸附技术	6
1.4.2 吸收技术	7
1.4.3 燃烧技术	7
1.4.4 生物技术	8
1.4.5 催化技术	8
1.5 国内外研究现状	9
1.6 研究目的及意义	9
1.7 研究内容与技术路线	10
1.7.1 研究内容	10
1.7.2 技术路线	10
第2章 典型餐饮业油烟中 VOCs 排放特征研究	11
2.1 实验部分	11
2.1.1 实验试剂与仪器设备	11
2.1.2 实验步骤与方法	12
2.2 结果与讨论	14
2.2.1 典型菜系油烟中 VOCs 排放浓度及影响因素	14
2.2.2 典型菜系油烟中 VOCs 组分构成	18
2.2.3 净化前后油烟浓度及去除率	20

2.3 本章小结.....	22
第3章 餐饮业油烟治理调研.....	25
3.1 实验部分.....	25
3.1.1 调研时间.....	25
3.1.2 调研地点.....	25
3.1.3 调研对象.....	25
3.1.4 调研内容.....	25
3.2 结果与讨论.....	25
3.3 本章小结.....	26
第4章 新型复合油烟净化器设计.....	27
4.1 净化思路及流程.....	27
4.2 净化技术原理.....	28
4.2.1 油烟气体过滤原理.....	28
4.2.2 静电捕集原理.....	28
4.2.3 催化臭氧氧化原理.....	29
4.3 设计参数.....	29
4.4 高压静电模块计算.....	30
4.4.1 临界起晕电晕场强度的计算.....	30
4.4.2 临界电压.....	30
4.4.3 电晕电流.....	31
4.4.4 电场强度.....	31
4.4.5 粒子在电场中的驱进速度.....	31
4.5 高压静电模块总体设计.....	32
4.5.1 吸附极比表面积.....	32
4.5.2 吸附极板总面积.....	33
4.5.3 验算除尘效率.....	33
4.5.4 有效截面积.....	33
4.5.5 吸附板有效宽度.....	33
4.5.6 净化器模块内通道数.....	34
4.5.7 电场有效高度.....	34
4.5.8 电场长度.....	34
4.5.9 气体在净化器电场内的实际速度.....	34
4.5.10 气体在有效电场内的停留时间.....	34
4.5.11 净化模块实际具有的净化面积.....	34

4.5.12 荷电区的通道数.....	35
第 5 章 展望与不足.....	37
结 论.....	39
参考文献.....	41
致 谢.....	45

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景

“民以食为天”，作为农业大国，中国人重视农业发展，同时也关注一日三餐，这也是我国悠久的餐饮文化的缘起。基于经济的发展，如今我国餐饮行业迎来新的发展机遇，大街小巷，餐馆酒店遍布，在人们饮食得到保障的同时，餐饮污染问题也引人关注。餐饮污染包括多个方面的内容，既有空气污染，又有水资源污染，还有噪音污染<sup>[1]</sup>。在餐饮行业为地方经济发展做出贡献的同时，政府部门也接收到不少有关餐饮行业的投诉，其中油烟排放污染投诉事件占餐饮污染投诉事件的40%以上<sup>[2]</sup>，可见，餐饮油烟污染问题已成为人们关心的一个焦点话题。

有研究表明：城市环境调查报告显示，在城市污染中空气污染最为突出，而造成空气污染的几大因素中，餐饮行业所产生的油烟污染占有一定比例，近些年，VOCs排放问题备受关注<sup>[3,4]</sup>。在环保部门空气检测中，PM<sub>2.5</sub>是空气质量的重要衡量指标，也是人们评价城市空气质量的主要依据，在PM<sub>2.5</sub>污染物构成中除了常见的工业等污染源以外，餐饮油烟也被纳入其中，成为重点关注对象。相较于扬尘等污染源，餐饮行业所排放出的油烟中相关物质更为复杂，并且许多物质在性质方面不稳定，在一定情况下还会发生反应，形成新的污染物，从而造成二次污染<sup>[5,6]</sup>。

近些年来，国家和地方相关部门采取并制定了一系列措施应对餐饮油烟排放超标问题。早在上世纪九十年代，国内就已针对餐饮行业油烟排放问题进行了研究，并就标准制定向社会征询意见。本世纪初，现相关标准已经被发布，并且在餐饮行业中予以实施应用，即《饮食业油烟排放标准-GWPB5-2000》；随后该标准被完善修改，采用国家标准对油烟排放进行控制，同时，针对餐饮行业中所应用到的净化标准，国家相关部门也结合当前环保要求，就设备技术规范进行了明确，并发布了相关规范要求<sup>[1]</sup>。

目前，对餐饮行业油烟排放进行规范的主要规制便是《饮食业油烟排放标准（试行）》GB18483-2001，该标准立足于国内实际情况，结合我国环保部门环境保护方面的总体要求，结合我国餐饮行业油烟排放实况，制定除了适合我国餐饮行业的油烟排放标准。此标准中就餐饮行业发展提出了要求，指出运行中的餐饮单位必须要加装油烟净化设施，确保其排放到空气中的油烟符合国家标准，现就油烟排放的相关要求进行说明，如表1-1所示：

表 1-1 餐饮业油烟排放标准<sup>[7]</sup>

基准灶头数	$\geq 1, < 3$	$\geq 3, < 6$	$\geq 6$
额定处理风量/ (mg/h)	$\geq 2000, < 6000$	$\geq 6000, < 12000$	$\geq 12000$
油烟最高允许排放浓度/ (mg/m <sup>3</sup> )		2.0	
油烟净化设施最低去除率/%	60	75	85

尽管，国内已经认识到了油烟排放对空气的危害，然而在其排放特征、理化特性、治理技术等方面的研究尚显薄弱。科学评估一个城市的餐饮业油烟排放对空气的影响，对人们健康的危害，并且立足于现状，就城市区域油烟排放的相关情况进行了解，主要是排放特征、排放净化等方面，并结合现状进行思考，从而确定出针对性较强的防治措施，促使烟油污染问题能够得到有效的控制，确保空气清洁度能够得到有效的改善，建设生态文明美丽中国，具有重要而紧迫的意义。

## 1.2 餐饮油烟及其危害

### 1.2.1 餐饮油烟的形成及组成

所谓油烟，主要是指在进行食物烹制过程中，所产生的各种裂解产物，该种污染物中包括了三种不同形态的物质，均是烹制材料在高温作用下所形成的<sup>[4]</sup>。具体表现为：当烹制温度达到 100 摄氏度，则烹制所采用的油料会出现汽化现象，小分子物质散发；而随着温度继续升高，在 260 摄氏度以内，则高沸点物质也将会出现汽化现象，而此时油料将会出现一些能够被看见的油烟散发到空气中，经过检测发现，此时散发出的颗粒物直径多为 3~11 μm；当温度继续升高，则油料中绝大多数大分析物质都将会出现汽化，并且反应极为剧烈，还将会形成油烟气溶胶<sup>[2,8]</sup>。当气体离开锅体之后，其环境温度将会下降，湿度也会出现变化，逐渐形成由各种冷凝物及物质构成的混合物，即为人们所知的餐饮油烟<sup>[9]</sup>。

通过上述叙述，不难发现，油烟属于混合其中所包含的物质成分较多，并且基于环境作用，不同物质之间还会发生反应从而形成新的物质，这些物质中不乏一些毒害成分，为此，在对其进行分类研究时，工作极为复杂。当烹饪过程中，所采用的多是动植物油脂或蛋白质，那么所产生的一般都是有机烟气、一些因高温氧化而得到的高分子化合物以及物质燃烧所得到的气体污染物<sup>[10]</sup>。如果在烹饪过程中，有使用到重油，则在烹制过程中还有可能产生一些烃类、芳香族化合物等，据不完全统计，相关物质总数超过了 310 种。同时，研究人员在研究过程中，还发现油烟中还含有一些诸如苯并芘之类的致癌物质<sup>[11]</sup>。在实际研究过程中，研究人员发现，餐饮油烟中含有大量大分子有机物，并且类别极为丰富，除了各种烃类，还有醛类等，

以及极少量的卤代烃和呋喃，其中醛类含量占比较大在 20%以上且也是油烟臭味的主要来源。

## 1.2.2 餐饮油烟的危害

### 1.2.2.1 油烟对环境的影响

餐饮油烟中的烃类化合物被排放到空气中后，如果与氮氧化合物在特定条件下发生反应，则会产生化学烟雾，其所依赖的条件，主要是紫外线作用，而基于大气层破坏问题，紫外线增强，为此，其反映条件可以达到。为此，不少研究人员认为城市中的雾霾之所以会如此严重，与餐饮油烟的排放也有一定的关系。根据香港排放清单研究数据表明，餐饮业 VOCs 和 PM<sub>2.5</sub> 的排放分别占其排放总量的 1.07% 和 4.16%；根据杭州市所公布的排放清单来看，在杭州 PM<sub>2.5</sub> 排放物组成中，以餐饮为代表的行业所产生的物质就已经占据了 6%；而法国方面与 2001 年也就其 PM<sub>2.5</sub> 排放清单进行了公布，相关数据显示，餐饮污染物数量已经占据了 3%。从上述数据不难看出，在 PM<sub>2.5</sub> 所测定的颗粒中，餐饮行业所产生的物质已经占据了相当一部分比例，是造成空气污染的主要原因之一，需要得到人们的广泛关注，并进行严格的控制。

### 1.2.2.2 油烟污染物对健康的影响

餐饮油烟不仅会对空气造成污染，同时还会对人们的身体健康产生直接的影响，其主要是作用与人体的呼吸道，促使呼吸道粘膜受伤这种危害具有潜在性，可能会引起鼻炎、咽喉炎、气管炎等呼吸道疾病。还可能会导致哮喘恶化。科研人员在研究中了解到<sup>[15,16]</sup>：当人体吸入过多的餐饮油烟时，则体内的免疫细胞的能力将会受到影响，从而影响到人体的免疫能力。此外，油烟中还含有一些致癌物质，这些物质会使人体免疫力下降，并且具有致癌致突变型，奉水东<sup>[17]</sup>在调查研究中发现，导致肺癌的主要因素除了吸烟之外，还与烟油作用有着重要关系，基于烟油污染的加重，肺癌产生的几率也会变大。若油烟颗粒附着在女性的皮肤上就会造成毛孔堵塞，加快皮肤老化，导致皮肤变粗糙，出现皱纹、出现色斑等。

## 1.3 餐饮油烟的控制技术

### 1.3.1 静电沉积法

静电沉积法<sup>[18]</sup>的作用原理主要是借助电场力，促使油烟中的相关物质失去挥发性，从而实现沉积，作用原理上来看，其与静电除尘有着类似之处。在采用静电沉积法对油烟中相关颗粒进行作用时，气体分子的电离、油烟微粒获得离子而荷电、荷电微粒向电极移动和油水混合液利用重力作用顺排泄孔排进收集器。最终可达到与气体相分离的目的。

影响静电式油烟净化设备的关键因素包括电极栅结构、尺寸、高压电源及电场

数量等。理想的高压静电油烟净化器的电极栅结构能把油烟颗粒充分极化和收集，并且净化器的极化区和收集区要分开<sup>[19]</sup>。高压静电技术应用过程中，一些直径较小的粉体颗粒物将会被有效捕获，从而能够实现对一些油雾颗粒处理，此外，该技术的应用还能够对烟油的气味产生作用，从而去除一些刺激性气味。

### 1.3.2 过滤法

过滤法的工作原理是利用纤维垫等材料作为滤层，使油烟粒物在碰撞、拦截和扩散作用下被捕集于滤料中得到净化<sup>[22]</sup>。过滤技术影响去除效率主要因素有：滤料孔隙大小、厚度、颗粒物粒径以及过滤风速等。

