

北京市某家具城室内空气污染水平与特征

姜传佳¹, 李申岫², 张彭义^{1*}, 王娟¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京市第五十五中学, 北京 100027)

摘要: 为了解家具城室内空气污染状况, 于 2009 年夏采样测定了北京市某家具城多个展区空气中苯系物(苯、甲苯、二甲苯)、总挥发性有机物(TVOC)、甲醛等羰基化合物的浓度. 家具城室内空气中甲醛、苯、甲苯、二甲苯和 TVOC 的总体浓度(均值 $\pm$ 标准差)分别为: (0.37 ± 0.08) 、 (0.04 ± 0.03) 、 (0.19 ± 0.16) 、 (0.47 ± 0.57) 和 (2.76 ± 2.18) mg/m^3 ; 甲醛、二甲苯、TVOC 的室内浓度分别为室外浓度的 22、46 和 34 倍. 甲醛、二甲苯、TVOC 的平均浓度均超过《室内空气质量标准》所规定的标准值, 甲醛、TVOC 最高浓度分别是标准值的 5.1 倍和 14.8 倍. 家具城内羰基化合物总浓度为 (689.3 ± 94.8) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 超过室外浓度 5 倍, 其中甲醛和乙醛的浓度最高, 二者浓度之和占羰基化合物总浓度的 75% 以上; 丙酮、4 碳羰基化合物(异丁烯醛、甲乙酮、正丁醛)和己醛的浓度也较高. 总之, 家具城存在严重的室内空气污染.

关键词: 家具城; 室内空气; 挥发性有机物; 甲醛; 羰基化合物

中图分类号: X502 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-2860-06

Level and Characteristics of Indoor Air Pollutants in a Furniture Mall in Beijing

JIANG Chuan-jia¹, LI Shen-shen², ZHANG Peng-yi¹, WANG Juan¹

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing No. 55 High School, Beijing 100027, China)

Abstract: Concentrations of BTX (benzene, toluene and xylene), total volatile organic compounds (TVOC), formaldehyde and other carbonyl compounds were measured in different sections of a furniture mall in Beijing. The overall indoor concentrations (mean $\pm$ standard deviation) of formaldehyde, benzene, toluene, xylene, and TVOC were (0.37 ± 0.08) , (0.04 ± 0.03) , (0.19 ± 0.16) , (0.47 ± 0.57) , and (2.76 ± 2.18) mg/m^3 , respectively. Indoor concentrations of formaldehyde, xylene and TVOC were 22, 46 and 34 times higher than the corresponding outdoor concentrations respectively. Concentrations of formaldehyde, xylene and TVOC were much higher than the standard limits regulated in the national "indoor air quality standard" (GB/T 18883-2002), and the highest concentrations of formaldehyde and TVOC exceeded the standard limit 5.1 and 14.8 times respectively. Total concentration of carbonyl compounds was (689.3 ± 94.8) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which was 5 times higher than that outdoors. Of the carbonyls, formaldehyde and acetaldehyde were found to be the most abundant, together accounting for over 75% of the total carbonyl concentrations. Acetone, C_4 carbonyls (methacrolein, methyl ethyl ketone, butanal), and hexanal also occurred at relatively high concentrations. In conclusion, indoor air pollution is serious in the furniture mall.

Key words: furniture mall; indoor air; volatile organic compounds (VOCs); formaldehyde; carbonyl compounds

人们的大部分时间在室内环境中度过^[1], 室内空气质量对人们的健康有重要影响. 家具商场展示的大量家具和室内装饰材料可能释放出甲醛、乙醛、苯系物等^[2~4], 从而造成严重的室内空气污染. 目前, 对家具商场室内空气污染的研究较少, 且多以甲醛、氨和总挥发性有机物(TVOC)的监测为主^[5~9], 而对羰基化合物的研究报道不多^[10]. 本研究以北京市某大型综合性家具城为对象, 于 2009 年 7~8 月测定了正常营业时家具城内多个展区的室内空气中苯系物、TVOC、甲醛和其它羰基化合物浓度, 以了解家具商场这一特殊微环境的室内空气污染水平与特征, 为评估家具商场从业人员的健康风险提供依据, 同时也可以间接反映家具可能引起的居室空气污染情况.

