

王贝贝, 段小丽, 黄楠, 等. 2011. 太原市城市和农村居民尿液中羟基多环芳烃的浓度比较[J]. 环境科学学报, 31(11): 2538-2544

Wang B B, Duan X L, Huang N, et al. 2011. Urinary concentration of hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons among rural and urban residents in Taiyuan City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(11): 2538-2544

# 太原市城市和农村居民尿液中羟基多环芳烃的浓度比较

王贝贝<sup>1</sup>, 段小丽<sup>1,\*</sup>, 黄楠<sup>1</sup>, 汪翠萍<sup>2</sup>, 方建龙<sup>3</sup>, 徐东群<sup>3</sup>, 蒋秋静<sup>4</sup>

1. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 北京 100012

2. 清华大学环境学院 北京 100084

3. 中国疾病预防控制中心环境与相关产品安全所 北京 100871

4. 太原市环境科学研究设计院 太原 030002

收稿日期: 2011-01-18 修回日期: 2011-03-25 录用日期: 2011-03-30

**摘要:** 尿液中的羟基多环芳烃(OH-PAHs) 可作为多环芳烃内暴露剂量的指示剂. 基于此, 分别在采暖期(2009年12月) 和非采暖期(2009年9月) 采集和分析了我国北方城市——太原市60名城市居民和60名农村居民(男女人数比为1:1, 年龄: 30~60岁) 尿样中6种OH-PAHs的浓度水平. 结果表明: 太原市城市居民和农村居民尿液中2-OHNaP、2-OHFlu、3-OHPhe、9-OHPhe、1-OHPy、3-OHBaP的浓度(中位值) 分别为8.97、0.34、0.19、0.18、0.34、0.002  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  (以肌酐计) 和5.01、0.85、0.18、0.24、0.61、0.001  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  (以肌酐计). 城市居民中, 男性尿液中2-OHNaP和1-OHPy的浓度水平均高于女性( $p < 0.05$ ). 1-OHPy在采暖期的浓度水平显著高于非采暖期( $p < 0.05$ ). 2-OHNaP的季节性差异不大. 农村居民中, 尿液中各OH-PAHs的浓度水平均为男性高于女性( $p < 0.05$ ). 采暖期尿液中2-OHNaP和2-OHFlu的浓度水平高于非采暖期, 3-OHPhe、9-OHPhe和1-OHPy的浓度水平则为非采暖期高于采暖期. 同时, 与国外人群尿液中的OH-PAHs浓度水平相比, 太原市居民尿液中的OH-PAHs(1-OHPy、2-OHNaP、2-OHFlu和3-OHPhe) 平均浓度水平均高于美国人群. 城市居民和农村居民对多环芳烃的暴露源不同, 致使体内多环芳烃代谢产物的水平也迥异. 由于不同环数多环芳烃的致癌强弱不同, 因此, 建议下一步开展城市和农村居民PAHs外暴露水平研究.

**关键词:** 羟基多环芳烃; 城市居民; 农村居民; 尿液; 太原市

文章编号: 0253-2468(2011)11-2538-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Urinary concentration of hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons among rural and urban residents in Taiyuan City

WANG Beibei<sup>1</sup>, DUAN Xiaoli<sup>1,\*</sup>, HUANG Nan<sup>1</sup>, WANG Cuiping<sup>2</sup>, FANG Jianlong<sup>3</sup>, XU Dongqun<sup>3</sup>, JIANG Qiujing<sup>4</sup>

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Beijing 100012

2. Tsinghua University, School of Environment, Beijing 100084

3. Chinese Center for Disease Control and Prevention, Environmental and Related Product Safety Institute, Beijing 100871

4. Taiyuan Research Design Institute of Environmental Sciences, Taiyuan 030002

**Received** 18 January 2011; **received in revised form** 25 March 2011; **accepted** 30 March 2011

**Abstract:** Urinary hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons (OH-PAHs) are internal dose indicators of human exposure to PAH. We recruited 60 urban residents (F/M = 1:1, age: 30~60) and 60 rural residents (F/M = 1:1, age: 30~60) in Taiyuan, Shanxi Province and measured 6 OH-PAHs in collected first morning urine samples in heating and non-heating season, respectively. The results showed that the medians of concentrations of 2-hydroxynaphthalene (2-OHNaP), 2-hydroxyfluorene (2-OHFlu), 3-hydroxyphenanthrene (3-OHPhe), 9-hydroxyphenanthrene (9-OHPhe), 1-hydroxypyrene (1-OHPy) and 3-hydroxybenzo(a)pyrene (3-OHBaP) were 8.97, 0.34, 0.19, 0.18, 0.34, 0.002  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  creatinine in urban residents and 5.01, 0.85, 0.18, 0.24, 0.61, 0.001  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  creatinine in rural residents, respectively. For urban residents, the concentrations of 2-OHNaP and 1-OHPy for males were higher than those for females ( $p < 0.05$ ). The concentrations of 1-OHPy in heating season were significantly higher than those in non-heating season ( $p < 0.05$ ), while the concentrations of 2-OHNaP showed no significant seasonal differences. For rural residents, OH-

