

# 南京市某城区部分居室室内降尘中多环芳烃的污染水平及其影响因素

崔媛<sup>1</sup>, 刘茂<sup>2</sup>, 陈悦娇<sup>2</sup>, 杨雪<sup>2</sup>, 陈珊珊<sup>2</sup>, 王炳玲<sup>3\*</sup>, 张正东<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>南京医科大学公共卫生学院卫生检验系, <sup>2</sup>预防医学系, <sup>3</sup>职业医学与环境卫生学系, 江苏 南京 210029)

**[摘要]** 目的:调查城市室内降尘中多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)的浓度及其可能的影响因素。方法:用真空吸尘器采集 61 家居室内降尘, 高效液相色谱编程荧光法检测其中的 PAHs。自制问卷调查可能影响室内 PAHs 分布的因素。结果:室内降尘中芴、菲和芘的检出率为 100%, 其余被测物质的检出率均在 85%以上;几何均数的浓度范围为 0.113~1.919  $\mu\text{g}/\text{g}$ ; 15 种 PAHs 浓度之和的几何均数为 10.066  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 最高浓度为 280.395  $\mu\text{g}/\text{g}$ ; 4 环及多于 4 环的高分子 PAHs 的浓度之和远高于 2 环和 3 环低分子 PAHs 的浓度之和;苯并芘最高浓度的风险指数达到了 0.9, 而苯并芘毒性当量浓度的第 95 百分位数以上均超过了 1。没有发现显著影响室内 PAHs 浓度的决定因子。结论:室内多环芳烃的污染普遍存在, 并且其暴露水平可能对儿童健康造成潜在的影响。尚需进一步增加样本量以分析决定室内 PAHs 浓度分布的影响因子。

**[关键词]** 室内降尘; 多环芳烃; 半挥发性有机化合物; 城市

**[中图分类号]** X513

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1007-4368(2012)09-1328-06

## Levels and influence factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban house dust of Nanjing

CUI Yuan<sup>1</sup>, LIU Mao<sup>2</sup>, CHEN Yue-jiao<sup>2</sup>, YANG Xue<sup>2</sup>, CHEN Shan-shan<sup>2</sup>, WANG Bing-ling<sup>3\*</sup>, ZHANG Zheng-dong<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Department of Hygiene Analysis and Detection, <sup>2</sup>Department of Preventive Medicine, <sup>3</sup>Department of Occupational Medicine and Environmental Health, School of Public Health, NJMU, Nanjing 210029, China)

**[Abstract]** **Objective:** To investigate the concentration and possible influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban settled house dust. **Methods:** Vacuum cleaner was used for gathering settled house dust in 61 urban homes, and high-performance liquid chromatography (HPLC) with fluorescence detection and wavelength programming were used for PAHs measurement. Self-administered questionnaire was used to collect the possible influencing factors on PAHs in settled house dust. **Results:** Of 61 samples, the detection rates of phenanthrene, fluorene and pyrene were all 100%, and others were more than 85%. The geometric mean (*G*) concentration range was from 0.113 to 1.919  $\mu\text{g}/\text{g}$ . The *G* concentration of total PAHs was 10.066  $\mu\text{g}/\text{g}$ , and the maximum concentration was up to 280.395  $\mu\text{g}/\text{g}$ . The sum of PAHs was far higher for high molecular weight than low high molecular weight. No influencing factors were found on PAHs levels in settled house dust. **Conclusion:** The PAHs pollution is ubiquitous and its level might cause potential health effects. It needs further investigation with larger sample size to explore the possible influencing factors on PAHs levels in settled house dust.

**[Key words]** settled house dust; polycyclic aromatic hydrocarbons; semi-volatile organic compounds; city

[Acta Univ Med Nanjing, 2012, 32(9): 1328-1333]

人的一生有 70%~92% 的时间在诸如居室、工作场所和学校等室内环境中度过。室内环境污染对人类尤其是婴幼儿和孕妇健康的影响早就引起了人们

**[基金项目]** 国家自然科学基金面上项目(81072268);江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目;江苏省自然科学基金面上项目(BK2010535);江苏省博士后基金(1001017C);江苏高校优势学科建设工程资助项目

\*通讯作者, E-mail: blwang@njmu.edu.cn

的重视。室内降尘很早就被认为可以作为一种暴露媒介进行暴露评价和污染物来源分析<sup>[1]</sup>。从半挥发性有机化合物在居室内空气和悬浮颗粒物及室内降尘的动态平衡而言<sup>[2]</sup>, 室内降尘甚至可以作为一种评价室内环境污染的总体指示物<sup>[3]</sup>。因为婴幼儿和刚学会走路的儿童体内化学物质的负荷主要是经过手-口途径暴露而来, 室内降尘对其暴露具有更重要的意义。

