

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

温梦婷, 胡敏*

(北京大学环境科学与工程学院 环境模拟与污染控制国家联合重点实验室, 北京 100871)

摘要: 调研了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, 并初步估算餐饮源排放细粒子对北京细粒子中颗粒有机物的贡献。结果表明, 餐馆的原料、烹饪过程、油烟去除装置以及客流量都会影响餐馆所排放颗粒物的物理、化学性质。样本餐馆营业期间排放颗粒物 $PM_{2.5}$ 质量浓度是当日环境大气 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 8~35 倍, $PM_{1.0}$ 在 $PM_{2.5}$ 的质量浓度中约占 50%~85%。餐饮源排放颗粒物多以固态和液态颗粒物形貌存在, 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, 分别占到 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 70% 左右、5%~11% 和小于 2%。初步估计结果表明, 北京餐饮源排放细粒子对有机颗粒物的贡献和交通源的排放相当, 成为北京细粒子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, 可以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; $PM_{2.5}$; 理化特征; 有机颗粒物

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2620-06

Physical and Chemical Characteristics of Fine Particles Emitted from Cooking Emissions and Its Contribution to Particulate Organic Matter in Beijing

WEN Meng-ting, HU Min

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This paper investigated the current status of Beijing restaurants, conducting measurements of cooking emission from 4 kinds of typical Chinese restaurants with different cooking styles in Beijing. Mass concentration, morphology and chemical compositions of $PM_{2.5}$ were analyzed based on filter samples. Mass concentrations of cooking source are about 8~35 times of those of ambient air simultaneously. Both $PM_{1.0}$ and $PM_{2.5}$ emitted from the restaurants were monitored by on-line equipment, and $PM_{1.0}$ took 50%~85% of $PM_{2.5}$ in mass concentration. Particles emitted from cooking source are mostly in solid and liquid morphology. Chemical concentrations of organic matter, inorganic ions and elemental carbon account for about 70%, 5%~11%, and less than 2%, respectively. The total amount of fine particles emitted by cooking source and its contribution to total POM for Beijing are roughly estimated. POM in fine particles from cooking source is approximately the same magnitude as transportation source emission and becomes one of the main sources of POM in fine particles in Beijing. Therefore it's quite urgent to understand the physical and chemical characteristics of cooking emission in order to improve Beijing air quality and secure residents' health.

Key words: cooking emission; fine particle; $PM_{2.5}$; physical and chemical characteristics; POM

烹饪时所用植物油、动物油和原料等, 在高温条件下, 产生大量热氧化分解产物, 即有机烟气, 与烹饪炉灶明火燃烧产生的烟气被抽油烟机抽取到烟道内混合, 形成气态、液态和固态的 3 类污染物, 即油烟, 主要以液体气溶胶和固体气溶胶形态存在, 粒径在 $0.010 \sim 10 \mu m$ 之间, 可长时间悬浮于空气中^[1~4]。油烟中至少含有 300 多种化学物质, 包括醛、酮、烃、脂肪酸、醇、芳香化合物、脂、内脂和杂环化合物等, 在烹饪油烟中还发现挥发性亚硝胺、苯并(a)芘(BaP)和二苯并(ah)蒽(DBaA)等已知致癌致突变物。油烟气溶胶在空气中长时期悬浮, 飘移过程中可吸附多种物质, 并在其表面进行复杂的物理、化学反

应, 形成对人体危害更大的污染物^[5~8]。

中国菜的烹饪方式有炸、炒、煎、烤等, 容易产生大量油烟气溶胶。加之近 20 a 来中国餐饮业规模与数量的迅速发展和有限的油烟治理技术之间的矛盾, 加剧了餐饮排放对环境 and 人体健康所产生的负面影响。北京市餐饮业规模、发展速度均位于全国之首, 了解北京餐饮源排放颗粒物, 特别是细粒子的理

收稿日期: 2006-12-11; 修订日期: 2007-04-09

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040001055); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211605); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA649030)

作者简介: 温梦婷(1982~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物理化特征, E-mail: mmting@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: minhu@pku.edu.cn

化特征,可以为控制北京空气质量和保证居民人体健康提供必要的数据依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

选择在 2005-07-18 ~ 2005-07-30 对北京市海淀区内主营川菜、杭州菜、家常菜和烧烤 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营业高峰时段,采样时间 3 ~ 4 h.同时在北京大学理科二号楼 6 楼顶采集环境大气的样品,采样时间 24 h.

