

# 北京餐饮源排放细粒子 (PM<sub>2.5</sub>) 的理化特征<sup>1</sup>

温梦婷, 胡敏\*

北京大学环境模拟与污染控制国家联合重点实验室, 北京大学环境学院, 北京, (100871)

Email: [minhu@pku.edu.cn](mailto:minhu@pku.edu.cn)

**摘要:** 近年来, 餐饮企业数量和规模快速增长, 但有限的油烟治理技术使得餐饮源排放问题在中国尤为突出, 对环境和人体健康产生重要影响。本文调研北京餐饮业发展现状, 通过在线监测、采样分析等手段研究北京 4 家不同烹调方式的餐馆所排放颗粒物的质量浓度、粒径分布、形貌特征、化学组分, 并根据研究结果初步估算餐饮源排放对北京颗粒有机物排放量的贡献。餐饮源作为有中国特色的排放源, 其排放细粒子中 70%以上是有机物, 每年向北京大气中贡献的有机物相当于交通源的排放, 成为中国有机颗粒物的主要来源之一。认识餐饮源排放颗粒物的理化性质为改善北京空气质量和保证居民身体健康提供数据支持。

**关键词:** 餐饮源, 细粒子, PM<sub>2.5</sub>, 理化特征

## 1. 引言

油烟是由固体颗粒、液体颗粒以及液体和固体颗粒悬浮于气体介质中形成的均匀分散体系, 主要以液体气溶胶和固体气溶胶形态存在, 粒径在 0.010-10 $\mu$ m 之间, 可长时间悬浮于空气中。<sup>[1]</sup>烹饪时所用植物油和动物油、蛋白质和原料等, 在高温条件下, 产生大量热氧化分解产物, 即有机烟气, 再与燃烧烟气混合, 形成气态、液态和固态的三类污染物, 即油烟。<sup>[2]</sup>油烟中至少含有 300 多种化学物质, 其中主要的有醛、酮、烃、脂肪酸、醇、芳香化合物、脂、内脂和杂环化合物等等, 同时在烹饪油烟中还发现挥发性亚硝胺, 苯并(a)芘(BaP)和二苯并蒽(DBahA)等已知突变致癌物。油烟气溶胶在空气中长时期悬浮, 飘移过程中又吸附了多种物质, 并在其表面进行着复杂的物理、化学反应, 形成对人体危害更大的污染物。<sup>[1-5]</sup>

中国人习惯在烹饪过程中大量采用炸、炒、煎、烤等工艺, 从而产生大量的油烟气溶胶。<sup>[5]</sup>随着中国经济快速发展, 餐饮企业数量和规模快速增长, 但是有限的油烟治理技术使得餐饮源排放问题在中国尤为突出, 对环境和人体健康产生重要影响。

北京人口密集, 餐饮业发达, 餐馆分布密度大。本文调研北京餐饮业发展现状, 通过在线监测、采样分析等手段研究北京 4 家不同烹调方式的餐馆所排放颗粒物的质量浓度、粒径分布、形貌特征、化学组分, 并根据研究结果初步估算餐饮源排放对北京有机碳排放总量的

<sup>1</sup>本课题得到高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号: 20040001055)资助; 国家重点基础研究发展规划项目(973)(2002CB211605); 国家科技部“863”(2005AA649030)

贡献，为控制北京空气质量和保证居民身体健康提供必要的数据依据。

## 2. 北京市餐饮业发展现状

### 2.1 北京市餐饮行业近年来快速发展

北京市人口密度大，同时又是政治、经济和文化活动的中心。近年来，餐饮业持续上升势头，截止 2002 年 6 月底，北京市已有餐饮业网点 22325 个<sup>[6]</sup>，2004 年北京已成为全国餐饮消费增长率最高的城市。到 2005 年底，北京共有 41000 家餐饮企业。据业内估计平均每天大约都有 2% 新增餐馆。

### 2.2 餐馆分布遍布北京市

近年来，北京市国民经济快速发展，大型商业、科技园区、CBD 商务中心、使馆区和金融街都集中在四环路以内，伴随城市交通系统的发展，北四环以北，南三环以南开发了大面积居住区。<sup>[6]</sup>以中关村地区的餐饮业发展为例：2005 年底，在北京市海淀区中关村地区 25km<sup>2</sup> 的面积内共分布了大、中型中餐餐馆 240 余家（不包括机关，企事业单位和大中小学的食堂，社区内小型餐馆），西餐餐馆 20 余家，而且还随着中关村核心地区商业发展，快速膨胀。

### 2.3 中、西快餐发展迅速

截止 2002 年 6 月底，北京市共有中式正餐馆 3590 家，占全部餐饮企业的 74.4%。<sup>[6]</sup>近年来，中式快餐和西式快餐以连锁加盟的经营策略发展迅猛。据调查显示，北京市共有中式快餐馆、西式快餐馆 621 家，占全部餐饮企业的 12.9%。<sup>[6]</sup>快餐原料涉及大量肉类和油脂，而且由于营业时间长，客流量大，油烟净化设备老化快，成为餐饮业排放的一支生力军。

### 2.4 餐馆油烟净化设备状况良莠不齐

国家环保总局和国家质量监督检验检疫总局于 2001 年 11 月 12 日联合发布了《饮食业油烟排放标准》(GB18483-2001)，规定了饮食业油烟不得自然排放，必须净化。北京市环保局于 2002 年底优先治理了中型餐饮企业，烧烤店以及敏感地区、繁华街道的餐饮企业。2003 年底基本完成了所有餐饮企业的治理工作。但是由于国内现有油烟治理方法自身的缺点，很难长期根本性解决油烟排放问题(见表 1)。

