

• 专论与综述 •

室内空气有机污染的研究现状

完莉莉, 汪玉庭

(武汉大学化学与环境科学学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 主要讨论了室内空气中有有机物污染的研究现状。重点介绍了室内空气中多环芳烃(PAHs)、挥发性有机物(VOCs)、醛类化合物等的污染状况及来源。简要叙述了室内空气污染的影响因素及对人体的健康风险评价。

关键词: 室内空气; 有机物污染; 多环芳烃; 挥发性有机物; 醛类化合物

中图分类号: X 501

文献标识码: A

文章编号: 1006-2009(2001)02-0012-05

Progress in Research on Organic Compounds Pollution in Indoor Air

WAN Li-li, WANG Yu-ting

(College of Chemistry and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Advances in research on organic compound pollution in indoor air are reviewed. The concentrations, sources and occurrences of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), volatile organic compounds (VOCs), aldehydes are carefully discussed. The influence factors of indoor air pollution and risk assessment of PAHs, VOCs and aldehydes in indoor air are simply reported.

Keywords: Indoor air; Organic compound pollution; Polycyclic aromatic hydrocarbons; Volatile organic compounds; Aldehydes

随着生活水平的提高和生活方式的改变,人们生活和工作于室内的时间越来越多,室内空气质量(Indoor Air Quality, IAQ)也成为工作和生活环境中的重要组成部分。低劣的空气质量使人感到不舒适,分散注意力,降低工作效率,严重时可以使人体产生头痛、恶心、疲劳、皮肤红肿等症状,统称厌恶建筑物综合症(Sick Building Syndrome, SBS)。因此,研究室内空气污染物的种类、分布和变化特征,以及源和汇对人体健康的影响就成为比较热门的课题。

近年来的研究表明:室内空气中不仅存在可吸入悬浮颗粒(RSP)、石棉、重金属(Pb、As、Ni、Cr等)、放射性物质(氡等)、一氧化碳(CO)、臭氧(O₃)、二氧化氮(NO₂)等无机污染物,而且还存在多环芳烃(PAHs)、挥发性有机物(VOCs)、醛类等有机污染物。这些有机污染物中相当一部分都具有致癌或致畸性,并且还可以和空气中的O₃、NO_x等反应转化成致癌或致畸性更强的化合物。由于人类大约85%的时间都是在室内度过的,因此室

内空气中存在这些具有“三致”作用的有机污染物将会对人体健康造成影响。

室内空气质量不仅受室外大气污染物渗透、扩散等的影响,也受室内污染源的影响。如烹调、取暖、吸烟、建筑及装饰材料的挥发与释放、家用电器的释放、办公设施的排放等。同时,随着建筑技术的发展和对能量储存的关注,室内通风率比以前逐渐下降,室内污染源排放的污染物在整个室内空气污染中所占比重越来越大。当室内存在加热、烹调、吸烟等污染源时,若没有良好的通风条件,室内空气中致癌物、致畸物和相关的有机污染物浓度将比室外高的多。因此有学者认为:室内空气污染比室外污染更严重,空气污染对人体健康的影响主要在室内^[1]。

现对室内空气中具有代表性的多环芳烃(PAHs)、挥发性有机物(VOCs)、醛类化合物的污

收稿日期:2000-10-28

第一作者简介:完莉莉(1975-),女,河南漯河人,硕士研究生,已发表论文3篇。

染状况及来源作重点介绍, 简要论述室内空气有机污染的影响因素及对人体的健康风险评价。

1 室内空气有机污染现状

1.1 室内空气中 PAHs 的监测及来源分析

PAHs 是指两个以上苯环以稠环形式相连的化合物。它是含碳氢有机物在温度高于 400℃ 时, 经热解、环化、聚合作用而生成的产物。室内空气中 PAHs 主要有两个来源, 一是来自室外空气, 二是来自室内吸烟、采暖、烹调等。研究表明: 民用煤炉燃烧排放的 PAHs 中, 致癌物占 35% ~ 65%^[2]。受污染的室内空气中存在着 30 余种致癌性物质, 其中半数以上是 PAHs 及其衍生物^[3]。因此, 室内空气中 PAHs 的污染程度、来源及对人体健康的影响近几年日益受到关注。

