

上海地区住宅儿童卧室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析

蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨*

(上海理工大学环境与建筑学院,上海 200093)

摘要: 2013 年 3 月~2014 年 12 月对上海地区 454 户装修时间超过 1 a 的住宅内的儿童卧室内甲醛和苯系物进行了现场监测。不同儿童卧室内甲醛和苯系物浓度存在较大差异。冬季卧室内甲醛浓度明显高于其他季节 ($P < 0.001$),但苯系物浓度无明显的季节差异。春季使用不同内墙墙面装饰材料的卧室苯系物浓度均值存在明显差异;夏季使用不同地板装饰材料的卧室苯系物浓度均值也存在显著差异 ($P < 0.01$)。秋季室内盆景数量为 >5 个的卧室甲醛浓度均值明显高于其他卧室。冬季经常使用加湿器和家中饲养宠物的儿童卧室内苯系物浓度均值显著高于其他儿童卧室 ($P < 0.05$)。结果表明,装修较长时间后,装修材料的类型仍然与室内苯系物浓度存在一定的关系;但相对于装修材料,室内通风可能对室内甲醛浓度影响更大。室内苯系物浓度可能与室内湿度和室内宠物的饲养有关。家用空气净化器可能可以有效降低室内甲醛的暴露水平。植物盆栽净化装修时间较长的住宅室内甲醛和苯系物的效果可能有限。

关键词: 上海地区; 儿童卧室; 挥发性有机物; 装修材料; 生活习性

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0585-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703144

Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors

JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, LU Rong-chun, LIU Wei, ZHOU Hua-yuan, GONG Ying-ying, ZHOU Ya-xin, HUANG Chen*

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: From March 2013 to December 2014, we on-site inspected indoor concentrations of formaldehyde and a benzene series in 454 children's bedrooms that were decorated earlier than one year before our inspection. Large differences existed in the formaldehyde and benzene-series concentrations among individual bedrooms. Bedrooms that were inspected in winter had significantly higher concentration of formaldehyde than bedrooms that were inspected in other seasons ($P < 0.001$), but the benzene-series concentration had no significant seasonal difference. Among bedrooms that were inspected in spring, those using different materials as wall coverings had significant differences in concentrations of the benzene series. Among bedrooms that were inspected in summer, those using different materials as floor coverings had significant differences in concentrations of the benzene series ($P < 0.01$). Among bedrooms that were inspected in autumn, those with >5 household bonsais had significantly higher concentrations of formaldehyde than other bedrooms did. Among bedrooms that were inspected in winter, those with frequent use of air humidifiers and those in which pets were kept had significantly higher concentrations of the benzene series than other bedrooms did ($P < 0.05$). These results indicate that, after a long time since decoration, the types of household wall and floor covering materials still have certain relationships with indoor benzene-series levels and, compared to decoration materials, household ventilation perhaps has greater effect on indoor formaldehyde levels. The indoor benzene-series level perhaps has associations with indoor humidity level and the keeping of pets in households. Household bonsaies may have limited effect on indoor formaldehyde and benzene-series levels in residences that were decorated a long time ago.

Key words: Shanghai; child's bedroom; volatile organic compounds (VOCs); decoration materials; lifestyle behaviors

随着近年经济水平的不断提高和建筑业的快速发展,住宅建筑采用的材料和日常用品的种类已发生巨大改变;1990~2010年的中国城市化面积、复合木地板和城市空调设备的销售量等均呈现指数上升趋势^[1]。同时住宅气密性不断提高也导致室内通风存在不足的现象^[2]。这些变化已经显著改变了住宅室内人员的化学成分暴露种类和浓度^[3]。较多的研究发现新型建筑装修材料和家具可散发较高浓

度的多种有机性挥发物(甲醛和苯系物等)^[4~6]。而室内甲醛和苯系物等有机性挥发物的高浓度暴露与儿童哮喘等呼吸道或过敏性疾病存在关联^[7~10]。因

收稿日期: 2017-03-16; 修订日期: 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278302); 上海市教委项目(14ZZ132); 大学生创新创业训练计划项目

作者简介: 蒋巧云(1994~),女,主要研究方向为室内空气品质, E-mail: dieyu520@outlook.com

* 通信作者, E-mail: hehywyj@163.com

此,为改善住宅室内空气品质和降低儿童相关疾病的患病风险,有必要探明普通住宅室内有机性挥发物的暴露水平现状.本文基于对上海市学龄儿童的住宅进行的现场检测,探究了上海地区普通住宅的儿童卧室室内甲醛和苯系物暴露水平现状及其与住宅建筑特性和居民生活习性的关系.