过滤技术的净化效率一般在 80%~90%之间。并且技术所需要花费的资金较少，在操作上具有便捷性，能够高效的吸附颗粒物。但是该技术应用过程中，所需要占据的空间较大，同时，设备容易损坏，尤其体现在滤网上，容易堵塞，并且不能清洗，故只能用新的滤料将其替换，这不仅增加了滤料的用量，同时设备滤网更换也会较为频繁。对于更换下来的滤网，还需要对上面的沉积物进行清除，而这需要花费一定的人力和清洁原料，故而也会增加过滤成本。正因为这样，过滤技术在一般的餐饮单位中不会被采用，而对于一些大型餐饮单位，则往往会考虑该种技术。

### 1.3.3 湿式法

#### 1.3.3.1 水溶液吸收法

该种方法的主要作用原理是通过除油剂、去味剂作用，促使油烟中的油性物质能够得到溶解<sup>[23]</sup>，并且对油烟中的味道进行处理，该种水溶液在使用过程中可以反复利用。在当前的餐饮行业中，采用较多的是运水烟罩，其处理效果较好，并且成本不高。为了保证该种净化方法的净化效果，操作人员还需要对相关因素进行控制，从而促使效果达到最佳，一般来说可控制的因素主要有喷水量、水滴直径等，研究发现当水滴直径控制在 200~450 μm 范围时，除油效果最好、效率最佳最高，除油效率还随喷水量的增加而提高。

采用水溶液吸收法设计而成的油烟净化器在造型上并没有固定性，可以根据餐饮单位的具体情况对其造型进行设计。基于该种净化方法在油烟净化中的广泛应用，相关技术已经足够成熟，在技术工艺上也得到了优化，净化效果也得到了明显的提升。同时，人们还将各种净化方法进行结合，从而促使净化效果更佳，水溶液吸收法也曾与其他的方法进行结合使用，一般多与过滤技术结合，即在水淋之前加之过滤网，从而对烟油进行先行净化；还可以与超声波发生器进行结合使用，从而增大吸收率。典型的水溶液吸收式油烟净化器的结构如图 1-1 所示。

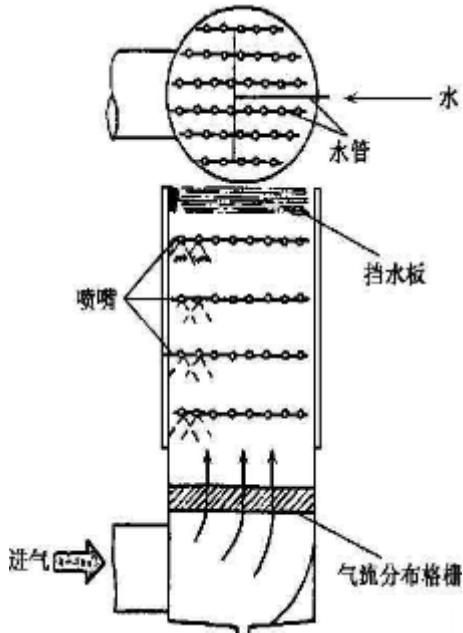


图 1-1 水溶液吸收式油烟净化器

大致流程为：油烟首先经过分布格栅，而后均匀通入净化器，净化器将会对油烟进行洗涤，从而促使其得到净化，此时，高压喷嘴还会制造出水雾，从而促使颗粒能够被捕获，实现进一步净化，经过净化的气流通过挡水板除去水雾后排出。

与其他净化方法相比，水溶液吸收法具有抽风阻力较小（通常为 250~500 Pa），耗费资金较少、操作简单、维修成本低等优势，其不足之处主体体现在运行成本大，不能够有效清除直径超小的颗粒。水溶液吸收式油烟净化器需要定期更换洗涤液，洗涤液由于吸收了油烟烟气中污染物不能直接排入下水道，需要经过油水分离装置处理后循环使用，否则会出现二次污染问题。

### 1.3.3.2 水膜湿法

现对其作用机理进行分析：采用该种技术方法对油烟净化时，其从筒下进入，烟油上升成螺旋趋势，在此过程中，一些大颗粒物质在离心力作用下将会被清除，吸附在筒壁之上<sup>[24]</sup>，最后流经筒底，被排出。该技术中的水膜实际就是高压之下喷嘴喷出的水流或水雾，在持续作用之下，这种水膜处于流动状态，能够有效的清除油烟中的颗粒。

该种净化方法相对来说能够对油烟进行高效净化，并且技术成本不高，能够为中小型餐饮单位所接受。但该技术在具体应用过程中对场地具有一定的要求，小面积场地不能够满足安装要求，此外，该技术应用时还可能会产生二次污染。就目前的应用情况来看，该技术应用较为广泛，但是基于设备的差别，在不同餐饮单位该技术的净化效果也各不相同。

## 1.3.4 氧化焚烧法

该种净化方法的主要原理是对油烟中的一些毒害成分进行氧化，从而致使其生

成安全性较强的物质。基于作用原理，该种净化方法的实施较为复杂，作用过程更加繁琐。氧化焚烧法根据技术的不同，还可以进行分类，最为常见的就是直燃式燃烧炉技术，该技术主要是将油烟和其它其他进行混合随后通入炉内进行充分燃烧，从而促使油烟中的颗粒能够得到一定程度的控制，促使油烟的气味能够得到改善。但是需要注意的是，采用该技术进行油烟净化时，必须要保证燃烧过程中氧气量的充足性，从而改善作用效果，保证燃烧的完全性。在一些餐饮单位中，为了促使燃烧过程中的热量能够得到充分利用，对设备进行改善，从而形成了多级燃烧系统[25]。

该种净化方法的应用具有一定的局限性，一般多用于油炸类餐饮单位，为此，更加适合西餐，而中餐则不尽然，我们的烹调方式多种多样，决定着与西方餐饮油烟性质存在很大的差异。因此，这种技术总体上不大适合我国的国情，适用范围比较狭窄。

## 1.4 餐饮油烟中 VOCs 的控制技术

在油烟成分职工，有机物占据了较大的比例，并且多数都具有挥发性，为此餐饮油烟一般都带有刺激性的气味，这也是引起人们厌恶的主要原因之一<sup>[26]</sup>，为此在对油烟进行处理的过程中，带有挥发性的有机物必须要作为处理的重点对象。一般来说，与其有关的处理措施分为两大类：回收技术和破坏性技术<sup>[27]</sup>。回收技术是指通过一些物理办法对物质进行处理，一般包括有过滤、吸附等，从而实现有机物的分离，从而实现处理有害物质，循环利用可用资源的目的。前文中所提到的过滤、吸附方法便属于此类。破坏技术是指通过一些的技术，一般是指化学方法对有机物进行处理，从而促使原物质发生反应，转变其他的物质，经过处理之后，原物质将不复存在，而留下的新的物质。一般常见方法为离子体技术。具体方法的选择还需要根据污染物中所包含的挥发性有机物的相关情况来进行具体的选择<sup>[28-30]</sup>。

### 1.4.1 吸附技术

吸附法去除 VOCs 的原理是利用吸附剂(如活性炭、炭纤维、沸石等)丰富的孔径结构将 VOCs 分子截留，而达到净化废气中 VOCs 的目的。吸附法具有成本低廉、能耗低、操作简单等优点，被广泛应用于低浓度、高通量挥发性有机物处理<sup>[31,32]</sup>。吸附技术可分为固定床吸附、流动床吸附和浓缩轮吸附等技术。

吸附技术应用中的一个关键问题是吸附剂的选择。一般要求吸附剂要具有比较大的比表面积和丰富的孔隙结构、稳定的化学性质、耐高温高压、耐酸碱以及比较大的吸附容量。目前，活性炭和沸石分子筛的应用在市场上已经相对饱和，但它们存在这易燃、易堵塞等不足，同时在技术应用上还会涉及到较高的成本。相比较之下，海泡石则具有更多的优势，该种材料的储量较为丰富，市场价格较低、热稳定

性好、环境友好等特点。海泡石进行简单的加工改良之后，其物理性质将会得到改善，从而形成个具有吸附力的孔隙结构，实现对有机物的有效吸收，是一类极具开发潜力的吸附材料，近些年得到不少学者的研究和开发<sup>[33-35]</sup>。

### 1.4.2 吸收技术

吸收技术一般又被称为液体吸收技术，其作用原理就是化学中的相似相容，即到粒子在结构上相似，则相互之间的作用力将会增强，如果在对有机物进行处理的过程中，借助一些与其结构相同的粒子对其实施作用，则能够促使其对有机物进行强有力的吸附，从而保证有机物得到有效的处理。该技术中常被选用的吸收剂多为有机溶剂，通过有机溶剂的作用，进入其中的有机物质将会被吸收，从而得到处理。在油烟净化作业中，该技术主要是用于一些具有特殊性质的挥发性有机物，该类有机物的浓度、压力均偏高，但是温度较低<sup>[36]</sup>。

吸收技术的作用效果如何往往取决于吸收剂、吸收装备，为此，为了保证吸收效果，还需要对吸收剂和吸收装备进行选择。最关键的是要选择合适的吸收剂。理想的吸收剂的应该具有选择性强、无毒、对 VOCs 溶解度大以及化学稳定性好等特点。李湘凌<sup>[37]</sup>在对吸收技术进行研究时，采用柴油作为吸收剂，发现其净化率高达 87.6%。肖潇<sup>[38]</sup>等用氟碳微乳液吸收处理甲苯，在工艺条件为进气甲苯浓度小于 4000 mg/m<sup>3</sup>、吸收液温度小于 30℃、处理容量为 1~2 m<sup>3</sup>·(kg·h)<sup>-1</sup> 时，则气体中的甲苯将会得到有效的控制，被净化的甲苯占据了 91%，满足排放要求。

### 1.4.3 燃烧技术

燃烧法是利用燃烧室内的高温使废气完全燃烧，最终废气被分解为水和二氧化碳的过程。其主要适用于处理挥发性有机物气体浓度比较高、成分比较复杂的情况。基于燃烧机理的不同，则可以分为直接燃烧、热力燃烧和催化燃烧三类。

当采用直接燃烧法对挥发性有机气体进行处理时，则是将其作为燃料进行燃烧，工艺简单、净化效率高。直接燃烧的运行温度一般>750 ℃，当温度高于 1100 ℃时，可使废气中挥发性有机物的去除率达到 95%<sup>[39]</sup>。其缺点是将会消耗大量的能量，同时还可能会对空气造成二次污染，直接燃烧技术的应用还需要满足一定的条件，即挥发性有机气体的浓度大于 1000 ppm，只有满足此条件情况下，则其可以提供自身燃烧所需要的能量，如果不能达到此要求，那么使用直接燃烧技术则需加入其他的辅助燃料<sup>[40]</sup>。热力燃烧法则是借助辅助性的燃料促使挥发性有机气体的氧化分解具有足够的热量，其完全分解所需要的条件是温度维持在 740~830℃，该种技术一般都是对低浓度的物质进行作用，其在应用过程中的不足在于前期预热过程中需要消耗较多的能量，同时当不能实现完全分解时，还会生成一些带有刺激性气味的气体<sup>[41]</sup>。催化燃烧法则主要是通过催化剂作用，促使氧化过程中的活化能得到控制，从而促

使反应效率得到改善，将其转化成无害物质的一种技术。尽管改善技术在能耗上较低，但是作用中所应用的催化剂较为昂贵，尽管催化剂不参与反应能够多次应用，但在操作过程中，如果因为操作失误导致催化剂中毒，则需要进行更换，这必将会带来一大笔费用，无疑增加了净化成本<sup>[42]</sup>。Guilin Zhou<sup>[43]</sup>等人研究发现，CAT350 催化剂具有比 CTA250, CAT300 和 CAT400 催化剂更高的甲苯催化燃烧活性。在 235℃ 下，CAT350 催化剂的甲苯催化燃烧转化率超过 93.5%。但需要注意的是，在此过程中必须要保证燃烧的充分性，避免因为不完全燃烧而造成毒害性更强的污染物产生。诸如吠喃等<sup>[44]</sup>。