1 材料与方法

1.1 采样点布设及采样时间

选取北京市一家经营面积超过 15 万 m^2 的综合性家具城为研究对象, 采样点分别位于家具城内欧美家具(OC)、办公家具(OF)、儿童家具(CH)、餐桌餐椅(TC)、沙发地毯(SC)和饰品(OR)等 6 个展区的中央. 此外, 在离家具城建筑物约 50 m 处设一个室外(OD)对照点. 共采样 4 次, 分别于 2009 年的 7 月 19 日、7 月 29 日、8 月 6 日和 8 月 12 日进行, 分

收稿日期: 2010-01-05; 修订日期: 2010-03-22

基金项目: 国家重点实验室专项基金项目(08Y02ESPCT); 北京市青少年科技后备人才培养计划项目

作者简介: 姜传佳(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为室内空气污染物监测及降解, E-mail: jiangcj05@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zpy@mail.tsinghua.edu.cn

别测定家具城正常营业时各点甲醛、苯系物和 TVOC 浓度,羰基化合物浓度则测定 1 次.共得到室内甲醛浓度数据 29 个、苯系物及 TVOC 浓度 27 组(舍去 2 组异常值)、羰基化合物 1 组,上述污染物室外浓度数据 3 组.

1.2 采样及分析方法

甲醛、苯系物及 TVOC 的采样和测定按照文献[11]进行操作,羰基化合物的采样及分析按照文献[12]进行操作.具体地,甲醛采样体积 5~10 L,用酚试剂分光光度法测定,用紫外可见分光光度计(UNICO UV2802PC)测定 630 nm 处的吸光度,由外标法定量.苯系物、TVOC 用 Tenax TA 吸附管采样约 4 L,热脱附-气相色谱法(Perkin Elmer ATD650 自动热脱附仪,Agilent 6890N GC 气相色谱仪,FID 检测器)测定.色谱柱为通用型石英毛细管柱(北分天普,TP. PEG-20M,50 m×0.32 mm,1 μm).采用程序升温:初始温度 50 ℃,保持 10 min,然后以 5 ℃/min 的速率升温至 250 ℃,保持 2 min.补偿气流量为 30 mL/min. FID 检测器温度 250 ℃,氢气流量 30 mL/min,空气流量 300 mL/min.采用外标法定量,标样(国家环境保护部标准物质研究所)含有苯、甲苯、二甲苯等 9 种挥发性有机物.

羰基化合物用 2, 4-二硝基苯肼(2, 4-DNPH)吸附柱(美国 Waters 公司)采样,高效液相色谱法分析.室内采样点采样 12~13 L,室外对照点采样约 45 L.采得的样品用乙腈(美国 J. T. Baker 公司,色谱纯)洗脱定容至 5 mL 容量瓶中,用高效液相色谱-紫外光检测器(Shimadzu,LC 10AD)分析.色谱柱为 AichromBond-AQ C18 反相柱(美国 Abel Industries 公司,150 mm×4.6 mm,5 μm),流动相为 60% 的乙腈水溶液(乙腈为 J. T. Baker 公司,色谱纯;水为 milliQ 高纯水),泵流量 1.2 mL/min,进样量 20 μL,柱温 40℃,检测波长 360 nm.采用外标法定量,标样(美国 AccuStandard 公司,Mix 1)含有 13 种羰基化合物的 DNPH 衍生物:甲醛、乙醛、丙酮、丙烯醛、丙醛、甲乙酮、丁醛、2-丁烯醛、异丁烯醛、戊醛、苯甲醛、对甲基苯甲醛和己醛.由于高效液相色谱未配备梯度洗脱装置,异丁烯醛、甲乙酮、正丁醛等 3 种 4 碳羰基化合物不能分开,计算其总浓度;丙酮与丙烯醛也不能分开,且因空白中含量过高,故文中未给出准确浓度.