餐饮源排放颗粒物采样器包括:美国 URG 公司 PM_{2.5} Cyclone(流量 16.7 L/min),采样膜为 Whatman 公司石英膜,用于颗粒物化学组分的分析.2 台美国 TSI 公司 DusttrakTM Aerosol Monitor(流量 1.7 L/min)分别在线监测源排放颗粒物 PM_{2.5}和 PM_{1.0}质量浓度.

环境大气颗粒物采样器为美国 URG 公司 PM_{2.5} Cyclone(流量 16.7 L/min),采样膜为 Whatman 公司石英膜,用于分析环境大气颗粒物的化学组分.

采样前将石英膜在 500℃马弗炉灼烧4 h除去石英膜上的少量有机杂质.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.

1.2 采样餐馆描述

四家采样餐馆分别主营川菜、杭州菜、家常菜和烧烤.餐馆排放情况与油烟净化方式和设备状态有很大关系.采样餐馆中杭州菜餐馆净化设备先进,维护最好,其次是烧烤、川菜,家常菜净化设备状态较差.表 1 中列出了各餐馆的烹调特点、规模、上座率、除尘方式、除尘设备状态、燃料及用油等基本信息.

1.3 样品分析

表 1 餐饮源采样餐馆烹调特点及基本信息
Table 1 Main information of sampling restaurants

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 处理设备状态:一般 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 处理设备状态:良好 使用燃料:天然气 使用油:色拉油、调和油
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 处理设备状态:较差 使用燃料:天然气 使用油:大豆色拉油
烧烤	煎烤,油炸,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 处理设备状态:良好 使用燃料:木炭 + 天然气 使用油:色拉油

1.3.1 无机离子的提取和测定

超纯水中超声提取采集了 PM_{2.5}颗粒物的采样膜,将提取液通过 0.45 μm 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 3.5 mmol/L Na₂CO₃ + 1.0 mmol/L NaHCO₃)测定提取液中水溶性无机阴离子(F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻).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 20 mmol/L 甲磺酸溶液)测定水溶性无机阳离子(Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺).离子色谱最小检出限为:Cl⁻ 0.004 μg/mL, NO₃⁻ 0.01 μg/mL, SO₄²⁻ 0.004 μg/mL.

1.3.2 有机碳和元素碳的测定

有机碳和元素碳使用美国 Sun-set Laboratory Inc. 碳分析仪测定.分析时所用石英膜面积为 1.45 cm × 1 cm.该仪器测定 OC 和 EC 的检测限均为 0.2 μg·cm⁻²,精密度均为 5%.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.

1.3.3 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.

2 结果与讨论

2.1 北京餐饮业发展现状

北京市餐饮行业近年来发展迅速.统计数据显示,2002 年度,北京饮食业经营机构共有网点40 458 家,2003 年度增长到73 232家^[9,10].2004 年,北京已成为全国餐饮消费增长率最高的城市,限额以上(年营业额在 200 万元以上)的餐饮企业单位数量从 377 家(2004 年度)迅速增长大 1 255 家(2005 年度)^[10~12],占全国同等规模餐饮企业单位数量的 17%^[13].快速发展的北京餐饮业具有以下特点.

(1) 餐馆分布遍布北京市 近年来,伴随北京市城市规模扩大和交通系统发展,居民生活需要和城市发展促进了北京市餐饮企业数量和规模的扩大.集中于商业区和居民区的大量餐馆在方便人民生活同时,排放的油烟也带来对人体健康的负面影响.