1 材料与方法

1.1 住宅选择和取样方法

基于前期在上海地区针对学龄前儿童开展大样本量问卷调查(中国室内环境与儿童健康研究第一阶段)获得的信息,笔者在2013年3月~2014年12月对上海市4个市区行政区(杨浦区、虹口区、闸北区和静安区)和2个郊区行政区(宝山区和奉贤区)的454名5~10岁儿童的住宅室内环境进行了现场检测和调查.这些住宅在现场监测前1 a内均未进行装修.更多相关研究的信息和这些住宅的具体选择方法可参见文献[10].在现场检测过程中,本研究采用日本SHINYEI公司开发的多模式甲醛监测仪(formaldehyde multimode monitor;检测浓度范围:12~800 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;分辨率:1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)对儿童卧室的室内甲醛浓度进行了连续24 h(取样间隔为30 min)的监测^[11];同时采用德国AQUARIA公司开发的RING被动吸附采样管收集了儿童卧室连续7 d的室内空气样本.每户住宅现场检测和取样1次.为获得儿童的真实暴露水平,现场检测和取样期间均要求家庭成员保持通常的起居和生活习惯.儿童卧室的采样完成后,将采样管密封保存在-40℃的冰箱,以备后续对儿童卧室室内苯系物等进行分析;甲醛监测点和空气样本采样点均布置在儿童卧室中部且离地1 m左右处.在现场调查期间,通过家长问卷报告和调查员问卷报告的方法也获取了住宅建筑特性(建设年代、房间面积、楼层、地板材料和墙面材料等)和相关的居民生活习性(清洁习惯和通风习惯)等信息.本研究得到了复旦大学公共卫生学院伦理委员会的批准.

1.2 样品检测方法

首先对样品进行前处理:将采样管从冰箱取出,迅速放入带帽的玻璃套管内.待采样管温度恢复到室温,分两次进行超声萃取,第一次萃取加入3 mL二硫化碳(CS_2),盖紧管帽,利用超声振荡清洗仪超声20 min,强度53 Hz.超声完成后,将溶剂取出,重新加入2 mL CS_2 ,再次进行超声.将两次超声后的溶剂放在一起,并利用氮吹仪将萃取液浓缩

至0.5 mL.

然后利用气相色谱-质谱联用仪(GC/MS)对上述浓缩好的样品中的苯系物进行分析.气相色谱仪型号是Trace 1310,质谱仪型号是ISQ,仪器均由美国Thermo Fisher Scientific公司生产.气相色谱条件:色谱柱为DB5-MS的柱子.进样量为1 μL ,进样口温度为260℃,辅助加热温度为280℃.柱温箱温度采用程序升温,初始温度50℃,然后以8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升到180℃,再以15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升温到280℃.载气为氦气,流速是1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$.质谱条件:采用全扫描模式,扫描范围为20~500,溶剂延迟时间为3 min.离子源温度为250℃,四级杆温度为280℃.最后利用2008版的NIST数据库对谱图中出现的苯系物进行定性和定量分析^[12].

对于采样柱中的苯系物浓度,采用以下公式进行计算:

$$Q_i = R_f \frac{Q_{is} A_i}{A_{is}} \quad (1)$$

式中, A_{is} 为内标峰值面积(m^2); Q_{is} 是测试中添加到样本溶液中的内标质量(μg); A_i 是目标分析物*i*在校准样中的面积(m^2); Q_i 是测试中样本中的目标分析物*i*的质量(μg); R_f 是分析的目标物相对于内标的质量系数.其中质量系数 R_f 采用下式进行计算:

$$R_f = \frac{Q_{is}/A_{is}}{Q_i/A_i} \quad (2)$$

在样本定量分析前,准备了与内标具有相同稀释比例的目标物质的校准溶液.采用这些校准溶液制备一系列添加到空白采样器中具有不同浓度水平的对照样本:①在不同的玻璃罐中准备具有不同数量(10、30、50、100、200 mL)的校准溶液;②在每个玻璃罐中添加不同数量的内标溶液(从最小量开始添加,后续在同一样本中不断增加内标溶液);③在每个玻璃罐中添加2~3 mL的溶剂.各类试剂添加完成后,等待溶剂、目标分析物和内标物之间达到热力学平衡.然后进行分析获得目标分析物的校准曲线,确定相对于内标的质量系数 R_f .

对于室内空气中的苯系物浓度,采用以下公式进行计算:

$$c_i = \frac{10^6 Q_i}{t \Phi_i} \quad (3)$$

式中, Q_i 是测试样本中的目标分析物*i*的质量(μg); Φ_i 是扩散吸收率($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$); t 为采样柱在空气中的暴露时间(min); c_i 是住宅室内空气中*i*

物质的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。

1.3 统计分析方法

采用独立样本 t 检验(二分类变量)或单因素方差分析(ANOVA)(多分类变量)对目标因素(建筑特性和居民生活习性)的不同选项下的均值差异在统计学上的显著性进行检验。一般来说, $P < 0.05$ 显示差异有统计学意义。但因样本量较少,按 $P < 0.05$ 的规定难于有统计学意义的结果,本文也对 $P < 0.1$ 的比较结果进行了标记。所有的统计分析均采用软件 SPSS 17.0 来实现。

2 结果与讨论

454 户住宅中共 409 户住宅(90.1%)的儿童卧室存在有效的甲醛浓度数值。甲醛浓度均值为 $21.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 最大值为 $110.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 绝大部分的卧室甲醛浓度均低于 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 室内甲醛浓度均值 $> 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的卧室仅有 2 户,占 0.7%。不同儿童的卧室甲醛浓度存在较大差异。卧室甲醛浓度存在显著的季节差异($P < 0.001$): 冬季检测的卧室甲醛的检出率和浓度均值明显高于其他季节(表 1)。