1.3 质量控制与质量保证

甲醛、苯系物及 TVOC 测定所用仪器均经计量检定,标准曲线的相关系数 R^2 均大于 0.999.每采

10 个样,配 1 个空白,与样品经同样步骤分析,计算样品浓度值时减去空白背景值.

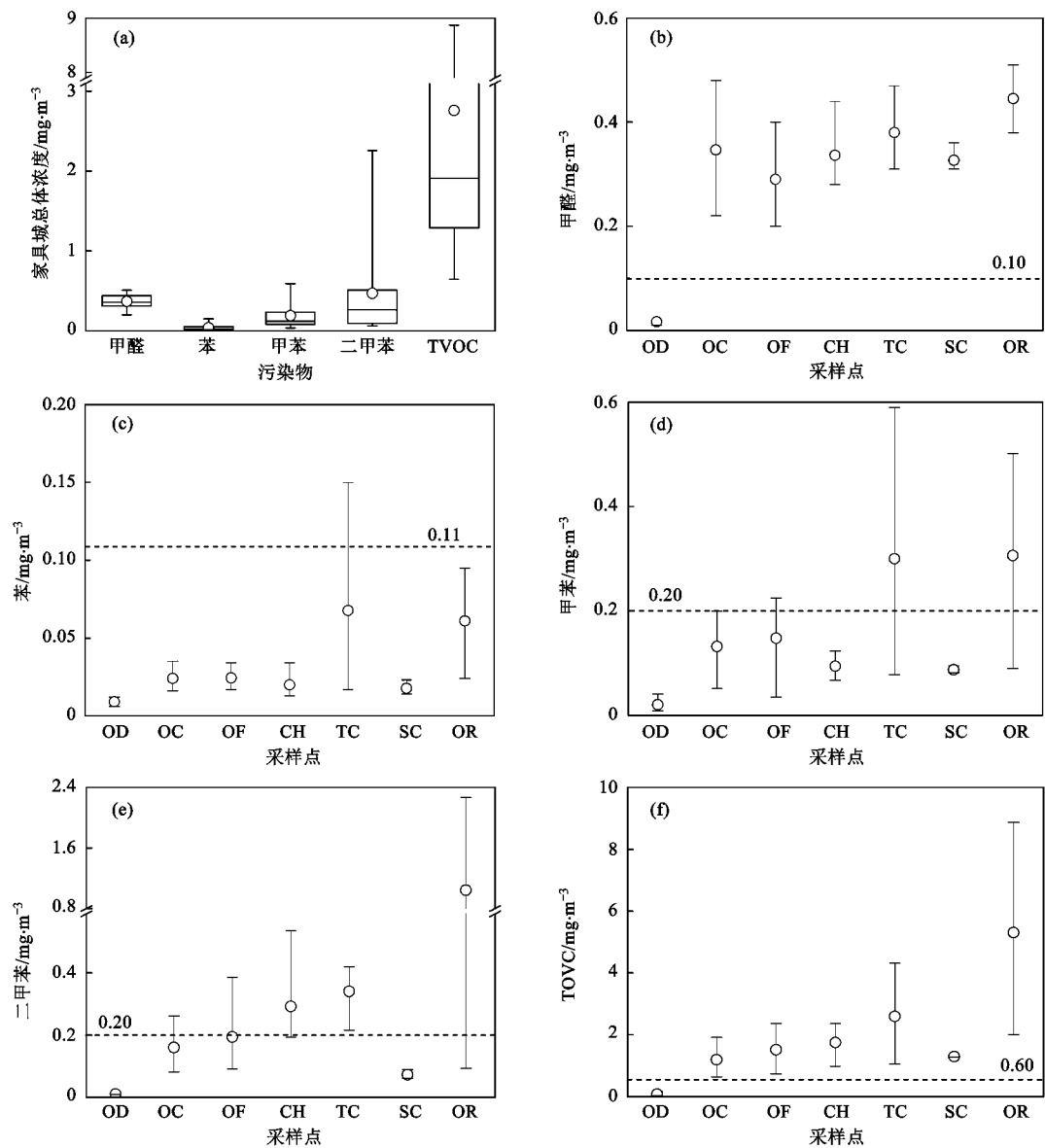
羰基化合物每次用 2 根 DNPH 吸附柱平行采样,平行样相对误差一般在 10% 以下.根据 Waters SEP-PAK 采样柱用户手册计算确定采样体积,防止穿透.每个样品至少分析 2 次,取平均值,洗脱效率在 99% 以上.每 10 个样品配 1 个空白,与样品经同样步骤分析,在计算样品中各羰基化合物质量时减去空白样中的背景值.空白样中检出甲醛、乙醛和丙酮,其含量分别为各样品中相应物质最低含量的 0.9%、3.1% 和 26.5%,其中丙酮的空白背景值过高,故本研究未给出采样样品中丙酮准确浓度.标准曲线的线性回归系数 R^2 均大于 0.9995.检测限(LOD)由标准曲线最小浓度 10 次测定标准偏差的 3 倍确定,对典型采样体积(12L),LOD 在 0.44 μg/m³(乙醛)~3.53 μg/m³(3 种 4 碳羰基化合物)之间,一般 < 2.20 μg/m³.