(2) 中、西快餐发展迅速 近年来,中、西式快餐以连锁加盟的经营策略迅猛发展.北京饮食业经营

机构中正餐网点由 33 135 家(2002 年度)增长到 59 717家(2003 年度),快餐网点由4 464家(2002 年度)增长到8 114家(2003 年度)^[9,10].快餐原料涉及大量肉类和油脂,营业时间长,客流量大,数量多,分布广,排放总量不容小视.

(3) 餐馆油烟净化设备状况良莠不齐 2001 年发布了《饮食业油烟排放标准》(GB 18483-2001),规定了饮食业单位油烟的最高允许排放浓度为 2.0 mg/m³和大、中、小型饮食业单位油烟净化设施的最低去除效率分别为 60%、75%、85%.国内常见的油烟治理方法有沉降法、洗涤法和吸附法,这 3 种方法的理论净化效率都很高,但如果没有定期维护设备,净化效率将降低(见表 2).资金和环保意识不足往往成为餐馆业主忽视仪器维护的原因.

2.2 北京餐饮源排放细粒子质量浓度

表 2 国内外常见油烟治理方法及比较^[3,14]

Table 2 Comparison of widely-used oil smoke control methods in China and foreign countries			
治理方法	设备	优点	缺点
沉降法 ¹⁾	高压静电油烟净化器	净化效率高、阻力小,半年清洗 1 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 ¹⁾	水喷淋	净化效率高,不占场地,能自动清洗	价格贵,专用洗涤剂不好处置
吸附法 ¹⁾	活性炭	净化效率高达 90%,运行较稳定,除烟油量 大,价格便宜	需配套设备,复合材料不能循环使用
热氧化焚烧法 ²⁾	燃烧器	效果好,彻底清除污染和气味	设备成本高

1) 为国内常见油烟治理方法; 2)为国外常见油烟治理方法

餐饮源排放细粒子(PM_{2.5})与食物的烹饪过程有很大关系.烹饪温度、食物组成、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^[15~17].

从表 3 可以看出,各餐馆颗粒物排放浓度是当日环境大气颗粒物浓度的 8~35 倍.其中餐饮源排放颗粒物 PM_{2.5}质量浓度最高的是家常菜餐馆,午市和晚市分别达到4 053.2 μg/m³和2 348.5 μg/m³,远高于营业规模更大的杭州菜餐馆,主要因为家常菜餐馆是用活性炭吸附除尘,吸附剂更换不及时,除尘效果下降.杭州菜餐馆和川菜餐馆除尘方式的理论效果接近(见表 2),杭州菜餐馆是川菜餐馆营业规模的 3 倍,但二者排放颗粒物浓度却相差不大,说明设备状态对排放量有一定影响.

同一个餐馆受客流量影响,午市和晚市排放的颗粒物质量浓度差别较大.如:家常菜餐馆地处办公区,午市客流量大于晚市,因此午市排放高于晚市.杭州菜餐馆因其价格档次较高,主要客流量出现在晚市时段,因此晚市排放浓度高于午市.川菜和烧烤餐馆午市和晚市差别不大,同客流量统计结果一致.

2.3 北京餐饮源排放细粒子粒径分布

表 3 餐饮源采样餐馆排放颗粒物 PM_{2.5}平均质量浓度及其与环境大气的比较

Table 3 Comparison of PM _{2.5} average mass concentration between sampling restaurants emission and ambient air				
菜系	时段	源排放颗粒物 质量浓度 /μg·m ⁻³	环境大气颗粒 物质量浓度 /μg·m ⁻³	源排放/ 环境大气
川菜	午市	1 497.0	188.4	7.9
	晚市	1 396.4		7.4
杭州菜	午市	1 562.7	77.4	20.2
	晚市	1 813.9		23.4
家常菜	午市	4 053.2	115.2	35.2
	晚市	2 348.5		20.4
烧烤	午市	1 384.5	73.2	18.9
	晚市	1 382.2		18.9

以往研究普遍认为,餐饮排放的颗粒物粒径在 0.010~10 μm 之间^[1,2].He 等^[18]对深圳和赵云良等对广州餐饮源的研究结果表明,餐饮源排放颗粒物 PM_{2.5}占到 PM₁₀的 80% 以上,说明中国餐饮源排放颗粒物主要为细粒子^[18,21].