#### 1.4.4 生物技术

生物技术<sup>[45,46]</sup>在当前的污染物处理技术中是十分热门的，同时也是人们研究部的重点对象，该技术主要是借助一些微生物作用，促使挥发性有机物能够实现自然分解，从而得到净化处理。常见的生物技术一般包括三种，分别是过滤、洗涤、滤床。生物技术处理的最大优势在于其处理的效果十分明显，并且所需要的条件容易满足，在处理过程中能量能够得到充分利用，不需要过高的处理成本，还有效的避免了为此污染的产生，为此成为人们研究的重点对象之一。但是不足之处就在于生物技术的作用进程较长，效率降低，不能够满足人们的处理要求，同时处理过程对微生物的<sup>[47]</sup>还具有较高的要求，而微生物对生存环境也具有一定的要求，当环境出现变化时，则微生物的生存将会受到影响，为此该技术的应用还具有一定的局限性，是人们当前研究的重点之所在。

#### 1.4.5 催化技术

催化技术具有反应条件温和，该技术的应用能够实现对多种物质的同步讲解，从而提高讲解效率。与一般技术相比，催化技术在成本上较低，并且对运行费用的需求较小，操作人员在技术实施上也较为简单，其应用一般多针对浓度小于 1000 mg/m<sup>3</sup> 的挥发性有机物<sup>[48,49]</sup>。刘文举等<sup>[50]</sup>曾在此方面进行研究，其研究的重点主要是一些非贵金属催化剂，这些催化剂的成本相对较低，并且制备过程中不是十分复杂，为此实用性较强。在进行研究时，其选择微波升温，对相关元素的氧化物效果进行观察，其主要观察的是元素周期表中的 V 族、VB 族、B 族，通过大量的观察实验，其发现，Co、Ni、V 表现较为明显，其中 V 的氧化物，负载型 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 作为催化剂时，其相关性能则较为稳定，而向其中加入 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 时，则其催化效果较好，研究数据表明，微波条件下，当温度控制在 150 摄氏度，La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 1% 时，则净化率可以超过了 89%，净化效果较为明显。照此来看，想要促使该项技术能够得到很好的应用，确保净化效果，还必须要对催化剂进行深入研究，从而获取到一种更加适合，成本更低的催化剂。与 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 不同的是，VOCs 则是采用贵金属制作而成的，是其具有

活性的主要原因之一，这种催化在活性上要优于非贵金属催化剂，并且在使用期限上也具有一定的优势，也曾得到人们的高度重视，但基于制造成本偏高，为此，在应用上也具有一定的局限性，不能实现广泛应用。

## 1.5 国内外研究现状

面对空前的油烟污染问题，世界各国专家都在油烟治理方面开展了大量研究。各相关部门都对油烟的排放制定了相应标准。美国于 1996 年制订了第一部限制餐饮油烟排放的地方标准。时至今日，我国已经颁布了《饮食业油烟排放标准（试行）》。

由于烹饪方式的不同，国外一些国家烹调食物时使用的食用油较少，油烟排放浓度较低。一般较大规模的餐饮企业会采用氧化焚烧法，中小餐饮业采用催化净化法。氧化焚烧法处理餐饮油烟的效率可达到 90% 以上，该方法的缺点是设备占地面积大，设备费用高，运行成本也比高，不适合中小型参与企业。催化氧化法利用的原理是将油烟气中有机成分在催化剂的作用下，分解为对环境无害的二氧化碳和水。Cordi E M 使用基于氧化铜及兰氧化二侣的催化剂对气体有机物进行瞬间氧化的研究取得看一定的突破。

由于我国的烹调习惯会产生大量的油烟，所以在大部分国内餐饮企产生的餐饮油烟量及油烟浓度都比较高，而且上述的国外先进的焚烧法和催化法技术复杂，不适合我国国情。目前国内餐厅多采巧经济实用，技术较为简单的油烟净化方法进行油烟的处理。比如上面提到的分离法、液体清洗法、静电沉积法以及两种或者两种以上的油烟净化技术进行合理的结合的复合法。

## 1.6 研究目的及意义

餐饮业排放的油烟不仅危害人体的健康，还引发了一系列的环境污染问题、社会问题。钱佳与李强<sup>[51,52]</sup>等人对 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物的组成进行了深入研究，其以武汉、济南为研究地，就两个城市中 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物的组成进行分析，发现颗粒物中很大一部分来自于餐饮单位的油烟，两城市所占据的比例分别为 14.16%、4.1%，基于 CMB 模型源对其进行分析，发现在武汉市中，来源于餐饮行业的颗粒物远大于机动车排放所造成的颗粒物。由此可见，餐饮行业所造成的污染问题已经不容忽视，需要进行深入的研究。

笔者以石家庄市为研究对象，就该市餐饮油烟排放问题进行调查，就油烟处理装备的应用情况进行研究，并更具调查结果进行分析，从而就餐饮油烟净化装置进行设计，从而促使餐饮行业能够拥有一款更加适合行业发展的净化装备，从而促使该市油烟净化工作的进行，从而为其空气清洁工作贡献力量。同时，该项工作的开

展，还有助于为油烟污染的研究获取相关信息，为今后研究工作的进一步深入夯实基础。

## 1.7 研究内容与技术路线

### 1.7.1 研究内容

在调查过程中，通过监测技术，笔者就该市餐饮油烟排放情况进行了全面调查，研究当前餐饮油烟的排放特征，就当前餐饮行业中所应用到的处理技术进行了解，从而为新型净化装置的设计做好准备。

具体如下：

对石家庄典型餐饮行业（中式快餐、西式快餐、烧烤、川菜、上海菜）进行到访调查，并就具体的餐饮单位进行个案分析，从而获取到各菜系烹制过程中释放油烟及油烟中 VOCs 的浓度水平和组分构成。将油烟污染比较严重的菜系，确定为重点管控对象。

进行大规模的调查，从而了解整个餐饮行业油烟排放情况，并结合净化工作，整理出相关思路，从而为科学治理工作提供意见。

设计一种新型复合型油烟净化装置。

### 1.7.2 技术路线

本论文研究的技术路线如下图框图 1-2 所示。

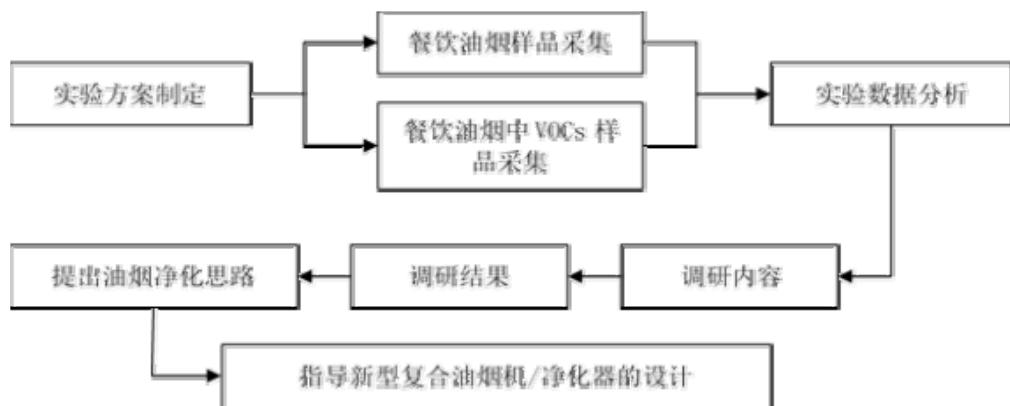


图 1-2 技术路线

## 第2章 典型餐饮业油烟中 VOCs 排放特征研究

本章以石家庄市调查地，研究了五种菜系，分别是中式快餐、西式快餐、川菜、上海菜和烧烤，在研究过程中，为保证研究结果的准确性，特借用 EPA，就 VOCs 实施采样分析，从而了解餐饮业各菜系排放的油烟浓度及油烟中 VOCs 的浓度水平和组分构成。

### 2.1 实验部分

#### 2.1.1 实验试剂与仪器设备

本章实验所用主要实验试剂、规格及生产厂家见表2-1。本章实验所用主要仪器/设备见表2-2。

表 2-1 试剂

原料与试剂	规格	生产厂家
四氯化碳	分析纯	天津市科密欧化学试剂有限公司
二硫化碳	分析纯	天津市科密欧化学试剂有限公司

表 2-2 主要仪器/设备

仪器名称	型号	生产厂家
红外分光仪	TJ270-30A	天津天光光学仪器有限公司
超声清洗器	SG5200HBT	上海冠特超声仪器有限公司
不锈钢采样枪与滤筒	TH-D47	武汉市天虹仪表有限责任公司
容量瓶	25mL、50mL	石家庄现代仪器仪表化工有限公司
比色管	25ml	石家庄现代仪器仪表化工有限公司
聚四氟乙烯圆柱形套筒	2812-259	英国 Whatman
烟尘测试仪	TH-880F	武汉市天虹仪表有限责任公司
分析天平	EL204	梅特勒-托勒多仪器（上海）有限公司
活性炭吸附柱	木质柱状活性炭	石家庄现代仪器仪表化工有限公司
锥形瓶	250ml	石家庄现代仪器仪表化工有限公司
抽滤装置	SHZ-DIII 防腐型	杭州振和科学仪器有限公司
旋转蒸发装置	RV10	艾卡（广州）仪器设备有限公司
气相色谱质谱联用仪	GC-MS-QP 2010Plus	岛津企业管理（中国）有限公司

## 2.1.2 实验步骤与方法

### 2.1.2.1 样品采集

选取餐饮业中中式快餐、西式快餐、川菜、上海菜和烧烤 5 种典型菜系作为采样对象。采样口的设置参照文献 (GB 18483-2001, 食行业油烟排放标准 [S]) 的要求, 取用餐高峰时间进行了连续性采样, 并记录了采样时段的油烟气实测风量等相关信息, 所选餐饮业的基本信息和采样时段相关信息见表 2-3。

表 2-3 采样餐饮企业的基本信息

菜系	餐位/个	上座量/%	灶台数/个	燃料	实际风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
中式快餐	160	90%	4	天然气	5498.0
西式快餐	100	60%	3	天然气	6068.4
川菜	260	80%	8	天然气	9047.8
上海菜	200	70%	4	天然气	8425.7
烧烤	100	90%	3	木炭	6920.2

根据 GB/T 16157-1996 中的烟尘等速采样的步骤进行采样。采样基本步骤具体如下:

- (1) 将不锈钢采样枪和烟尘采样器连接好, 并且在两者中间连接活性炭吸附柱。
- (2) 在采样之前, 先检查一下装置的气密性是否良好。
- (3) 将干球、湿球温度、湿球负压和大气压这些参数在采样器上进行相关设置。然后将烟道的形状及面积、还有烟气的温度以及烟气的动、静压等各项条件参数测定出来并在采样仪上进行相关设置。
- (4) 将采样枪放入烟道内, 根据烟尘采样器的推荐来确定等速采样流量及采样嘴直径。
- (5) 安装选定的采样嘴还有滤芯。装滤芯时需要小心的把滤芯直接从聚四氟乙烯套筒内倒入采样枪头里, 需要注意不要污染滤芯的表面。
- (6) 设置滤筒编号和采样时间。
- (7) 将采样时的体积、流量、负压、温度及采样时间等数据记录下来。
- (8) 开始用油烟采样器采集样品。
- (9) 将收集了油烟的滤芯立即倒回聚四氟乙烯滤筒中, 拧紧杯盖, 并将采完 VOCs 的活性炭吸附柱两头封闭好, 带回到实验室进行处理。

需要特别注意的是样品应尽量在 24 小时之内测定完毕, 如果不能在一天之内进行测量, 则可以将样品搁置于冰箱的冷藏室中, 样品最多可保存七天。

### 2.1.2.2 样品预处理

油烟样品按照 GB18483-2001<sup>[27]</sup>中相关要求进行预处理，具体如下：

- (1) 用 12 mL 重蒸后的四氯化碳把采样后的滤芯浸泡在聚四氯乙烯滤筒中，盖好滤筒盖；
- (2) 把滤筒放置于超声清洗仪中，超声 10 分钟，然后把滤筒中的清洗液转移到 25mL 比色管中；
- (3) 再在滤筒中加入 6 mL 四氯化碳，超声清洗 5 分钟，把滤筒中的清洗液同样转移到上述的 25 mL 比色管中；
- (4) 再用少量的四氯化碳溶液洗滤筒两次，同样把清洗液倒于上述 25 mL 比色管中，加入四氯化碳稀释至刻度标线；
- (5) 最后待将样品送入红外分光光度计测定其分光度并计算浓度。

