

李勤勤, 吴爱华, 龚道程, 等. 餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 污染特征研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(8): 41-50. Li Qinqin, Wu Aihua, Gong Daocheng, et al. Characteristics of  $PM_{2.5}$  emitted from cooking emissions: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(8): 41-50.

## 餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 污染特征研究进展

李勤勤<sup>1</sup>, 吴爱华<sup>1\*</sup>, 龚道程<sup>2</sup>, 王伯光<sup>2</sup>, 栾胜基<sup>1</sup>

(1. 北京大学深圳研究院深圳环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 深圳 518057;

2. 暨南大学环境与气候研究院, 广东 广州 511443)

**摘要:** 餐饮油烟排放的污染物危害人体健康, 餐饮源已成为城市环境 $PM_{2.5}$ 的重要来源之一。文章对餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 污染特征的研究进行了综述, 包括餐饮源对城市大气环境中 $PM_{2.5}$ 的贡献、餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征、化学特性、排放量的估算; 初步总结了影响餐饮源 $PM_{2.5}$ 排放特征的多种因素; 分析了餐饮源 $PM_{2.5}$ 污染的健康效应。该文在汇总国内外研究的基础上, 对餐饮源 $PM_{2.5}$ 的研究前景进行了展望。

**关键词:** 餐饮源;  $PM_{2.5}$ ; 时空分布; 化学特性; 健康效应

**中图分类号:** X513 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.08.008 **文章编号:** 1003-6504(2018)08-0041-10

## Characteristics of $PM_{2.5}$ Emitted from Cooking Emissions: a Review

LI Qinqin<sup>1</sup>, WU Aihua<sup>1\*</sup>, GONG Daocheng<sup>2</sup>, WANG Boguang<sup>2</sup>, LUAN Shengji<sup>1</sup>

(1. Shenzhen Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Peking University Shenzhen Institute, Shenzhen

518057, China; 2. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China)

**Abstract:** Pollutants emitted from cooking oil fumes have caused harm to human health. Cooking emissions are one of the important sources of  $PM_{2.5}$  in urban environment. In this paper, researches on pollution characteristics of  $PM_{2.5}$  emitted from cooking emissions have been summarized, including the contribution of cooking emissions to  $PM_{2.5}$  in urban atmospheric environment; temporal and spatial distribution features of  $PM_{2.5}$ ; chemical characteristics; estimation of  $PM_{2.5}$  emission. Various influence factors on  $PM_{2.5}$  emission have been preliminarily summarized; health effect of  $PM_{2.5}$  emitted from cooking emissions has also been analyzed. Future researches on  $PM_{2.5}$  emission from cooking oil fumes have been prospected based on the summary of researches at home and abroad.

**Key words:** cooking emissions;  $PM_{2.5}$ ; temporal and spatial distributions; chemical characteristics; health effects

食物烹饪过程可释放大量有机气溶胶(OA), 餐饮油烟对城市一次有机碳细颗粒的贡献可达21%<sup>[1]</sup>。不同城市餐饮源对OA的贡献分别为: 北京24.4%<sup>[2]</sup>、Paris 17% (用餐高峰时间段可达35%)<sup>[3]</sup>、London 和 Manchester 34%<sup>[4]</sup>、Barcelona 17%<sup>[5]</sup>、Zurich 10%~15%<sup>[6]</sup>、New York 16%<sup>[7]</sup>、Fresno 19%<sup>[8]</sup>。而OA是颗粒物的重要组成部分, 可占颗粒物的20%~90%<sup>[9]</sup>。同时, 研究发现餐饮源排放颗粒物中,  $PM_{10}$ 占TSP质量的97.43%,  $PM_{2.5}$ 占TSP质量的76.91%<sup>[10]</sup>,  $PM_{2.5}$ 可占 $PM_{10}$ 质量的80%~93%<sup>[11]</sup>。因此, 餐饮源是城市大气环境中颗粒物的重要来源之一, 并且排放的颗粒物以 $PM_{2.5}$ 为主。

流行病学研究指出, 餐饮油烟与人体癌症, 尤其是肺癌的发生密切相关<sup>[12]</sup>。大量研究表明, 餐饮油烟对人体健康的作用受多重因素的影响, 如: 高温烹饪可使患癌风险增加1.64倍<sup>[13]</sup>; 患癌风险随着使用菜子油爆炒的频率和烹饪年限的增加而增加<sup>[14]</sup>。与普通居民相比, 餐厅职工慢性患病概率增加了2~3倍<sup>[15]</sup>。研究表明, 餐饮油烟可对餐厅厨房工作人员造成DNA氧化损伤<sup>[16]</sup>。同时, 颗粒物中包含大量有毒有害物质, 如重金属、醛酮类和多环芳烃(PAHs)。动物活体实验表明, 餐饮油烟排放的颗粒物可造成动物肺部损伤<sup>[17]</sup>。

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) [hjkxyjs@vip.126.com](mailto:hjkxyjs@vip.126.com)

收稿日期: 2017-12-11; 修回 2018-02-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0211501)

作者简介: 李勤勤(1989-), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境安全与污染控制, (电话) 0755-26972819 (电子信箱) [liqq9108@163.com](mailto:liqq9108@163.com); \*通讯作者, (电子信箱) [phenix\\_wah@aliyun.com](mailto:phenix_wah@aliyun.com)。

基于以上研究背景,大量学者对餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 的贡献率、排放浓度、时空分布特征、理化特征、影响因素等方面进行了研究。本文对已有研究进行了归纳总结与分析,以期全面了解餐饮源 $PM_{2.5}$ 的污染特征及健康效应,为进一步研究餐饮源 $PM_{2.5}$ 提供参考,最终达到有效治理餐饮油烟污染、降低餐饮油烟危害的目的。

## 1 餐饮源贡献

随着餐饮油烟污染的加剧,餐饮源对城市大气 $PM_{2.5}$ 的贡献逐步受到学者的重视。表1总结了国内

外不同区域餐饮源对城市大气 $PM_{2.5}$ 贡献的研究结果。虽然监测时间、监测方法以及源解析方法存在差异,但表1在一定程度上仍能反映不同地域餐饮源污染情况。从表1可以得出,餐饮源贡献的解析方法大致可分为2种,即排放量估算和模型模拟(CMB模型和PMF模型)。在表1所列城市中,北京地区餐饮源对 $PM_{2.5}$ 的贡献最高,最大值可达25%;餐饮源贡献最低值出现在美国Atlanta地区,为0.5%。总体上看,国内餐饮源对 $PM_{2.5}$ 的贡献率略高于国外餐饮源的贡献率,这与中西方饮食文化差异<sup>[18]</sup>和中式餐饮经常使用爆炒、煎炸等烹饪方式有关<sup>[19]</sup>。

表1 不同城市餐饮源 $PM_{2.5}$ 的贡献率  
Table 1 Contributions of cooking emissions to  $PM_{2.5}$  in different cities