本研究用 DusttrakTM在线记录 PM_{2.5}和 PM_{1.0}的质量浓度,在餐馆营业期间颗粒物排放是间歇非连续

的, $PM_{2.5}$ 瞬时浓度最高达到 11 mg/m^3 . 在餐饮源排放的颗粒物中, $PM_{1.0}/PM_{2.5}$ 值为 $50\% \sim 85\%$ (见表 4), 说明 $PM_{1.0}$ 占 $PM_{2.5}$ 质量浓度较大比例.

各餐馆之间 $PM_{1.0}/PM_{2.5}$ 值差别较大. 如: 杭州菜餐馆的 $PM_{1.0}/PM_{2.5}$ 最高, 接近 85% , 其次是烧烤餐馆接近 80% . 杭州菜和烧烤餐馆均采用高压静电除尘技术, 该技术主要去除粒径大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物, 对粒径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物去除效果不是很好, 因此, 杭州菜和烧烤排放颗粒物质量中大多数为 $PM_{1.0}$.

表 4 各餐馆营业时段排放颗粒物($PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$)质量浓度

项目	川菜		杭州菜		家常菜		烧烤	
	午市		午市		午市		午市	
	晚市		晚市		晚市		晚市	
$PM_{1.0}/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.03	0.66	1.48	1.40	2.59	1.51	1.27	1.03
$PM_{2.5}/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.41	1.12	1.75	1.67	3.46	3.01	1.65	1.22
$PM_{1.0}/PM_{2.5}$	73%	59%	85%	84%	75%	50%	77%	85%

餐饮源排放的颗粒物主要来自食用油及食品在高温下热分解的产物和燃料的不充分燃烧产生的颗粒物. 从形态上看, 包括颗粒物及气态污染物 2 类. 颗粒物又分为固态、液态 2 种, 且液态的粘度较大^[3,14].

应用环境扫描电镜分别对 4 个餐馆样品进行颗粒物形貌研究, 发现不同餐馆之间颗粒物形貌差别不大, 主要有 3 种颗粒物: 球状颗粒物、固态颗粒物和液态颗粒物. 对电镜照片中 $20\text{ }\mu\text{m}\times 20\text{ }\mu\text{m}$ 面积内 146 个颗粒物统计归类发现: 球状颗粒物、固态颗粒物和液态颗粒物分别大约占 3% 、 43% 和 44% . 图 1 为颗粒物附着在石英膜纤维上的照片. 图 1 中柱状物是石英纤维, 3 种箭头所指分别表示球状、固态和

同一餐馆不同营业时段 $PM_{1.0}/PM_{2.5}$ 值也存在差别. 如: 川菜和家常菜餐馆晚市的 $PM_{1.0}/PM_{2.5}$ 都明显低于该餐馆的午市, 很可能同当时餐馆具体菜式的烹调方式和原料有关, 但由于餐馆排烟口的油烟往往来自几个灶头的同时排放, 所用原料和烹调方式丰富多样, 采样过程中无法限制餐馆烹调的原料和方式, 所以本研究没有进行餐馆排放同烹饪方式和原料之间关系的分析.

2.4 北京餐饮源排放细粒子形貌特征

液态颗粒物.

球状颗粒物[图 1(a)中方箭头所指]的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是飞灰, 主要来自燃烧过程的排放. 固态颗粒物[图 1(b), 1(c)中单箭头所指]大多为无定型结构, 粒径分布集中在 $100\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$, 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[图 1(c)中单箭头所指], 固态颗粒物由于撞击到纤维上, 其原有立体形貌得以保持. 液态颗粒物[图 1(b)中虚箭头所指]在纤维表面由于张力的作用, 如油状铺展包裹纤维, 纤维局部变粗, 不光滑, 或者出现扁平状油滴.