油烟中气态 VOCs 预处理步骤如下：

- (1) 将吸附柱中的活性炭取出倒入 500 mL 锥形瓶中，在每个锥形瓶中加入 100 mL 二硫化碳试剂，密闭，轻轻振动；
- (2) 等待其在室温下解析 1 小时，待时间一到将其进行抽滤；
- (3) 将抽滤后所得清液进行旋蒸浓缩，将其浓缩至大约 1 mL；
- (4) 将浓缩后的样品过滤膜并置于 1 mL 小瓶中，待送入气相色谱-质谱联用仪中进行检测，得出 VOCs 成分。

### 2.1.2.3 样品分析

红外分光光度法测定油烟的含量：

将待测定的油烟样品送入红外分光光度计中，设置好相关参数后进行检测。油烟的含量根据波数分别是  $2930\text{ cm}^{-1}$ 、 $2960\text{ cm}^{-1}$ 、还有  $3030\text{ cm}^{-1}$  谱带位置的吸光度来计算。

气相色谱-质谱联用仪对 VOCs 进行定性定量分析：

使用的分析标准物质为 TO-15 标准气体和 PAMs 标准气体。色谱条件：程序升温：初始温度：50 °C，保持 5 min 后以  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  速度升至 150 °C，保持 7 min 后以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  速度升至 200 °C，保持 10 min。进样口温度：140 °C；溶剂延迟时间：4.2 min；载气流速： $1\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ 。质谱条件：接口温度：200 °C；离子源温度：200 °C；扫描方式：SIM；扫描范围：35~300 amu。

## 2.2 结果与讨论

### 2.2.1 典型菜系油烟中 VOCs 排放浓度及影响因素

#### 2.2.1.1 各菜系的挥发性有机物排放浓度

挥发性有机物排放浓度受到所选餐饮业的菜系类型、规模、上座率、风机管道设计等诸多因素影响。表 2-4 为本研究选取的典型菜系餐饮油烟中挥发性有机物的实测排放浓度以及各菜系的挥发性有机物组分构成。依据文献, 检测油烟排放浓度时将实测排放浓度折算为基准风量的排放浓度, 以此来排除餐饮业规模、上座率、风机风量等因素对不同菜系污染物排放强度的影响。采用单个灶头基准排风量时的挥发性有机物排放浓度作为指标, 以期科学客观地比较各菜系的挥发性有机物排放的浓度水平。

表 2-4 各菜系餐厅油烟中 VOCs 成分及实测排放浓度

种类	化合物	化学式	VOCs 实测平均排放浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				
			中式快餐	西式快餐	川菜	上海菜	烧烤
	丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	49.28	-	27.13	50.04	769.50
	正丁烷	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	82.13	-	39.44	42.95	1041.37
	2-甲基丁烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	28.46	-	402.17	-	52.43
	2,2-二甲基丁烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	5.08	15.77	-	-	30.67
	2,3-二甲基丁烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	10.25	-	-	-	-
	正戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	98.64	157.00	62.24	15.97	502.10
	异戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-	-	-	-	-
	环戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	-	-	-	-	10.28
	甲基环戊烷	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	8.44	-	2.68	-	31.05
	2-甲基戊烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	5.58	-	4.12	6.92	8.03
	3-甲基戊烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	1.96	-	2.10	-	1.55
烷烃	2,3-二甲基戊烷	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-	-	-	-	19.23
	正己烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	25.77	13.27	13.40	8.28	350.00
	环己烷	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	5.90	-	-	-	25.29
	甲基环己烷	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	7.06	-	3.45	-	19.00
	3-甲基己烷	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-	-	-	-	2.03
	庚烷	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	22.32	100.05	12.82	-	297.87
	辛烷	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	13.56	120.66	17.58	-	312.57

续表 2-4

种类	化合物	化学式	VOCs 实测平均排放浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				
			中式快餐	西式快餐	川菜	上海菜	烧烤
烷烃	壬烷	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-	98.82	-	-	176.64
	癸烷	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	-	-	-	-	125.29
	正十一碳烷	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	-	-	-	-	133.45
	正十二碳烷	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	-	-	-	-	50.19
烯烃	丙烯	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	85.45	10.26	58.98	50.47	1049.60
	1-丁烯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	50.40	-	30.24	20.03	1128.30
	反-2-丁烯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-	-	-	-	150.08
	正-2-丁烯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-	-	-	-	223.04
芳香烃	2,3-丁二烯	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	11.67	-	16.88	-	-
	正戊烯	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	24.15	108.20	15.63	-	585.27
	反-2-戊烯	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	-	-	-	-	121.35
	正-2-戊烯	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	-	-	-	-	57.25
	正戊二烯	C <sub>5</sub> H <sub>18</sub>	-	-	-	-	58.00
	正庚烯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	23.25	8.87	6.02	-	604.17
芳香烃	苯	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	11.45	4.92	40.03	5.15	875.21
	甲苯	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	25.17	-	20.22	13.46	412.55
	邻二甲苯	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-	-	-	-	135.84
	对/间二甲苯	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-	-	3.05	-	46.56
	3-乙基甲苯	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-	-	20.04	-	11.88
	对乙基甲苯	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-	-	7.52	-	72.33
	正丙苯	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-	-	-	-	81.86
	异丙苯	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-	-	6.02	-	20.00
	1,3,5-三甲苯	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-	-	20.00	-	17.48
	1,2,4-三甲苯	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-	-	5.85	-	12.24
	乙苯	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-	6.23	5.94	-	150.84
	对二乙苯	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	-	-	13.17	-	35.52
	间二乙苯	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	-	-	10.57	-	37.24
	1-乙基-2 甲基苯	C <sub>9</sub> H <sub>13</sub>	-	-	5.35	-	43.54
	1-乙基-3 甲基苯	C <sub>9</sub> H <sub>13</sub>	-	-	15.18	-	22.56
	苯乙烯	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	-	-	-	-	105.63

续表 2-4

化合物	化学式	VOCs 实测平均排放浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$					
		中式快餐		中式快餐			
芳香烃	1,3-二氯苯	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	-	-	15.05	-	-
	1,2,4-三氯苯	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	-	-	6.05	-	3.36
醇	乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	3872.68	1523.70	11332.25	3578.00	7.58
	丙醇	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	-	442.85	-	-	-
醛酮	丁醛	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	172.56	-	502.15	-	-
	戊醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	389.46	1265.19	1077.30	50.22	-
	丙烯醛	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	250.53	109.75	169.78	33.25	508.65
	丙酮	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	49.78	1823.15	45.06	29.07	355.15
	1-丁酮	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	15.49	10.02	13.21	10.70	105.45
	2-己酮	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-	101.50	-	-	20.08
卤代烃	一氯甲烷	CH <sub>3</sub> Cl	-	5.27	0.85	-	10.08
	二氯甲烷	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	-	15.58	1.44	6.25	30.18
其它	四氢呋喃	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-	-	1.20	3.10	16.55
	萘	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	-	-	-	-	46.80
	乙酸乙酯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	17.27	105.00	15.91	8.57	52.49
	甲基丙烯酸甲酯	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	-	-	-	-	19.82
	实测排放浓度		5363.74	6046.06	14068.07	3932.43	11193.07
	基准风量排放浓度		3686.23	6114.99	7955.32	4141.68	12909.71

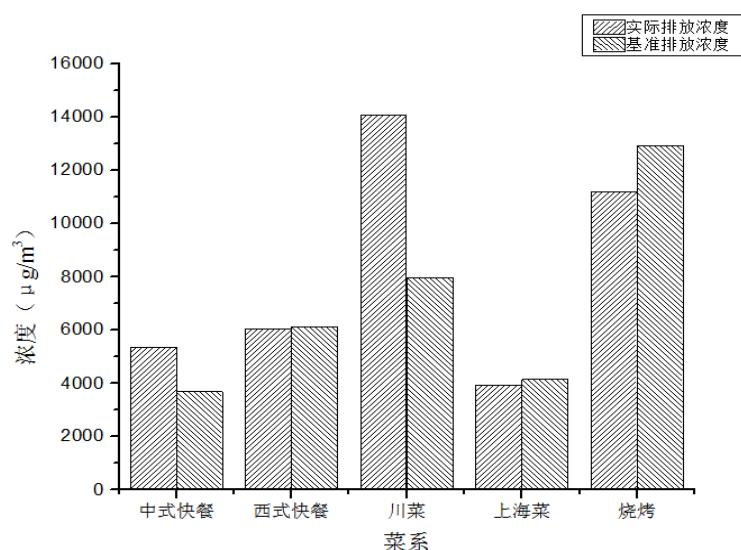


图 2-1 各菜系的 VOCs 实测排放浓度与基准风量排放浓度

图 2-1 为餐饮油烟中 VOCs 的实测排放浓度和基准风量排放浓度。从图 2-1 可以直观的看出：川菜的实测排放浓度最高，达到  $14.07 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其次是烧烤为  $11.19 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，处于中间位置的是西式快餐和中式快餐，它们的实测浓度分别为  $6.05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $5.36 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最低的是上海菜，浓度为  $3.93 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

川菜的实测排放浓度高，主要有餐厅规模比较大、上座率高、厨房灶头工作负荷大等原因。烧烤有较高的实测排放浓度，很大程度上受木炭燃烧的影响，木炭燃烧和食材高温烘烤产生的挥发性有机物一块排出，加之同样具有较高的上座率，致使其浓度偏高。在川菜和烧烤这两种菜系的餐厅采样时，在烟道口可以看到明显的烟雾，而且伴有强烈的气味，这两种菜系排放的油烟可能对周边环境的影响比较大，因此，这两类菜系的餐厅是餐饮 VOCs 排放的重点源。中式快餐、西式快餐和上海菜油烟中的 VOCs 实际排放浓度比较低，对周围环境的影响较小，但如果烟道排口距离民宅较近，也会对居民生活环境造成污染。

折算成基准风量浓度后，烧烤的排放浓度为  $12.91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其后依次为川菜、西式快餐、上海菜和中式快餐，它们的浓度分别为  $7.96 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6.11 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $3.69 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在调查研究中发现，川菜和中式快餐在挥发性有机物基准风量浓度上存在一定的区别，不仅体现在基准风量与实测风量之间，还表现在不同菜系之上其中川菜的实测风量较小。在调查研究过程中，笔者发现其主要原因是因为，调查餐饮单位的所采用的风机在风量上不能够满足厨房需要，致使所排放出的油烟较少，造成排出口周边的污染较为严重；而在一些上海菜等菜系的餐饮单位中，所采用的风机在风量上较为充沛，从而能够对污染物进行及时的疏散，从而导致污染相对较低。在进行调查研究时，笔者发现烧烤类餐饮单位所产生的排放物明显要高于其他菜系，在同等规模之下，该类餐饮单位所产生的挥发性有机物的排量将是其他类型餐饮单位的数倍之多。此外，在非烧烤类菜系中，川菜的排放情况最为严重，而上海菜则最轻。

### 2.2.1.2 影响 VOCs 排放水平因素

之所以不同的菜系在 VOCs 排放水平上会存在区别主要是因为不同菜系在烹饪制作手法上存在较大的区别，其主要集中在下述几个方面：一是烹饪方式，即炒、蒸、煮等；二是食物原料；三是翻炒频率等。

立足于本次研究所涉及到的菜系，不难发现烧烤所采用的烹制燃料主要是木炭，该种燃料在使用过程中本身就会产生一些污染物，同时，其作用于食物上往往会造成食物产生挥发，尤其是油脂，从而致使排放物浓度过高；而西餐在制作过程中，主要是油炸，在高温左右攻下，也容易产生一些挥发性有机物，为此浓度必然也不会低；而在川菜以及中式快餐中，对于肉类食材应用较少，但是在翻炒频率上较高。为此促进了挥发性有机物的散发，致使其浓度偏高，同时，川菜制作过程中，往往