区域	研究方法	贡献率/%
北京 <sup>[20]</sup>	基于排放浓度和餐馆数量的排放量估算	15~25
深圳 <sup>[21]</sup>	基于改进单箱模式推导的大气环境容量模型	14.5
厦门 <sup>[22]</sup>	采用CMB模型分析2013年1月、4月、7月和10月24 h采样数据	6.1
武汉 <sup>[23]</sup>	采用CMB模型分析2009年1月、6月至7月夏冬两季24 h采样数据	14.15~18.64
重庆 <sup>[24]</sup>	采用CMB模型分析楼顶24 h采样数据	4.8
US Pasadena <sup>[25]</sup>	采用CMB模型分析10个洛杉矶空气监测站及一个上风向采样点于1982年全年每6 d采集一次24 h的采样数据	8.5
US Los Angeles <sup>[25]</sup>		4.9~8.0
US Rubidoux <sup>[25]</sup>		5.2
US Denver <sup>[26]</sup>	采用CMB模型分析1996年1月~1997年2月共149 d采样数据	5.1
US Fresno <sup>[27]</sup>	采用CMB模型分析采样点位于房顶于2000年12月12日~2001年2月3日的采样数据	5~19
US San Joaquin Valley <sup>[28]</sup>	采用PMF模型分析1999年12月2日~2001年2月3日24 h采样数据	3~9
US Atlanta <sup>[29]</sup>	采用CMB模型分析2001年7月3日~8月4日及2002年1月2日~31日24 h采样数据	0.5~20.3
India Chennai <sup>[30]</sup>	采用CMB模型分析位于主干道附近的监测站于2008年12月~2009年4月24 h采样数据	1.5

## 2 时空分布特征

### 2.1 空间分布特征

为进一步了解不同地区餐饮源 $PM_{2.5}$ 的排放特征,表2归纳总结了不同城市不同菜系餐饮源 $PM_{2.5}$ 排放特征,并示出了餐饮源的基本信息。需要指出的是,分析过程忽略了采样方法的差异对监测结果的影响。从表2可以得出,深圳地区露天烧烤排放 $PM_{2.5}$ 的浓度最高,香港地区的西餐厅排放 $PM_{2.5}$ 的浓度最低,前者约为后者的260倍。深圳地区露天烧烤排放的 $PM_{2.5}$ 浓度高达环境背景浓度的42.7倍,说明该类餐饮源对深圳市大气环境污染较为严重。总体上看,国内城市中北京、上海、深圳等城市餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 浓度较港台地区的浓度高;国内外城市对比时,国内城市餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 浓度较国外城市的浓度高。另外,中式菜系较西式菜系排放的 $PM_{2.5}$ 浓度高;爆炒、碳烤类菜系较蒸煮类菜系排放 $PM_{2.5}$ 浓度高;过滤式除尘系统和静电除尘系统较活性炭吸附系统对餐饮油烟 $PM_{2.5}$ 的净化效率高。

### 2.2 时间变化特征

季节变化影响居民饮食习惯,从而影响餐饮源 $PM_{2.5}$ 的排放。钱佳<sup>[23]</sup>对武汉市 $PM_{2.5}$ 的来源进行解析时指出,夏冬两季餐饮源对 $PM_{2.5}$ 的贡献率分别为18.64%和14.15%。Zheng等<sup>[29]</sup>分析了美国Atlanta地区 $PM_{2.5}$ 的来源,指出夏季餐饮油烟的贡献值高于冬季的贡献值。王桂霞<sup>[31]</sup>对北京地区的研究指出,餐饮源在夏季排放的 $PM_{2.5}$ 质量浓度范围为120.4~640.0  $\mu g/m^3$ ,冬季其质量浓度范围达到186.4~455.8  $\mu g/m^3$ ,并指出上座率、气象条件、烹饪风格等可影响不同季节餐饮源 $PM_{2.5}$ 的排放浓度。

随着社会经济的发展,居民饮食习惯也发生了变化:以工作餐为主的餐饮源午市上座率较高,如小炒、快餐等;以家庭聚餐为主的餐饮源则晚市上座率较高,如火锅、烧烤等。王桂霞<sup>[31]</sup>指出,不同餐饮源在中午和晚上时 $PM_{2.5}$ 的排放浓度略有不同,影响因素为菜式和原料。温梦婷等<sup>[32]</sup>研究则指出,不同餐饮源午市和晚市 $PM_{2.5}$ 的排放浓度与客流量密切相关。Pei等<sup>[33]</sup>对沪菜馆、川菜馆和意大利餐馆的分析指出,晚市餐饮油烟 $PM_{2.5}$ 排放浓度均高于午市的排放浓度,与餐馆上座率有关。由此可知,餐饮源在不同营业时间段

表 2 不同餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>的浓度水平  
Table 2 Concentrations of PM<sub>2.5</sub> emitted from different cooking emissions

城市	菜系	基本信息	浓度/(μg·m <sup>-3</sup> )	源/环境	文献
北京	川菜	中型;水喷淋+活性炭吸附系统	1 446.7	7.7	[32]
	杭州菜	大型;高压静电除尘系统	1 688.3	21.8	
	家常菜	大型;活性炭吸附系统	3 200.9	27.8	
	烧烤	中型;静电除尘系统	1 383.4	18.9	
	川菜	中型;过滤式除尘系统	411.05	7.1	[34]
	家常菜	中型;静电除尘系统	297.05	5.25	
	家庭餐饮	普通抽油烟机系统	192.35	3.45	
	家常菜	静电油烟净化系统	494.9	4.3	
	山东菜	静电油烟净化系统	404.8	6.9	[35]
	湘菜	静电油烟净化系统	331.3	6.8	
上海	烧烤	无净化系统	1 841.9	20.2	[33]
	沪菜	大型;有组织排放净化系统	671	14.0	
	川菜	大型;有组织排放净化系统	432.5	6.3	
	意大利菜	中型;有组织排放净化系统	413.5	7.4	
深圳	湘菜	部分油脂由挡板式油烟净化器去除	1 406.3	—	[36]
	粤菜		672.0	—	
晋城	露天烧烤	位于居民区内;无组织排放	5 659.8	42.7	[37]
	餐馆	大中型;多种油烟净化系统	2 733.6	20.6	
	火锅	中型;无油烟净化系统	665.9	5.0	
	街边小吃	流动商贩;无组织排放	409.5	3.1	
香港	火锅	位于商业区;中央空调通风系统	81.1	1.6	[11]
	粤式早茶		28.7	0.5	
	西餐		21.8	0.3	
	韩式烤肉		1 167	18.2	
台北	火锅	夜市摊位;移动式厨房;无油烟装置	247.0	—	[38]
	汉堡		214.1	—	
	烧烤		287.5	—	
Kent Ridge	中式菜	大学食堂摊位;自然通风	201.8	6.9	[39]
	马来菜		245.3	8.3	
	印度菜		186.9	6.4	
Boston	美食广场	商场内	200	2.8	[40]
	咖啡馆	街边	25	1.1	