表 1. 国内外常见油烟治理方法及比较<sup>[1-2, 4-5]</sup>

治理方法	设备	原理	优点	缺点
沉降法 <sup>a</sup>	高压静电油烟净化器	利用电场使油雾颗粒荷电, 并在电场力作用下被收集到极板上, 从而达到净化效果	净化效率高、阻力小, 半年清洗一次, 能满足各种类型的餐饮场所	长期使用电极表面形成油膜层, 阻碍电场放电且不易清洗, 设备造价偏高, 占地面积大
洗涤法 <sup>a</sup>	水喷淋	吸收液吸收油烟气中的污染物, 通过气液接触使污染物从气相向液相转移	净化效率高, 不占地, 能自动清洗	价格贵, 专用洗涤液不好处置
吸附法 <sup>a</sup>	活性炭	烟油气通过净化器内壁的复合材料时被吸附在其纤维中, 达到净化目的	净化效率高达 90%, 运行较稳定, 除烟油量较大, 价格便宜	需配套设备, 复合材料不能循环使用
分离法 <sup>a</sup>	滤布、滤网和格栅	油烟通过滤层, 颗粒物由于动力捕集作用被除去, 也可同时去除大部分油烟气味	费用较低, 效率高, 运行可靠, 安装方便	滤网容易堵塞, 压降大、价格较贵
热氧化焚烧法 <sup>b</sup>	燃烧器	采用油烟充分燃烧使其转化成二氧化碳和水	效果好, 彻底清除污染和气味	设备成本高

\* a. 为国内常见油烟治理方法, b 为国外常见油烟治理方法

### 3. 样品采集和分析

#### 3.1 样品采集

选择在 2005 年 7 月 18 日~7 月 30 日在北京市海淀区对川菜、杭州菜、家常菜和烧烤类 4 家餐馆排烟口进行采样, 采样时间集中在餐馆午市和晚市的高峰时段(根据不同餐馆的营业状况有所不同), 采样时间 3-4h。同时在北京大学理科二号楼六楼楼顶采集环境大气的样品, 采样时间 24h。

餐饮源排放颗粒物采样器包括: 北京地质仪器厂中流量 PM<sub>2.5</sub>-2 型颗粒物采样器(流量为 78L/min), 美国 URG 公司 PM<sub>2.5</sub> Cyclone(流量 16.7L/min), 采样膜为 Whatman 公司石英纤维膜, 用于化学组分分析。用美国 TSI 公司 Dusttrak<sup>TM</sup> Aerosol Monitor(流量 1.7L/min) 在线监测源排放颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1.0</sub> 的质量浓度。

环境大气颗粒物采样器包括: 美国 URG 公司 PM<sub>2.5</sub> Cyclone(流量 16.7L/min)、美国 Thermal Anderson 公司的大流量 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物采样器(流量 1.13m<sup>3</sup>/min), 采样膜为 Whatman 公司石英纤维膜。

为除去新石英膜上的少量有机杂质, 采样前将石英膜在 500℃ 马弗炉灼烧 4h。采样结束后, 将石英膜包在灼烧过的铝箔中, 放入专用的冰箱中在 -18℃ 冷冻保存。

### 3.2 采样餐馆描述

采样餐馆包括川菜、杭州菜、家常菜、烧烤，分别为北京市餐馆中较为常见的菜系。餐馆排放油烟浓度同油烟净化方式及设备状态有很大关系（见表 1），其中川菜，杭州菜，烧烤的油烟净化设备维护状态较好，家常菜净化设备相对较差。表 2 中列出了各餐馆的烹调特点、规模、上座率、除尘方式、燃料及用油的基本信息。

表 2 餐饮源采样餐馆烹调特点及基本信息

菜系	烹调特点	规模	上座率	餐馆基本信息
川菜	基本特点是酸、甜、麻、辣、香、油重、味浓，主要烹调方法是：炒、爆、烤、烧、煸等。	中型 6 灶头	80%	处理方式：水喷淋+活性炭吸附 使用燃料：天然气 使用油：色拉油
杭州菜	烹调方法突出煎、炸、蒸、炖等，口味特点：爽、淡、脆、鲜。	大型 22 灶头	85%	处理方式：高压静电除尘 使用燃料：天然气 使用油：色拉油、调和油
家常菜	家常菜以炖、酱、炒为主要特点，形糙色重味浓。	大型 10 灶头	100%	处理方式：活性炭 使用燃料：天然气 使用油：大豆色拉油
烧烤	油炸，煎烤，肉类多，主食少，蔬菜多为生吃，高蛋白、高脂肪、高热量	中型 分散型	85%	处理方式：静电除尘 使用燃料：木炭+天然气 使用油：色拉油