2 结果与讨论

2.1 甲醛、苯系物和 TVOC 污染水平

家具城正常营业时各污染物的总体平均浓度见图 1(a),甲醛、苯、甲苯、二甲苯和 TVOC 的平均浓度(均值±标准差)分别为:(0.37±0.08)、(0.04±0.03)、(0.19±0.16)、(0.47±0.57)和(2.76±2.18)mg/m³.

图 1(b)~1(f)分别为各个采样点甲醛、苯、甲苯、二甲苯和 TVOC 的污染情况.各展区室内采样点浓度均大于室外(OD),其中二甲苯、TVOC、甲醛、甲苯和苯室内外浓度比(I/O)分别为 46、34、22、9 和 4 倍.对照文献[13]所规定的标准值(图中用虚线和数值表示),所有样品的甲醛浓度均远超过标准值,其中办公家具展区(OF)浓度最低,为(0.29±0.10)mg/m³;饰品展区(OR)浓度最高,为(0.45±0.05)mg/m³,最大值(0.51 mg/m³)是标准值的 5.1 倍. TVOC 样品也全部超标,其中最大值(8.87 mg/m³,出现在饰品展区)是标准值的 14.8 倍.苯系物中,苯的浓度很低,且除餐桌餐椅展区(TC)外均不超标,这反映出近年来我国系列室内装饰装修材料有害物质限量标准^[14,15]对苯含量实施限制后所取得的效果,也与国际上进行相应限制后苯等室内空气污染物的变化趋势一致^[16];甲苯和二甲苯分别有约 33% 和 63% 的样品超标.值得注意的是,苯、甲苯和二甲苯只占 TVOC 的 7%~35% (平均 23%),在 TVOC 分析中除已知的 9 种物质外,其它的未定性



图中虚线及数值为文献[13]中各污染物的标准值;(a)中箱子上、下边框分别表示第1、第3个四分位数,中间的横线表示中位数,上下两端的横线表示最大值和最小值,○表示算术平均值;(b)~(f)中分别给出各采样点浓度范围及算术平均值

图1 家具城总体及各采样点甲醛、苯系物(苯、甲苯、二甲苯)和TVOC浓度

Fig. 1 Average concentrations of formaldehyde, benzene, toluene, xylene and TVOC in the furniture mall and specific concentrations at different sampling sites

物质占较大的比例. 总体而言,家具城内的室内空气污染十分严重.