PM<sub>2.5</sub>的排放浓度受多种因素的影响。

3 化学特征

3.1 有机碳(OC)和元素碳(EC)

研究表明,餐饮源对城市的大气一次OC的贡献率可达20%,超过机动车尾气和生物质燃烧源的贡献率<sup>[41]</sup>。餐饮源夏冬OC贡献浓度可达7.30 μg/m<sup>3</sup>和11.45 μg/m<sup>3</sup>,高于机动车尾气、木质燃烧和燃煤排放源的贡献浓度<sup>[23]</sup>。Hildemann等<sup>[42]</sup>研究指出,食物烹饪所产生的OC排放量可达4 389 kg/d,对OC的贡献率为15.9%;以烹饪食材质量计,细气溶胶排放因子为7~40 g/kg,其中OC的占比为68%~73%,EC占比较少。由此可见,餐饮源是OC的重要来源,EC的排放较少。

图1总结了不同餐饮源排放的PM<sub>2.5</sub>中OC和EC的浓度。从图中可以看出,不同类型餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>

中的OC和EC浓度水平不同。其中,温梦婷等<sup>[32]</sup>研究的家常菜OC浓度最高,这是由于家常菜烹调特点为形糙色重味浓,使用的燃料为天然气,且作为大型餐馆上座率可达100%,且油烟处理设备状态较差。Wang等<sup>[35]</sup>研究的烧烤店排放EC浓度最高,这与烧烤店以烤制和煎炸烹饪方式为主、食材以肉类为主、使

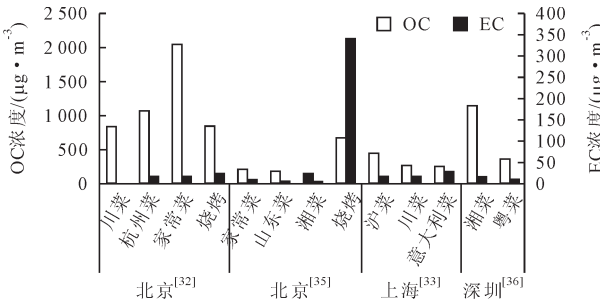


图1 不同餐饮源排放的PM<sub>2.5</sub>中OC和EC的浓度水平  
Fig.1 Concentrations of OC and EC in PM<sub>2.5</sub> emitted from different cooking emissions

用燃料为木炭且无烟气净化设备有关。See 等<sup>[43]</sup>研究表明,烹饪方式影响 OC、EC 排放特征,其中基于油的烹饪方式较基于水的烹饪方式产生更多的 OC。总体而言,餐饮源排放 PM<sub>2.5</sub> 中 OC 浓度较 EC 的高,OC 和 EC 的排放受烹饪方式、燃料、食材、油烟处理设备等多重因素的影响。

3.2 无机离子

无机离子是 PM<sub>2.5</sub> 的重要组成部分,表 3 示出了不同类型餐饮源排放 PM<sub>2.5</sub> 中无机离子的占比情况。北京市家常菜、山东菜、湘菜和烧烤油烟 PM<sub>2.5</sub> 中,无机离子分别占 PM<sub>2.5</sub> 质量的 11.6%、13.5%、17.5% 和 9.1%;深

圳市湘菜和粤菜则分别为 1.45% 和 2.01%;晋城市街边小吃、露天烧烤、火锅和餐馆则为 24.93%、2.71%、18.79% 和 6.89%。各餐饮源排放 PM<sub>2.5</sub> 的无机离子中 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 占比较高,总占比可达无机离子的 62.9%~91.1%。研究表明,Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 主要来自食用盐的使用,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 F<sup>-</sup> 则主要来自饮用水<sup>[35]</sup>,烧烤油烟中较高的 K<sup>+</sup> 来自木炭的燃烧<sup>[44]</sup>,其他离子则主要来自食用油和食材<sup>[45]</sup>。因此,不同餐饮源所使用的调料、食材、食用油、燃料等是影响其排放 PM<sub>2.5</sub> 中无机离子浓度的重要影响因素。

3.3 元素组分

表 3 餐饮源排放 PM<sub>2.5</sub> 中无机离子的占比  
Table 3 Percentage of inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> emitted from cooking emissions (%)

城市	菜系	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	F <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
北京 <sup>[35]</sup>	家常菜	1.8	1.9	1.8	0.7	1.9	1.0	0.1	2.3	0.1	0
	山东菜	1.9	2.3	2.4	2.3	0.9	1.0	0.2	2.4	0.1	0
	湘菜	3.0	1.8	2.3	1.4	2.6	2.1	1.2	2.7	0.3	0.1
	烧烤	1.4	2.4	0.4	0.3	0.5	2.2	0.3	1.5	0.1	0
深圳 <sup>[36]</sup>	湘菜	0.29	0.06	0.02	0.10	0.13	0.30	0.32	0.23	-	-
	粤菜	0.15	0.05	0.02	0.10	0.34	0.24	0.34	0.77	-	-
晋城 <sup>[37]</sup>	街边小吃	0.97	0.83	0.51	8.27	3.21	2.13	2.49	6.44	0.08	-
	露天烧烤	0.25	0.41	0.06	0.75	0.03	0.51	0.13	0.55	0.02	-
	火锅	0.75	1.69	0.25	3.42	2.23	4.98	2.07	3.34	0.06	-
	餐馆	0.62	0.19	0.25	2.59	0.25	0.99	0.62	1.34	0.04	-

微量元素(尤其是重金属元素)附着于 PM<sub>2.5</sub> 中,可随着呼吸与 PM<sub>2.5</sub> 一同进入人体,从而引起呼吸道和心血管疾病,甚至造成 DNA 损伤<sup>[46]</sup>。表 4 列出了不同餐饮源排放 PM<sub>2.5</sub> 中元素组分的浓度水平。从表中可以看出,Al、Ca、Fe 和 Si 等元素质量浓度较高,总占比可

达元素组分的 64.3%~80.5%。阿依克孜·吾吉等<sup>[47]</sup>研究指出,Al、Ca 和 Si 等既可来自地壳,也可能来自餐厅墙壁;Fe 可能来自餐厅使用的设备;Na 主要来自调料。同时,在清洗食材、烹饪器材及烹饪过程中使用的富含元素组分的饮用水,也可能成为烹饪油烟排放

表 4 餐饮源排放 PM<sub>2.5</sub> 中元素组分的浓度水平  
Table 4 Concentrations of element components in PM<sub>2.5</sub> emitted from commercial cooking sources (μg/m<sup>3</sup>)