2.5 北京餐饮源排放细粒子化学组成

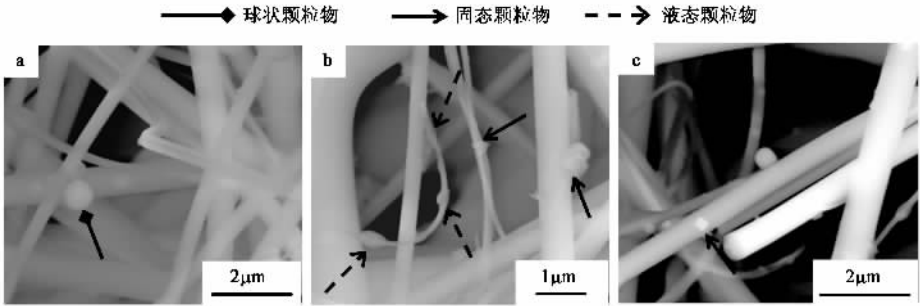


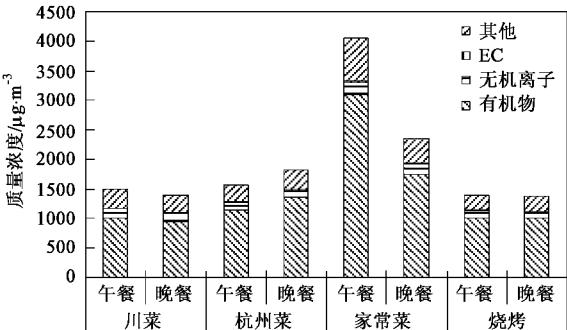
图 1 餐饮源排放颗粒物的 FESEM 显微图像

Fig.1 FESEM images of particles emitted from sampling restaurants

国内外有关餐饮源的研究主要集中在烹调油热解以及与健康有关的物种和相关流行病学方面. 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^[2, 5-8,20]. Hildemann 等^[15]对

肉类烹饪的研究发现排放的细粒子中有 $68\% \sim 73\%$ 是有机物, 含有较少的元素碳. He 等^[18]利用直接采样法对 3 种中国菜系进行采样, 结果显示在细粒子中有机物占 50% 以上.

本研究采集的北京餐饮源排放颗粒物化学组分质量浓度(见图2),主要组分为有机物,占样品质量浓度的70%左右,无机离子约占5%~11%,EC小于2%(见图3).餐馆之间存在一定差别,说明不同菜系烹调方式和原料影响排出颗粒物的化学组成.



有机物 = 1.2 × OC, 无机离子包括 Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , 下同

图2 餐饮源排放颗粒物中个组分浓度比较

Fig.2 Mass concentrations of chemical species in cooking emission

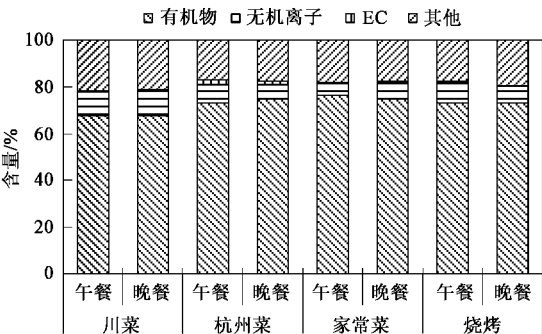


图3 餐饮源排放颗粒物中个组分浓度比较

Fig.3 Mass concentrations of chemical species in cooking emission

如图4,无机离子组分中质量浓度从高到低依次是 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} . 计