多环芳烃(PAHs)是指不完全燃烧形成的 2 个以上苯环以稠环形式相连的化合物,数量多,分布广,与人类关系密切,是最早发现且数量最多的致癌物。由于其毒性、生物蓄积性和半挥发性,并能在环境中持久存在,而被列入了典型持久性有机污染物(POPs),受到人们的广泛关注。最近有报道,母亲怀孕期间个体采样获得的空气中 PAHs 浓度与其婴儿出生后的智商缺陷<sup>[4]</sup>、认知能力发育迟缓<sup>[5]</sup>、宫内发育迟缓<sup>[6]</sup>及呼吸道影响<sup>[7-8]</sup>相关联。PAHs 的暴露评价媒介包括空气、室内降尘和大气颗粒物等环境介质及血尿等生物材料,其中因为 PAHs 能够蓄积在地板降尘或地毯中几年甚至几十年<sup>[9]</sup>,室内降尘中 PAHs 浓度可以作为室内 PAHs 暴露的长期指示物。而且有研究表明,在早期儿童体内非食物来源的 PAHs 42%来自于室内降尘<sup>[10]</sup>。因此室内降尘中 PAHs 水平对儿童早期 PAHs 暴露具有重要意义。

经文献检索,截止到目前,尚未发现我国有关室内降尘中 PAHs 暴露水平的报道。因此本研究以南京市某区的学龄前儿童所在居室为调查对象,调查了解我国目前城市室内降尘中 PAHs 的暴露水平及其对学龄前儿童神经发育的可能影响<sup>[11]</sup>。本研究作为前期性研究,重点对室内降尘中 PAHs 的暴露水平及其可能的影响因素进行初步探讨。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 仪器

美国 Waters2695 高效液相色谱仪配有 Waters2475 荧光检测器、Waters C<sub>18</sub>PAHs 专用色谱柱(5 μm,4.6 mm × 250 mm)、Symmetry C<sub>18</sub> 保护柱(3.9 mm × 20 mm,Wat054225)均为美国 Waters 公司产品。

#### 1.1.2 试剂

15 种 PAHs 混合标准物质:萘、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、屈、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、苯并(g,h,i)芘、茚并(1,2,3-cd)芘,浓度均为 200 μg/ml,购于美国 Cerilliant 公司。乙腈(德国 Merck 公司)、丙酮均为色谱纯。流动相用水为超纯水(18MΩ,美国 Milli-Q 公司)。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 样品采集及处理

南京市某区内 61 位学龄前儿童所在居室作为研究对象,具体儿童筛选的标准参照文献<sup>[11]</sup>。使

用吸尘袋和真空吸尘器在居室内儿童经常玩的区域收集地板降尘。同时,用毛刷收集居室所在楼外地面上的自然降尘。收集到的降尘转移到甲醇清洗过的玻璃瓶中,聚四氟乙烯胶带封口后,-20℃避光保存。收集降尘的同时,使用自行设计的调查问卷收集室内外环境中可能存在的影响室内降尘的因素。

称取过 100 目过筛的室尘 50 mg 于 10 ml 具塞试管中,加入丙酮 1.5 ml,超声提取 30 min,离心机 4 000 r/min 离心 15 min,取上清液 1 ml。重复萃取 1 次,合并上清液,低温浓缩至干,加入 0.1 ml 乙腈,充分溶解转移至仪器进样瓶,于-20℃保存待测。

#### 1.2.2 高效液相色谱(HPLC)分析

使用 HPLC 编程荧光检测法测定 15 种常见多环芳烃类物质,具体分析按照陆晓梅等<sup>[12]</sup>报道的方法。

### 1.3 统计学分析

用 SPSS13.0 进行统计学处理。文献中常见的参数包括中位数、算数平均数和标准误等,但是本研究中数据显示室内外降尘中的 PAHs 均呈对数正态分布,因此,本研究使用几何均数(*G*)和几何标准偏差(*GSD*)来描述浓度的集中和离散趋势。同时,为了便于文献间的比较,我们也对浓度的算术平均数( $\bar{x}$ )和中位数(*M*)进行描述。室内外浓度自然对数化后,采用配对 *t* 检验比较室内外浓度差别;采用 Pearson 相关系数描述室内外各组间的相关性;对两组间的 PAHs 浓度水平比较,采用 *t* 检验;对 3 组间的比较,则采用 one-way ANOVA。*P* < 0.05 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 室内外 PAHs 浓度分布