表 1 儿童卧室室内甲醛浓度的总体分布状况/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Overall concentrations of formaldehyde in children's bedrooms/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 项目 | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 最小值 | 百分位数 | | | 最大值 |
|----|-------------|---------------------|------|------|------|------|-------|
| | | | | 25% | 50% | 75% | |
| 总体 | 409 (90.1) | 21.5 ± 13.0 | 6.8 | 12.3 | 19.6 | 27.5 | 110.7 |
| 春季 | 118 (90.8) | 20.4 ± 10.3 | 9.2 | 12.3 | 17.6 | 27.1 | 73.2 |
| 夏季 | 110 (86.6) | 19.7 ± 17.9 | 6.8 | 9.7 | 11.6 | 22.1 | 110.7 |
| 秋季 | 92 (88.5) | 19.2 ± 12.6 | 6.8 | 11.5 | 18.3 | 23.2 | 109.7 |
| 冬季 | 89 (95.7) | $27.7 \pm 5.8^{1)}$ | 12.8 | 25.8 | 27.5 | 28.2 | 53.0 |

1) $P < 0.001$

对于苯系物, 358(78.9%)户住宅的儿童卧室存在有效的苯系物浓度数值。这些儿童卧室共检测出 14 种苯系物。检出率最高的为对二甲苯, 为 91.6%; 检出率最低的为丙苯, 仅在 1(0.3%)户卧室内检测出。浓度最大值为 1,4-二氯苯($757.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其次为甲苯($186.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。因大部分的苯系物检出率较低, 后续分析中将这些苯系物累

加作为总体进行分析。苯系物总和浓度均值为 $33.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 绝大部分的卧室苯系物浓度均低于 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。检测的卧室苯系物浓度存在较大差异(标准差为 $72.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。卧室苯系物浓度的季节差异不显著($P = 0.621$); 冬季检出率和浓度高于其他季节(表 2)。

表 3 展示了建筑特性与室内甲醛和苯系物的关

表 2 儿童卧室室内苯系物总和浓度的季节差异对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Overall concentrations of \sum (benzene-series) in children's bedrooms/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 项目 | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 最小值 | 百分位数 | | | 最大值 |
|----|-------------|-----------------|---------------------|------|------|------|-------|
| | | | | 25% | 50% | 75% | |
| 总体 | 358 (78.9) | 33.9 ± 72.1 | $< \text{LOD}^{1)}$ | 8.3 | 14.7 | 30.4 | 770.1 |
| 春季 | 88 (67.7) | 29.2 ± 48.8 | 2.0 | 7.5 | 13.8 | 30.1 | 335.4 |
| 夏季 | 91 (71.7) | 35.4 ± 81.6 | 0.8 | 5.0 | 11.6 | 26.2 | 595.9 |
| 秋季 | 88 (84.6) | 30.6 ± 54.2 | 2.8 | 10.4 | 15.9 | 31.1 | 451.3 |
| 冬季 | 86 (92.5) | 42.4 ± 95.8 | 0.2 | 8.8 | 20.6 | 33.0 | 770.1 |

1) LOD: limit of detection, 检出限

系分析结果。总体上, 处在住宅楼低层的卧室甲醛浓度均值高于其他楼层的卧室; 1995 年前建设的住宅的卧室甲醛浓度均值高于其他卧室。对于秋季检测的住宅, 房间面积不同的卧室甲醛浓度均值存在明显差异: 房间面积 $> 20 \text{ m}^2$ 的卧室甲醛浓度均值高于其他卧室。对于冬季检测的住宅, 处在住宅楼低层的卧室甲醛浓度均值高于其他楼层的卧室; 1996 ~ 2005 年建设的卧室甲醛浓度均值高于其他年份建设的住宅。总体上和不同季节检测的住宅中, 不同建筑特性

下的卧室苯系物浓度均值均无显著差异。

表 4 展示了儿童卧室室内装修材料与室内甲醛和苯系物的关系分析结果。对于春季检测的住宅, 使用不同内墙墙面装饰材料的卧室苯系物浓度均值存在明显差异($P < 0.05$): 使用石灰做内墙墙面装饰材料的卧室苯系物浓度均值明显高于使用其他材料的卧室; 但使用石灰做内墙墙面装饰材料的卧室样本量只有 1 户, 其浓度均值明显高于使用其他材料的卧室的结果很可能存在偶然性。对于夏季检测

的住宅,使用不同地板装饰材料的卧室苯系物浓度均值也存在显著差异($P < 0.01$):使用瓷砖做地板装饰材料的卧室苯系物浓度均值明显高于使用其他材料的卧室;但使用瓷砖做地板装饰材料的卧室样

本量只有2户,其浓度均值明显高于使用其他材料的卧室的结果也可能存在偶然性.总体上和不同季节检测的住宅中,使用不同室内装修材料的卧室甲醛浓度均值无显著差异.