### 3.3 样品分析

#### 3.3.1 无机离子的提取和测定

超纯水中超声提取采集了 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物的采样膜，将提取液通过 0.45 $\mu$ m 的微孔滤膜（德国 Membrana 公司）过滤。用 ICS-2500 型离子色谱仪（AS-14 型阴离子色谱柱，AG-14 型保护柱，淋洗液为 3.5mMNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+1.0mMNaHCO<sub>3</sub>）测定提取液中水溶性无机阴离子（F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>），用 ICS-90 型离子色谱仪（CS-12A 型阳离子色谱柱，CG-12A 型保护柱，淋洗液为 20mM 甲磺酸溶液）测定水溶性无机阳离子（Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>）。离子色谱测量物质的最小检出限为：Cl<sup>-</sup>0.004  $\mu$ g/ml, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>0.01  $\mu$ g/ml, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>0.004  $\mu$ g/ml。

#### 3.3.2 有机碳和元素碳的测定

有机碳和元素碳的测定使用美国 Sun-set Laboratory Inc. 碳分析仪。分析时使用的石英膜面积为 1.45cm $\times$ 1cm。该仪器测定 OC 和 EC 的检测限均为 0.2 $\mu$ g $\cdot$ cm<sup>-2</sup>，精密度分别为 4.56% 和 4.90%。由总有机碳质量换算成总有机物质量时转换系数采用 1.2。

### 3.3.3 颗粒物显微形貌的测定

北京大学物理学院电子显微镜实验室,美国 FEI 公司的 Quanta 200FEG 环境扫描电子显微镜,低真空模式 (0.1-1.5Torr)。

## 4. 结果与讨论

### 4.1 北京餐饮源排放细粒子质量浓度及粒径分布

餐饮源排放细粒子 ( $PM_{2.5}$ ) 与食物的烹饪过程有很大关系,如:烹饪温度、食物组成、通风情况、油烟去除装置,以及客流量都会影响细粒子排放浓度及组成。<sup>[7-9]</sup>

表3中列出采样餐馆不同营业时段排放颗粒物 $PM_{2.5}$ 的平均浓度及环境大气 $PM_{2.5}$ 的质量浓度。排放颗粒物 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高的是家常菜,分别是 $4053.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ (午市)和 $2348.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ (晚市),远高于同为大型餐馆的杭州菜。川菜、烧烤的质量浓度比较接近,约为 $1400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。杭州菜的营业规模是川菜的三倍,但是二者排放颗粒物浓度相差不大,说明采用高压静电除尘的净化方式效果要好于水喷淋和活性炭。各餐馆颗粒物排放浓度是环境大气颗粒物浓度 8-35倍,远远大于大气中颗粒物的浓度水平。

对于同一个餐馆,午市和晚市排放的颗粒物质量浓度变化也较大,主要是由客流量多少决定。家常菜的午市排放高于晚市,主要因为家常菜地处于办公区,午市客流量远大于晚市。同为大型餐馆的杭州菜,晚市排放浓度高于午市,因为其价格档次较高,主要客流量出现在晚市时段。川菜和烧烤午市和晚市差别不大,和客流量统计的结果一致。

表 3 餐饮源采样餐馆的平均浓度及其与环境大气的比值

菜系	时段	源排放颗粒物 质量浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	环境大气颗粒 物质量浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	源排放/ 环境大气 (倍数)
川菜	午市	1497.0	188.4	7.9
	晚市	1396.4		7.4
杭州菜	午市	1562.7	77.4	20.2
	晚市	1813.9		23.4
家常菜	午市	4053.2	115.2	35.2
	晚市	2348.5		20.4
烧烤	午市	1384.5	73.2	18.9
	晚市	1382.2		18.9

图 1 (a, b, c, d) 分别为四个采样餐馆排烟口颗粒物 ( $PM_{2.5}$  和  $PM_{1.0}$ ) 质量浓度在线记录。可以明显看出烹饪过程作为一个间歇非连续过程,各个餐馆在进餐高峰期颗粒物排放也是非连续的。 $PM_{2.5}$  瞬时最高浓度可以达到  $11\text{mg}/\text{m}^3$ , 细粒子 ( $PM_{2.5}$ ) 作为油烟质量浓度组成的一部分就已经大大超过饮食业油烟排放标准 (试行) 最高允许排放浓度  $2.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。从

各个餐馆油烟净化设备的指标来看,如果及时有效维护,都可以实现排放达标。但因餐馆资金情况和重视程度不同,设备状况差别较大。实际餐饮业中,资金实力和环保意识差的餐馆为数很多,排放超标问题十分严峻。