室内降尘中 15 种 PAHs 的浓度分布见表 1。室内降尘中芴、菲、芘的检出率为 100%,其余被测物质的检出率均在 85%以上。几何均数的浓度范围为 0.113~1.919 μg/g,其中以菲的几何均数浓度最大。对 61 家居室中 45 家的室外 PAHs 进行了分析,其中菲、芘、苯并(a)蒽、屈、苯并(b)荧蒽和苯并(k)荧蒽的检出率为 100%,但是萘的检出率只有 76%,二氢苊更是低到 42%。被测组分的几何均数浓度范围为 0.079~0.830 μg/g,同样以菲的几何均数浓度最大(表 2)。不管是室内还是室外,4 环及多于 4 环的高分子量 PAHs 的浓度之和远高于 2 环和 3 环的低分子量 PAHs 的浓度之和。

### 2.2 室内外 PAHs 浓度分布间的关联

表1 室内降尘样品中多环芳烃组分含量测定

| PAH       | 居室数 | 检出率(%) | $\bar{x}$ | $M$    | $G \pm GSD$        | Min   | Max     |
|-----------|-----|--------|-----------|--------|--------------------|-------|---------|
| Nap       | 59  | 96.70  | 0.424     | 0.277  | $0.255 \pm 0.003$  | 0.019 | 2.800   |
| Ace       | 53  | 86.90  | 0.573     | 0.394  | $0.302 \pm 0.003$  | 0.013 | 5.202   |
| Flu       | 61  | 100.00 | 0.425     | 0.154  | $0.168 \pm 0.003$  | 0.006 | 8.672   |
| Phe       | 61  | 100.00 | 5.353     | 1.988  | $1.919 \pm 0.004$  | 0.082 | 102.580 |
| Ant       | 57  | 93.40  | 0.241     | 0.120  | $0.113 \pm 0.003$  | 0.007 | 2.173   |
| Fluo      | 60  | 98.40  | 4.301     | 1.771  | $1.440 \pm 0.005$  | 0.009 | 72.141  |
| Pyr       | 61  | 100.00 | 3.035     | 1.327  | $1.359 \pm 0.003$  | 0.039 | 37.739  |
| B[a]A     | 59  | 96.70  | 0.657     | 0.461  | $0.323 \pm 0.004$  | 0.007 | 5.731   |
| Chr       | 60  | 98.40  | 2.481     | 1.489  | $1.107 \pm 0.005$  | 0.006 | 19.539  |
| B[b]F     | 59  | 96.70  | 1.437     | 1.014  | $0.786 \pm 0.003$  | 0.011 | 10.313  |
| B[k]F     | 59  | 96.70  | 0.482     | 0.314  | $0.271 \pm 0.003$  | 0.013 | 3.433   |
| B[a]P     | 58  | 95.10  | 0.688     | 0.468  | $0.385 \pm 0.003$  | 0.007 | 6.449   |
| D[a,h]A   | 52  | 85.20  | 0.280     | 0.172  | $0.153 \pm 0.003$  | 0.011 | 1.617   |
| B[g,h,i]P | 57  | 93.40  | 0.641     | 0.436  | $0.326 \pm 0.004$  | 0.007 | 3.595   |
| I[cd]P    | 53  | 86.90  | 0.570     | 0.387  | $0.328 \pm 0.003$  | 0.008 | 4.046   |
| LMW       | 61  | 100.00 | 6.911     | 3.125  | $2.936 \pm 0.003$  | 0.101 | 120.373 |
| HMW       | 61  | 100.00 | 14.185    | 8.039  | $6.897 \pm 0.004$  | 0.083 | 160.022 |
| CaPAHs    | 61  | 100.00 | 4.289     | 2.953  | $2.435 \pm 0.003$  | 0.018 | 29.686  |
| TPAHs     | 61  | 100.00 | 21.096    | 11.277 | $10.066 \pm 0.003$ | 0.184 | 280.395 |

Nap: 萘; Ace: 二氢萘; Flu: 芴; Phe: 菲; Ant: 蒽; Fluo: 荧蒽; Pyr: 芘; B[a]A: 苯并(a)蒽; Chr: 屈; B[b]F: 苯并(b)荧蒽; B[k]F: 苯并(k)荧蒽; B[a]P: 苯并(a)芘; D[a,h]A: 二苯并(a,h)蒽; B[g,h,i]P: 苯并(g,h,i)芘; I[cd]P: 茚并(1,2,3-cd)芘; LMW: 含有2个或3个苯环的PAHs; HMW: 含有3个以上苯环的PAHs; CaPAHs: 美国环保局规定的有致癌性的PAHs; TPAHs: 总PAHs;  $\bar{x}$ : 算术平均数;  $M$ : 中位数;  $G$ : 几何均数;  $GSD$ : 几何标准偏差; Min: 最小值; Max: 最大值。