表3 住宅建筑特性与室内甲醛和苯系物浓度的关系¹⁾

Table 3 Associations of indoor formaldehyde or the benzene series with building characteristics

| 项目 | 甲醛 | | | | | | | 苯系物 | | | | | | |
|--------------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|------|-------------------|-------------------|--|-------------|------------------|-------------------------------------|------|------|------|--|
| | 总体 | | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | | | | 总体 | | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | | | |
| | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | |
| 住宅类型 | | | | | | | | | | | | | | |
| 低层公寓住宅 | 192 (48.6) | 21.9 \pm 14.4 | 19.7 | 19.6 | 18.8 | 28.0 | | 171 (50.1) | 39.6 \pm 94.1 | 17.2 | 41.9 | 29.4 | 52.1 | |
| 高层公寓住宅 | 203 (51.4) | 21.0 \pm 11.6 | 20.3 | 19.2 | 19.3 | 27.2 | | 170 (49.9) | 29.6 \pm 44.3 | 32.0 | 24.4 | 32.2 | 26.1 | |
| 住宅总层数 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1~5层 | 179 (47.9) | 22.6 \pm 14.8 | 19.6 | 21.2 | 18.6 | 28.1 | | 160 (49.5) | 41.2 \pm 96.5 | 21.8 | 43.1 | 30.4 | 51.2 | |
| ≥ 6 层 | 195 (52.1) | 20.5 \pm 11.6 | 19.7 | 18.6 | 19.9 | 26.7 | | 163 (50.5) | 29.2 \pm 44.9 | 33.0 | 22.0 | 29.5 | 27.3 | |
| 房间所在楼层 | | | | | | | | | | | | | | |
| 底层 | 54 (13.6) | 24.8 \pm 18.1 | 14.0 | 23.6 | 22.5 | 30.4 | | 49 (14.4) | 40.7 \pm 76.5 | 103.1 | 41.6 | 27.9 | 46.9 | |
| 2~5层 | 161 (40.8) | 19.8 \pm 11.3 | 19.5 | 15.8 | 16.5 | 27.1 | | 146 (43.0) | 36.3 \pm 91.5 | 14.6 | 34.1 | 36.0 | 51.2 | |
| ≥ 6 层 | 122 (30.9) | 22.2 \pm 13.3 | 21.2 | 23.2 | 22.1 | 25.8 | | 98 (28.8) | 31.6 \pm 52.5 | 34.8 | 29.4 | 31.8 | 21.1 | |
| 顶层 | 58 (14.7) | 21.8 \pm 11.1 [#] | 18.2 | 22.2 | 18.3 | 28.7 [#] | | 47 (13.8) | 27.4 \pm 37.1 | 28.8 | 37.1 | 18.2 | 29.0 | |
| 住宅建设年代 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1995年之前 | 67 (18.8) | 23.8 \pm 15.3 | 19.4 | 26.8 | 22.5 | 25.2 | | 58 (19.1) | 38.8 \pm 73.2 | 49.8 | 17.3 | 57.6 | 43.9 | |
| 1996~2000年 | 82 (23.0) | 20.3 \pm 10.6 | 20.5 | 15.9 | 18.8 | 29.4 | | 73 (23.9) | 38.7 \pm 68.3 | 41.6 | 53.5 | 18.3 | 29.1 | |
| 2001~2005年 | 131 (36.8) | 23.1 \pm 16.1 | 21.9 | 21.0 | 21.1 | 29.9 | | 108 (35.4) | 23.1 \pm 33.1 | 14.5 | 25.2 | 29.6 | 24.9 | |
| 2006年之后 | 76 (21.4) | 17.8 \pm 8.1 [*] | 17.7 | 15.4 | 16.9 | 25.9 [#] | | 66 (21.6) | 41.9 \pm 84.1 | 27.3 | 69.8 | 29.4 | 57.7 | |
| 房间面积/ m^2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 4~10 | 62 (15.4) | 21.3 \pm 16.0 | 20.0 | 16.8 | 23.7 | 27.6 | | 54 (15.5) | 27.9 \pm 50.6 | 43.2 | 25.7 | 20.1 | 22.0 | |
| 11~15 | 225 (56.0) | 21.7 \pm 13.4 | 21.7 | 20.5 | 16.4 | 28.4 | | 189 (54.3) | 39.9 \pm 90.9 | 24.8 | 47.1 | 32.2 | 52.9 | |
| 16~20 | 98 (24.4) | 20.9 \pm 10.1 | 19.2 | 17.4 | 21.1 | 26.2 | | 88 (25.3) | 24.7 \pm 32.6 | 25.9 | 14.2 | 27.3 | 31.0 | |
| >20 | 17 (4.2) | 22.3 \pm 11.9 | 16.0 | 26.8 | 26.7 [#] | 21.6 | | 17 (4.9) | 43.1 \pm 54.4 | 44.1 | 33.3 | 60.8 | 20.5 | |
| 房间体积/ m^3 | | | | | | | | | | | | | | |
| <28 | 90 (22.1) | 21.1 \pm 14.3 | 19.9 | 18.1 | 20.7 | 28.9 | | 78 (22.1) | 32.0 \pm 56.1 | 36.6 | 26.6 | 26.1 | 43.1 | |
| 28~34 | 102 (25.0) | 19.9 \pm 9.6 | 19.5 | 15.9 | 15.0 | 27.0 | | 88 (24.9) | 43.1 \pm 115.0 | 14.2 | 58.2 | 42.5 | 53.2 | |
| 35~40 | 116 (28.4) | 23.3 \pm 15.6 | 23.5 | 23.6 | 18.5 | 28.5 | | 94 (26.6) | 34.0 \pm 57.8 | 30.4 | 44.8 | 24.0 | 35.8 | |
| >40 | 100 (24.5) | 21.4 \pm 11.3 | 18.5 | 19.7 | 22.1 | 27.0 | | 93 (26.4) | 28.4 \pm 38.6 | 33.9 | 16.6 | 32.7 | 33.1 | |