比较不同展区的污染程度,饰品展区(OR)最为严重,餐桌餐椅展区(TC)次之,沙发地毯展区(SC)的污染程度最轻,这可能是由于饰品和餐桌餐椅展区木制产品较多,而木制产品会释放甲醛和多种挥发性有机物^[17]. 此外,饰品展区、餐桌餐椅展区苯系物和TVOC浓度范围大,而沙发地毯展区的各污染物浓度变化很小,这主要是因为不同类型产品在家

具城的平均存放时间不同所造成. 家具及装饰装修材料污染物的释放速率一般随存放时间而下降^[18, 19]. 沙发地毯展区的产品与饰品展区以及餐桌餐椅展区相比,平均存放时间相对较长.

用统计分析软件SPSS 13.0对27组甲醛、苯系物和TVOC数据进行相关分析. 由于单样本K-S检验(双尾检验,显著性水平0.05)表明甲醛、苯和甲苯浓度符合正态分布,而二甲苯和TVOC浓度不符合正态分布,故采用Spearman相关分析(双尾检

验),得到的相关系数见表 1. 甲醛、甲苯、二甲苯和 TVOC 的相关性显著,说明它们的来源相似性较高;苯与其它污染物,尤其与甲醛的相关性较差,说明苯和甲醛的来源可能有较大的差别. 联系到前面所说的苯的浓度较低,从这一结果可推测,苯可能只在某些产品中使用,而甲醛、甲苯、二甲苯和 TVOC 在各种产品中均被普遍的使用.

表 1 家具城室内甲醛、苯系物和 TVOC 浓度的 Spearman 相关系数¹⁾

Table 1 Spearman correlation coefficient between indoor formaldehyde, BTX, and TVOC in the furniture mall

	甲醛	苯	甲苯	二甲苯	TVOC
甲醛	1.00				
苯	0.32 *	1.00			
甲苯	0.76 **	0.45 *	1.00		
二甲苯	0.50 **	0.46 *	0.67 **	1.00	
TVOC	0.77 **	0.49 **	0.84 **	0.81 **	1.00

1) * 表示显著性水平为 0.05 ($p < 0.05$), ** 表示显著性水平为 0.01 ($p < 0.01$)

表 2 总结比较了近年国内有关家具商场室内空气研究和本研究的结果,给出了不同季节、不同地区家具商场监测得到的室内甲醛浓度以及温度、湿度、风速等环境因子. 在不同季节,各地家具商场室内甲醛平均浓度表现出一定的规律性:冬、春季浓度较低,在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg/m}^3$ 左右;夏季浓度较高,在 $0.3 \sim 0.7 \text{ mg/m}^3$ 左右. 本研究得到的家具城室内甲醛浓度为 $(0.37 \pm 0.08) \text{ mg/m}^3$,与文献中夏季浓度范围相符. 不同季节的差异可能与温度、湿度以及室内外通风状况等因素有关,室内较高的温度和湿度利于家具中的甲醛的释放^[6, 20~22]. 何作顺等^[7]于 2005 年 9~10 月在云南省大理市 2 家家具城室内测得的甲醛浓度最低,主要与室内外通风较强有关.

2.2 羰基化合物污染水平

除甲醛外,在家具城内还检测到其它羰基化合物,结果见表 3. 其中,室内丁烯醛和对甲基苯甲醛的浓度低于检测限,其它各羰基化合物均有检出. 由

表 2 不同季节、不同地区家具城室内甲醛浓度及相关环境因子

Table 2 Formaldehyde concentrations and relevant environmental factors in furniture malls in different areas and different seasons

序号	时间	季节	地点	温度/℃	湿度/%	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	甲醛浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	文献
1	1999 年 2~3 月	冬	北京市	17.3	32	0.08	0.16	[5]
2	1999 年 7~8 月	夏	北京市	28.3	53	0.14	0.52	[5]
3	2003 年前后	—	北京市	28.6	54.3	0.18	0.07~1.93 (平均 0.74)	[6]
4	2005 年 9~10 月	秋	大理市	24	61~76	1.0~1.8	0.082 ± 0.026	[7]
5	2006 年 3~4 月	春	杭州市	—	—	—	0.165	[10]
6	2006 年 11 月	冬	衡水市	8~20	—	—	0.13~0.21	[8]
7	2007 年 8 月	夏	衡水市	29~32	—	—	0.26~0.45	[8]
8	2007 年 3~5 月	春	—	—	—	—	0.05~0.49 (平均 0.17)	[9]
9	2009 年 7~8 月	夏	北京市	27	66	—	$0.20 \sim 0.51 (0.37 \pm 0.08)$	本研究