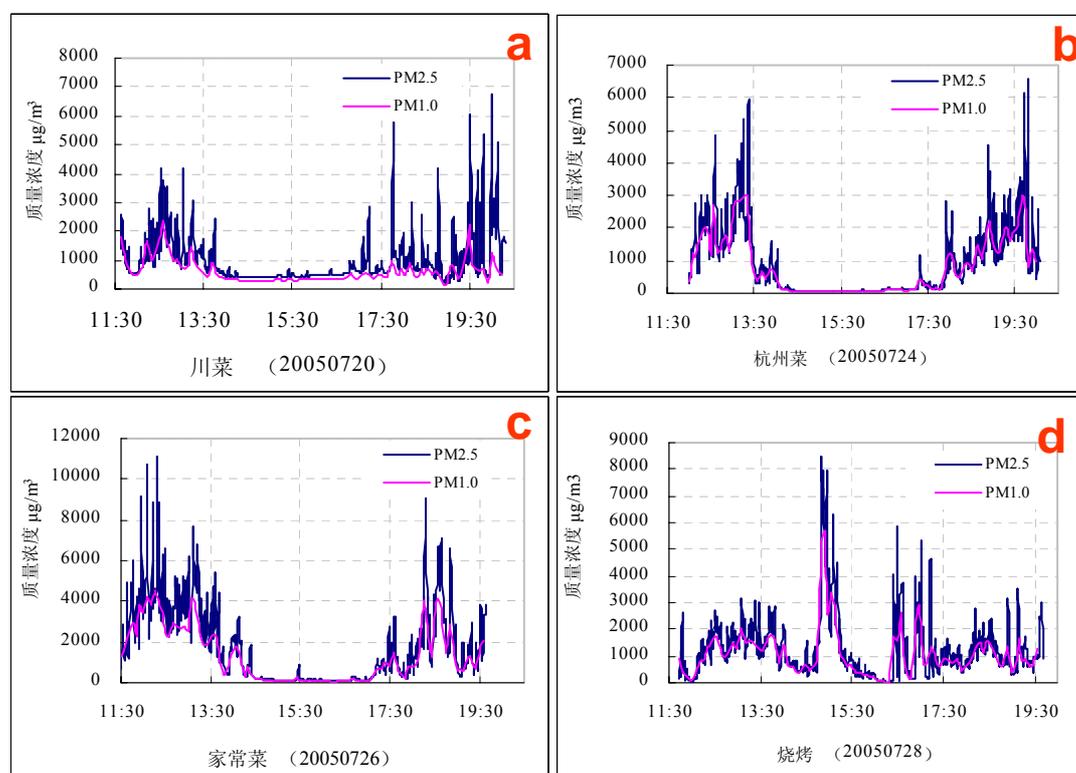


图 1. 各餐馆排烟口排放颗粒物 ( $PM_{2.5}$  和  $PM_{1.0}$ ) 质量浓度随时间变化图

以往研究普遍认为,餐饮排放的颗粒物粒径在  $0.010-10\mu\text{m}$  之间。<sup>[1]</sup>何凌燕等对深圳和赵云良等对广州餐饮源的研究结果表明,中国餐饮源排放颗粒物  $PM_{2.5}$  占到  $PM_{1.0}$  的 80% 以上,说明中国餐饮源排放颗粒物主要为细粒子。<sup>[10-11]</sup>

本研究采用 dusttrak<sup>TM</sup> 在线记录细粒子 ( $PM_{1.0}$  和  $PM_{2.5}$ ) 浓度变化,并计算  $PM_{1.0}/PM_{2.5}$  (见表 4)。餐饮源排放颗粒物中,  $PM_{1.0}/PM_{2.5}$  值为 40%-90%,说明  $PM_{1.0}$  占到  $PM_{2.5}$  质量浓度较大比例。但是波动区间较大,很可能由于具体餐馆所做菜式的烹调方式和原料以及除尘设备状态的影响。

营业时间段,杭州菜的  $PM_{1.0}/PM_{2.5}$  最高,接近 85%。说明杭州菜排放颗粒物质量中大多数为  $PM_{1.0}$ 。四个餐馆中杭州菜的除尘设备维护最好,但是高压静电除尘技术限制,对粒径小于  $1\mu\text{m}$  的颗粒物去除效果不是很好。同样使用静电除尘设备的烧烤,  $PM_{1.0}/PM_{2.5}$  的比例也相当的高。此外,川菜和家常菜晚市的  $PM_{1.0}/PM_{2.5}$  都明显低于午市,这可能和具体烹饪的菜式有一定关系。

表 4 各餐馆营业时段排放颗粒物 (PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1.0</sub>) 质量浓度

菜系	川菜		杭州菜		家常菜		烧烤	
	午市	晚市	午市	晚市	午市	晚市	午市	晚市
PM <sub>1.0</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	1.03	0.66	1.48	1.40	2.59	1.51	1.27	1.03
PM <sub>2.5</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	1.41	1.12	1.75	1.67	3.46	3.01	1.65	1.22
PM <sub>1.0</sub> /PM <sub>2.5</sub>	73%	59%	85%	84%	75%	50%	77%	85%

表 5 所示, 非营业时段 (14:30-16:30), 排烟口的颗粒物浓度还是高于环境大气 (当天 24h 平均值), 由于抽风设备在不停的运转, 还是会有来自厨房或者原本吸附在排烟通道上的颗粒物被送出排烟口。川菜在非营业时间排放浓度远大于环境大气, 说明设备和管道的脱附情况比较严重。杭州菜和家常菜排放细粒子浓度最接近环境大气的浓度, 由于环境大气为 24h 平均值, 夜间边界层降低, 大气颗粒物浓度增加的影响, 非营业时间段的实际大气浓度小于 24h 平均值。

表 5 各餐馆非营业时段排放颗粒物 (PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1.0</sub>) 质量浓度

菜系	川菜	杭州菜	家常菜	烧烤
非营业时段 (14:30-16:30)	PM <sub>1.0</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) 0.320	0.064	0.102	--
	PM <sub>2.5</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) 0.460	0.080	0.152	--
环境大气 (24hr 平均)	PM <sub>2.5</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) 0.155	0.084	0.130	--

\* 烧烤餐馆没有显著的营业时段和非营业时段差别

## 4.2 北京餐饮源排放细粒子形貌特征

餐饮源排放的颗粒物来自食用油及食品在高温下的热分解的产物。食用油及食品在高温下的挥发物及其冷凝物气溶胶, 水气及含水量烟尘气体所组成烹调油烟气。<sup>[1, 12]</sup>从形态组成上看, 餐饮业外排烹调油烟气包括颗粒物及气态污染物两类。其中颗粒物粒径一般小于 10μm, 分为固体、液体两种, 且液体的粘度较大。<sup>[5]</sup>