城市 类型	北京 <sup>[35]</sup>				晋城 <sup>[37]</sup>			
	家常菜	山东菜	湘菜	烧烤	小吃	烧烤	火锅	餐馆
Al	2.5	2.4	1.7	9.2	17.7	41.3	24.0	58.5
Ca	6.4	7.7	3.3	29.5	24.4	82.6	35.8	93.5
Fe	15.8	13.0	8.3	18.4	1.8	3.4	1.0	21.9
K	-	-	-	-	7.2	28.3	15.4	17.8
Mg	1.5	1.6	1.0	11.1	11.6	13.0	9.5	20.2
Mn	0.0	0.4	0.0	0.0	0.1	0.6	0.1	0.5
Na	-	-	-	-	7.7	24.9	14.9	30.3
Si	-	-	-	-	23.4	46.4	30.4	83.6
Ti	1.0	0.8	0.7	3.7	0.5	1.1	0.6	0.8
V	-	-	-	-	2.2	5.1	3.2	3.0
Cr	1.5	2.0	1.0	3.7	0.2	0.6	0.8	0.5
Ni	1.5	0.8	0.7	1.8	0.3	0.6	0.3	1.4
Co	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0
As	-	-	-	-	0.2	0.6	0.3	0.3
Cd	-	-	-	-	0.1	0.0	0.1	0.0
Pb	-	-	-	-	2.9	1.7	2.8	4.4
Cu	0.0	0.4	0.0	0.0	0.2	1.1	0.9	1.1
Zn	0.5	0.8	0.3	1.8	0.9	1.1	1.7	6.3



PM<sub>2.5</sub>元素组分的重要来源<sup>[48]</sup>。通过污染土壤和水体进入食材的元素组分,尤其是重金属元素,需要予以重视<sup>[49,50]</sup>。其他微量元素含量较少,但对人体健康的危害存在较大的风险,如:Pb、Cr、Cd和As等<sup>[51]</sup>。因此,餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>中元素组分的成分谱和来源需要予以重视,关注焦点为重金属元素。

3.4 PAHs

PAHs是一类含有2个或2个以上苯环的有机物,多种PAHs物质被国际癌症研究机构(IARC)归为致癌物质<sup>[52]</sup>。研究表明,烹饪过程可产生较高浓度的PAHs,一方面,食材和食用油中含有的PAHs会随着加热过程挥发到环境空气中;另一方面,高温使食材和食用油中的有机物热解重组形成PAHs<sup>[53,54]</sup>。研究表明,烹饪油烟对室外颗粒相PAHs的贡献可达20%~75%<sup>[55]</sup>。Chen等<sup>[56]</sup>指出餐饮油烟颗粒相PAHs占总PAHs的4.7%~41.5%,其中颗粒相苯并[a]芘(BaP)对总BaP的贡献可达78.8%。值得注意的是,虽然餐饮源对气相和颗粒相总PAHs的贡献低于交通源,但餐饮源对致癌PAHs组分的贡献高于交通源,使得餐饮源的致癌潜力高于交通源<sup>[57]</sup>。流行病学研究证实,餐

饮源排放PAHs可造成DNA氧化损害<sup>[58]</sup>,与居民癌症的发生密切相关<sup>[59]</sup>。Zhu等<sup>[60]</sup>指出59%~97%的颗粒相PAHs吸附在PM<sub>2.5</sub>中,且对人体危害更大的大分子PAHs物质主要位于颗粒相中。结合PM<sub>2.5</sub>特性分析可知,餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>中的PAHs更容易进入人体,急需对其予以控制,尤其是BaP类致癌物质。

表5列出了不同餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>中16种美国环保署优先控制PAHs物质的浓度。从表中可以看出,不同餐饮源排放的PM<sub>2.5</sub>中,主要PAHs物质各不相同;不同区域同一类型餐饮源排放的PM<sub>2.5</sub>中,主要PAHs物质不同。餐饮源PAHs总浓度变化范围为34.2~5 677 ng/m<sup>3</sup>,其中烧烤源PAHs总浓度最大。研究表明,烹饪时所使用的烹饪方式、食用油、食材、燃料等类型的不同,可导致PM<sub>2.5</sub>中PAHs排放特征发生改变<sup>[61~63]</sup>。同时,烹饪时所使用的油温越高、油量越大,生成的PAHs浓度越高<sup>[39]</sup>。通风系统和空气污染控制系统的不同,也是影响餐饮油烟PAHs排放特征的重要因素<sup>[64]</sup>。综上所述,餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>中的PAHs组分不容忽视,烧烤源PAHs的排放须予以特别关注。

表5 餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>中16种PAHs的质量浓度  
Table 5 Mass concentrations of 16 kinds of PAHs in PM<sub>2.5</sub> emitted from cooking oil fumes (ng/m<sup>3</sup>)

城市 类型	深圳 <sup>[66]</sup>		晋城 <sup>[57]</sup>				台北 <sup>[38]</sup>			Kent Ridge <sup>[39]</sup>		
	湘菜	粤菜	小吃	烧烤	火锅	餐馆	火锅	汉堡	烧烤	中式菜	马来菜	印度菜
萘(Nap)	—	—	6	20	11	19	3.0	1.9	10.1	1.9	2.8	3.9
蒽(ACY)	—	—	0	22	1	1	2.6	1.0	8.4	2.4	5.6	2.7
苊(Ace)	—	—	1	7	1	2	6.5	4.5	7.6	1.0	3.1	1.1
芴(Flu)	—	—	3	125	4	8	8.2	5.3	6.3	3.8	9.2	3.9
菲(Phe)	8.7	4.3	7	1 224	10	23	15.6	11.9	22.6	11.5	15.7	9.5
蒽(Ant)	0.4	0	1	257	2	2	4.5	3.0	6.7	3.0	6.1	2.6
荧蒽(Flt)	8.7	10.4	4	1 250	6	11	34	10.9	59.9	6.9	30.7	1.6
芘(Pyr)	11	18.7	5	1 503	6	15	48.6	29.7	63.5	10.9	18.1	2.9
苯并[a]蒽(BaA)	1.2	1.7	3	266	3	4	111.6	79.6	185.2	3.8	23.1	1.0
䓛(Chr)	1.1	1.9	4	300	5	5	56.9	39.7	69.3	5.8	48.7	1.0
苯并[b]荧蒽(BbF)	2.4	6.5	3	142	4	7	176	100.8	200.5	21.8	122.4	1.9
苯并[k]荧蒽(BkF)	—	—	2	117	3	5	59.8	37.6	90.1	3.7	23.1	0.5
苯并[a]芘(BaP)	0.7	1.4	3	188	3	7	40.6	26.5	66.3	5.6	16.0	0.9
二苯并[a, h]蒽(DBA)	—	—	1	40	1	3	25.4	17.3	31.4	2.7	8.3	1.1
茚并[1,2,3-cd]芘(Ind)	0	2.6	2	92	3	8	161.6	101.8	177.6	24.4	105.9	1.3
苯并[ghi]芘(BPe)	0	11.2	3	124	4	46	12.4	8.8	15.7	31.9	170.1	2.1
ΣPAHs	34.2	58.7	48	5 677	66	165	767	480	1 021	141.0	609.0	37.9