于空白样中丙酮背景值太高(详见 1.3 节),表 3 中未给出丙酮浓度准确值,但由实验结果估计,家具城内丙酮的大致浓度在 $100 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ 左右. 各展区除丙酮外的羰基化合物总浓度平均为 $(689.3 \pm 94.8) \text{ }\mu\text{g/m}^3$,以欧美家具展区最高,沙发地毯展区最低. 欧美家具展区的 TVOC 水平较低,而羰基化合物浓度最高;饰品展区 TVOC 最高,但羰基化合物却相对较低,这一方面说明羰基化合物和 TVOC 的来源可能有较大差别,另一方面也说明 TVOC 低不一定室内空气污染程度就低. 在检出的各羰基化合物中,甲醛浓度最高,家具城总体平均浓度达 $(310.3 \pm 62.2) \text{ }\mu\text{g/m}^3$,与酚试剂法测得的浓度范围符合. 乙醛次之,平均浓度为 $(257.5 \pm 31.2) \text{ }\mu\text{g/m}^3$,其中在沙发地毯和饰品 2 个展区,乙醛浓度超过了甲醛. 二者总浓度占羰基化合物总浓度的 75% 以上. 异丁烯醛、甲乙酮、正丁醛等 3 种 4 碳羰基化合物和己醛的

浓度也较高,平均浓度分别为 $(66.5 \pm 36.6) \text{ }\mu\text{g/m}^3$ 和 $(29.2 \pm 7.8) \text{ }\mu\text{g/m}^3$. 戊醛、丙醛和苯甲醛的浓度相对较低,平均浓度分别为 (9.8 ± 1.8) 、 (8.5 ± 1.0) 和 $(5.5 \pm 5.0) \text{ }\mu\text{g/m}^3$.

表 3 还给出了家具城室外采样点的羰基化合物浓度,室外总羰基化合物浓度为 $120.9 \text{ }\mu\text{g/m}^3$,不足室内平均浓度的 1/5. 甲醛、乙醛、丙醛、4 碳羰基化合物和苯甲醛的室内外浓度比分别为:3.8、9.1、3.0、12.5 和 3.5;戊醛和己醛在室外环境大气中未检出,而在家具城室内浓度较高,说明羰基化合物在家具城各展区有很强的室内释放源. 刨花板、中密度纤维板、胶合板等板材会释放大量甲醛、己醛、戊醛、苯甲醛等羰基化合物以及萜烯类不饱和烃^[23, 24],而萜烯类不饱和烃与臭氧及羟基自由基的反应也能产生羰基化合物^[25]. 地毯也可以直接释放^[26]或与臭氧反应产生多种羰基化合物^[27].

表 3 家具城各采样点及总体羰基化合物浓度¹⁾/μg·m⁻³
Table 3 Concentrations of carbonyl compounds in the furniture mall, overall and at respective sampling sites/μg·m⁻³

污染物名称	室外	欧美家具	办公家具	儿童家具	餐桌餐椅	沙发地毯	饰品	家具城平均
甲醛	81.6	385.8	323.7	350.9	318.2	208.0	274.9	310.3 ± 62.2
乙醛	28.2	258.7	295.0	223.4	225.8	249.5	292.5	257.5 ± 31.2
丙醛	2.9	9.4	9.7	8.5	8.0	7.0	8.1	8.5 ± 1.0
丁烯醛	nd ²⁾	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
异丁烯醛、甲乙酮、正丁醛	5.3	81.7	92.2	110.8	68.4	28.1	18.1	66.5 ± 36.6
苯甲醛	1.6	3.7	2.7	1.8	7.3	2.7	15.0	5.5 ± 5.0
戊醛	nd	10.1	11.2	11.8	10.1	7.7	7.5	9.8 ± 1.8
对甲基苯甲醛	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
己醛	nd	29.2	29.2	32.3	40.9	26.3	17.2	29.2 ± 7.8
羰基化合物总浓度 ³⁾	120.9	780.7	765.5	741.3	680.6	531.0	634.9	689.3 ± 94.8