会用到较多的香料，故而，所产生的油烟中还带有较多的刺激性气味。相比较之下，上海菜制作则较为清淡，浓度故而偏低。

### 2.2.1.3 人均挥发性有机物排放浓度

在研究过程中，笔者就浓度、规模、上座率这三大因素之间的关系进行研究，从而就人均浓度进行核算，相关结果可参照图 2-2。调查研究发现，人均浓度由大到小分别是烧烤、西式快餐、中式快餐、川菜、上海菜，对应的浓度分别为  $172 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $24\sim38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ （后三者）。为此，处于环保目的，笔者认为市民在日常餐饮菜系选择过程中，应该尽可能的少选烧烤和西式快餐，从而减少餐饮油烟排放，为城市空气净化做出贡献。而对于城市管理部门来说，则应该控制诸如烧烤类的餐饮单位数量，同时，加大对这类餐饮单位油烟排放的监管，从而控制污染物排放，减轻空气治理压力。

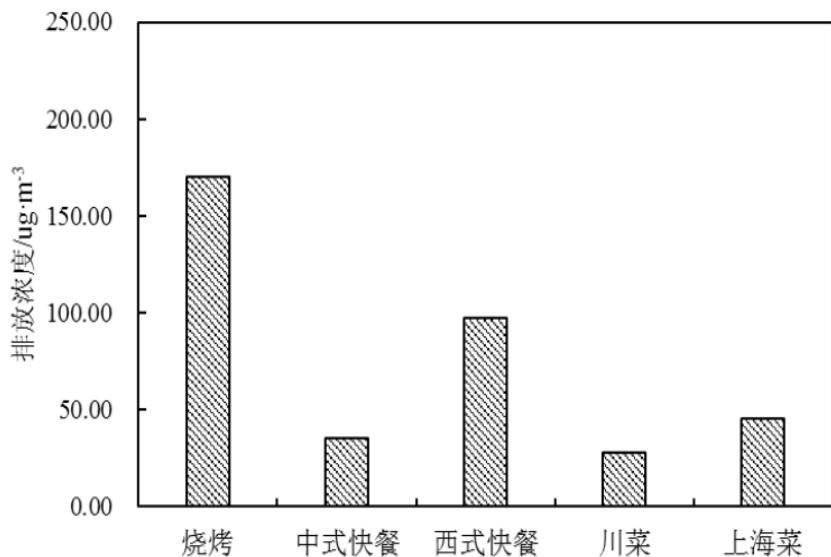


图 2-2 典型菜系的人均 VOCs 排放浓度

### 2.2.2 典型菜系油烟中 VOCs 组分构成

#### 2.2.2.1 主要排放组分

从之前的分析来看，我们可以发现烧烤油烟中的 VOCs 组分和基准风量排放浓度跟其它的四种菜系之间存在很大的区别，下面为了方便讨论，我们把这五种菜系分为烧烤类和非烧烤类两大类。这两大类油烟中 VOCs 主要组分及其浓度水平见图 2-3（a、b）。

从图 2-3（a）中我们可以看出烧烤类油烟中 VOCs 的主要成分为 1-丁烯、丙烯和正丁烷，它们的排放浓度分别为  $1128.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1049.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $1041.37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，都超过了  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，除此之外是苯、丙烷、正庚烯、正戊烯、丙烯醛、正戊烷等，

它们的排放浓度均在  $500\sim1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间。根据图 2-3 (b) 非烧烤菜系排放的 VOCs 主要是乙醇，其浓度达到了  $5000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其他成分如戊醛、丙酮和丙烯醛等，排放浓度仅为  $50\sim700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。综上可以得出，虽然烧烤和非烧烤菜系所排放的主要组分有部分相同，但是各自的排放浓度水平差距较大。另外，烧烤菜系排放的组分浓度均比较高，而非烧烤菜系除乙醇排放浓度较高外，其他组分均处于很低的浓度水平。

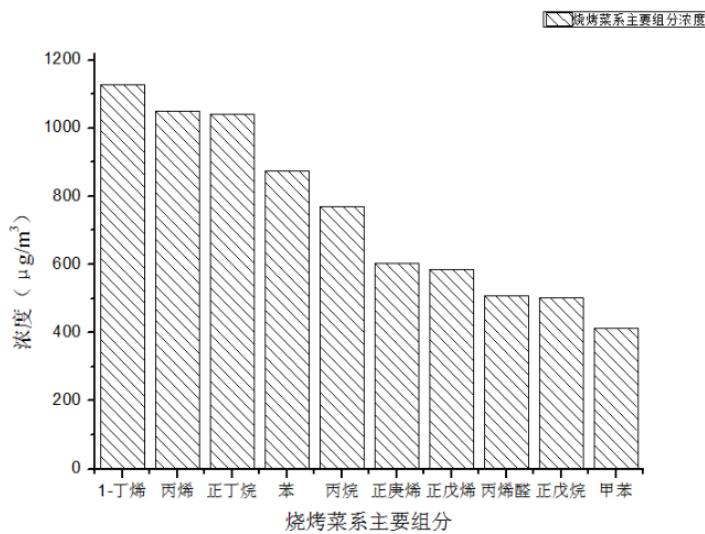


图 2-3 (a) 烧烤菜系主要组分及浓度

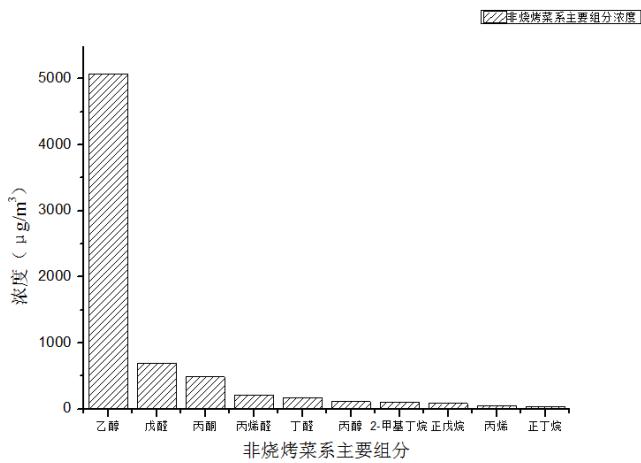


图 2-3 (b) 非烧烤菜系主要组分及浓度

### 2.2.2.2 组分构成

为了进一步研究各菜系排放的 VOCs 成分，我们将各油烟中的 VOCs 分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、醇类、醛酮类和其它七类。通过作图来表示这七大类成分在各菜系油烟排放的 VOCs 中所占的数值及比例，具体见图 2-4。

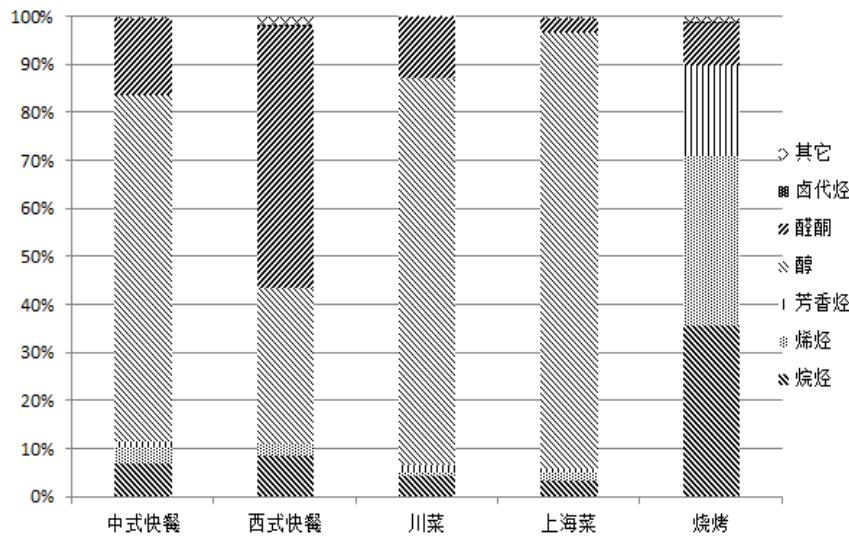


图 2-4 各菜系 VOCs 主要组分及比例

从图 2-4 可以看出，烧烤类排放的 VOCs 主要组分是烯烃、烷烃、芳香烃还有醛酮类化合物，其中烯烃所占比重最高，为 35.53%，其次是烷烃（35.37%）、芳香烃（18.62%）和醛酮（8.84%）。烧烤类排放 VOCs 成分与非烧烤类菜系相比，醇类占的比例很小，烃类所占的比例比较大，共占总成分的 89.52%。西式快餐油烟中 VOCs 的主要成分所占比例从高到低依次是醛酮类、醇类和烷烃，其中醛酮类有机物占了总量的 54.74%，显著高于其它菜系醛酮类物质所占比例。西式快餐中醇类有机物的比例高于烧烤，但是低于其他菜系。川菜、上海菜和中式快餐等非烧烤菜系中，所排油烟中的 VOCs 组成比较相似，主要排放组分都是乙醇，在三种菜系中所占比例分别为 80.55%、90.99% 和 72.20%。非烧烤菜系中乙醇的含量很高，主要原因是在烹饪过程中使用料酒、黄酒，其中含有的乙醇在加热时比较容易挥发。川菜和上海菜使用料酒、黄酒比其它菜系更多，所以乙醇所占的比例也更高。非烧烤菜系中，除乙醇外所占比例较大的还有醛酮类和烷烃类有机物，这三种菜系中烷烃所占的比例分别为 4.17%、3.16%、6.79%，醛酮类所占比例分别是 12.85%、3.13%、16.37%。

### 2.2.3 净化前后油烟浓度及去除率

油烟在排放时都要经过净化装置，净化前后油烟排放量及油烟浓度都不同，我们根据《饮食业油烟排放标准(试行)》(GB18483-2001)中相关要求计算出油烟净化前后的浓度见表 2-5。

由标准规定，各菜系的油烟最高允许排放浓度为  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，从表 2-5 可以看出本次采样的 5 个餐厅的最终油烟排放浓度均达到标准。为了更直观的比较各菜系油烟浓度，我们可以根据表 2-5 中的数值作出各菜系净化前后油烟浓度对比图，见图

2-5。

表 2-5 各菜系净化前后油烟排放量及浓度

菜系	排风量 (m <sup>3</sup> /h)		浓度(mg/m <sup>3</sup> )	
	净化前	净化后	净化前	净化后
中式快餐	5860.7	5498.0	11.03	0.92
西式快餐	6328.5	6068.4	9.58	0.77
川菜	10024.2	9047.8	13.72	1.26
上海菜	8854.5	8425.7	8.97	0.40
烧烤	7073.0	6920.2	15.28	1.93

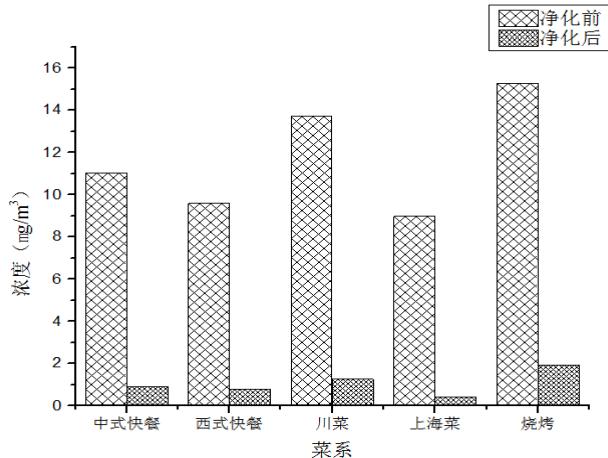


图 2-5 各菜系净化前后油烟浓度对比图

从图 2-5，可以清晰的观察出烧烤净化前的油烟浓度最高，上海菜最低，处于中间位置的依次是川菜、中式快餐和西式快餐。而净化后的浓度，也就是最终的排放浓度最高的依旧是烧烤，最低的依旧是上海菜，处于中间位置的是川菜、中式快餐和西式快餐。净化前后浓度相差最大的是烧烤，相差最小的是西式快餐。