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项(No. 200809101)

Supported by the Ministry of Environmental Protection Funded Project(No. 200809101)

作者简介: 王贝贝(1984—), 女, E-mail: wangbeibei723@163.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: duanxiaoli0219@yahoo.com.cn

Biography: WANG Beibei(1984—), female, E-mail: wangbeibei723@163.com; \* Corresponding author, E-mail: duanxiaoli0219@yahoo.com.cn

PAHs for males were higher than those for females ( $p < 0.05$ ). 2-OHNap and 2-OHFlu were higher in heating season than those in non-heating season, while 3-OHPhe, 9-OHPhe and 1-OHPy were different ( $p < 0.05$ ). The concentrations of urinary 1-OHPy, 2-OHNap, 2-OHFlu and 3-OHPhe were higher than those for American residents reported by National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals in USA. This study indicated that the levels of OH-PAHs in rural and urban residents were different owing to the different exposure sources of PAHs in different groups. Since toxicity and carcinogenicity of PAHs were different with different structures and rings, external exposure research of PAHs for urban and rural residents were suggested in future studies.

**Keywords:** hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons; urban residents; rural residents; urinary; Taiyuan City

## 1 引言( Introduction)

多环芳烃( PAHs) 是人类最早发现的有机致癌化合物, 并可通过呼吸、饮食、饮水、吸烟甚至皮肤接触等途径对人群产生不同程度的暴露。自 20 世纪 80 年代起, 人们开始研究通过检测人体组织或体液中的 PAHs 或 PAHs 代谢物羟基多环芳烃( OH-PAHs) 来综合反应人体对 PAHs 的暴露情况( Jongeneelen *et al.*, 2001)。迄今为止, 有关 OH-PAHs 作为生物标志物的研究主要集中在芘( Py) 在尿液中的代谢物 1-羟基芘( 1-OHPy) 上, 而关于其他种类 OH-PAHs 的研究还相对较少, 但 Py 不具有致癌性, 用其代谢产物作为人体接触 PAHs 的生物监测指标仅是一种间接的评价方法( 段小丽等, 2004), 而且用其代谢产物作为标志物进行危险度评价具有一定的局限性。另一方面, 研究对象中职业人群较多, 而非职业人群较少, 尤其是缺少关于农民体内 PAHs 暴露水平的研究。同时, 由于燃料类型和取暖方式的不同, 致使农村居民与城市居民的多环芳烃暴露来源可能有所不同, 然而, 关于农村居民和城市居民尿液中 OH-PAHs 浓度水平的比较研究却未见报道。因此, 本文通过研究我国北方城市——太原市城市和农村居民尿液中 OH-PAHs 的浓度水平, 探讨城市和农村居民尿液中各类 OH-PAHs 在采暖和非采暖期的差异, 以及在不同人群中的差异, 以期为深入研究尿液中 OH-PAHs 作为农村居民暴露 PAHs 生物标志物的可行性提供参考。

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 样品采集

研究区域选择在我国北方重工业城市——太原市, 该市工业能源结构以煤为主, 耗煤量占总能耗的 99.5% 以上。同时, 该市农村居民冬季取暖和日常烹饪所用燃料也以煤炭为主, 城市居民采用集中供暖。

分别于 2009 年 9 月( 非采暖期) 和 12 月( 采暖期) 在该市采集 60 名城市居民和 60 名农村居民的

晨尿样品, 同时对所有的受试者进行问卷调查, 内容包括基本信息( 如性别、年龄、身高、体重、职业等) 是否吸烟和膳食结构等。受试者年龄均分布在 30 ~ 60 岁之间, 男女各半, 城市居民的职业以科研设计为主, 其中, 城市居民和农村居民男性中吸烟者和不吸烟者各半, 经调查发现, 城市和农村居民的膳食结构相同。采暖期和非采暖期实验都在同一组人群中开展。

### 2.2 材料与方法

2.2.1 材料与试剂 HP 1200 型高效液相色谱( 美国 Agilent 公司), G1321A 荧光检测器( 美国 Agilent 公司), SB-C<sub>18</sub> 分析柱( 4.6 mm × 150 mm, 5.0 μm, 美国 Agilent 公司), 24 孔固相萃取装置( 美国 Supelco 公司), ProElut C<sub>18</sub>-U 小柱( 1000 mg, 6 mL, Waters 公司)。