1) 因空白背景值过高,表中未给出丙酮的准确浓度,但其室内大致浓度约 100 μg/m³; 2) nd 表示未检出; 3) 不包括丙酮浓度,且对于浓度低于检测限(LOD)的物质,按 LOD/2 计

表 4 比较了家具城室内与其它环境中羰基化合物的浓度. 由表 4 可见,家具城室内各羰基化合物浓度普遍高于其它环境,尤其是甲醛、乙醛、4 碳羰基化合物和己醛. 文献[10]给出了 2006 年春季杭州一家家具店中甲醛、乙醛、丙酮、丙醛、丁烯醛和丁醛等 6 种羰基化合物的浓度,均低于本研究的测定结果. 与表 2 中不同季节甲醛浓度的差异类似,这一差异可能主要也是由温度等环境因子不同所造成.

表 4 家具城与其它典型环境羰基化合物平均浓度对比/μg·m⁻³
Table 4 Comparison of carbonyl concentrations in the furniture mall and other environments /μg·m⁻³

时间	地区	环境类型	甲醛	乙醛	丙酮	丙醛	丁烯醛	4 碳羰基化合物	苯甲醛	戊醛	对甲基苯甲醛	己醛	羰基化合物总浓度	文献
2009 年 8 月	北京市	家具城	310.3	257.5	—	8.5	nd	66.5 ¹⁾	5.5	9.8	nd	29.2	689	本研究
2006 年 3~4 月	杭州市	家具店	165.4	27	17.3	5.4	2.2	3.6 ²⁾	—	—	—	—	221	[10]
2009 年 5 月	北京市	办公楼	21.5	7.7	23.8	1.3	nd	3.1 ³⁾	0.8	0.4	nd	3.5	62.1	[28]
2006 年 8 月	北京市	环境大气	15.3	12.9	13.3	2.6	0.5	3.4 ⁴⁾	8.3	2.3	nd	2.1	60.7	[29]
2004 年 2 月	中国	列车车厢	92.2	49.9	58.0	4.0	3.0	11.2 ⁵⁾	2.5	4.4	—	—	233.0	[30]

1) 异丁烯醛、甲乙酮、正丁醛; 2) 正丁醛; 3) 异丁烯醛、甲乙酮、正丁醛; 4) 甲乙酮、正丁醛; 5) 正丁醛

3 结 论

(1)家具城存在严重的室内空气污染,甲醛、TVOC 浓度远超过我国《室内空气质量标准》所规定的标准值,最高浓度分别是标准值的 5.1 倍和 14.8 倍;二甲苯超标率约 63%,甲苯超标率约 33%,苯基本不超标.

(2)相关性分析表明,甲醛、甲苯、二甲苯和 TVOC 的来源有较大的相似性,但苯和其他污染物的来源可能有较大差别.

(3)家具城存在严重的羰基化合物污染,总浓度高达(689.3 ± 94.8) μg/m³,是家具城室外浓度的 5 倍以上,其中甲醛、乙醛浓度最高,两者浓度之和占羰基化合物总浓度的 75% 以上.

参考文献:

[1] Klepeis N E, Nelson W C, Ott W R, *et al.* The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants [J]. J Expo Anal Environ Epidemiol, 2001, **11**(3): 231-252.

[2] Jones A P. Indoor air quality and health[J]. Atmos Environ, 1999,**33**(28): 4535-4564.

[3] Kelly T J, Smith D L, Satola J. Emission rates of formaldehyde from materials and consumer products found in California homes [J]. Environ Sci Technol, 1999, **33**(1):81-88.

[4] Brown S K. Chamber assessment of formaldehyde and VOC emissions from wood-based panels[J]. Indoor Air, 1999, **9**(3): 209-215.