3.5 其他组分

烹饪油烟排放的PM<sub>2.5</sub>中往往含有烷烃、烯烃、芳香烃和有机酸类等有机物<sup>[65]</sup>。贡营涛等<sup>[66]</sup>指出烹饪油烟是城市大气PM<sub>2.5</sub>中羧酸的重要来源之一。He等<sup>[36]</sup>分析了湘菜和粤菜排放PM<sub>2.5</sub>中的正烷烃、脂肪酸、二羧酸、类固醇,指出脂肪酸占定量有机物的90%以上。Zhao等<sup>[67]</sup>分析了粤菜、川菜、东北菜和湘菜排放PM<sub>2.5</sub>中的正烷烃、正醛、正酮、酯类、酰胺类、饱和脂肪酸、

不饱和脂肪酸和二羧酸等,并指出脂肪酸含量占定量有机物的73%~85%。Wang等<sup>[35]</sup>分析了家常菜、山东菜、湘菜和烧烤排放PM<sub>2.5</sub>中的正烷烃和有机酸类物质,研究结果显示,不同类型餐饮源正烷烃排放浓度差异不大,C16~C26占总正烷烃的61.8%~69.0%;有机酸含量最高,占定量有机物的85.7%~96.1%。同时指出,烹饪方法和食材的不同可能是导致不同餐饮源有机酸组分发生变化的主要原因。

#### 4 排放量估算

柳晓雷等<sup>[20]</sup>以中型餐馆为代表,结合文献获得的排放因子和统计局获得的餐馆数量,计算出北京市餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>排放总量可达13 010 t/a,占PM<sub>2.5</sub>总量的15%~25%。李洁<sup>[68]</sup>采用环保部技术手册中餐饮油烟污染物的排放系数及南京市油烟在线监控系统获得的餐饮源数量,估算出2014年南京市餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>的排放量为3 160 t。温梦婷等<sup>[32]</sup>结合餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>排放浓度、排烟通道流量、日营业时间等,估算了北京市川菜、杭州菜、家常菜和烧烤源PM<sub>2.5</sub>的排放量,分别为100、96、384和48 kg/a。Wang等<sup>[35]</sup>以相同的思路估算了家常菜、山东菜、湘菜和烧烤源PM<sub>2.5</sub>排放量,依次为12.4、6.0、6.9和3.8 kg/a。赵云良<sup>[69]</sup>估算了广州市西式快餐、川菜、东北菜、粤菜和湘菜馆PM<sub>2.5</sub>排放量,依次为42、153、628、1 983和471 kg/a。

综上所述,国内餐饮源排放量的估算大都基于排放因子结合餐饮源分类进行估算。餐饮源分类方法分为2种,分别是基于餐馆规模和基于餐馆菜系2种方法。结合Buonanno等<sup>[70]</sup>和Olson等<sup>[71]</sup>分析可知,食材、食用油、烹饪方式、油烟处理系统等均是影响餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>排放量的重要因素。仅基于某单一影响因素进行分类,如相同规模、相同菜系等,排放量估算存在较大差异。同时,我国小型无证餐馆和夜市摊位数量众多,且基本没有油烟处理装置,而统计局统计餐饮数量时并未将其统计在内,导致基于餐饮数量计算的餐饮油烟排放量存在低估的情况。另外,部分研究采用国外排放因子进行计算,不符合中国的国情,导致排放量的估算存在一定偏差。

#### 5 健康影响评价

20世纪流行病学研究发现,中国女性及国外华裔女性肺癌发病率较高<sup>[72]</sup>,低于10%的女性肺癌的发生与吸烟有关<sup>[73]</sup>,中式烹饪油烟被视为诱发女性肺癌的主要元凶<sup>[12,74]</sup>。Zhong等<sup>[13]</sup>研究指出,经常使用菜籽油和高温烹饪方式时,烹饪油烟致癌风险增加。Kim等<sup>[75]</sup>调查了上海市未吸烟女性的肺癌发生情况,调查结果显示厨房通风条件较差可使肺癌风险增加49%;暴露时间的增加和使用煤炭作为燃料亦可使患癌风险增加。Baumgartner等<sup>[76]</sup>监测结果显示,将生物质作为主要烹饪燃料的女性,其PM<sub>2.5</sub>暴露浓度高于使用改进燃料的女性的暴露浓度;冬季日暴露浓度高于夏季日暴露浓度;女性暴露浓度高于儿童暴露浓度。同时指出,烹饪燃料、通风条件、厨具保养和厨房结构是影响人体暴露浓度的主要因素。综上所述,食物烹饪时

排放的PM<sub>2.5</sub>可能会对人体健康构成威胁,患癌风险受多种因素的影响。但上述研究均未对PM<sub>2.5</sub>的致癌风险进行定性定量分析,无法定量限制餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>排放。

随着研究的深入,餐饮油烟排放PM<sub>2.5</sub>对人体健康的影响受到学者的关注,尤其是PM<sub>2.5</sub>中的PAHs和重金属元素。Zhao等<sup>[38]</sup>分析了台北夜市4种餐饮源PAHs的过量致癌风险(ELCR),ELCR由高到低依次为烧烤>火锅>汉堡,平均ELCR达到 $1.01 \times 10^{-4}$ 。See等<sup>[39]</sup>分析了中式菜、马来菜和印度菜排放PM<sub>2.5</sub>中PAHs的ELCR,3种摊位ELCR依次为 $4.08 \times 10^{-3}$ 、 $1.21 \times 10^{-2}$ 和 $1.07 \times 10^{-3}$ ,均超过可接受限值 $1 \times 10^{-6}$ 。Zhang等<sup>[77]</sup>指出烹饪排放的PM<sub>2.5</sub>中重金属元素健康风险较高,致癌风险(LCR)由高到低依次为Cr>As>Ni>Pb>Cd,综合风险值为 $2.7 \times 10^{-3}$ ,远高于可接受限值 $1 \times 10^{-6}$ ;多环芳烃中Bap存在致癌风险,为 $4.0 \times 10^{-6}$ 。综上所述,餐饮油烟排放PM<sub>2.5</sub>具有较高的致癌风险,但目前研究所涉及的餐饮类型和致癌物质较少,不同餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>中致癌物质的健康风险评估需要进一步完善。

#### 6 总结和展望

餐饮油烟含有多种污染物,会对人体健康造成一定损害,随着餐饮业的快速发展,餐饮油烟的污染问题不断加剧。本文综述了国内外对餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>污染特征的研究成果,得出以下结论。