空气中 PAHs 主要以气态和颗粒态两种形式存在。Lee 等^[4]比较研究发现聚四氟乙烯采集 PAHs 的性能最好, 其空白值低, PAHs 损失较少, 收集效果最佳。对于气态 PAHs, 常用的吸附剂有 XAD-2、Tenax、聚氨基甲酸乙酯泡沫 (PUF)、Chromosorb 102、固体 β - 环糊精等。由于价格便宜、空白值低、易处理, PUF 常用于大流量采样系统, XAD-2 常用于小流量采样器。张淑芳^[5]曾对气态 PAHs 的采样方法、吸附剂的选择、采样系统性能等作过综述。

研究室内空气中 PAHs 的污染程度和来源时, 样品的采集和分析非常重要。在实际工作中, 气态和颗粒态 PAHs 的采集都是一次完成的。Jackson 和 Cupps 等^[6]用 Chromosorb 102 和玻璃纤维-银膜同时采集了空气中气态、颗粒态 PAHs。Zhu 等^[7]采用小体积采样泵, 用 XAD-2 和玻璃纤维滤膜 (GF) 同时采集了空气中气态和颗粒态的 PAHs, 取得了较好的效果。同时, 有研究表明, 6 h 采集的 PAHs 量是 24 h 所采集量的 1.5 倍^[8]。

Mumford 等^[9,10]对中国宣威地区居民肺癌发病率, 尤其是妇女肺癌发病率进行了调查研究, 发现这与室内燃煤及木材有关。通过对该地区 4 户家庭燃煤时室内空气中 PAHs 浓度的分析和对比实验, 发现宣威居民接触 PAHs 已达到职业暴露水准, 室内空气中致癌物二苯并 (a, 1) 芘的浓度达 (43 ± 13) ng/m³, 居民尿中 1- 羟基芘的浓度也比对照组高的多。Hamada 等^[11]也发现: 当用木柴作燃料时, 厨房中 PAHs 浓度比其他房间高的多。

戴树桂等^[12]采集了不同类型、不同污染源的几户家庭中的 PAHs。结果表明: 冬季室内空气中 PAHs 主要来源于燃煤及吸烟。当室内有这些污染源时, 室内空气中 PAHs 浓度明显高于室外; 实验结果显示室内吸烟排放的 PAHs, 组成含量具有较显著的特征性, BaP/BeP 比值大于 1 是室内吸烟 PAHs 污染的显著特征。夏季因室内通风换气量高, 室内外空气中 PAHs 污染水平较接近, 当 BaP/BeP 比值大于 1 时, 表明室内有吸烟 PAHs 污染特征。Koo 等^[13]采集了 33 户香港居民家中 7 种致癌性 PAHs。结果表明: 香港居室中气态 BaP 的平均浓度为 0.81 ng/m³, 颗粒态 BaP 浓度约为 15.63 ng/m³。这些 PAHs 主要来源于烹调和烧香; 同时, 家用热水器、吸烟也可产生一定量的 PAHs。当室内有良好的通风条件时, 可以适当降低室内空气中 PAHs 的浓度。Chen 等^[14]对中国多个大城市室内空气质量的调查表明: 加热、烹调是室内 BaP 的主要来源, 冬季室内 BaP 浓度比允许值高 26.7 倍。另外, 室内吸烟也是 BaP 的一个重要来源, 由吸烟造成的室内空气污染对妇女和儿童健康的影响最大。Chuang 等^[15]研究发现: 吸烟严重的家庭中 BaP 浓度比不吸烟的家庭中 BaP 浓度要高 10 倍以上。Mitra 等^[16]分析了室内不同污染源对 PAHs 的贡献率, 发现吸烟对室内空气中 PAHs 浓度影响最大, 吸烟者家庭中 87% 以上的 PAHs 都来自吸烟, 而不吸烟的家庭中 PAHs 主要来自室外的扩散。

室内空气中颗粒物的浓度和粒径分布是评价室内空气质量的重要指标。室内空气中不同粒径的颗粒物上 PAHs 的含量不相同, 在人体呼吸器官内沉积部位及相对沉积量也不相同, 对人体健康所造成的危害也不相同。因此, 考察空气中颗粒物粒径分布, 研究不同粒径范围内颗粒物中 PAHs 的含量是十分重要的。Shui 等^[17]研究表明: 公共汽车站周围大气中 PAHs 粒子以亚微米为主, 粒径越小, PAHs 含量越大, 在亚微米范围内 (0.056 μm ~ 3.2 μm), 单个 PAHs 均有其峰值。Venkataraman 等^[18]研究了粒径在 0.05 μm ~ 4 μm 范围内的气溶胶, 发现约 85% 以上的 PAHs 都存在于空气动力学直径小于 0.12 μm 的颗粒物上。Ando 等^[19]指出: 空气动力学直径小于 2 μm 的颗粒物中含有更多的 PAHs 和诱变物, 故细粒子对人体的危害比粗粒子对人体的危害更大。Tanabe 等^[20]也认为室