[5] 于慧芳,李心意,吕静,等. 家具城室内空气污染现状调查[J]. 环境与健康杂志,2000,**17**(4):224-227.

[6] 李心意,于慧芳,吕静,等. 北京市家具城室内微小气候与空气中甲醛和氨的相关研究[J]. 中国预防医学杂志,2005,**6**(6):238-239.

[7] 何作顺,宋正蕊,张态,等. 家具城内空气中甲醛水平对人体健康影响分析[J]. 现代预防医学,2006,**33**(4):589-592.

[8] 赵双. 衡水市区家具商场空气中甲醛污染的调查[J]. 环境与健康杂志,2008,**25**(5):449.

[9] 李解生,龚德光,李君波,等. 家俱展销厅空气中甲醛和挥发性有机物污染的调查[J]. 实用预防医学,2008,**15**(1):38-39.

- [10] Weng M L, Zhu L Z, Yang K, *et al.* Levels and health risks of carbonyl compounds in selected public places in Hangzhou, China[J]. *J Hazard Mater*, 2009, **164** (2-3): 700-706.
- [11] HJ/T 167-2004, 室内环境空气质量监测技术规范[S].
- [12] US EPA. Compendium method TO-11A, Determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC) [active sampling methodology]. 1999[S].
- [13] GB/T 18883-2002, 室内空气质量标准[S].
- [14] GB 18581-2001, 室内装饰装修材料溶剂型木器涂料中有害物质限量[S].
- [15] GB 18583-2001, 室内装饰装修材料胶黏剂中有害物质限量[S].
- [16] Weschler C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s[J]. *Atmos Environ*, 2009, **43**(1): 153-169.
- [17] Kirkeskov L, Witterseh T, Funch L W, *et al.* Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emission from exotic wood products[J]. *Indoor Air*, 2009, **19**(1): 45-57.
- [18] Wolkoff P. Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products [J]. *Atmos Environ*, 1998, **32**(14-15): 2659-2668.
- [19] Kim S, Kim H J. Comparison of formaldehyde emission from building finishing materials at various temperatures in under heating system; ONDOL[J]. *Indoor Air*, 2005, **15**(5): 317-325.
- [20] Myers G E. The effects of temperature and humidity on formaldehyde emission from UF-bonded boards; a literature critique[J]. *Forest Prod J*, 1985, **35**(9): 20-31.
- [21] Zhang Y P, Luo X X, Wang X K, *et al.* Influence of temperature on formaldehyde emission parameters of dry building materials[J]. *Atmos Environ*, 2007, **41**(15): 3203-3216.
- [22] Wolkoff P, Kjaergaard S K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality[J]. *Environ Int*, 2007, **33**(6): 850-857.
- [23] Baumann M G D, Lorenz L F, Batterman S A, *et al.* Aldehyde emissions from particleboard and medium density fiberboard products[J]. *Forest Prod J*, 2000, **50**(9): 75-82.
- [24] Hodgson A T, Beal D, McIlvaine J E R. Sources of formaldehyde, other aldehydes and terpenes in a new manufactured house[J]. *Indoor Air*, 2002, **12**(4): 235-242.
- [25] Weschler C J, Shields H C. Potential reactions among indoor pollutants[J]. *Atmos Environ*, 1997, **31**(21): 3487-3495.
- [26] Katsoyiannis A, Leva P, Kotzias D. VOC and carbonyl emissions from carpets: A comparative study using four types of environmental chambers[J]. *J Hazard Mater*, 2008, **152**(2): 669-676.
- [27] Morrison G C, Nazaroff W W. Ozone interactions with carpet: Secondary emissions of aldehydes [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(10): 2185-2192.
- [28] 姜传佳. 办公楼室内空气中羰基化合物存在状况研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
- [29] 许嘉钰, 高阳. 北京市城区大气羰基化合物的季节变化[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 625-630.
- [30] 陆豪, 朱利中. 列车车厢内醛酮化合物的污染状况[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 74-77.