1) # 表示 $0.05 \leq P < 0.1$; * 表示 $0.01 \leq P < 0.05$

表4 儿童卧室室内装修材料与室内甲醛和苯系物浓度的关系¹⁾

Table 4 Associations of indoor formaldehyde or the benzene series with decoration materials

| 项目 | 甲醛 | | | | | | | 苯系物 | | | | | | |
|----------|-------------|-----------------|-------------------------------------|------|------|------|--|-------------|------------------|-------------------------------------|--------------------|------|------|--|
| | 总体 | | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | | | | 总体 | | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | | | |
| | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | |
| 内墙墙面装饰材料 | | | | | | | | | | | | | | |
| 壁纸 | 32 (8.1) | 22.0 \pm 15.5 | 21.9 | 17.7 | 23.0 | 43.7 | | 24 (7.1) | 41.7 \pm 50.6 | 27.4 | 67.6 | 68.6 | 3.6 | |
| 乳胶漆 | 318 (80.7) | 21.5 \pm 13.3 | 19.7 | 20.2 | 18.6 | 27.6 | | 280 (82.3) | 33.5 \pm 75.9 | 27.6 | 33.6 | 27.0 | 45.0 | |
| 油漆 | 15 (3.8) | 20.1 \pm 7.1 | 15.3 | 12.4 | 18.1 | 26.4 | | 14 (4.1) | 26.4 \pm 24.1 | 7.2 | 12.8 | 30.6 | 36.6 | |
| 石灰 | 22 (5.6) | 21.4 \pm 10.1 | 23.4 | 19.5 | 22.0 | 27.5 | | 16 (4.7) | 33.9 \pm 53.3 | 186.8 | 14.1 | 37.1 | 17.2 | |
| 其他 | 7 (1.8) | 21.8 \pm 11.2 | 22.5 | 21.2 | NA | NA | | 6 (1.8) | 77.9 \pm 152.2 | 9.8 [*] | 111.9 | NA | NA | |
| 地板装饰材料 | | | | | | | | | | | | | | |
| 实木 | 281 (71.3) | 21.2 \pm 13.0 | 19.0 | 19.9 | 19.6 | 27.6 | | 250 (73.5) | 32.1 \pm 70.3 | 28.1 | 22.1 | 33.7 | 45.6 | |
| 复合木 | 66 (16.8) | 21.8 \pm 9.8 | 24.1 | 12.7 | 17.9 | 28.0 | | 47 (13.8) | 46.2 \pm 96.5 | 37.6 | 71.2 | 26.6 | 45.7 | |
| 瓷砖 | 13 (3.3) | 18.7 \pm 8.2 | 19.6 | 12.1 | 12.6 | 27.4 | | 13 (3.8) | 52.6 \pm 102.7 | 10.9 | 204.0 | 19.7 | 34.9 | |
| 其他 | 34 (8.6) | 24.3 \pm 19.7 | 19.2 | 28.2 | 19.3 | 27.0 | | 30 (8.9) | 31.1 \pm 40.6 | 20.7 | 52.4 ^{**} | 20.2 | 20.8 | |

1) NA: no available, 无有效样本; * 表示 $0.01 \leq P < 0.05$; ** 表示 $0.001 \leq P < 0.01$, 下同

表 5 展示了居民生活习性与儿童卧室室内甲醛和苯系物的关系分析结果. 总体上, 居民生活习性不同的卧室甲醛浓度均无显著差异; 但冬季经常使用加湿器和家中饲养宠物的儿童卧室室内苯系物浓度均值显著高于其他儿童卧室. 对于春季检测的住宅, 未经常使用空气净化器的卧室甲醛浓度均值显著高于其他卧室; 室内盆景数量不同的卧室甲醛浓度均值存在差异 ($P < 0.1$): 室内盆景数量为 1

~5 个的卧室室内甲醛浓度均值高于其他卧室. 对于秋季检测的住宅, 室内盆景数量不同的卧室甲醛浓度均值显著不同 ($P < 0.05$), 室内盆景数量为 >5 个的卧室甲醛浓度均值明显高于其他卧室; 家中经常使用加湿器的卧室苯系物浓度均值显著高于其他卧室. 对于冬季检测的住宅, 家中饲养宠物的卧室苯系物浓度均值明显高于家中未饲养宠物的卧室.

表 5 居民生活习性与儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度的关系¹⁾

Table 5 Associations of indoor formaldehyde or the benzene series with lifestyle behaviors