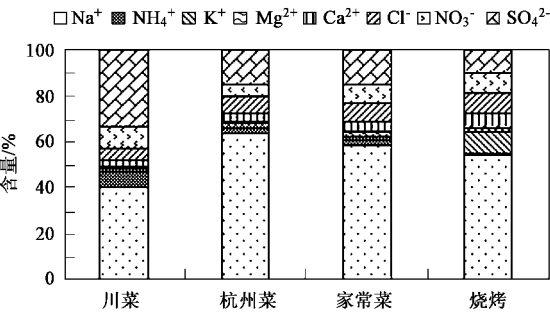


图4 北京餐饮源排放中各种无机离子百分数柱状图

Fig.4 Percentage of inorganic ions in particles emitted by sampling restaurants

算当量结果得知 Na^+ 和 Cl^- 可能来自食盐[见图1(c)],此外也有 NaNO_3 、 Na_2SO_4 等组分.其中烧烤餐馆中 Ca^{2+} 、 K^+ 的百分数比其他3种餐馆高很多,主要来自该餐馆主营的肉类烧烤排放^[22].

2.6 北京餐饮源排放对细粒子有机颗粒物贡献的初步估算

鉴于所选取的样本餐馆基本代表北京市餐馆的排放情况,根据监测结果,以各样本餐馆午、晚市营业期间排放细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的平均值 2.0 mg/m^3 为起点,对餐饮源排放细粒子总量进行估算.对于1个中型餐馆(灶头数6个)来说,通常设计的排烟通道流量 $12\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,每天营业6 h,1 a排放颗粒物 52.6 kg (见表5).截至2005-05工商部门登记的数字显示,北京有41 000个注册餐饮企业^[23],按这个数量估算,全年将向北京市的大气排放大约2 100 t 细粒子颗粒物,根据本研究发现的餐馆排放细粒子颗粒物中70%为有机物计算,每年将有大约1 500 t 细粒子有机颗粒物排入北京大气.

综合广州^[21]和北京样本餐馆实际排放量情况如下表5所示.可以看出,大部分餐馆排放量都大于理论估计值,对于大型餐饮企业来说灶头数多达20~30个,排放量自然很大.各餐馆实际营业时间虽有长有短,但因注册的餐饮企业个数没有包括连锁和加盟店的数量,设备状态又参差不齐,因此实际餐饮源排放量应大于前面的保守估计.

表5 北京、广州各菜系餐馆排放量估算¹⁾

Table 5 Emission estimation of sampling restaurants in Beijing and Guangzhou

项目	规模	小时排放量 /kg·h ⁻¹	全天排放量 /kg·d ⁻¹	全年排放 /kg·a ⁻¹
川菜 ^a	中型	0.046	0.275	100
杭州菜 ^a	大型	0.044	0.263	96
家常菜 ^a	大型	0.175	1.05	384
烧烤 ^a	中型	0.022	0.132	48
西式快餐 ^b	中型	0.019	0.114	42
川菜 ^b	中型	0.070	0.418	153
东北菜 ^b	中型	0.287	1.72	628
粤菜 ^b	大型	0.905	5.43	1 983
湘菜 ^b	中型	0.215	1.29	471
达标理论计算 ^c	中型	0.024	0.144	52.6

1) a 为北京样本餐馆, b 为广州样本餐馆^[21], c 为按照中型餐馆参数和国家标准

Cao 等^[24]对2000年中国各省市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(OC)为1 400 t.北京餐饮源细粒子中颗粒有机物保守估算排放量已接近交通源.

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、工业源和居民源等污染源的排放量将得到控制和减少.然而,同城市居民生活密切相关的餐饮源和交通源的排放点源数量会随着城市的发展和人民生活水平的提高继续扩大.保证北京市空气质量和人民身体健康,控制并减少餐饮源排放细粒子总量将任重道远.

3 结论

(1)北京市餐饮行业近年来快速发展,餐馆分布遍布北京市,由于国内现有油烟治理方法自身的技术缺陷及资金、设备状况良莠不齐,油烟排放问题日渐突出.北京餐饮源排放细粒子中有机颗粒物保守估计的排放量已接近交通源排放量.改进油烟净化设备,加强监察餐馆排放力度迫在眉睫.