本研究的监测结果显示, 餐饮源排放的颗粒物质量浓度大部分为 PM<sub>1.0</sub>。因此需要更多的证据证明中国餐饮源排放颗粒物的物理特性, 如形貌, 大小, 分布等。

场发射环境扫描电镜 (Field Emission Environmental Scanning Electron Microscope 简称 FESEM) 利用高能电子束入射颗粒物表面, 收集高能电子束和颗粒物表面原子相互作用激发的二次电子, 经过分析得出相关的高分辨率的微区形貌。由于它采用场发射电子枪和压差光阑技术, 使得这种电镜有很高的图像空间分辨 (优于 2nm), 而且对样品无需进行预处理 (包括不导电样品, 含水样品甚至活体等), 可直接进行电镜观察获得有关颗粒物粒度、大小、形貌、聚集特征、成分、来源等信息。<sup>[13]</sup>

国内有关颗粒物形貌的研究报道较少,<sup>[14]</sup>对于餐饮源这类颗粒物的形貌几乎没有任何研究。本研究采用石英纤维膜采集样品, 膜上收集成分由半挥发性物质和颗粒态物质共同组

成。环境扫描电子显微镜通过低真空模式对采样膜直接进行形貌研究，保持样品原始形貌。

对四种餐馆样品分别应用环境扫描电镜研究，发现不同餐馆之间颗粒物形貌差别不大，主要有三种颗粒物：固体颗粒物、液体颗粒物和球状颗粒物（见图 2）。图 2(a)为颗粒物附着在石英膜纤维上的照片，(b)为经过灼烧的空白膜的电镜照片，发现经过灼烧之后，石英膜纤维没有颗粒物附着，(c) (d)是局部放大的颗粒物附着在石英膜纤维上的照片。