| 项目 | 甲醛 | | | | | | | 苯系物 | | | | | | |
|---------------|--------------|-------------------|-------------------------------------|-------|--------------------|-------|--------------|---------------------------------|--------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|---|--|
| | 总体 | | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | | | | 总体 | | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | | | |
| | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | | n (检出率/%) | 均值 \pm 标准差 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | |
| 家中是否经常使用空气净化器 | | | | | | | | | | | | | | |
| 否 | 301 (79. 0) | 21. 7 \pm 14. 0 | 20. 6 | 20. 3 | 19. 2 | 27. 7 | 267 (77. 8) | 31. 5 \pm 59. 3 | 30. 0 | 32. 7 | 27. 8 | 35. 3 | | |
| 是 | 80 (21. 0) | 19. 6 \pm 9. 4 | 16. 9 [*] | 16. 2 | 20. 4 | 27. 2 | 76 (22. 2) | 43. 3 \pm 106. 6 | 29. 0 | 53. 0 | 47. 8 | 62. 5 | | |
| 家中是否经常使用加湿器 | | | | | | | | | | | | | | |
| 否 | 252 (70. 6) | 21. 8 \pm 13. 6 | 19. 8 | 20. 2 | 20. 0 | 27. 6 | 229 (70. 9) | 30. 1 \pm 56. 0 | 28. 3 | 35. 4 | 20. 6 | 36. 2 | | |
| 是 | 105 (29. 4) | 20. 2 \pm 12. 9 | 18. 4 | 19. 9 | 17. 7 | 28. 1 | 94 (29. 1) | 45. 3 \pm 106. 0 [#] | 28. 6 | 44. 1 | 60. 0 ^{**} | 62. 0 | | |
| 家中是否饲养宠物 | | | | | | | | | | | | | | |
| 否 | 335 (85. 5) | 21. 7 \pm 12. 7 | 21. 0 | 20. 7 | 18. 4 | 27. 6 | 294 (86. 2) | 31. 1 \pm 60. 8 | 27. 8 | 36. 0 | 28. 4 | 31. 9 | | |
| 是 | 57 (14. 5) | 20. 2 \pm 15. 7 | 16. 9 | 14. 9 | 26. 4 | 27. 6 | 47 (13. 8) | 50. 9 \pm 122. 0 [#] | 38. 8 | 33. 0 | 41. 2 | 110. 2 [*] | | |
| 室内盆栽数量(个) | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 175 (46. 5) | 21. 0 \pm 12. 3 | 19. 8 | 19. 1 | 17. 8 | 27. 3 | 152 (46. 3) | 36. 9 \pm 81. 2 | 24. 2 | 32. 8 | 27. 7 | 63. 4 | | |
| 1 ~ 5 | 115 (30. 6) | 20. 9 \pm 12. 6 | 22. 1 | 18. 8 | 17. 6 | 27. 7 | 100 (30. 5) | 35. 5 \pm 79. 4 | 30. 9 | 36. 8 | 40. 8 | 27. 5 | | |
| > 5 | 86 (22. 9) | 22. 6 \pm 14. 3 | 16. 3 [#] | 22. 9 | 26. 2 [*] | 27. 4 | 76 (23. 2) | 28. 7 \pm 49. 2 | 41. 6 | 39. 1 | 17. 3 | 18. 5 | | |

1) #表示 $0.05 \leq P < 0.1$

由于本研究检测的住宅在检测前 1 a 内均未进行过装修, 检测的儿童卧室室内甲醛 ($21.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和苯系物 ($33.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 浓度均值均低于其他研究中对 1 a 内装修或半年内装修过的住宅进行检测获得的结果^[6]. 比如, 王春等^[13]在 2003 年 3~9 月对上海市徐汇区的 23 户新装修(装修时间为 2 个月内)住宅的室内甲醛浓度进行了连续监测发现: 住宅客厅、主卧和储藏室的甲醛浓度均值分别为 54.0、108.0 和 388.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 装修 3 个月后室内甲醛浓度明显下降, 但由于不合格板材的应用, 室内甲醛污染仍比较严重和普遍^[13]. 此外, 许多研究^[6, 14~17]发现绝大部分住宅在装修 1 a 后的室内甲醛和苯系物浓度均可满足国家室内空气质量标准(甲醛: $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 甲苯: $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[18]. 比如 2012 年刘晓途等全面总结了 1990 年以来有关我国城市住宅室内空气品质的研究资料发现: 城市住宅室内的主要空气污染物为甲醛、甲苯和二甲苯等装修型污染; 其中甲醛是首要空气污染物, 新装修住宅室内各种污染物均呈现较高的浓度水平; 除甲醛外, 其他挥发性有机物随着竣工时间的推移而快速

下降^[6]. 这与本研究的结果基本一致.

本研究发现冬季卧室甲醛的检出率和浓度均值明显高于其他季节, 可能与冬季儿童卧室通风量普遍不足有关^[2], 也可能与冬季室外挥发性有机物浓度比其他季节高有关^[19~26]. 尽管卧室通风量较差, 室外高浓度的挥发性有机物还有可能通过卧室窗户缝隙处渗透进入室内, 且上海地区的住宅在冬季一般都会采用空调等采暖设备保持室内较高的温度. 部分先前的研究表明住宅室内甲醛浓度的差异和分布特征与城市的气候和地理位置有关^[6]. 在长沙^[23]和太原^[27]开展的研究发现住宅室内的甲醛浓度和检出率均高于夏季. 但徐东群等研究发现: 不同城市甲醛浓度季节变化特征不同; 主要取决于室内温度和通风状况^[15]. 而本研究发现的儿童卧室室内苯系物浓度不存在明显的季节差异与先前的研究结果类似^[6].