(1)餐饮源是城市大气PM<sub>2.5</sub>的重要来源之一,其贡献率为0.5%~25%,饮食文化和烹饪方式的不同是导致国内外餐饮源贡献率存在差异的主要原因。

(2)餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>污染具有地域性,总体呈现出内地城市PM<sub>2.5</sub>污染高于港台地区,中式菜系PM<sub>2.5</sub>污染高于西式菜系。餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>污染的时间分布特征总体呈现夏高冬低趋势,午市和晚市的污染特征亦不同。餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>的时空分布特征受多种因素的影响。

(3)餐饮油烟排放PM<sub>2.5</sub>富含OC、EC、无机离子、元素组分、PAHs、烷烃、有机酸等多种组分,各组分来源复杂,烹饪方式、食材、食用油、调料和燃料等是影响PM<sub>2.5</sub>化学组分排放特征的重要因素。

(4)餐饮源PM<sub>2.5</sub>排放量较高,不同菜系餐饮源PM<sub>2.5</sub>排放量不同,食材、食用油、烹饪方式等是影响餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>排放量的重要因素。但餐饮源PM<sub>2.5</sub>排放量的估算普遍存在低估的情况。

(5)餐饮源PM<sub>2.5</sub>可能危害人体健康,其PAHs和重金属元素具有较高的致癌风险,烹饪燃料、通风条

件、厨具保养和厨房结构等影响人体暴露浓度。

目前国内外餐饮油烟排放PM<sub>2.5</sub>的研究已经取得了很多成果,但仍需进一步完善。例如各研究餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>成分谱中化学物质未统一,建立餐饮源PM<sub>2.5</sub>成分谱的基础数据库将对区域环境污染溯源研究提供帮助;现有研究中餐饮源PM<sub>2.5</sub>排放量的估算偏低,未注册的小型餐饮源单点排放量少,但数量多,后续研究需要将其考虑进去;有关PM<sub>2.5</sub>中各组分排放因子的分析较少,无法准确估算有毒有害组分的排放量并评估其环境和健康效应;关于餐饮源排放PM<sub>2.5</sub>的物理和化学转化的研究较少,无法评估餐饮油烟二次污染对环境和人体健康的损害。我国餐饮类型繁多,又具有地域性,不同区域开展餐饮油烟污染治理时,需实地调研本地餐饮业发展情况并分析污染物排放特征,从而有效控制餐饮油烟排放PM<sub>2.5</sub>造成的环境污染。通过对餐饮油烟排放PM<sub>2.5</sub>进行深入研究,将对改善餐饮油烟PM<sub>2.5</sub>污染、提高城市空气质量、保障居民健康生活水平、实现社会经济可持续发展做出重要贡献。

#### [参考文献]

- [1] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, et al. Sources of fine organic aerosol. 1. charbroilers and meat cooking operations[J]. *Environmental Science and Technology*, 1991, 25(6): 1112–1125.
- [2] Huang X F, He L Y, Hu M, et al. Highly time-resolved chemical characterization of atmospheric submicron particles during 2008 Beijing Olympic Games using an aerodyne high-resolution aerosol mass spectrometer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(18):8933–8945.
- [3] Crippa M, Decarlo P F, Slowik J G, et al. Wintertime aerosol chemical composition and source apportionment of the organic fraction in the metropolitan area of Paris[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 13(2): 961–981.
- [4] Allan J D, Williams P I, Morgan W T, et al. Contributions from transport, solid fuel burning and cooking to primary organic aerosols in two UK cities[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 10(2): 647–668.
- [5] Mohr C, Decarlo P F, Heringa M F, et al. Identification and quantification of organic aerosol from cooking and other sources in Barcelona using aerosol mass spectrometer data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(4): 1649–1665.
- [6] Lanz V A, Alfarra M R, Baltensperger U, et al. Source apportionment of submicron organic aerosols at an urban site by factor analytical modelling of aerosol mass spectra[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(6): 1503–1522.
- [7] Sun Y L, Zhang Q, Schwab J J, et al. Characterization of the sources and processes of organic and inorganic aerosols in New York City with a high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(4): 1581–1602.
- [8] Ge X L, Setyan A, Sun Y L, et al. Primary and secondary organic aerosols in Fresno, California during wintertime: results from high resolution aerosol mass spectrometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117, D19301.
- [9] Kanakidou M, Seinfeld J H, Pandis S N, et al. Organic aerosol and global climate modelling: a review[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(4): 1053–1123.
- [10] 吴芳谷, 汪彤, 陈虹桥, 等. 餐饮油烟排放特征[A]//中国颗粒学会. 中国颗粒学会2002年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会会议论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2002: 319–323.  
Wu Fanggu, Wang Tong, Chen Hongqiao, et al. Emission Characteristics of Cooking Fume[A]// Chinese Society of Particuology. Proceedings of 2002 Annual Conference of Chinese Society of Particuology and the Symposium on Particle Technology across Taiwan Strait[C]. Beijing: Science Press, 2002: 319–323.
- [11] 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(1/2/3): 181–193.
- [12] Hung H S, Wu W J, Cheng Y W, et al. Association of cooking oil fumes exposure with lung cancer: involvement of inhibitor of apoptosis proteins in cell survival and proliferation *in vitro*[J]. *Mutation Research—Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2007, 628(2): 107–116.
- [13] Zhong L J, Goldberg M S, Gao Y T, et al. Lung cancer and indoor air pollution arising from Chinese-style cooking among non-smoking women living in Shanghai, China[J]. *Epidemiology*, 1999, 10(5): 488–494.
- [14] Metayer C, Wang Z Y, Kleinerman R A, et al. Cooking oil fumes and risk of lung cancer in women in rural Gansu, China[J]. *Lung Cancer*, 2002, 35(2): 111–117.
- [15] Juntarawijit C, Juntarawijit Y. Cooking smoke and respiratory symptoms of restaurant workers in Thailand[J]. *BMC Pulmonary Medicine*, 2017, 17(1): 41.
- [16] Wang J J, Luo X L, Xu B, et al. Elevated oxidative damage in kitchen workers in Chinese restaurants[J]. *Journal of Occupational Health*, 2011, 53(5): 327–333.
- [17] 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, 34(1): 31–33.  
Wu Yu, Zhou Xiangdong. Effect of particulates from heated cooking oil smoke on lung injury in rats[J]. *China Occupational Medicine*, 2007, 34(1): 31–33.
- [18] 万苗苗. 浅谈中西方饮食文化差异[J]. *哈尔滨职业技术学院学报*, 2015(5): 168–169.