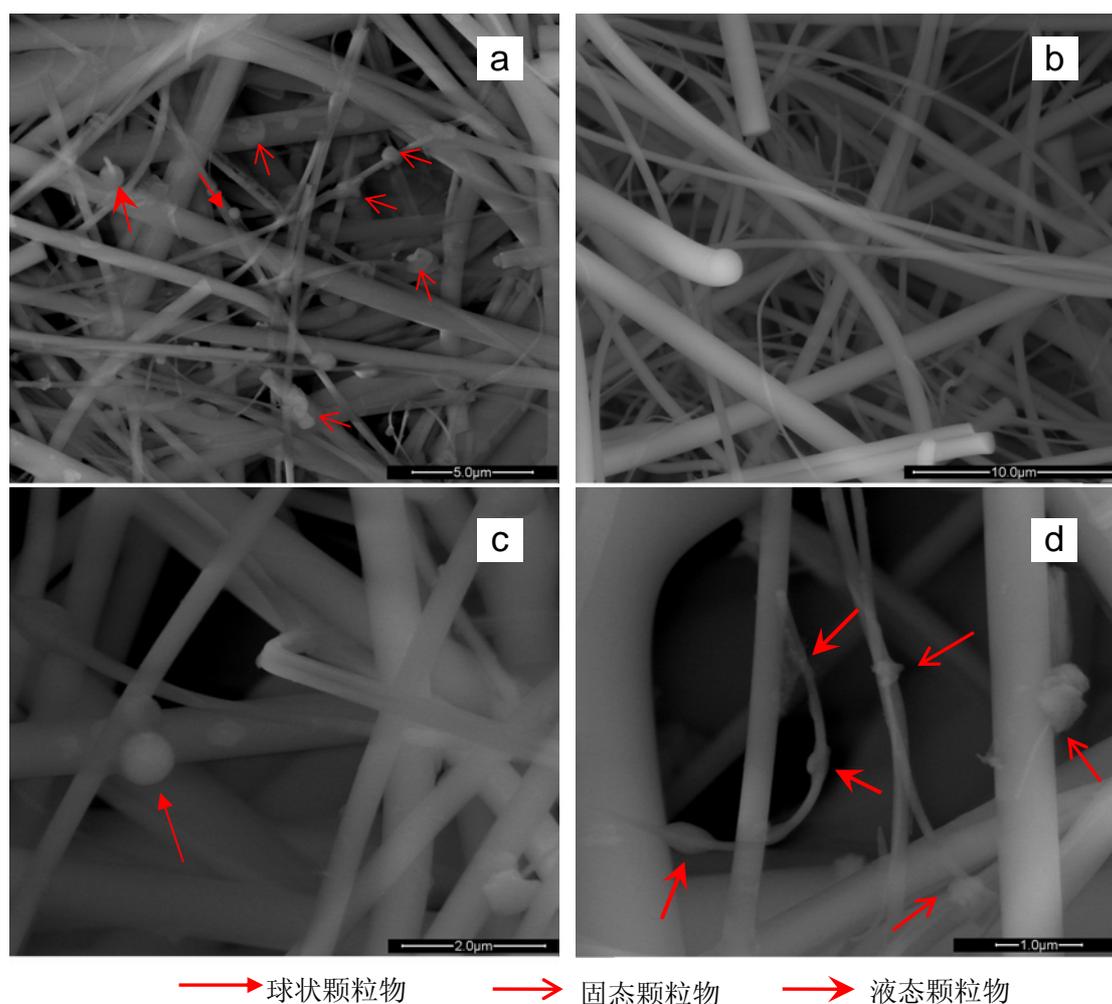


图 2. 餐饮源排放颗粒物的 FESEM 显微图像

(a) (c) (d)中用三种箭头分别表示固体颗粒物、液体颗粒物和球状颗粒物。其中固体颗粒物基本都是无定型结构，可能为颗粒有机物，此外还观察到少量无机晶体颗粒附着在石英纤维表面。从空白石英纤维膜的电镜照片可以看出，纤维表面非常光滑，(a) (d)燕尾箭头所指为液体颗粒物，液体颗粒物在纤维表面由于张力的作用，如油状铺展包裹纤维。体现在电镜照片就是纤维局部变粗，不光滑，或者出现扁平状油滴。相比之下，固体颗粒物是撞击到表面，保持其立体的形貌，如(a) (d)中单箭头所示的固体颗粒物。

(c)中箭头所指的球状颗粒物在各餐馆样品中均有发现，粒径在几十纳米到几百纳米之

间。根据尺寸和形貌特点分析，很可能是烟炱（soot）。燃料天然气的不完全燃烧以及烹饪原料或用油受热不均造成的局部碳化都有可能产生烟炱。

### 4.3 北京餐饮源排放细粒子化学组成

Hildemann 等（1991）对肉类烹饪进行研究，结果发现排放的细粒子中有 68—73%是有机物，含有较少的元素碳。<sup>[7]</sup>国内研究主要集中在烹调油热解以及与健康有关的物种的研究和相关的流行病学的研究。研究的化合物只限于对人体有潜在危害的化合物，如 PAHS，杂环胺和不饱和醛，并且限于对室内空气污染物中的 PAHs 研究。<sup>[15]</sup>何凌燕等利用直接采样法对三种菜系进行采样，结果显示在细粒子中有机物占 50%以上。<sup>[10]</sup>

本文采集的北京餐饮源排放颗粒物的质量浓度大约是环境大气的 8-35 倍（表 3），初步分析化学组分浓度（图 3），主要组分为有机物，占样品质量浓度的 70%左右（图 4）。

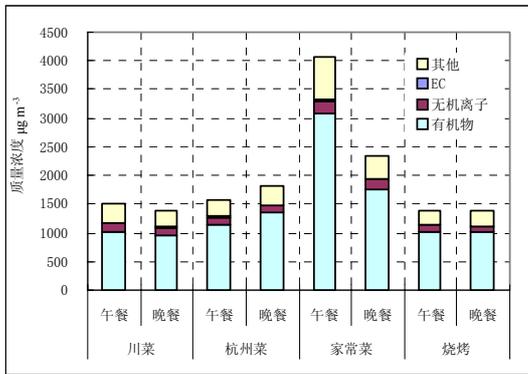


图 3. 餐饮源排放颗粒物中各组分浓度比较

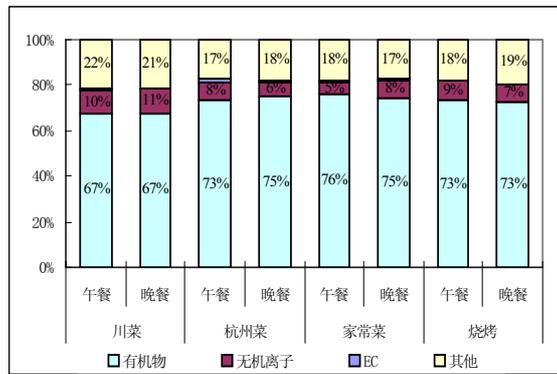


图 4. 餐饮源排放颗粒物中各化学组分百分比图

(有机物=1.2 \*OC，无机离子包括  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )

研究一次源排放的元素碳和有机碳的比例，有助于利用大气中二者的比值判断是否有二次有机气溶胶生成。<sup>[15]</sup>本研究餐饮源排放有机碳与元素碳的比例变化很大从 37.5-142.7（见表 6）。

表 6 北京餐饮源排放颗粒物样品中的 EC&OC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	川菜		杭州菜		家常菜		烧烤	
	午市	晚市	午市	晚市	午市	晚市	午市	晚市
EC	8.4	9.5	25.5	27.0	18.1	11.9	6.9	6.3
OC	841.6	783.6	954.6	1132.1	2576.1	1458.9	843.9	841.4
OC/EC	100.4	82.4	37.5	41.9	142.7	122.4	121.6	132.8

图 5 所示，餐饮源排放细粒子中无机离子组分中质量浓度从高到低依次是  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 。