表2 室外降尘样品中多环芳烃组分含量测定

| PAH       | 居室数 | 检出率(%) | $\bar{x}$ | $M$   | $G \pm GSD$       | Min   | Max    |
|-----------|-----|--------|-----------|-------|-------------------|-------|--------|
| Nap       | 34  | 75.56  | 0.133     | 0.092 | $0.092 \pm 0.003$ | 0.006 | 0.523  |
| Ace       | 19  | 42.22  | 0.150     | 0.128 | $0.128 \pm 0.003$ | 0.005 | 0.674  |
| Flu       | 41  | 91.11  | 0.100     | 0.097 | $0.097 \pm 0.003$ | 0.007 | 0.351  |
| Phe       | 45  | 100.00 | 1.303     | 1.214 | $1.214 \pm 0.003$ | 0.048 | 6.247  |
| Ant       | 36  | 80.00  | 0.112     | 0.097 | $0.097 \pm 0.003$ | 0.007 | 0.582  |
| Fluo      | 44  | 97.78  | 1.848     | 1.607 | $1.607 \pm 0.007$ | 0.005 | 7.263  |
| Pyr       | 45  | 100.00 | 1.193     | 1.000 | $1.000 \pm 0.003$ | 0.057 | 4.875  |
| B[a]A     | 45  | 100.00 | 0.462     | 0.351 | $0.351 \pm 0.004$ | 0.015 | 2.274  |
| Chr       | 45  | 100.00 | 1.348     | 1.149 | $1.149 \pm 0.004$ | 0.037 | 5.450  |
| B[b]F     | 45  | 100.00 | 0.894     | 0.754 | $0.754 \pm 0.003$ | 0.037 | 3.750  |
| B[k]F     | 45  | 100.00 | 0.330     | 0.290 | $0.290 \pm 0.003$ | 0.016 | 1.421  |
| B[a]P     | 42  | 93.33  | 0.485     | 0.313 | $0.313 \pm 0.003$ | 0.022 | 2.454  |
| D[a,h]A   | 42  | 93.33  | 0.157     | 0.123 | $0.123 \pm 0.003$ | 0.010 | 0.534  |
| B[g,h,i]P | 43  | 95.56  | 0.435     | 0.378 | $0.378 \pm 0.003$ | 0.012 | 1.544  |
| I[cd]P    | 43  | 95.56  | 0.407     | 0.315 | $0.315 \pm 0.003$ | 0.031 | 1.526  |
| LMW       | 45  | 100.00 | 1.648     | 1.478 | $1.478 \pm 0.003$ | 0.144 | 6.999  |
| HMW       | 45  | 100.00 | 7.437     | 6.670 | $6.670 \pm 0.003$ | 0.228 | 26.339 |
| CaPAHs    | 45  | 100.00 | 2.775     | 2.503 | $2.503 \pm 0.003$ | 0.143 | 11.228 |
| TPAHs     | 45  | 100.00 | 9.086     | 8.479 | $8.479 \pm 0.003$ | 0.373 | 29.689 |

Nap: 萘; Ace: 二氢萘; Flu: 芴; Phe: 菲; Ant: 蒽; Fluo: 荧蒽; Pyr: 芘; B[a]A: 苯并(a)蒽; Chr: 屈; B[b]F: 苯并(b)荧蒽; B[k]F: 苯并(k)荧蒽; B[a]P: 苯并(a)芘; D[a,h]A: 二苯并(a,h)蒽; B[g,h,i]P: 苯并(g,h,i)芘; I[cd]P: 茚并(1,2,3-cd)芘; LMW: 含有2个或3个苯环的PAHs; HMW: 含有3个以上苯环的PAHs; CaPAHs: 美国环保局规定的有致癌性的PAHs; TPAHs: 总PAHs;  $\bar{x}$ : 算术平均数;  $M$ : 中位数;  $G$ : 几何均数;  $GSD$ : 几何标准偏差; Min: 最小值; Max: 最大值。

通过对 PAHs 浓度自然对数后进行 Pearson 相关系数分析发现,在室内,除了萘和二苯并(a,h)蒽的相关系数为 0.33( $P < 0.05$ )外,15 种 PAHs 相互间均显著相关( $P < 0.01$ ,表 3)。室外,大部分 PAHs 间显著相关( $P < 0.01$ ),但是萘和二氢萘与其他

PAHs 浓度间无显著相关性( $P > 0.05$ ,表 3)。室内外间配对后分析,除了萘、二氢萘和二苯并(a,h)蒽外,其他 PAHs 均显示了显著相关( $P < 0.05$ );萘、芴、菲、芘和屈的室内浓度显著高于室外( $P < 0.05$ ,表 4)。