根据排放标准中的公式，我们可以计算出各菜系油烟的去除率。公式为：

$$P = \frac{c_{\text{前}} \times Q_{\text{前}} - c_{\text{后}} \times Q_{\text{后}}}{c_{\text{前}} \times Q_{\text{前}}} \times 100\%$$

式中：P—油烟去除效率，100%；

$c_{\text{前}}$ —处理设施前的油烟浓度，mg/m<sup>3</sup>；

$Q_{\text{前}}$ —处理设施前的排风量，m<sup>3</sup>/h；

$c_{\text{后}}$ —处理设施后的油烟浓度，mg/m<sup>3</sup>；

$Q_{\text{后}}$ —处理设施后的排风量，m<sup>3</sup>/h。

根据表 2-5 中相关数据和上述公式可计算出各菜系油烟去除率, 见表 2-6。

表 2-6 各菜系油烟去除率

菜系	去除率/%
中式快餐	92.18
西式快餐	92.29
川菜	91.71
上海菜	95.76
烧烤	87.64

从表 2-6 可以看出本次采样的各菜系餐厅的去除率都很高, 其从高到低依次为上海菜、西式快餐、中式快餐、川菜、烧烤。根据标准中相关要求, 中型规模餐厅的油烟去除率需达到 75%以上, 大型规模餐厅的油烟去除率需达到 85%。本次采样的餐厅中, 川菜餐厅为大型规模, 其余均为中型规模。可以看出各个菜系餐厅的去除率均达到标准要求。

## 2.3 本章小结

(1) 本次采样各菜系油烟中的 VOCs 排放浓度换算成单个灶头基准风量浓度后, 浓度最高的是烧烤, 为  $12909.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其他从大到小依次为川菜、西式快餐、上海菜、中式快餐, 它们的浓度分别为  $7955.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6114.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4141.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3686.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2) 烧烤类油烟中 VOCs 的主要成分为 1-丁烯、丙烯和正丁烷, 它们的排放浓度都超出了  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。非烧烤类菜系的最主要成分为乙醇, 尤其是川菜, 其乙醇浓度超过了  $5000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其次浓度比较高的组分就是戊醛、丙酮、丙烯醛等。非烧烤类菜系的主要排放组分浓度水平除了乙醇的浓度水平很高之外, 其它的组分浓度都较低。

(3) 烧烤排放的 VOCs 主要组分是烯烃、烷烃、芳香烃还有醛酮类化合物, 川菜、上海菜和中式快餐所排油烟中的 VOCs 组成比较相似, 它们的主要排放组分都是醇类有机物, 西式快餐油烟中 VOCs 的主要成分所占比例从高到低依次是醛酮类、醇类和烷烃。

(4) 本次采样的 5 个餐厅的最终油烟排放浓度均小于  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均达标排放。各个菜系餐厅的去除率均达到标准中的要求, 且去除率都较高, 其从高到低依次为上海菜、西式快餐、中式快餐、川菜、烧烤, 其去除率分别为 95.76%、92.29%、92.18%、91.71% 和 87.64%。

(5) 根据各菜系油烟中 VOCs 成分及排放浓度还有油烟浓度及去除率的分析，可以确定烧烤油烟对周围环境的污染比较严重，是城市油烟污染的重点，应该加强对烧烤类餐厅的管控，重点治理烧烤油烟污染。其次，应重点管控的是川菜。



## 第3章 餐饮业油烟治理调研

从第2章分析结果可知，实验所选取的5种典型菜系的最终油烟净化排放浓度均达标。很大因素在于，所选取的采样对象均坐落在石家庄市中心的大型商业区/生活区等人流量大的地点。受近些年天气因素的影响和政府政策的引导，这些地点的餐饮企业已经完成了餐饮油烟净化处理设备的上新工作。进一步地，为了全方位了解石家庄市地区餐饮业的油烟排放及其治理现状，对离市中心方圆15公里的餐饮业走访、调研显得十分必要。

### 3.1 实验部分

#### 3.1.1 调研时间

在完成第2章该阶段采样工作，分析得出实验结果后，根据实验结果，制定具体的调研计划，开始调研工作。具体到：2015年10月到2016年6月。

#### 3.1.2 调研地点

石家庄市主城区及其周边区域。

#### 3.1.3 调研对象

石家庄市中心方圆15公里范围内的餐饮店铺（不分菜系）。

#### 3.1.4 调研内容

了解餐饮行业餐饮油烟排放及其治理现状。

## 3.2 结果与讨论

通过对餐饮业的走访、调研，结果梳理如下：

主城区及其周边区域大部分餐饮企业均安装了油烟净化设备/净化器，餐饮油烟均经过净化后排放，其中静电油烟净化技术应用较多。但也呈现不少问题，具体如下：

1) 已安装油烟净化设备的餐饮店铺/企业，油烟净化率较低，呈现净化设备老旧、缺乏维护、上新率低现象；

2) 已安装油烟净化设备的餐饮店铺/企业，出现安装风机的风量和厨房灶头实际所需不匹配的现象，致使油烟排放设备排风能力不足等；

- 3) 部分餐饮从业人员环保意识差，不安装或者只在突击检查时运行设备；
- 4) 餐饮业呈现规模小，分布分散等特点，不利于管理。

### 3.3 本章小结

主城区及其周边区域大部分餐饮企业均安装了油烟净化设备/净化器，餐饮油烟均经过净化后排放，其中静电油烟净化技术应用较多。同时，也呈现出净化设备老旧、缺乏维护、上新率低、安装风机的风量和厨房灶头实际所需不匹配的现象。

## 第4章 新型复合油烟净化器设计

在走访、调研工作的基础上，我们总结并提出了一种复合型油烟净化思路，并以此进行计算和设计。

### 4.1 净化思路及流程

餐饮业外排油烟气包括颗粒物及气态污染物两类。颗粒物又分为固体颗粒物、液体两种，即餐饮业厨房油烟气包含气、液、固三相。其中油烟中的味道主要是气态污染所为。

调研发现，油烟净化设备大多只针对颗粒物的去除（静电油烟净化器应用较多），而关于 VOCs 的去除问题则很少会被人们所顾忌，针对当前餐饮油烟问题对城市空气治理的影响，笔者认为应该要就餐饮油烟净化装置设计进行思考，从而设计出一种能够对颗粒物和 VOCs 进行同步处理的净化装置。

由此我们提出餐饮油烟的净化思路，多污染物协同处理，多模块净化处理。根据这一思路设计了新型复合油烟净化模块，净化示意图如图 4-1 所示。

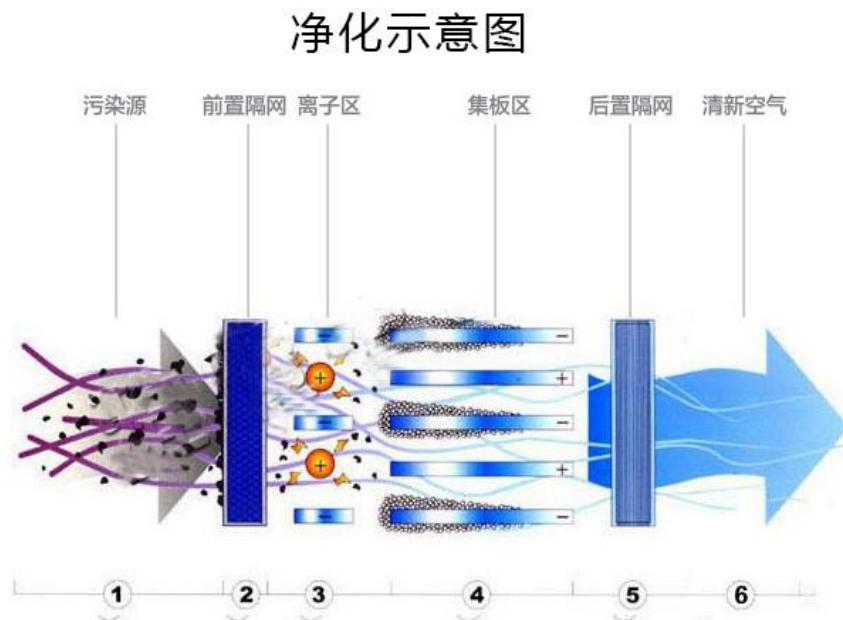


图 4-1 餐饮油烟净化示意图

该净化过程采用三级净化处理，顺着油烟流向，分别为：第一级油烟气体过滤分离单元，采用纤维垫等材料作为滤层，使油烟粒物在碰撞、拦截和扩散作用下被捕集于滤料中油烟得到净化，以最大程度地去除油烟气体中大颗粒的油滴和水滴等颗粒物；第二级高压静电捕集单元，采用静电捕集原理，分为高压放电区和低压捕

集区，通过高压电离作用使油烟颗粒荷电，在通过捕集区域时由于电场作用力而发生偏转，从而收集在捕集极板上，使油烟得以进一步净化；第三级催化单元，将油烟气体中的异味及有害气体催化分解，去除油烟中的异味及有害气体。

工作过程中，在一定范围内，电压越高则颗粒物捕集效率也越高，同时产生更多臭氧。虽然局部高浓度臭氧，对环境有害，但研究表明，在催化作用下  $O_3$  能实现对 VOCs 的有效净化，在催化过程中其有助于改善净化效果，这也使得该技术在室内净化方面得到了应用<sup>[51]</sup>。

## 4.2 净化技术原理

### 4.2.1 油烟气体过滤原理

过滤分离法原理是采用亲油性的多孔隙结构材料作为滤层，含油脂的餐饮油烟通过滤层时，油烟中携带的油滴由于扩散、截留等作用粘附在滤料材料上而从烟气中分离出来，从而实现净化作用。

### 4.2.2 静电捕集原理

静电对油烟微粒的净化过程可分为四步：1) 油烟气体电离；2) 油烟微粒获得离子而荷电；3) 荷电微粒在电场内迁移并向电极移动；4) 油水混合液利用重力作用，顺收集电极流下，并顺排泄孔排进收集器。

#### 4.2.2.1 气体电离

气体的原子是由带正电荷的质子与不带电荷的中子组成的原子核以及外层高速运转的带负电荷电子组成。外层高速运转的电子比较容易受撞击或外力影响而脱离原子核的束缚，成为带负电的“自由电子”，而这些自由电子有些还会附着在其它分子或者颗粒上，成为带负电性质粒子，我们称此粒子为“负离子”。当气体分子失去一个电子以后，就会多出一个正电荷，呈现出带正电的性质，我们称此为“正离子”。其中，这种中性气体分子分离为正离子和负离子(包括自由电子)的现象，就称为气体电离。

#### 4.2.2.2 油烟微粒荷电

只有在电荷作用之下，则油烟中颗粒会实现分离，为此，在技术应用过程中需要对电荷的数量进行控制，从而促使颗粒能够得到有效的清除，除了电荷数量之外，还需要对电场强度等因素进行把控，从而保证效果。一般来说，荷电可以分为两种，分别是电场荷电、扩散荷电。

电场荷电是在电场作用之下才得以形成的，是由于离子与颗粒之间碰撞而形成的，但是在对油烟颗粒进行处理的过程中，电荷的数量会有一个增长限制，即为饱和荷电。在实际研究中发现，当颗粒进入到电场后，很短时间内该过程便已结束。

这也就说明其已经达到了饱和荷电状态，为此，其净化效果是较好的。扩散荷电则主要是依靠离子扩散与颗粒碰撞而形成的，其主要是起到了辅助性的作用，并不能单独使用。

#### 4.2.2.3 荷电微粒向电极移动

当颗粒处于带电情况下，则会受到电场力的作用，通过极性作用，从而促使不同的荷电吸附在不同的电板上。而油烟中含有较多的水蒸气，故而颗粒会随其流动，最终进入收集器。当采用的方式为负电晕，则颗粒电性均表现为负电，由正极收集、排出。

静电除烟主要是依靠电场力作用，促使荷电颗粒发生移动，从而最终被捕获，但是该过程对于电场力的带下和方向有一定的要求，为此，需要控制好电场的强度，同时颗粒在捕获过程中还将会受到其他因素的做义工，为此，在实际操作过程中还需要考虑其他的因素。