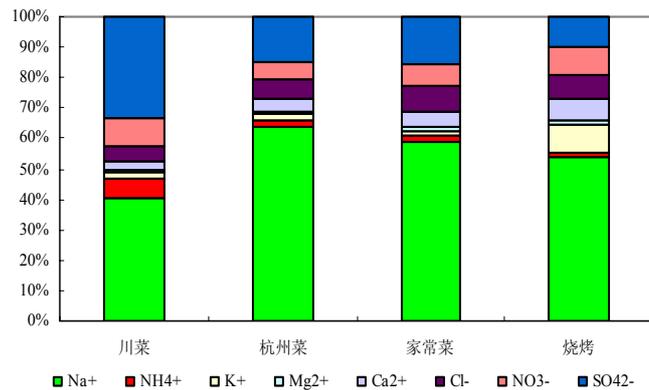


图 5. 北京餐饮源排放中各种无机离子百分数柱状图

由上面的一系列图表可以看出北京餐饮源颗粒物排放的特点：

1. 餐饮源排放颗粒物中化学组分质量百分数由多到少依次是有机物，无机离子和元素碳，其中有机物大约占到了餐饮源排放颗粒物质量浓度的 70%左右，无机离子约占 5%-11%，EC 小于 2%。家常菜排放颗粒物中有机物含量最多，达到 76%，川菜含量最少，为 67%。说明不同菜系烹调方式和原料影响排放出的颗粒物不同的化学组成。
2. 本研究餐饮源排放有机碳与元素碳的比例变化很大，从 37.5-142.7，其中最低比例出现在杭州菜，家常菜和烧烤的比例值都相当高（121.6-142.7），高于广州餐饮源排放研究中有机碳与元素碳的比例 50.9~71.6。<sup>[15]</sup>分析原因主要由于采样餐馆都使用天然气作为燃料，燃料排放 EC 较少，此外油烟除尘设备较广州采样餐馆运行状况要好，导致 EC 的浓度较低，从而增大了有机碳和元素碳的比值。
3. 无机离子组分中质量浓度从高到低依次是  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 。计算当量结果  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  可能来自食盐，此外也有  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等组分。其中烧烤中  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  的百分数比其他三种餐馆高很多，主要来自该餐馆烧烤的肉类。

#### 4.4 北京餐饮源排放对有机颗粒物的贡献的初步估算

2004 年北京已成为全国餐饮消费增长率最高的城市。2005 年底，北京共有 41000 家注册餐饮企业。据业内估计平均每天大约都有 2% 新增餐馆。

参照饮食业油烟排放标准（试行）最高允许排放浓度  $2.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。按照这个浓度，一个中型餐馆（灶头数 6 个），一般设计的排烟通道流量  $12000\text{m}^3/\text{h}$ ，每天营业 6 个小时，一年排放颗粒物 52.6kg。如果北京的 41000 个注册餐饮企业，都按照这个排放规模，全年将向北京市的大气排放 2157 吨细粒子，其中有 1510 吨为有机颗粒物。随着餐饮业自身发展，这个颗粒物排放量还在以每天 4 吨的数量增长。

广州和北京样本餐馆实际排放量情况如下表 7 所示，不难看出，大型的餐饮企业排放总量因为灶头数很多（20-30 个）而相当大。此外，由于资金的原因，油烟净化设备难以保证

良好的维护，排放烟气浓度往往超过国家标准。

表7 北京、广州各菜系餐馆排放量估算

	营业规模	小时排放量	全天排放量	全年排放
		kg/h	kg/d	kg/y
川菜 <sup>a</sup>	中型	0.046	0.275	100.4
杭州菜 <sup>a</sup>	大型	0.044	0.263	95.8
家常菜 <sup>a</sup>	大型	0.175	1.051	383.6
烧烤 <sup>a</sup>	中型	0.022	0.132	48.2
西式快餐 <sup>b</sup>	中型	0.019	0.114	41.6
川菜 <sup>b</sup>	中型	0.070	0.418	152.7
东北菜 <sup>b</sup>	中型	0.287	1.720	627.7
粤菜 <sup>b</sup>	大型	0.905	5.432	1982.8
湘菜 <sup>b</sup>	中型	0.215	1.290	470.8
达标理论计算 <sup>c</sup>	中型	0.024	0.144	52.56

\*a. 北京样本餐馆; b. 广州样本餐馆<sup>[15]</sup>; c.按照中型餐馆参数和国家标准

参比 Guoliang Cao 对 2000 年中国各省排放元素碳和有机碳的源清单调查数据显示，北京市 2000 年交通源排放的有机碳为 1400 吨 (1.4Gg)，<sup>[16]</sup>北京市餐饮源颗粒有机物排放量接近交通源排放量。随着政府有关部门出台监察标准和推进技术改造，生物质燃烧，电厂源，工业源和居民源排放量将得到控制和减少。但是由于城市居民生活需要，餐饮源和交通源排放点源数量将继续扩大，排放总量将很难得到根本性控制。

## 4. 结论

- 北京市餐饮行业近年来快速发展，餐馆分布遍布北京市，餐饮源作为很有中国特色的排放源，由于国内现有油烟治理方法自身的技术缺陷及设备状况良莠不齐，油烟排放问题无法根本上解决而且日渐严重。北京市餐饮源颗粒有机物排放量接近交通源排放量，改进油烟净化设备，加强对餐馆排放监察的力度，控制餐饮源排放迫在眉睫。
- 餐饮源细粒子 (PM<sub>2.5</sub>) 排放与食物的烹饪过程、通风情况、油烟去除装置、以及客流量有很大关系。本文中样本餐馆营业期间排放颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度大约是环境大气 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度 8-35 倍，远远大于大气中颗粒物的浓度。高压静电除尘设备的净化效果要好于其它净化设备。客流量大时，餐馆排放量明显增大。餐饮源排放中 PM<sub>1.0</sub> 在 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度中占到较大的比例，约为 40%-90%，
- 餐饮源排放颗粒物包括固体颗粒物，液体颗粒物和球状颗粒物。固体颗粒物大多为无定型结构，也有少量无机晶体颗粒。液体颗粒物如油状包裹在石英纤维表面。球状颗粒物粒径在几十纳米到几百纳米。根据尺寸和形貌特点分析，很可能是天然气的不完全燃烧以及烹饪原料或油受热不均造成的局部碳化产生的烟炱 (soot)。