表 3 室内外 PAHs 各组分浓度分布的关联

Table 3 Pearson correlation coefficients between 15 logged PAH concentrations in house dust or outdoor dust ( $r$ )

|           | Nap    | Ace    | Flu    | Phe    | Ant    | Fluo   | Pyr    | B[a]A  | Chr    | B[b]F  | B[k]F  | B[a]P  | D[a,h]A | B[g,h,i]P |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|
| Nap       |        | 0.04   | 0.21   | 0.14   | -0.24  | -0.04  | 0.06   | 0.01   | 0.04   | 0.08   | 0.02   | 0.04   | 0.13    | 0.07      |
| Ace       | 0.58** |        | 0.18   | 0.27   | 0.34   | 0.43   | 0.30   | 0.25   | 0.29   | 0.24   | 0.22   | 0.24   | 0.16    | 0.20      |
| Flu       | 0.61** | 0.63** |        | 0.89** | 0.83** | 0.74** | 0.83** | 0.80** | 0.80** | 0.82** | 0.78** | 0.65** | 0.78**  | 0.79**    |
| Phe       | 0.47** | 0.58** | 0.93** |        | 0.93** | 0.86** | 0.96** | 0.92** | 0.93** | 0.93** | 0.91** | 0.78** | 0.77**  | 0.91**    |
| Ant       | 0.43** | 0.60** | 0.84** | 0.86** |        | 0.87** | 0.93** | 0.92** | 0.90** | 0.89** | 0.88** | 0.72** | 0.78**  | 0.87**    |
| Fluo      | 0.31** | 0.62** | 0.72** | 0.85** | 0.77** |        | 0.88** | 0.68** | 0.92** | 0.86** | 0.82** | 0.71** | 0.67**  | 0.80**    |
| Pyr       | 0.42** | 0.58** | 0.85** | 0.96** | 0.87** | 0.87** |        | 0.98** | 0.97** | 0.97** | 0.96** | 0.84** | 0.84**  | 0.95**    |
| B[a]A     | 0.44** | 0.69** | 0.75** | 0.83** | 0.84** | 0.78** | 0.88** |        | 0.98** | 0.97** | 0.97** | 0.87** | 0.83**  | 0.94**    |
| Chr       | 0.43** | 0.56** | 0.69** | 0.71** | 0.58** | 0.66** | 0.70** | 0.95** |        | 0.98** | 0.95** | 0.86** | 0.82**  | 0.93**    |
| B[b]F     | 0.40** | 0.66** | 0.77** | 0.85** | 0.80** | 0.81** | 0.91** | 0.96** | 0.95** |        | 0.97** | 0.88** | 0.85**  | 0.94**    |
| B[k]F     | 0.42** | 0.58** | 0.65** | 0.77** | 0.76** | 0.75** | 0.87** | 0.95** | 0.88** | 0.97** |        | 0.88** | 0.87**  | 0.97**    |
| B[a]P     | 0.37** | 0.60** | 0.59** | 0.60** | 0.66** | 0.57** | 0.65** | 0.85** | 0.80** | 0.82** | 0.85** |        | 0.75**  | 0.85**    |
| D[a,h]A   | 0.33*  | 0.49** | 0.59** | 0.68** | 0.68** | 0.62** | 0.68** | 0.66** | 0.55** | 0.61** | 0.57** | 0.43** |         | 0.84**    |
| B[g,h,i]P | 0.43** | 0.72** | 0.71** | 0.76** | 0.68** | 0.71** | 0.78** | 0.89** | 0.84** | 0.91** | 0.85** | 0.85** | 0.57**  |           |
| I[cd]P    | 0.40** | 0.56** | 0.60** | 0.66** | 0.63** | 0.64** | 0.70** | 0.83** | 0.78** | 0.80** | 0.76** | 0.82** | 0.65**  | 0.84**    |

左下方显示的是室内 PAHs 间的相关系数,右上方为室外 PAHs 间的相关系数。Nap:萘;Ace:二氢萘;Flu:芴;Phe:菲;Ant:蒽;Fluo:荧蒽;Pyr:芘;B[a]A:苯并(a)蒽;Chr:屈;B[b]F:苯并(b)荧蒽;B[k]F:苯并(k)荧蒽;B[a]P:苯并(a)芘;D[a,h]A:二苯并(a,h)蒽;B[g,h,i]P:苯并(g,h,i)芘;I[cd]P:茚并(1,2,3-cd)芘; \* $P < 0.05$ ; \*\* $P < 0.01$ 。