本研究也发现儿童卧室室内甲醛浓度与部分建筑特性(楼层、建设年代和面积)有关, 但与地板和墙面装修材料无关. 总体上, 处于住宅楼底层和建于 1995 年前的儿童卧室室内甲醛浓度更高. 推测住

宅楼底层的儿童卧室室内甲醛浓度更高可能与底层室内通风较差有关;而建于1995年前(建筑年龄约为20 a)的儿童卧室更高可能与这些卧室或所在住宅在近年内进行过重新装修有关^[6,15]。而本研究发现儿童卧室室内苯系物浓度与建筑特性(楼层、建设年代和面积等)无关,但与地板和墙面装修材料有关。除去样本量仅为1户或2户的使用石灰和瓷砖做装修材料的儿童卧室,室内苯系物浓度较高的是使用壁纸、乳胶漆和复合木地板等新型装修材料的儿童卧室。这些结果说明室内装修材料与室内苯系物的暴露水平存在一定的关系,但在装修1 a后,室内装修材料散发的甲醛对室内甲醛暴露水平的贡献有限。相对于装修材料,室内通风可能对装修较长时间后的室内甲醛浓度影响更大^[6]。

本研究发现室内使用空气净化器的儿童卧室室内甲醛浓度更低,但苯系物浓度普遍更高(尽管差异在统计学上不显著)。这项结果说明家用空气净化器可能可以有效降低室内甲醛的暴露水平,但也有可能会带来二次污染(比如苯系物)^[28]。因此,在家用空气净化器的选用和设计时应特别注意二次污染的问题。此外,不同类型的空气净化器的功能差异较大,在降低室内可吸入颗粒物的同时也可能并不能降低甲醛。本研究也发现室内经常使用加湿器和饲养宠物的儿童卧室室内苯系物浓度明显更高。这项结果说明室内苯系物浓度可能与室内湿度有关^[6];也说明宠物等动物可能会散发一定的苯系物或由于宠物的生活起居问题造成室内苯系物暴露水平较高。此外,本研究发现室内放置一定数量的盆栽的儿童卧室室内甲醛浓度并不低于室内未放置盆栽的卧室。这与大部分研究^[29]和公众普遍认为的在室内放置一定的盆栽可降低室内甲醛的暴露水平的看法相悖。而有研究发现部分盆栽的植物或培养基(土壤)本身也可能会散发挥发性有机物^[30]。此外,对室内盆栽经常浇水和水分挥发而有可能影响室内空气湿度,从而在一定程度上导致甲醛的释放速率改变^[30]。因此,建议在选择室内盆栽时也应注意有可能会加重室内空气污染(比如甲醛)的问题。

本研究存在一定的局限。由于本研究的主要目的是探究儿童住宅室内污染物的真实暴露水平及其健康效应^[10],在采样前12 h未按《室内空气质量标准》的技术规范^[18]关闭儿童卧室门窗,室内甲醛和苯系物浓度可能受到人为活动的影响。此外,每户住宅只进行了1次检测和取样,而不是1户住宅在不同季节均进行检测。这样的检测安排可能对不同

季节的室内甲醛和苯系物浓度结果比较存在影响。在现场检测期间也未对室外挥发性有机物浓度进行检测,无法对室内外污染物浓度的关系进行定量分析。

3 结论

(1) 上海地区学龄儿童的卧室室内甲醛和苯系物浓度存在较大差异,但绝大部分卧室的室内甲醛和苯系物浓度满足国家室内空气质量标准的规定。冬季卧室室内甲醛浓度明显高于其他季节,但苯系物浓度无明显的季节差异。

(2) 装修较长时间后,新型装修材料的使用仍然与室内苯系物浓度存在一定的关系,但这些材料散发的甲醛对室内甲醛暴露水平的贡献有限。相对于装修材料,室内通风可能对装修较长时间后的室内甲醛浓度影响更大。

(3) 家用空气净化器可以有效降低室内甲醛的暴露水平。室内苯系物浓度可能与室内湿度和室内宠物的饲养有关。植物盆栽净化装修时间较长后的室内甲醛和苯系物的效果可能有限。

参考文献:

- [1] Zhang Y P, Mo J H, Weschler C J. Reducing health risks from indoor exposures in rapidly developing urban China [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, **121**(7): 751-755.
- [2] 孙越霞,侯静,张庆男,等. 天津市居住建筑新风量的测量与分析[J]. *暖通空调*, 2016, **46**(6): 10-13.
Sun Y X, Hou J, Zhang Q N, *et al.* Measurement and analysis of outdoor air rate of residential buildings in Tianjin [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2016, **46**(6): 10-13.
- [3] Weschler C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 153-169.
- [4] Yu C, Crump D. A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings [J]. *Building and Environment*, 1998, **33**(6): 357-374.
- [5] Wilke O, Jann O, Brödnér D. VOC-and SVOC-emissions from adhesives, floor coverings and complete floor structures [J]. *Indoor Air*, 2004, **14**(S8): 98-107.
- [6] 刘晓途,闫美霖,段恒轶,等. 我国城市住宅室内空气挥发性有机物污染特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(10): 1077-1084.
Liu X T, Yan M L, Duan H Y, *et al.* Characteristics of indoor volatile organic compounds in urban residential microenvironments in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(10): 1077-1084.
- [7] Rumchev K, Spickett J, Bulsara M, *et al.* Association of domestic exposure to volatile organic compounds with asthma in young children [J]. *Thorax*, 2004, **59**(9): 746-751.
- [8] Venn A J, Cooper M, Antoniak M, *et al.* Effects of volatile organic compounds, damp, and other environmental exposures in the home on wheezing illness in children [J]. *Thorax*, 2003, **58**(11): 955-960.