内环境中在人体肺部沉积率大的小颗粒中含有比大颗粒更多的致癌性 PAHs。

综上所述, 室内空气中 PAHs, 尤其是强致癌性的 BaP 污染十分严重。其主要来自烹调、加热、吸烟等; 同时受室外污染空气的影响也较大。通过改善室内通风条件, 安装空气净化器或电力除尘器可以适当降低室内空气中 PAHs 浓度。但如何更加有效地控制室内 PAHs 污染, 最低限度地减轻 PAHs 对人体健康的危害仍是值得研究的问题。同时, 对室内空气中 PAHs 的健康风险评价方面的研究也有待于进一步深入。

1.2 室内空气中挥发性有机物(VOCs)的研究

VOCs 是指室温下饱和蒸气压超过 133.32 Pa 的有机物。其主要成分为: 烃类、卤代烃、氧烃、氮烃等, 是室内外空气中普遍存在的一类有机污染物。其表现出的毒性、刺激性、致癌作用和具有的特殊气味, 能导致人体出现种种不适反应, 对人体健康造成较大影响。因此, 研究人们生活及工作空间中 VOCs 的污染现状、来源及对人体健康的影响成为近几年国际上的研究热点之一。

室外空气中 VOCs 主要来自于燃料燃烧、交通运输等。室内空气中 VOCs 主要来源是: ①来自室外污染空气的扩散; ②来自室内本身的排放源。室内空气中 VOCs 的排放源较多, 情况也较复杂, 通常来源于燃煤、天然气等的燃烧产物、吸烟所产生的烟雾(ETS)、建筑材料的排放、办公设施(如打印机、复印机等及装饰材料、家具、家用电器、清洁剂和人类活动)等。因此, 室内空气中 VOCs 的种类繁多, 可达 900 种以上。

Baek 等^[21]研究表明: 室内空气中绝大多数 VOCs 来自室外汽车的排放; 取暖、烹调是室内空气中 VOCs 的两个主要排放源; VOCs 的浓度受季节的影响较大, 冬季浓度最高, 夏季最低。龚幸颐等^[22]指出: 大多数房屋内总 VOCs 浓度约在 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 2\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 内; 通风条件、季节变化、人为活动对室内 VOCs 浓度有重要影响。室外空气质量也直接影响室内的 VOCs 浓度高低, 室内多种芳香烃和烷烃主要来自于室外汽车尾气的排放, 其贡献率约为 76%~92%。Brickus 等^[23]研究了巴西某办公大楼空气中 VOCs 和醛类化合物, 结果表明, 该办公大楼内 VOCs 的平均浓度为 $803.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 污染比较严重。较低楼层内 VOCs 浓度受室外汽车排放废气的影响较大, 较高楼层内

VOCs 主要来自办公设施及装饰材料。室内吸烟和室内总的萜烯类化合物间具有良好的相关性。Scherer 等^[24]研究表明, 无论在市区还是在郊区, 吸烟者家庭中苯的含量均高于不吸烟的家庭, 吸烟者家庭中非吸烟者接触的苯有 15% 来自烟草烟雾。Chuang 等^[15]认为: 室内吸烟所造成的尼古丁污染十分严重。

随着人们生活水平的提高, 室内装潢开始走俏。然而, 室内装饰材料的使用是导致室内空气中 VOCs 种类和数量增加的主要原因。Howard 等^[25]分析了 3 种不同的油漆, 结果表明: VOCs 含量在 $410 \mu\text{g}/\text{g} \sim 830 \mu\text{g}/\text{g}$ 之间。张林等^[26]指出: 壁纸、地板革、油漆、胶合板是室内空气中芳香烃的污染来源。

VOCs 由于具有强挥发性, 一般情况下, 在涂上油漆后 10 h 内, 90% 以上的 VOCs 即可挥发出来, 油漆风干过程中可释放出约占总量 25% 的溶剂。在室内装修好 4 个月后, 可除去约 79% 的 VOCs。另有研究表明: 由于洗衣机等家用电器的使用, 室内空气中苯、甲苯及其他苯系化合物浓度比使用前有明显的上升^[27, 28]。