4. 餐饮源排放颗粒物中化学组分质量百分数由多到少依次是有机物, 无机离子和元素碳, 其中有机物大约占到了餐饮源排放颗粒物质量浓度的70%左右, 无机离子约占5%-11%, EC 小于2%。本文中有机碳与元素碳的比例变化很大, 从37.5-142.7。无机离子组分中质量浓度从高到低依次是 $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 。其中烧烤中 $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ 的百分数比其他三种餐馆高很多。

#### 参考文献

- [1] 段玉环, 谢超颖, 方恒. 餐饮业油烟污染及治理技术浅议. 环境污染治理技术与设备 [J]. 2002, (11), 67-69
- [2] 程希, 季学李. 烹调油烟污染及其净化技术探讨. 环境保护 [J]. 2001, (12):15-16
- [3] 洪强华. 城市餐饮业油烟污染及监测方法初探. 青海环境 [J]. 2006, (2):76-77
- [4] 黄太山. 对烹调油烟污染及其净化技术的探讨. 江西化工 [J]. 2005, (3):63-65
- [5] 梁衍魁. 餐饮业烹调油烟气的组成与危害及净化方法探讨. 能源与环境 [J]. 2004, (1):43-44
- [6] 北京餐饮业发展状况调查报告. 北京市统计信息网. [EB/OL]. <http://www.bjstats.gov.cn> 2003年3月
- [7] Hildemann, L. M.; Mazurek, M. A.; Cass, G. R.; Chemical Composition of Emissions from Urban Sources of Fine Organic Aerosol, Environ. Sci. Technol. [J]. 1991, 25, 744-759
- [8] Rogge, W. F.; Hildemann, L. M.; Mazurek, M. A.; Cass, G. R.; Simoneit, B. R. T.; Sources of Fine Organic Aerosol. 1. Charbroilers and Meat Cooking Operations, Environ. Sci. Technol. [J]. 1991, 25, 1112-1125
- [9] 何凌燕. 城市大气颗粒物有机物化学组成及变化特征 [D]. 2003, 北京大学博士学位论文
- [10] He Ling-Yan, Hu Min, Huang Xiao-Feng, Yu Ben-De, Zhang Yuan-Hang, Liu De-Quan. Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking, Atmospheric Environment [J]. 2004, 38, 6557-6564
- [11] Yunliang Zhao, Min Hu, Sjaak Slanina, Yuanhang Zhang. The Chemical Compositions of Fine Particulate Organic Matter Emitted from Chinese Cooking. Environ. Sci. Technol. [J]. In press
- [12] 沈孝兵, 王国雄; 烹调烟雾的健康危害; 环境检测管理与技术 [J]. 1999, 11(1), 13-16
- [13] McMurry, P. H.. A review of atmospheric aerosol measurements. Atmospheric Environment [J]. 2000, 34, 1959-1999
- [14] 邵龙义. 城市大气可吸入颗粒物理化学特征及生物活性研究 [M]. 气象出版社, 2006.
- [15] 赵云良. 餐饮源排放颗粒有机物和典型城市大气颗粒物化学组成及特征 [D]. 2005, 北京大学硕士学位论文
- [16] Guoliang Cao, Xiaoye Zhang, Fangcheng Zheng. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China. Atmospheric Environment [J]. 2006, 40, 6516-6527

**致谢:** 感谢赵云良在采样技术上的指导; 郭松、岳玗利、张雯婷等同学参加采样工作; 北京大学物理学院电子显微镜实验室陈莉老师和徐军老师在环境扫描电镜操作上的指导。

# Physical and Chemical Characteristics of Fine Particles (PM<sub>2.5</sub>) Emitted from Cooking Emissions in Beijing

Mengting WEN<sup>1</sup> Min HU<sup>1</sup>

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control  
College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing, PRC, 100087

## Abstract

In recent years, restaurants have largely grown in both number and size. But under-developed techniques of emission reduction control have made cooking emission a serious pollutant problem in China, causing environmental and health impact. This paper investigates the current status of Beijing restaurants management. Using on-line monitor equipment and sampling methods to analyze the mass concentration, size distribution, morphology and chemical composition of cooking emission from 4 kinds of typical Chinese restaurants in Beijing with different cooking style. Rough amount of cooking emission and its contribution to total OC for Beijing is estimated. Cooking emission is especially typical and strong in China, in which 70% and above composition is organic matter. The total amount of OC emitted by cooking emission is approximately the same size as transportation source. Cooking emission is already one of the main sources of particulate organic matter in China. It's quite urgent to understand the chemical and physical characteristics of cooking emission in order to improve Beijing air quality and secure residents' health.

**Keywords:** *Cooking Emission, Fine particle, PM<sub>2.5</sub>, Physical and chemical characteristics*

作者简介: 温梦婷, 女, (1982~), 硕士研究生, 主要研究方向大气颗粒物理化特征。

胡敏, 女, (1966~), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为气溶胶特性及其环境影响, 干湿沉降, 海洋排放二甲基硫及其大气化学过程等。

E-mail: [minhu@pku.edu.cn](mailto:minhu@pku.edu.cn)