表 4 室内与室外 PAHs 各组分浓度分布的关联与区别

Table 4 Association and difference of PAH concentrations in house dust samples with outdoor dust samples

| PAH       | 居室数 | $(\mu\text{g/g}, \bar{G} \pm GSD)$ |               |                |           |           |
|-----------|-----|------------------------------------|---------------|----------------|-----------|-----------|
|           |     | 室内                                 | 室外            | $R^{\ddagger}$ | $t^{\xi}$ | $P^{\xi}$ |
| Nap       | 32  | 0.262 ± 0.002                      | 0.075 ± 0.002 | -0.079         | 4.505     | < 0.001   |
| Ace       | 18  | 0.155 ± 0.003                      | 0.091 ± 0.003 | 0.313          | 1.482     | 0.16      |
| Flu       | 41  | 0.150 ± 0.002                      | 0.068 ± 0.002 | 0.555***       | 4.461     | < 0.001   |
| Phe       | 45  | 1.822 ± 0.002                      | 0.830 ± 0.002 | 0.517***       | 4.312     | < 0.001   |
| Ant       | 34  | 0.109 ± 0.002                      | 0.072 ± 0.002 | 0.442*         | 1.974     | 0.06      |
| Fluo      | 43  | 1.319 ± 0.003                      | 0.861 ± 0.003 | 0.629***       | 1.841     | 0.07      |
| Pyr       | 45  | 1.264 ± 0.002                      | 0.754 ± 0.002 | 0.513***       | 2.923     | < 0.01    |
| B[a]A     | 44  | 0.270 ± 0.002                      | 0.236 ± 0.003 | 0.668***       | 0.768     | 0.45      |
| Chr       | 44  | 1.047 ± 0.002                      | 0.758 ± 0.003 | 0.724***       | 2.061     | < 0.05    |
| B[b]F     | 44  | 0.687 ± 0.002                      | 0.590 ± 0.002 | 0.575***       | 0.917     | 0.36      |
| B[k]F     | 44  | 0.246 ± 0.002                      | 0.211 ± 0.002 | 0.503**        | 0.903     | 0.37      |
| B[a]P     | 40  | 0.316 ± 0.002                      | 0.291 ± 0.002 | 0.555***       | 0.479     | 0.64      |
| D[a,h]A   | 34  | 0.136 ± 0.002                      | 0.099 ± 0.002 | 0.101          | 1.147     | 0.26      |
| B[g,h,i]P | 40  | 0.286 ± 0.002                      | 0.237 ± 0.002 | 0.665***       | 1.032     | 0.31      |
| I[cd]P    | 38  | 0.274 ± 0.002                      | 0.260 ± 0.003 | 0.496*         | 0.281     | 0.78      |

Nap:萘;Ace:二氢萘;Flu:芴;Phe:菲;Ant:蒽;Fluo:荧蒽;Pyr:芘;B[a]A:苯并(a)蒽;Chr:屈;B[b]F:苯并(b)荧蒽;B[k]F:苯并(k)荧蒽;B[a]P:苯并(a)芘;D[a,h]A:二苯并(a,h)蒽;B[g,h,i]P:苯并(g,h,i)芘;I[cd]P:茚并(1,2,3-cd)芘;G:几何均数;GSD:几何标准差; $\ddagger$ : Pearson 相关系数; $\xi$ :配对 t 检验; \* $P < 0.01$ ; \*\* $P < 0.001$ ; \*\*\* $P < 0.0001$ 。

### 2.3 室内 PAHs 浓度分布的影响因素

分析厨房类型(开放式和独立型)、做饭次数、室

内是否有吸烟者吸烟、是否靠近交通干道、开窗时间(1~4 h/d 和 > 4 h/d)和除尘间隔(1~3 d、4~7 d 和

> 7 d)对室内 PAHs 浓度的影响,发现这些因素均不能显著影响室内降尘中的 PAHs 浓度。

#### 2.4 多环芳烃的暴露水平及其风险与其他地区报道水平的比较

为了初步判断目前的暴露水平是否具有潜在的健康影响,引入每日可耐受摄入量(TDI)与背景参考值对室内降尘中的多环芳烃暴露水平进行评价。TDI 是以毒理学为基础,根据神经系统、生殖系统和免疫系统等方面的生理指标来确定的不会对人们

身体健康产生伤害的最高摄入量。已知多环芳烃中的苯并(a)芘 B[a]P 的 TDI 为 0.05  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ,背景值为 0.001 5  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ <sup>[13]</sup>。为方便起见,引入风险指数(RI)来识别可能的健康风险。 $\text{RI}=(\text{估计通过接触室内降尘暴露量}+\text{背景暴露量})/\text{TDI}$ 。以儿童的体重为 15 kg,每天吸入 100 mg 的降尘,来计算儿童的平均 RI。将风险指数的临界值定为 0.8。根据 RI 的计算公式、多环芳烃中 B[a]P 的暴露水平、背景值及 TDI,计算出不同暴露水平的风险指数(表 5)。