Guo 等^[29]对室内 VOCs 排放的估算模式进行了研究。

面对室内空气中越来越严重的 VOCs 污染, 研究其浓度阈值, 提出有效的解决办法也越来越重要。Molhave^[30]提出: 当室内空气中 VOCs 浓度低于 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 对人体健康基本没有影响; 但其最高浓度不得超过 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在刚装修过的房间中, 可采取烘烤(bake-out), 加强空气流通, 采用活性炭吸附或安装空气净化器等措施来降低室内 VOCs 浓度。

综上所述, 室内空气中存在多种 VOCs 的排放源, VOCs 污染十分严重, 对人体健康的危害也非常大。目前国内对室内空气中 VOCs 的研究较少, 且大多集中在污染监测及来源分析等方面。而 VOCs 对人体的健康风险评价, 室内空气中 VOCs 的浓度阈值及 VOCs 的去除措施等方面的研究开展的较少。

1.3 醛类化合物的研究

醛类化合物是一种常见的室内污染物, 它能以气体形式作用于人体, 也能以气溶胶的形式释放出来, 在肺部中沉积, 损坏健康。

空气中醛类化合物主要有两种来源: ①来自交

通运输、化工行业、木材加工及吸烟等; ②大气中有有机物通过光化学反应生成。室内空气醛类化合物主要来自于室外扩散、室内建筑材料、家具、装饰材料及许多日用消费品等。邵晓君等^[31]认为烹调油烟气中也含有甲醛及其他醛类化合物。

空气中醛类化合物含量最高的是甲醛, 故对它的研究也最多。顾大全^[32]调查了室内空气中甲醛浓度的本底值为 $0.007 \text{ mg/m}^3 \sim 0.0125 \text{ mg/m}^3$ 。在室内装修时段内, 甲醛浓度最高, 3个月后降至平均浓度, 一年后(0.02 mg/m^3)仍高于本底值(0.011 mg/m^3)20倍。Kelly等^[33]分析了室内装饰材料及生活消费品等排出的甲醛, 结果表明: 经硫酸处理过的地板涂料排放甲醛的速率最高。张存玲等^[34]测得居室内空气甲醛为 0.028 mg/m^3 。Brickus等^[23]认为, 在巴西, 由于采用乙醇作为清洁剂, 办公大楼内甲醛、乙醛浓度均较高, 分别为 $12.2 \text{ } \mu\text{g/m}^3 \sim 121.7 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 和 $2.4 \text{ } \mu\text{g/m}^3 \sim 48.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 污染也较严重。Fortman等^[35]认为, 油漆中的甲醛成分挥发速率很慢, 即使经过115天的长时间后, 甲醛的挥发速率仍有 $0.17 \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。

1.4 室内空气污染的影响因素

室内空气中污染物来源较多, 室外环境、室内排放、通风条件、房间设计、室内装潢等都可对室内空气质量造成影响。近年来有关室内空气污染影响因素的报道较多。Alzona等^[36]曾对室内一室外空气间的关系作了综述。Kulmala^[37]提出可用栽种污染物的I/O(Indoor/Outdoor)比值来评价该种物是来自室内或室外。Liao等^[38]认为, RSP、苯、甲苯主要来自室外, 良好的通风条件可适当降低室内VOCs的污染水平。同时, 因气象条件特别是城市热岛与逆温的影响, 早晨、夜间室内空气会遭受各种污染源的封闭型污染、熏烟型污染及循环污染等的危害。

2 室内空气有机污染的健康风险评价

室内空气污染物对人体健康的影响一直受到人们的重视, 近年来有关室内空气污染健康风险评价及污染物浓度阈值等的报道也较多。松下秀鹤^[39]曾对空气中致癌物、致畸物暴露评价方法的研究进展进行了详细的评述。赵振华等^[40]采用尿中1-羟基芘作为人体接触PAHs的指标, 进行了大量的分析统计工作, 提出居民接触空气中BaP

的限值为 $6.0 \text{ } \mu\text{g}/100\text{m}^3$ 。Molhave等^[30]提出室内空气中总VOCs的浓度阈值为 $300 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。澳大利亚国家健康与医疗研究学会^[41]提出, 在单种化合物所占比例不超过50%的情况下, 室内空气中总的VOCs限值为 $500 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