### 4.2.3 催化臭氧氧化原理

该方法主要是依靠催化剂作用，从而促使臭氧的活性能够得到控制，促使有机物能够得到有效的降解。在臭氧催化作用之下，羟基自由基的活性将会受到影响，实现增高，此时自由基并无选择能力，其能够实现对有机物的氧化分解，从而得到更多于空气无害的小分子物质，进而得到净化的作用。

## 4.3 设计参数

本章节主要对油烟净化中高压静电处理模块进行计算与设计。

由于该新型复合油烟净化器净化过程第一个模块选用的是过滤分离法，对油烟压降有一定影响，以及考虑到仪器运行一段时间后过滤材料的“失活”/穿透亦或烟气的波动也会对处理效果有影响，所以净化过程高压静电模块处理烟气量设为 $12000\text{m}^3/\text{h}$ 。根据前期实验采样测量经验，其他一些参数取经验值如下：

- 1) 烟温  $100\sim150\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 2) 进口压力： $P_j=-150\text{ mmHg}=-1470\text{ Pa}$ ;
- 3) 出口压力： $P_c=-170\text{ mmHg}=-1666\text{ Pa}$ ;
- 4) 漏风率： $C_0=5\%$ ;
- 5) 当地大气压： $P_0=101.325\text{ kPa}$ ;
- 6) 由于芒刺状电晕电极具有放点性能好，尖端放电旺盛，临界电压低，芒刺刺尖产生强烈离子流使颗粒的驱进速度增大，对捕集微小颗粒效果显著的优点。因此，选用芒刺电晕电极，放电翅片厚度  $\delta=1\text{ mm}$ ，放电点的曲率半径取  $r_A=0.1\text{ cm}$ 。同极距： $B=50\text{ mm}$ ；异极距  $b=25\text{ mm}$ ；放电点间距  $2c=80\text{ mm}$ ； $c=40\text{ mm}$ 。

## 4.4 高压静电模块计算

### 4.4.1 临界起晕电晕场强度的计算

根据试验，对于芒刺状电晕极，其临界电场强度为：

$$E_0 = (31.02 \rho + 9.54) \sqrt{\frac{\rho}{r_A}} \times 10^3 (\text{V/cm}) \quad (4-1)$$

式中：  $r_A$ -放电点的曲率半径；

$\rho$ -气体密度因子；

$$\rho = \frac{T_0 P}{P_0 T} \quad (4-2)$$

$T_0=273+25=298 \text{ K}$ ;

$T=(273+t) \text{ K}$ ;

$P$ -运行压力，取  $P=1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;

$P_0=76 \text{ cmHg}=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;

$t$ -运行温度，由已知  $t=100 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ，取  $t=130 \text{ }^\circ\text{C}$ ；

由公式 (4-2) 可得：

$$\rho=0.74$$

将  $\rho=0.74$  代入公式 (4-1) 得：

$$E_0=41 \text{ kV/cm}$$

### 4.4.2 临界电压

当电压升至为临界电压时，其板式吸附极的临界电场强度与管式电极对于负电晕的临界电场强度一样，计算公式为：

$$u_0 = r_A E_0 \ln\left(\frac{d}{r_A}\right) (\text{kV}) \quad (4-3)$$

式中的  $d$  与  $b/c$  有关。当  $b/c \leq 0.6$  时，取  $d=4b/\pi$ ；  $b/c \geq 2$ ， $d=\frac{e}{\pi b/2c}$ ， $0.6 \leq b/c \leq 2$ ，

$d$

由已知参数：  $b=25 \text{ mm}$ ， $c=40 \text{ mm}$ ，得  $\frac{b}{c} = \frac{25}{40} = 0.625$

可得  $0.6 < \frac{b}{c} = 0.625 < 2$ ，由图 4-1 查得  $d/c=0.7$ ， $d=14$ 。代入公式 (4-3) 得：

$$u_0=20 \text{ kV}$$

### 4.4.3 电晕电流

根据资料，目前市场上的静电式油烟净化器的操作电压一般为 20~40 kV，取其为 35 kV。由于油烟中的组分比较复杂，本次计算中只计算油烟中主要气体成分。取经验值  $i=0.04 \text{ mA}$ 。

### 4.4.4 电场强度

电晕区电场强度

$$E_r = \sqrt{\frac{2i}{K}} \sqrt{f_0} \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} &= 986.4 \text{ (V/cm)} \\ &= 3.29 \text{ 静电单位/cm} \end{aligned}$$

吸附极附近的电场强度

$$E_p = \sqrt{\frac{2i}{K} f_0 \left(1 + \frac{2}{3} D S_0 R\right)} \quad (4-5)$$

式中：i-电晕电流，mA/m；

K-气体迁移率；

R-沉尘离电晕极的距离，取 R=10 cm；

$f_0$ -换算常数， $f_0=9\times 10^6$ ；

$S_0$ -单位体积含尘气体含粒总表面积，取  $S_0=0.4 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ ；

$\epsilon$ -粉尘介电常数，气体  $\epsilon=1$ ；

D-与粉尘介电常数有关的常数；

将数据代入公式 (4-5)，得  $E_p=6.4$  静电单位/cm。

### 4.4.5 粒子在电场中的驱进速度

气体黏度随温度变化而变化：

$$\mu = \mu_0 \frac{273+C}{T+C} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} \quad (4-6)$$

在标准状态下部分气体黏度  $\mu_0$  和 C 的值如表 4-1。

表 4-1 0℃, 101325Pa 部分气体黏度 $\mu_0$ 值和 C 值

项目	N <sub>2</sub>	空气	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
$\mu_0/10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}(10^{-4}\text{P})$	1.7	1.73	1.37	2.03	1.66	0.9	1.17
C	114	124	2.54	131	100	673	396

由表 4-1 查得空气的黏度 $\mu_0=1.73 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , C=124, 代入公式(4-6)得:

$$\mu = 2.37 \times 10^{-5} \text{ P}$$

当粒径为 0.1~2um 时, 驱进速度为: 尘粒荷电量采用静电单位, 则有:

$$W = \frac{DE_r E_p r}{6\pi \mu} (1 + A \frac{\lambda}{r}) \quad (\text{cm/s}) \quad (4-7)$$

式中: D-粉尘介电常数有关的常数;

E<sub>R</sub>-电晕电场强度;

E<sub>p</sub>-吸附极附近的电场强度;

A-常数, 对于标准状态空气 A=0.86;

$\lambda$ -空气分子的平均自由行程, 对于标准状态下空气 $\lambda=0.1 \text{ um}$ ;

u-含尘气体黏度;

r-尘粒半径, 由图 4-2 查得油烟粒子的半径为 0.05-1 um, 取粒尘半径 $r=8 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 。

将数据代入公式 (4-7) 得:

$$W=7.8 \text{ cm/s}$$

## 4.5 高压静电模块总体设计

### 4.5.1 吸附极比表面积

式中: w-驱进速度;

$\eta$ -除尘效率, 由于本次设计的静电油烟净化模块前面有油烟过滤分离模块, 可去除一定比例油烟, 取实验值 78%。

代入公式 (4-8) 得:

$$f = 19.4 \text{ s/m}$$

### 4.5.2 吸附极板总面积

$$P = \frac{P_f + P_C}{2} = \frac{-170 + (-150)}{2} = -160 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$Q = Q_0 \frac{\frac{273+t}{273} \frac{760}{p_0 + \frac{P}{12.6}}}{(1 + \frac{C_0}{2})} \quad (4-9)$$

式中： $Q_0$ -标准状况下的含尘气体量， $Q_0=12000 \text{ m}^3/\text{h}$ ；  
 $p_0$ -当地大气压；  
 $C_0$ -漏风率，取 $C_0=5\%$ ；

将数据代入公式(4-9)得：

$$Q=5.12 \text{ m}^3/\text{s}$$

吸附极总面积为：

$$A=f \times Q=99.3 \text{ m}^2$$

因处理气量、温度、压力的波动等因素影响，参考实际生产情况，取富裕系数 $n=1.5$ 。因此，其需要的吸附面积为：

$$A=1.5 \times 99.3=149 \text{ m}^2$$

实际比表面积：

$$f=19.4 \times 1.5=29.1 \text{ s/m}$$

### 4.5.3 验算除尘效率

$$\eta = 1 - e^{-fv} \\ = 79.7\%$$

### 4.5.4 有效截面积

$$F = \frac{Q}{3600v} \quad (4-10)$$

式中： $Q$ -工况含尘气体量；

$v$ -气体在有效面积上的速度，对于板气体速度取其值范围为 $2\sim4 \text{ m/s}$ ，取其为 $3 \text{ m/s}$ ；

公式(4-10)得：

$$F=1.7 \text{ m}^2$$

### 4.5.5 吸附板有效宽度

当 $F<80 \text{ m}^2$ ，极板高度 $h$ 为：

$$h=\sqrt{F}=1.3 \text{ m} \quad (4-11)$$

#### 4.5.6 净化器模块内通道数

$$n = \frac{F}{b_1 B} \quad (4-12)$$

式中： $b_1$ -吸附极间距（同极距），查得目前市场上静电式油烟净化器的吸附极同极距  $b_1=0.05$  m；

$B$ -吸附极板有效宽度，m；

将数据代入公式（4-12）得：

$$n=26$$

取整的通道数为  $n=26$ ，吸附极排数  $n+1=27$ ，零极极排数  $n=26$ ，电场数  $N=1$ 。

#### 4.5.7 电场有效高度

$$h = \frac{F}{B} = 1.3 \text{ m} \quad (4-13)$$

#### 4.5.8 电场长度

$$l = \frac{A}{2nh} \quad (4-14)$$

$$=2.2 \text{ m}$$

#### 4.5.9 气体在净化器电场内的实际速度

$$v = \frac{Q}{h_1 h n} \quad (4-15)$$

$$=3 \text{ m/s}$$

#### 4.5.10 气体在有效电场内的停留时间

$$t = \frac{l}{v} \quad (4-16)$$

$$=0.8 \text{ s}$$

#### 4.5.11 净化模块实际具有的净化面积

$$A' = hl \left( \frac{n}{2} + 1 \right) \times 2 \times 2 \quad (4-17)$$

$$=160 \text{ m}^2 > A=149 \text{ m}^2$$

即  $A=149 \text{ m}^2 < A'=160 \text{ m}^2$ ，满足要求。

#### 4.5.12 荷电区的通道数

$$n' = \frac{F}{cB} \quad (4-18)$$

式中：c-荷电区放电极间距，c=0.08m；

B-电场有效宽度，h=1.3m；

将数据代入（3-21）得：

$$n'=16$$

取荷电区通道数为 16,, 则放电极排数为 16, 负极排数为 17 个



## 第5章 展望与不足

餐饮油烟污染问题越来越引起人们的重视，餐饮油烟净化技术可以在一定程度上减少油烟的排放，改善城市大气环境，这是一项具有广阔应用前景的实用技术，同时也是今后国内外科研工作者关注的焦点。但本次实验及设计中依然发现了不足。

- 1) 本次采样区域范围较小，采样对象均选择的是市中心的商业区或生活区等人流量大的餐饮店铺/企业。经过采样分析结果显示最终油烟排放浓度均达标，与居民经常反映或投诉的情况并不是十分吻合。
- 2) 由于未考虑采样现场情况，对采样对象进行采样时，受到部分采样点场地条件限制，导致数据有误差。另外，受现场温度、湿度、客流量等等众多因素的影响，实验条件难以控制，给实验结果带来一些误差。
- 3) 由于一些不可抗因素，如采样对象的选取及采集，分析仪器的故障排除，致使前期采集样品分析过程时间周期较长，导致后期对复合油烟净化器的催化模块设计和新型油烟净化器的应用没有时间开展和迭代完善。