表 5 苯并(a)芘在室内的暴露浓度及其健康风险

Table 5 Exposure levels of benzo [a] pyrene in house dust and their related health risk index(RI)

| 研究报道                               | 时间(年份) | 地点   | n   | 暴露水平( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) |          |         | RI    |          |     |
|------------------------------------|--------|------|-----|--------------------------------|----------|---------|-------|----------|-----|
|                                    |        |      |     | G                              | $P_{95}$ | 最大值     | G     | $P_{95}$ | 最大值 |
| Rudel RA, et al <sup>[14]</sup>    | 2003   | 美国   | 120 | 0.285                          | 13.000   | 54.000  | 0.1   | 1.8      | 7.2 |
| Maertens RM, et al <sup>[15]</sup> | 2004   | 加拿大  | 132 | 0.013                          | 0.097    | -       | < 0.1 | < 0.1    | -   |
| Roberts JW, et al <sup>[9]</sup>   | 2009   | 美国   | 616 | 0.154                          | 2.390    | -       | < 0.1 | 0.3      | -   |
| Langer S, et al <sup>[16]</sup>    | 2010   | 丹麦   | 497 | 0.010                          | -        | -       | < 0.1 | -        | -   |
| 本次研究                               | 2011   | 中国南京 | 58  | 0.385                          | 1.918    | 6.449   | 0.1   | 0.3      | 0.9 |
|                                    |        |      |     | 0.730*                         | 4.342*   | 10.901* | 0.1   | 1.5      | 1.5 |

G:几何均数;RI:风险指数; $P_{95}$ :第 95 百分位数;\*苯并(a)芘毒性当量浓度。

本次研究所测 61 户家庭降尘中的 B[a]P 浓度的第 95 百分位数( $P_{95}$ )浓度以下的 RI 值均低于 0.8,但是可以发现,降尘中检出的 B[a]P 最大值的 RI 为 0.9,超过临界值。如果将 15 种 PAHs 采用 B[a]P 的毒性当量浓度<sup>[17]</sup>来评价, $P_{95}$  以上浓度的 RI 均超过 1。说明目前居室降尘中 B[a]P 对儿童及婴幼儿的健康存在潜在的危险,室内污染问题不容忽视。

### 3 讨论

本次研究结果显示,我国城市室内降尘中 PAHs 检出率高,浓度水平多数低于 2003 年美国 Rudel 等<sup>[14]</sup>报道的水平,但是高于 2009 年 Roberts 等<sup>[9]</sup>的报道及加拿大<sup>[15]</sup>和丹麦<sup>[16]</sup>大样本量的调查结果。室内降尘中 PAHs 各组分浓度多数高于室外,并且部分有显著差异,提示室内存在 PAHs 发生源。PAHs 各组分浓度在不同居室的分布差别较大,个别居室高暴露浓度的 PAHs 对儿童存在潜在的健康影响,提示人工干预的可能性和必要性。在本次小样本量的调查中,没有发现厨房燃气使用、吸烟及交通尾气对 PAHs 浓度的影响。

多环芳烃类化合物的室内来源主要是烹饪、燃煤、吸烟及蚊香的使用等。烹调油烟是厨房空气中 PAHs 的主要来源,其中包括油品本身含有的 PAHs 和加热过程发生化学反应产生的 PAHs,尤以后者

为主。随着食用油温度的升高,PAHs 产生量增大,特别是二氢芘浓度迅速增加<sup>[18]</sup>。因为存在共同的来源,室内降尘中二氢芘与其他组分间浓度显著相关。而室外考虑到萘和二氢芘可能大部分来自于石油产品的挥发而不是汽车尾气,因此这两者与其他主要来自汽车尾气的组分间的浓度相关性差。研究表明,吸烟严重的家庭室内空气中 B[a]P 浓度比不吸烟的家庭要高 10 倍以上<sup>[19]</sup>,但是本研究的结果并没有显示相同的趋势,这可能是因为本次受调查对象的家庭都有学龄前儿童,吸烟者有意识地减少了室内吸烟的频率或量。本次调查也没有发现其他室内因素如厨房类型、做饭次数、开窗时间和除尘频率等对室内 PAHs 的可能影响。除了样本量的原因外,可能因为变量设置过于简单。

在本次调查中,虽然室外地面自然降尘中 PAHs 浓度水平不能完全代替室外大气中 PAHs 水平,但是更接近于能够沉降到室内灰尘中的部分。结果也显示,室外降尘中大部分的 PAHs,尤其是 4 环及以上 PAHs 浓度与室内的 PAHs 浓度显著相关。室外影响室内 PAHs 浓度的一个重要因素是城市交通主干道。英国的一项研究表明:每年机动车排放的 PAHs 大约占所有排放源排放总量的 36%,汽油燃烧排放源和柴油燃烧排放源对交通主干道区 PAHs 的贡献率分别为 34.0%和 20.7%<sup>[20]</sup>。杨旭曙等<sup>[21]</sup>的研