3 小结

综上所述, 室内污染源的排放和室外扩散是室内空气中有机污染物的最主要来源。室内空气中PAHs、VOCs、醛类化合物等多种具有“三致”作用的有机化合物的污染十分严重, 对人体健康危害较大。由于其来源繁多、影响因素复杂, 目前对室内空气中VOCs的研究, 大多只能定性的检出, 还不能定量的进行描述, 这方面的工作还有待进一步深入。对PAHs、VOCs、醛类化合物等对人体的健康风险评价及如何采取有效措施来降低室内空气中有机物的污染等领域的研究也有待于进一步加强和深入。

[参考文献]

- [1] 宋瑞金, 张爱军. 人对室内外空气污染物的个体接触量评价研究[A]. 第七届全国大气环境科学学术会议论文集[C]. 北京: 中国环境科学出版社. 1998. 560~564.
- [2] 张月英, 王淑梅, 高秀媛, 等. 民用煤炉燃烧排放多环芳烃的研究[J]. 中国环境科学, 1990, 10(3): 161~165.
- [3] 曹守仁. 室内空气污染与测定方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [4] Lee FS, Bjorseth A, Dennis AJ, et al. Polynuclear aromatic hydrocarbons: chemistry and biological effects[A]. Fourth International Symposium[C]. Battelle Press: Columbus, OH, 1980. 543.
- [5] 张淑芳. 大气环境中多环芳烃的存在状态及其采样装置的研究[J]. 环境科学丛刊, 1991, 12(4): 11~20.
- [6] Jackson JQ, Cupps JA. in Jones PW and Freudenthal R I (Editors). Polynuclear aromatic hydrocarbons (Carcinogenesis, Vol. 3)[M]. Raven Press: New York, 1978. 183.
- [7] Zhu LZ, Takashi Y, Amagai T, et al. Highly sensitive automatic analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor air[J]. Talanta, 1997, 45: 113~118.
- [8] Westaway KC. A quantitative assessment of the mutagens and polynuclear aromatic hydrocarbons in dieselied underground mines[M]. chemistry department, Laurentian University Sudbury Ontario, 1982.
- [9] Mumford JL, He XZ, Chapman RS, et al. Lung cancer and indoor air pollution in Xuan Wei, China[J]. Science, 1987, 235: 217~220.