- [9] Mendell M J. Indoor residential chemical emissions as risk factors for respiratory and allergic effects in children: a review [J]. *Indoor Air*, 2007, **17**(4): 259–277.
- [10] Huang C, Wang X Y, Liu W, *et al.* Household indoor air quality and its associations with childhood asthma in Shanghai, China: on-site inspected methods and preliminary results [J]. *Environmental Research*, 2016, **151**: 154–167.
- [11] Maruo Y Y, Nakamura J, Uchiyama M. Development of formaldehyde sensing element using porous glass impregnated with β -diketone [J]. *Talanta*, 2008, **74**(5): 1141–1147.
- [12] 谢为博, 邓克俭. NIST Chemistry Webbooks 数据库的批量查询和数据采集 [J]. *计算机与应用化学*, 2004, **21**(2): 314–316.
- [13] 王春, 张焕珠, 蒋蓉芳, 等. 装修后居室空气中甲醛和总挥发性有机物污染现状 [J]. *环境与健康杂志*, 2005, **22**(5): 356–358.
- Wang C, Zhang H Z, Jiang R F, *et al.* Study on the indoor air levels of indoor formaldehyde and total volatile organic compounds after decoration [J]. *Journal of Environment and Health*, 2005, **22**(5): 356–358.
- [14] 张卫国, 郝森, 黄培林, 等. 新装修居室空气中总挥发性有机物随时间的变化规律 [J]. *环境与健康杂志*, 2007, **24**(10): 782–783.
- Zhang W G, Hao S, Huang P L, *et al.* Time variation regularity of TVOC in indoor Air in newly decorated houses [J]. *Journal of Environment and Health*, 2007, **24**(10): 782–783.
- [15] 徐东群, 尚兵, 曹兆进. 中国部分城市住宅室内空气中重要污染物的调查研究 [J]. *卫生研究*, 2007, **36**(4): 473–476.
- Xu D Q, Shang B, Cao Z J. Investigation of key indoor air pollutants in residence in part of the cities in China [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2007, **36**(4): 473–476.
- [16] 迟欣, 石玉琴, 颜进, 等. 武汉市室内装修后甲醛浓度动态变化规律研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2007, **24**(2): 81–83.
- Chi X, Shi Y Q, Yan J, *et al.* Dynamic change of formaldehyde concentration in indoor air after newly decorated in Wuhan [J]. *Journal of Environment and Health*, 2007, **24**(2): 81–83.
- [17] 张桂斌, 张金艳, 王富高, 等. 装修后居室内空气中苯系物浓度的动态变化 [J]. *环境与健康杂志*, 2007, **24**(7): 505–506.
- Zhang G B, Zhang J Y, Wang F S, *et al.* Dynamic changes of benzene series level in indoor air in newly decorated houses [J]. *Journal of Environment and Health*, 2007, **24**(7): 505–506.
- [18] GB/T 18883–2002, 室内空气质量标准 [S].
- [19] 张玉欣, 安俊琳, 林旭, 等. 南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 1–12.
- Zhang Y X, An J L, Lin X, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds and health assessment of benzene series in Northern suburb of Nanjing in Winter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 1–12.
- [20] 高爽, 张坤, 高松, 等. 上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 855–866.
- Gao S, Zhang K, Gao S, *et al.* Characteristics of reactive VOCs species during high haze-pollution events in suburban area of Shanghai in winter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 855–866.
- [21] 崔虎雄, 吴迺名, 高松, 等. 上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3537–3542.
- Cui H X, Wu Y M, Gao S, *et al.* Characteristics of ambient VOCs and their role in O₃ formation: a typical air pollution episode in Shanghai urban area [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 855–866.
- [22] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3560–3565.
- Zhou Y M, Hao Z P, Wang H L. Pollution and source of atmospheric volatile organic compounds in urban-rural juncture belt area in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3560–3565.
- [23] 李念平, 朱孔敏, 潘尤贵, 等. 长沙市住宅建筑室内外 VOC 浓度的实测与分析 [J]. *暖通空调*, 2004, **34**(6): 17–21.
- Li N P, Zhu K M, Pan Y G, *et al.* Field measurement and analysis of indoor and outdoor VOC concentration for Changsha residential buildings [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2004, **34**(6): 17–21.
- [24] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443–451.
- Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and Ozone formation potential in summer in Nanjing urban district [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443–451.
- [25] 刘丹, 解强, 张鑫, 等. 北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3693–3701.
- Liu D, Xie Q, Zhang X, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of VOCs during the haze period in the winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3693–3701.
- [26] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 845–854.
- Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al.* Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 845–854.
- [27] 齐惠萍, 杜银梅, 王向纯, 等. 太原市部分居室甲醛污染状况调查 [J]. *环境与健康杂志*, 2009, **26**(3): 253.
- [28] Zhang Y P, Mo J H, Li Y G, *et al.* Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(26): 4329–4343.
- [29] 侯海萍. 盆栽植物净化空气中挥发性有机污染物研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- [30] 徐仲均, 皮东恒, 林爱军, 等. 植物对室内空气中甲醛的净化 [J]. *环境与健康杂志*, 2008, **25**(10): 935–937.
- Xu Z J, Pi D H, Lin A J, *et al.* Purification of indoor air Formaldehyde by plants: a review [J]. *Journal of Environment and Health*, 2008, **25**(10): 935–937.