- Wan Miaomiao. Research on the differences of diet culture between the West and China[J]. Journal of Harbin Vocational & Technical College, 2015(5): 168–169.
- [19] Wan M P, Wu C L, To G S, et al. Ultrafine particles, and PM<sub>2.5</sub> generated from cooking in homes[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(34): 6141–6148.
- [20] 柳晓雷, 李晓丹, 熊安华, 等. 北京市餐饮油烟排放处理现状和治理对策研究[A]//中国环境科学学会. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2015: 3112–3116.
- Liu Xiaolei, Li Xiaodan, Xiong Anhua, et al. Research of Treatment and Countermeasures of Cooking Oil Fume in Beijing[A]// Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of 2015 Annual Meeting of Chinese Society for Environmental Sciences[C]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015: 3112–3116.
- [21] 褚艳玲, 班远冲, 田翠翠. 深圳中心城区餐饮油烟污染及防治对策探讨[J]. 绿色科技, 2015(9): 223–225.
- Chu Yanling, Ban Yuanchong, Tian Cuicui. Research of the pollution from cooking oil fume and its control measures in the central city of Shenzhen[J]. Journal of Green Science and Technology, 2015(9): 223–225.
- [22] Zhang N N, Zhuang M Z, Tian J, et al. Development of source profiles and their application in source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Xiamen, China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2016, 10(5): 177–189.
- [23] 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[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- Qian Jia. Distribution and Source Apportionment of Hydrocarbons in Atmospheric PM<sub>2.5</sub>, Southeast Wuhan[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [24] 周志恩, 张丹, 翟崇治, 等. 重庆市主城区颗粒物的来源解析研究[A]//中国环境科学学会. 2011中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷)[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 1129–1132.
- Zhou Zhi'en, Zhang Dan, Zhai Chongzhi, et al. Source Apportionment of Particulate Matter in the Downtown Area of Chongqing[A]// Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of 2011 Annual Meeting of Chinese Society for Environmental Sciences[C]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011: 1129–1132.
- [25] Schauer J J, Rogge W F, Hildemann L M, et al. Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(22): 3837–3855.
- [26] Watson J G, Zhu T, Chow J C, et al. Receptor modeling application framework for particle source apportionment[J]. Chemosphere, 2002, 49(9): 1093–1136.
- [27] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, et al. Evaluation of organic markers for chemical mass balance source apportionment at the Fresno Supersite[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7(7): 1741–1754.
- [28] Chen L W A, Watson J G, Chow J C, et al. Quantifying PM<sub>2.5</sub> source contributions for the San Joaquin Valley with multivariate receptor models[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(8): 2818–2826.
- [29] Zheng M, Cass G R, Ke L, et al. Source apportionment of daily fine particulate matter at Jefferson Street, Atlanta, GA, during summer and winter[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(2): 228–242.
- [30] Srimuruganandam B, Shiva Nagendra S M. Source characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> mass using a chemical mass balance model at urban roadside[J]. Science of the Total Environment, 2012, 433: 8–19.
- [31] 王桂霞. 北京市餐饮源排放大气颗粒物中有机物的污染特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [32] 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[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2620–2625.
- Wen Mengting, Hu Min. Physical and chemical characteristics of fine particles emitted from cooking emissions and its contribution to particulate organic matter in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, 28(11): 2620–2625.
- [33] Pei B, Cui H Y, Liu H, et al. Chemical characteristics of fine particulate matter emitted from commercial cooking[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2016, 10(3): 559–568.
- [34] 王桂霞, 董雪玲, 许立男. 餐饮源排放颗粒物的污染特征[A]//2012年环境污染与大众健康学术会议论文集[C]. 美国: 美国科研出版社, 2012: 672–678.
- Wang Guixia, Dong Xueling, Xu Linan. Pollution Characteristics of Particulates Emitted from Cooking Emissions[A]// Proceedings of Conference on Environmental Pollution and Public Health 2012[C]. USA: Scientific Research Publishing House, 2012: 672–678.
- [35] Wang G, Cheng S Y, Wei W, et al. Chemical characteristics of fine particles emitted from different Chinese cooking styles[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15: 2357–2366.
- [36] 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.
- [37] 张腾, 彭林, 李颖慧, 等. 餐饮源油烟中PM<sub>2.5</sub>的化学组分特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(2): 183–191.
- Zhang Teng, Peng Lin, Li Yinghui, et al. Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> emitted from cooking fumes[J]. Research of Environmental Science, 2016, 29(2): 183–191.
- [38] Zhao P, Yu K P, Lin C C. Risk assessment of inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in Taiwanese workers at night markets[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2011, 84(3): 231–237.



- [39] Siao W S, Sathrugnan K, Rajasekhar B. Health risk assessment of occupational exposure to particulate-phase polycyclic aromatic hydrocarbons associated with Chinese, Malay and Indian cooking[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2006, 8(3): 369–376.
- [40] Levy J I, Dumyahn T, Spengler J D. Particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in indoor and out-door microenvironments in Boston, Massachusetts [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2002, 12(2): 104–114.
- [41] Shrivastava M K, Subramanian R, Rogge W F, et al. Sources of organic aerosol: positive matrix factorization of molecular marker data and comparison of results from different source apportionment models[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(40): 9353–9369.
- [42] Hildemann L M, Markowski G R, Cass G R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol[J]. *Environmental Science and Technology*, 1991, 25(4): 744–759.
- [43] See S W, Balasubramanian R. Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(39): 8852–8862.
- [44] 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(1/2/3): 33–47.
- [45] Anwar F, Kazi T G, Saleem R, et al. Rapid determination of some trace metals in several oils and fats[J]. *Grasas Aceites*, 2004, 55(2): 160–168.
- [46] Lu S L, Yao Z K, Chen X H, et al. The relationship between physicochemical characterization and the potential toxicity of fine particulates (PM<sub>2.5</sub>) in Shanghai atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(31): 7205–7214.
- [47] 阿依克孜 吾吉, 胡颖, 迪丽努尔 塔力甫, 等. 餐厅、烤肉店PM<sub>2.5</sub>单颗粒的形貌及矿物组成特征[J]. *新疆大学学报: 自然科学版*, 2013, 30(3): 262–268, 379.
- Ayikezi Wuji, Hu Ying, Dilinuer Talifu, et al. Chemical compositions of individual particles in PM<sub>2.5</sub> in the canteen and barbecue store[J]. *Journal of Xinjing University: Natural Science Edition*, 2013, 30(3): 262–268, 379.
- [48] 徐辉. ICP-MS测定生活饮用水中的金属元素分析[J]. *中国新技术新产品*, 2017(3): 55.
- Xu Hui. Determination of metal in drinking water by ICP-MS[J]. *New Technology & New Product of China*, 2017(3): 55.
- [49] 陈宝玲, 关世宏, 关汉坤, 等. 佛山市南海区本土种植蔬菜重金属污染现状及对人体健康的风险分析[J]. *华南预防医学*, 2011, 37(5): 3–8.
- Chen Baoling, Guan Shihong, Guan Hankun, et al. Heavy metal contamination of vegetables grown in Nanhai District and risk analysis on human health[J]. *South China Journal of Preventive Medicine*, 2011, 37(5): 3–8.
- [50] 高志杰, 汪婵娜, 姚浔平, 等. 海产品中重金属铅、汞、镉、铬对人体健康的潜在风险评价[J]. *中国卫生检验杂志*, 2014, 24(7): 1019–1021, 1025.
- Gao Zhijie, Wang Lina, Yao Xunping, et al. Potential health of lead, mercury, cadmium and chromium in seafoods[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2014, 24(7): 1019–1021, 1025.
- [51] 张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 等. 青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2736–2741.
- Zhang Chunrong, Wu Zhenglong, Yao Chunhui, et al. Health risk assessment of heavy metals in atmospheric dust of Qingdao City[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2736–2741.
- [52] International Agency for Research on Cancer. Overall Evaluations of Carcinogenicity: an Updating of IARC Monographs, vols.1–42, Suppl.7[EB/OL]. <http://www-cie.iarc.fr/htdocs/indexes/suppl7in dex. html>. Accessed 20 April 2006.
- [53] Iwegbue C M A, Tesi G O, Overah L C, et al. Concentrations and profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in some popular fish species in Nigeria[J]. *Journal of Food Protection*, 2015, 78(3): 554–560.
- [54] Moret S, Conte L S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in edible fats and oils: occurrence and analytical methods[J]. *Journal of Chromatography A*, 2000, 882(1/2): 245–253.
- [55] Venkataraman C, Friedlander S K. Source resolution of fine particulate polycyclic aromatic hydrocarbons using a receptor model modified for reactivity[J]. *Air & Waste*, 1994, 44(9): 1103–1108.
- [56] Chen J W, Wang S L, Hsieh D P H, et al. Carcinogenic potencies of polycyclic aromatic hydrocarbons for back-door neighbors of restaurants with cooking emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417/418: 68–75.
- [57] Li C T, Lin Y C, Lee W J, et al. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons and their carcinogenic potencies from cooking sources to the urban atmosphere[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2003, 111(4): 483–487.
- [58] Lai C H, Jaakkola J J K, Chuang C Y, et al. Exposure to cooking oil fumes and oxidative damages: a longitudinal study in Chinese military cooks[J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2013, 23(1): 94–100.
- [59] Xia Z H, Duan X L, Qiu W X, et al. Health risk assessment on dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Taiyuan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(22): 5331–5337.
- [60] Zhu L Z, Lu H, Chen S G, et al. Pollution level, phase distribution and source analysis of polycyclic aromatic hydrocar-