- [10] Mumford JL, Li XM, Hu FD, *et al.* Human exposure and dosimetry of polycyclic aromatic hydrocarbons in urine from Xuan Wei, China with high lung cancer mortality associated with exposure to unvented coal smoke[J]. *Carcinogenesis*, 1995, 16(12): 3031~ 3037.
- [11] Hamada GS, Kowalski LP, Murata Y, *et al.* Wood stove effects on indoor air quality in Brazilian homes: carcinogens, suspended particulate matter, and nitrogen dioxide analysis[J]. *Toxicol J Exp Clin Med*, 1991, 17(3, 4): 145~ 153.
- [12] 戴树桂, 张林. 室内空气多环芳烃污染的测量和特征性研究[J]. *环境化学*, 1996, 15(2): 138~ 145.
- [13] Koo LC, Matsushita H, Ho JH-C, *et al.* Carcinogens in the indoor air of Hong Kong homes: levels, sources, and ventilation effects on 7 polynuclear aromatic hydrocarbons[J]. *Environ Technol*, 1994, 15: 404~ 418.
- [14] Chen BH, Hong CJ, He XZ. Indoor air pollution and its health effects in China: a review[J]. *Environ Technol*, 1992, 13: 301~ 312.
- [15] Chuang JC, Kuhlman MR, Wilson NK. Evaluation of methods for simultaneous collection and determination of nicotine and polynuclear aromatic hydrocarbons in indoor air[J]. *Environ Sci Technol*, 1990, 24: 661~ 665.
- [16] Mîra S, Ray B. Patterns and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in indoor air[J]. *Atmos Environ*, 1995, 29(22): 3345~ 3356.
- [17] Shui JC. Size distribution of particle-bound PAH composition in the ambient air of bus station[J]. *J Environ Sci. Health Environ. Sci Eng Toxic Hazard Subst Control A*, 1997, 32(6): 1781~ 1805.
- [18] Venkataraman C, Friedlander SK. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons and elemental carbon 2. Ambient measurements and effects of atmospheric process[J]. *Environ Sci Technol*, 1994, 28: 563~ 572.
- [19] Ando M, Katagiri K, Tamura K, *et al.* Indoor and outdoor air pollution in Tokyo and Beijing supercities[J]. *Atmos Environ*, 1996, 30(5): 695~ 702.
- [20] Tanabe K, Matsushita H, Kuo Ct, *et al.* Determination of carcinogenic nitroarenes in airborne particulates by high performance liquid chromatography[J]. *J Japan Soc Air Pollut*, 1998, 21: 535~ 544.
- [21] Baek SO, Kim YS, Perry R. Indoor air quality in homes, Offices and restaurants in Korean urban areas—indoor outdoor relationships[J]. *Atmos Environ*, 1997, 31(4): 529~ 544.
- [22] 龚幸颐, 白郁华, 虞江平, 等. 北大园区室内挥发性有机物 (VOCs) 的研究[J]. *环境科学研究*, 1998, 11(6): 52~ 54.
- [23] Brickus LSR, Cardoso JN, Neto FRDA. Distributions of indoor and outdoor air pollutants in Rio de Janeiro, Brazil: implications to indoor air quality in bayside offices[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32: 3485~ 3490.
- [24] Scherer G. Contribution of tobacco smoke to environmental benzene exposure in Germany[J]. *Environ Intern*, 1995, 21(6): 779~ 789.
- [25] Howard EM, McCrillis RC, *et al.* Indoor emissions from conversion varnishes[J]. *J Air & Waste Manage Assoc*, 1998, 48: 924~ 930.
- [26] 张林, 戴树桂, 宋丽香, 等. 室内空气芳香烃的测定与污染源模拟[J]. *环境科学*, 1998, 18(5): 63~ 65.
- [27] Howard C, Corsi RL. Volatilization of chemicals from drinking water to indoor air: the role of residential washing machines[J]. *J Air & Waste Manage Assoc*, 1998, 48: 907~ 914.
- [28] Morrison GC, Nazaroff WW, Cano Ruiz JA, *et al.* Indoor air quality impacts of ventilation ducts: ozone removal and emissions of volatile organic compounds[J]. *J Air & Waste Manage Assoc*, 1998, 48: 841~ 952.
- [29] Guo ZS, Chang JCS, Sparks LE, *et al.* Estimation of the rate of VOC emissions from solvent-based indoor coating materials based on product formulation[J]. *Atmos Environ*, 1999, 33: 1205~ 1215.
- [30] Molhave L. Indoor air pollution due to organic gases and vapors of solvents in building materials[J]. *Environ Int*, 1982, 8: 117~ 127.
- [31] 邵晓君. 甲醛对人类健康的危害[J]. *中华预防医学杂志*, 1992, 26(3): 182~ 183.
- [32] 顾大全. 装饰材料所致的室内空气污染[J]. *上海环境科学*, 1994, 13(1): 17~ 19.
- [33] Kelly TJ, Smith DL, Satola J. Emission rates of formaldehyde from materials and consumer products found in California homes[J]. *Environ Sci Technol*, 1999, 33: 81~ 88.
- [34] 张存玲, 于剑, 翟敏德. 居室空气中甲醛的气相色谱法分析[J]. *色谱*, 1998, 16(4): 363~ 364.
- [35] Fortman R, Roache N, Chang JCS, *et al.* Characterization of emissions of volatile organic compounds from interior alkyd paint[J]. *J Air & Waste Manage Assoc*, 1998, 48: 931~ 940.
- [36] Alzona J, Cohen BL, Rudolph H, *et al.* Indoor-outdoor relationships for airborne particulate matter of outdoor origin[J]. *Atmos Environ*, 1978, 13: 55~ 60.
- [37] Kulmala M, Asmi A, Pirjola L. Indoor air aerosol model: the effects of outdoor air, filtration and ventilation on indoor concentrations[J]. *Atmos Environ*, 1999, 33: 2133~ 2144.
- [38] Liao SST, Shone JB, Kim YS. Factors influencing indoor air quality in Hong Kong: measurements in offices and shops[J]. *Environ Technol*, 1991, 12: 737~ 745.
- [39] Matsushita H, Mori T. Nitrogen dioxide and nitrosamine levels in indoor air and side stream smoke of cigarette [A]. In: Berglund B, Lindvall T, J Sundell (eds) *Indoor air*, Swedish Council for Building research[C]. Stockholm, 1984. 2: 335~ 340.
- [40] 赵振华. 多环芳烃的环境健康化学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993, 63.
- [41] Dingle P, Murray F. Control and regulation of indoor air: an Australian perspective[J]. *Indoor Environ*, 1993, 2: 217~ 219.