究发现:城市交通干道区大气中54.7%的颗粒态PAHs来源于机动车尾气。所以,室外大气中的PAHs会通过紧靠城市交通干道的家庭开窗通风时进入室内,增加室内PAHs的浓度。但是本次研究结果没有发现靠近与远离交通干道间PAHs的差别,除了与调查样本量有关外,也可能与变量设置过于简单,没有采用一些更为客观的指标如交通流量有关。

本次研究的样本量较少,尚需要扩大样本量,进一步明确可能影响室内PAHs分布的决定性因素,从源头、传输过程以及净化方式等手段控制室内PAHs污染。另外尚需要了解目前室内降尘途径的PAHs暴露水平是否能够造成婴幼儿的健康影响,从而为后续的健康风险评估提供科学依据。

#### [参考文献]

- [1] Liou PJ, Freeman NC, Millette JR. Dust: a metric for use in residential and building exposure assessment and source characterization [J]. *Environ Health Perspect*, 2002, 110(10): 969-983
- [2] Weschler CJ, Nazaroff WW. Semivolatile organic compounds in indoor environments [J]. *Atmos Environ*, 2008, 42(40): 9018-9040
- [3] Butte W, Heinzow B. Pollutants in house dust as indicators of indoor contamination [J]. *Rev Environ Contam Toxicol*, 2002, 175: 1-46
- [4] Edwards SC, Jedrychowski W, Butscher M, et al. Prenatal exposure to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons and children's intelligence at 5 years of age in a prospective cohort study in Poland [J]. *Environ Health Perspect*, 2010, 118(9): 1326-1331
- [5] Perera FP, Rauh V, Whyatt RM, et al. Effect of prenatal exposure to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons on neurodevelopment in the first 3 years of life among inner-city children [J]. *Environ Health Perspect*, 2006, 114(8): 1287-1292
- [6] Choi H, Rauh V, Garfinkel R, et al. Prenatal exposure to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons and risk of intrauterine growth restriction [J]. *Environ Health Perspect*, 2008, 116(5): 658-665
- [7] Jedrychowski W, Galas A, Pac A, et al. Prenatal ambient air exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and the occurrence of respiratory symptoms over the first year of life [J]. *Eur J Epidemiol*, 2005, 20(9): 775-782
- [8] Miller RL, Garfinkel R, Horton M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons, environmental tobacco smoke, and respiratory symptoms in an inner-city birth cohort [J]. *Chest*, 2004, 126(4): 1071-1078
- [9] Roberts JW, Wallace LA, Camann DE, et al. Monitoring and reducing exposure of infants to pollutants in house dust [J]. *Rev Environ Contam Toxicol*, 2009, 201: 1-39
- [10] Gevao B, Al-Bahloul M, Zafar J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor air and dust in Kuwait: implications for sources and nondietary human exposure [J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2007, 53(4): 503-512
- [11] Wang BL, Li XL, Xu XB, et al. Prevalence of and risk factors for subjective symptoms in urban preschool children without a cause identified by the guardian [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2012, 85(5): 483-491
- [12] 陆晓梅, 王炳玲, 张晓玲, 等. 高效液相色谱编程荧光法测定室尘中痕量多环芳烃 [J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2011, 31(10): 1521-1526
- [13] Baars AJ, Theelen RMC, Janssen PJCM, et al. Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible levels. [R]. National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands, 2001
- [14] Rudel RA, Camann DE, Spengler JD, et al. Phthalates, alkylphenols, pesticides, polybrominated diphenyl ethers, and other endocrine-disrupting compounds in indoor air and dust [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(20): 4543-4553
- [15] Maertens RM, Bailey J, White PA. The mutagenic hazards of settled house dust: a review [J]. *Mutat Res*, 2004, 567(2-3): 401-425
- [16] Langer S, Weschler CJ, Fischer A, et al. Phthalate and PAH concentrations in dust collected from Danish homes and daycare centers [J]. *Atmos Environ*, 2010, 44(19): 2294-2301
- [17] Crnković D, Ristić M, Jovanović A, et al. Levels of PAHs in the soils of Belgrade and its environs [J]. *Environ Monit Assess*, 2007, 125(1): 75-83
- [18] 朱利中, 王 静, 江斌焕. 厨房空气中PAHs污染特征及来源初探 [J]. *中国环境科学*, 2002, 22(2): 47-50
- [19] 朱利中, 刘勇建, 松下秀鹤. 室内空气多环芳烃的污染特征、来源及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2001, 21(1): 64-68
- [20] Harrison RM, Smith DJT, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U.K. [J]. *Environ Sci Technol*, 1996, 30(3): 825-832
- [21] 杨旭曙, 王正萍, 宋艳涛. 城市交通干道区颗粒物中多环芳烃的源解析研究 [J]. *环境科学与技术*, 2004, 27(6): 50-51

[收稿日期] 2012-03-27