- bons in residential air in Hangzhou, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2): 1165–1170.
- [61] Yao Z L, Li J, Wu B B, et al. Characteristics of PAHs from deep-frying and frying cooking fumes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(20):16110–16120.
- [62] Zhao X Y, Hu Q H, Wang X M, et al. Composition profiles of organic aerosols from Chinese residential cooking: case study in urban Guangzhou, south China[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2015, 72(1): 1–18.
- [63] Shen G F, Preston W, Ebersviller S M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fine particulate matter emitted from burning kerosene, liquid petroleum gas, and wood fuels in household cook stoves[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(3): 3081–3090.
- [64] To W M, Lau Y K, Yeung L L. Emission of carcinogenic components from commercial kitchens in Hong Kong[J]. Indoor and Built Environment, 2007, 16(1): 29–38.
- [65] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, et al. The molecular distribution of fine particulate organic matter emitted from western-style fast food cooking[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(37): 8163–8171.
- [66] 贡营涛, 田密, 傅敏, 等. 重庆主城区PM<sub>2.5</sub>中羧酸的季节变化和来源分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(7): 2332–2343.  
Gong Yingtao, Tian Mi, Fu Min, et al. Seasonal variation and source analysis of carboxylic acids in PM<sub>2.5</sub> in the urban area of Chongqing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(7): 2332–2343.
- [67] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, et al. Chemical compositions of fine particulate organic matter emitted from Chinese cooking [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(1): 99–105.
- [68] 李洁. 南京市餐饮油烟源大气污染物排放清单构建的研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(4): 55–56.  
Li Jie. Study on amounts of cooking oil fumes in Nanjing City[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(4):55–56.
- [69] 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.
- [70] Buonanno G, Morawska L, Stabile L. Particle emission factors during cooking activities[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(20): 3235–3242.
- [71] Olson D A, Burke J M. Distributions of PM<sub>2.5</sub> source strengths for cooking from the Research Triangle Park particulate matter panel study[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(1): 163–169.
- [72] Zhong L, Goldberg M S, Parent M É, et al. Risk of developing lung cancer in relation to exposure to fumes from Chinese-style cooking[J]. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 1999, 25(4): 309–316.
- [73] Ko Y C, Lee C H, Chen M, et al. Risk factors for primary lung cancer among non-smoking women in Taiwan[J]. International Journal of Epidemiology, 1997, 26(1): 24–31.
- [74] Lee T, Gany F. Cooking oil fumes and lung cancer: a review of the literature in the context of the U. S. population[J]. Journal of Immigrant and Minority Health, 2013, 15(3): 646–652.
- [75] Kim C, Gao Y T, Xiang Y B, et al. Home kitchen ventilation, cooking fuels, and lung cancer risk in a prospective cohort of never smoking women in Shanghai, China[J]. International Journal of Cancer, 2015, 136(3): 632–638.
- [76] Baumgartner J, Schauer J J, Ezzati M, et al. Patterns and predictors of personal exposure to indoor air pollution from biomass combustion among women and children in rural China [J]. Indoor Air, 2011, 21(6): 479–488.
- [77] Zhang N, Han B, He F, et al. Chemical characteristic of PM<sub>2.5</sub> emission and inhalational carcinogenic risk of domestic Chinese cooking[J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 24–30.

(上接第28页)

- [7] 钟志明. 大气环境评价工作等级确定方法探讨[J]. 煤炭工程, 2011(6):24–25.  
Zhong Zhiming. Discussion on method to determine grade of atmosphere environment evaluation[J]. Coal Engineering, 2011(6):24–25.
- [8] 张云海, 马雁军, 孙财涛, 等. 灰色聚类评价在经济区大气环境质量评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S1): 426–428.  
Zhang Yunhai, Ma Yanjun, Sun Caitao, et al. Application of grey clustering method for atmospheric environmental quality assessment in economic zone[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(S1):426–428.
- [9] 韩鹏, 李涛. 资源环境承载力综合评价方法研究—以中原经济区为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(S1):88–101.  
Han Peng, Li Tao. Study on comprehensive evaluation method of resources and environment carrying capacity—taking Zhongyuan Economic Zone as an example[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015(S1):88–101.
- [10] 张凡勇. 多属性综合评价方法与实证[J]. 统计与决策, 2015 (21):65–68.  
Zhang Fanyong. Multi-attribute comprehensive evaluation method and demonstration[J]. Statistics and Decision, 2015 (21):65–68.