## 结 论

通过本文实验研究，得出结论如下：

- 1) 本次采样各菜系油烟中的 VOCs 排放浓度换算成单个灶头基准风量浓度后，浓度最高的是烧烤，为  $12909.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其他从大到小依次为川菜、西式快餐、上海菜、中式快餐，它们的浓度分别为  $7955.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6114.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4141.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3686.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。
- 2) 烧烤类油烟中 VOCs 的主要成分为 1-丁烯、丙烯和正丁烷，它们的排放浓度都超出了  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。非烧烤类菜系的最主要成分为乙醇，尤其是川菜，其乙醇浓度超过了  $5000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其次浓度比较高的组分就是戊醛、丙酮、丙烯醛等。非烧烤类菜系的主要排放组分浓度水平除了乙醇的浓度水平很高之外，其它的组分浓度都较低。烧烤排放的 VOCs 主要组分是烯烃、烷烃、芳香烃还有醛酮类化合物，川菜、上海菜和中式快餐所排油烟中的 VOCs 组成比较相似，它们的主要排放组分都是醇类有机物，西式快餐油烟中 VOCs 的主要成分所占比例从高到低依次是醛酮类、醇类和烷烃。
- 3) 本次采样的 5 个餐厅的最终油烟排放浓度均小于  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，均达标排放。各个菜系餐厅的去除率均达到标准中的要求，且去除率都较高，其从高到低依次为上海菜、西式快餐、中式快餐、川菜、烧烤，其去除率分别为 95.76%、92.29%、92.18%、91.71% 和 87.64%。
- 4) 根据各菜系油烟中 VOCs 成分及排放浓度还有油烟浓度及去除率的分析，可以确定烧烤油烟对周围环境的污染比较严重，是城市油烟污染的重点，应该加强对烧烤类餐厅的管控，重点治理烧烤油烟污染。其次，应重点管控的是川菜。
- 5) 主城区及其周边区域大部分餐饮企业均安装了油烟净化设备/净化器，餐饮油烟均经过净化后排放，其中静电油烟净化技术应用较多。同时，也呈现出净化设备老旧、缺乏维护、上新率低、安装风机的风量和厨房灶头实际所需不匹配的现象。
- 6) 提出一种可与静电油烟净化技术联用的方法以同时去除油烟中的颗粒物与 VOCs 的净化思路，即多污染物协同处理，多模块净化处理。



## 参考文献

- [1] 马瑞巧. 餐饮业油烟净化废液处理方法的试验研究. [天津大学硕士论文]. 天津: 天津大学, 2007
- [2] 王程塬. 兰州市餐饮油烟污染排放治理技术研究. [兰州大学硕士论文]. 兰州: 兰州大学, 2015
- [3] S.S. Ho, J.Z. Yu, K.W. Chu, et al. Carbonyl Emissions from Commercial Cooking Sources in Hong Kong. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56(8): 1091
- [4] 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. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1768-1774
- [5] 北京市政府关于《北京市大气污染防治条例》实施情况的报告, 2015
- [6] 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. 环境科学, 2007, 28(11): 2620-2625
- [7] 中华人民共和国国家环境保护局, 国家质量监督检疫总局, 饮食业油烟排放标准(试行) GB18483-2001, 中华人民共和国国家标准, 北京: 中华人民共和国国家标准出版社, 2001-11-12
- [8] 王秀艳, 高爽, 周家岐, 等. 餐饮油烟中挥发性有机物风险评估. 环境科学研究, 2012, 25(12): 1359-1363
- [9] 王京. 餐饮业油烟污染危害及控制策略. 贵州化工, 2011, 36(2): 54-55
- [10] 李俊华. 超重力技术净化油烟实验研究. [中北大学硕士论文]. 太原: 中北大学, 2007
- [11] 张宜升, 李文秀, 曹美娜, 等. 民用固体燃料及烹调油烟杂环胺排放及健康风险评价. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2196-2204
- [12] 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. 环境与职业医学, 2005, 22(1): 17-19
- [13] 王秀艳, 高爽, 周家岐, 等. 餐饮油烟中挥发性有机物风险评估. 环境科学研究, 2012, 25(12): 1359-1363
- [14] 奉水东, 凌宏艳, 陈锋. 烹调油烟与女性肺癌关系的Meta分析. 环境与健康杂志, 2003, 20(6): 353-354
- [15] 王贞涛, 闻建龙, 陈燕, 等. 静电雾化理论及应用技术研究进展. 排灌机械工程学报, 2004, 22(6): 41-44
- [16] 张楠, 李贺青. 高压静电应用在饮食业油烟净化上的设计. 环境保护科学, 2004, 30(3): 7-8
- [17] 牛晓明. 饮食业油烟污染现状分析与对策. 图书情报导刊, 2006, 16(1): 156-158
- [18] 茅培森, 程军, 罗源钦. 静电与机械式油烟净化设备技术性能的探讨. 环境研究与监测, 2003(S1): 48-48

- [19] 张秀东, 刘有智, 樊光友, 等. 餐饮业油烟净化技术探讨. 天津化工, 2009, 23(4): 8-10
- [20] 姜威. 吸附法油烟处理研究. 现代农业, 2009(5): 104-105
- [21] 李刚, 冯国会, 代菲, 等. 水幕式公共厨房油烟净化装置的试验研究. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(6): 726-730
- [22] 陈城. 饮食油烟对长沙大气环境污染损失分析及其控制措施研究. [中南大学硕士论文]. 长沙: 中南大学, 2007
- [23] 高俊敏, 李百战, 金振星. 重庆市油烟污染现状调查及原因分析和防治对策. 土木建筑与环境工程, 2008, 30(1): 83-87
- [24] B.S. OYAMA, M.F. ANDRADE, P. HERCKES, et al. Vehicular Emissions of Organic Particulate Matter in Sao Paulo, Brazil. Atmospheric Chemistry & Physics, 2015, 15(23): 33755-33788
- [25] C.Y. KUO, F.C. CHENG, S.Y. CHANG, et al. Analysis of the Major Factors Affecting the Visibility Degradation in Two Stations. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, 63(4): 433-441
- [26] R.J. HUANG, Y. ZHANG, C. BOZZETTI, et al. High Secondary Aerosol Contribution to Particulate Pollution during Haze Events in China. Nature, 2014, 514(7521): 218-222
- [27] 罗文旺, 戴文灿, 李东鸣, 等. 工业源常见 VOCs 治理技术的研究进展. 广东化工, 2017(16).12-19
- [28] L.T. Gibson. Mesosilica Materials and Organic Pollutant Adsorption: Part A Removal from Air.. Chemical Society Reviews, 2014, 43(15):5163-72
- [29] G.B. Baur, I. Yuranov, A. Renken, et al. Activated Carbon Fibers for Efficient VOC Removal from Diluted Streams: the Role of Surface Morphology. Adsorption-journal of the International Adsorption Society, 2015, 21(6-7):479-488
- [30] 梁伟朝. 海泡石改性及其吸附挥发性有机物机理与过程研究. [河北科技大学硕士论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [31] R. Liu, J. Wang, J. Zhang, et al. Honeycomb-like Micro-Mesoporous Structure TiO<sub>2</sub> /Sepiolite Composite for Combined Chemisorption and Photocatalytic Elimination of Formaldehyde. Microporous & Mesoporous Materials, 2017, 248
- [32] G. Zhang, Q. Xiong, W. Xu, et al. Synthesis of Bicrystalline TiO<sub>2</sub>, Supported Sepiolite Fibers and their Photocatalytic Activity for Degradation of Gaseous Formaldehyde. Applied Clay Science, 2014, 102:231-237
- [33] 胡国丽. 我国制药行业 VOCs 与恶臭气体排放控制的研究. [南开大学硕士论文]. 天津: 南开大学, 2013
- [34] G.C. FANG, C.N. CHANG, Y.S. WU, et al. Characterization, Identification of Ambient Air and

- Road Dust Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Central Taiwan, Taichung. *Science of the Total Environment*, 2014, 327(1-3): 135-146
- [35] 肖潇. 液体吸收法资源化处理工业甲苯废气的研究. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015
- [36] A. Gervasini, GC. Vezzoli, V. Ragini. VOC Removal by Synergic Effect of Combustion Catalyst and Ozone. *Catalysis Today*, 1996, 29(14): 449-455
- [37] Y. Yan, L. Wang, H. Zhang. Catalytic Combustion of Volatile Organic Compounds over Co/ZSM-5 Coated on Stainless Steel Fibers. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 255(6): 195-204
- [38] D. CONTINI, A. GAMBARO, F. BELOSI, et al. The Direct Influence of Ship Traffic on Atmospheric PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and PAH in Venice. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(9): 2119-2129
- [39] N. Jodeiri, L. Wu, J. Mmbaga, R.E. Hayes et al. Catalytic Combustion of VOC in a Counter-Diffusive Reactor. *Catalysis Today*, 2010, 155(1-2): 147-153
- [40] G. Zhou, X. He, S. Liu, et al. Phenyl VOCs Catalytic Combustion on Supported CoMn/AC Oxide Catalyst. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 2015, 21(1): 932-941
- [41] A. ARANZABAL, J.A. GONZÁLEZ-MARCOS, M. ROMERO-SÁEZ, et al. Stability of Protonic Zeolites in the Catalytic Oxidation of Chlorinated VOCs (1, 2-Dichloroethane). *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, 88 (3-4): 533-541
- [42] K. KIARED, L. BIBEAU, R. BREZEZINSKI, et al. Biological Elimination of VOCs in Biofilter. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 1996, 15(3): 148-152
- [43] P. BAJPAI. Biological Methods for the Elimination of Odorous Compounds. Germany: Springer International Publishing, 2014: 2191-5547
- [44] G. LESON, A. M. WINES. Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emissions Air Waste Manage Assoc, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1991, 41(8): 1045-1053
- [45] A. Zielińska-Jurek, A. Zaleska. Ag/Pt-modified TiO<sub>2</sub>, Nanoparticles for Toluene Photooxidation in the Gas Phase. *Catalysis Today*, 2014, 230(7): 104-111
- [46] C. Zhang, Y. Liu, J. Yang, et al. Hydrothermal Synthesis of Porous SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Microspheres and Their Photocatalytic Degradation of Gaseous Benzene. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 170(1): 53-58
- [47] 刘文举, 姚俊婷, 党乐平, 等. 微波场下非贵金属氧化物的升温行为和烹饪油烟的催化净化性能研究. *分子催化*, 2006, 20(3): 221-225
- [48] 钱佳. 武汉市东南部大气PM<sub>2.5</sub>中烃类化合物分布及来源解析. [武汉理工大学硕士论文].

武汉: 武汉理工大学, 2010

- [49] 李强. 济南市大气颗粒物上多环芳烃的分析和来源解析研究. [山东大学硕士论文]. 济南: 山东大学, 2006
- [50] Z. Jiang, M.X. Chen, J. Shi, et al. Catalysis Removal of Indoor Volatile Organic Compounds in Room Temperature: From Photocatalysis to Active Species Assistance Catalysis. *Catalysis Surveys from Asia*, 2015, 19(1):1-16
- [51] 何红勤. 商用厨房油烟净化与导流通风系统的优化设计及数值模拟研究. [江苏大学硕士论文]. 镇江: 江苏大学, 2010

## 致 谢

本文是在段二红教授和企业导师张灵芝的悉心指导和严格要求下完成的。从实验方案的制定，到实验过程中关键问题的解决，以及最后论文的撰写，每一步都倾注了老师大量的精力和心血。感谢段老师在科研工作中对学生的春风化雨般教导与及生活上对学生的鼓励，老师严谨的治学态度、高尚的人格精神给学生树立了榜样，从您身上学到的东西将是学生一生的财富，我还要特别感谢我的企业导师张灵芝在整个实验过程中给予我的大力帮助。在整个实验过程中，企业导师给我提出了许多宝贵的意见，使我获益匪浅。在此，谨向段二红老师和张灵芝主任致以崇高的敬意和衷心的感谢！

过去的四年，河北科技大学环境学院各个科研室为研究工作提供了许多便利条件，并得到了老师们的无私指导和帮助。在此表示衷心的感谢！

感谢实验室众师弟师妹给予我在科研上和生活上的热心帮助！

此外，我要特别感谢一直在背后默默支持我学习和工作的家人。你们的理解、鼓励、支持，永远是我勇往直前的强大后盾！