(2)北京餐饮源细粒子排放与食物的烹饪过程、油烟去除装置、以及客流量有很大关系.样本餐馆营业期间排放颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度大约是当日环境大气 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 8 ~ 35 倍.餐饮源排放中 $\text{PM}_{1.0}$ 在 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度中约占 50% ~ 85%,主要受到除尘方式的影响.餐饮源排放颗粒物主要以固态和液态颗粒物形貌存在.

(3)各餐馆排放颗粒物化学组分存在一定差别,受不同菜系烹调方式和原料影响.其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,分别占到颗粒物质量浓度的 70% 左右、5% ~ 11% 和小于 2%.

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.感谢北京市劳动保护研究所汪彤研究员在采样设备方面的支持.

参考文献:

- [1] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 4. C1-C27 organic compounds from cooking with seed oils [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36** (4): 567 ~ 575.
- [2] 程希, 季学李. 烹调油烟污染及其净化技术探讨[J]. *环境保护*, 2001, (12): 15 ~ 16.
- [3] 段玉环, 谢超颖, 方恒. 餐饮业油烟污染及治理技术浅议[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, **3**(11): 67 ~ 69.
- [4] See S W, Balasubramanian R. Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking [J]. *Environmental Research*, 2006, **102**(2): 197 ~ 204.
- [5] Chiang T A, Wu P F, Koi Y C. Identification of carcinogens in

- cooking oil fumes[J]. *Environ Res*, 1999, **81**(1): 18 ~ 22.
- [6] Metayer C, Wang Z Y, Kleinerman R A. Cooking oil fumes and risk of lung cancer in women in rural Gansu, China [J]. *Lung Cancer*, 2002, **35**(2): 111 ~ 117.
- [7] Chen B H, Chen Y C. Formation of PAH in the smoke from heated model lipids and food lipids [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, **49** (11): 5238 ~ 5243.
- [8] Zhu L Z, Wang J. Sources and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons pollution in kitchen air, China [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(5): 611 ~ 618.
- [9] 北京市统计局. 北京统计年鉴.2003[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003. 305.
- [10] 北京市统计局. 北京统计年鉴.2004[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004. 312 ~ 315.
- [11] 北京市统计局. 北京统计年鉴.2005[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005. 266 ~ 267.
- [12] 北京市统计局. 北京统计年鉴.2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006. 296 ~ 297.
- [13] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴.2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006. 683.
- [14] 梁衍魁. 餐饮业烹调油烟气的组成与危害及净化方法探讨[J]. *能源与环境*, 2004, (1): 43 ~ 44.
- [15] Hildemann L M, Mazurek M A, Cass G R. Chemical Composition of Emissions from Urban Sources of Fine Organic Aerosol [J]. *Environ Sci Technol*, 1991, **25**(4): 744 ~ 759.
- [16] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of Fine Organic Aerosol. 1. Charbroilers and Meat Cooking Operations [J]. *Environ Sci Technol*, 1991, **25**(6): 1112 ~ 1125.
- [17] 何凌燕. 城市大气颗粒物有机物化学组成及变化特征[D]. 北京: 北京大学, 2003. 142.
- [18] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38): 6557 ~ 6564.
- [19] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, *et al.* Chemical Compositions of Fine Particulate Organic Matter Emitted from Chinese Cooking [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**(1): 99 ~ 105.
- [20] Lee S C, Li W M, Chan L Y. Indoor air quality at restaurants with different styles of cooking in metropolitan Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **279**(1-3): 181 ~ 193.
- [21] 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]. 北京: 北京大学, 2005. 42 ~ 65.
- [22] Watson J G, Chow J C. Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border[J]. *Science of the Total Environment* 2001, **276**(1-3): 33 ~ 47.
- [23] 杨学聪. 京城每天百家餐馆转业倒闭[N]. 北京: 北京日报, 北京日报报业集团, 2005-05-27. 第 10 版.
- [24] Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6516 ~ 6527.