2-羟基萘( 2-OHNap, 纯度 99%)、2-羟基芴( 2-OHFlu, 纯度 98%)、3-羟基菲( 3-OHPhe, 纯度 98%)、9-羟基菲( 9-OHPhe, 纯度 99%)、1-羟基芘( 1-OHPy, 纯度 99%) 和 3-羟基苯并( a) 芘( 3-OHBap, 纯度 98%) 均购自美国 Aldrich-Sigma 化学试剂公司, β-葡萄糖苷酸-芳基硫酸酯酶购自于德国 Merck 公司( 每 mL 中含 122400 单位 β-葡萄糖苷酸酯酶和 3160 单位芳基硫酸酯酶)。

2.2.2 样品的前处理方法 取 10 mL 尿样移入 100 mL 锥形瓶中, 使用 1 mol·L<sup>-1</sup> 稀盐酸将尿样 pH 值调至 5, 再加入 2.5 mL 醋酸钠缓冲溶液搅拌均匀, 用移液枪精确移取 20 μL β-葡萄糖苷酸-芳基硫酸酯酶滴加入样品中, 然后用封口膜将锥形瓶密封, 并用锡箔纸将锥形瓶包好后放入恒温水浴振荡器中 37 °C 恒温振荡 4 h 以上。之后将摇好的尿样取出, 用定量滤纸过滤, 准备过柱。取 10 mL 甲醇缓慢加入 C<sub>18</sub> 固相萃取小柱中上柱活化, 再加入 20 mL 纯水过柱, 然后加入准备好的尿样, 待样品完全过柱后, 再加入约 20 mL 甲醇过柱洗脱, 洗脱液滴入 K-D 浓缩瓶中以备定容。将装有洗脱液的 K-D 浓缩瓶接入旋转蒸发器, 在负压下恒温水浴蒸发浓缩, 旋转蒸发器水温设为 45 °C。待样品旋转蒸发接近至 1

mL 时, 转用氮吹仪定容至 1 mL. 用注射器将样品移出, 并经 2.2  $\mu\text{m}$  孔径的有机滤膜过滤后装入 1.5 mL 棕色样品瓶内准备分析.

2.2.3 样品的分析方法 采用甲醇-水梯度洗脱-HPLC/FLD 检测方法. 自动进样量为 20  $\mu\text{L}$ , 流速为 1 mL $\cdot\text{min}^{-1}$ . 流动相切换程序: 0~30 min, 甲醇 50%~90%; 30~32 min, 甲醇 90%~50%; 32~40 min, 甲醇 50%. 荧光切换的时间程序(激发波长  $\lambda_{\text{ex}}$ , 发射波长  $\lambda_{\text{em}}$ , 表示为  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}}$ ): 0~10 min,  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 227/355$  nm; 10~13 min,  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 277/355$  nm; 13~16 min,  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 244/400$  nm; 16~20 min,  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 239/402$  nm; 20~40 min,  $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 263/439$  nm.

2.2.4 方法性能和质量控制 6 种 OH-PAHs 在给定的范围内均呈现良好的线性关系,  $R^2$  均大于 0.990, 检出限为 0.5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 样品的前处理回收率在 70%~80% 之间. 样品前处理过程中, 每 10 个样品做 1 个平行加标样进行质量控制; 在分析测试过程中, 每运行 10 个样品做 1 个标样控制.

### 2.3 数据分析处理

数据分析采用 SPSS13.0 软件完成.

## 3 结果和讨论(Results and discussion)

### 3.1 城市居民尿液中 OH-PAHs 的浓度水平

表 1 给出了城市居民尿液中 OH-PAHs 的浓度水平. 从表 1 中可见, 城市居民尿液中 2-OHNAp 的浓度(中位值)为 8.97  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  (以肌酐计, 下同). 这高于黄传峰等(2010) 研究报道的某城市 58 名非 PAHs 暴露居民(男性 48 名, 女性 10 名) 尿液中 OHNAp 的浓度范围水平(2.92~6.35  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). 同时, 从表 1 中还可以看出, 男性尿液中 2-OHNAp 的浓度水平高于女性, 采暖期水平高于非采暖期 ( $p < 0.05$ ).

2-OHNAp 是二环 PAHs 中萘的代谢产物, 萘在空气中主要以气态形式存在(段小丽等, 2005). 城市居民对萘的暴露主要来源于室内香烟烟雾、卫生球挥发和烹调油烟, 同时室外的燃煤烟气和交通尾气对其也有一定的贡献. 根据朱利中等(2002) 的研究报道可知, 室内香烟烟雾、卫生球挥发和烹调油烟 3 种暴露来源对萘的贡献率比约为 3:1:2. 同时, 冷曙光等(2003) 研究发现, 非 PAHs 暴露人群中吸烟组尿液中 2-OHNAp 的浓度水平是不吸烟组的 6

倍. 由于在本次调查中, 男性吸烟者占男性总数的 1/2, 可见吸烟也是导致男性尿液中 2-OHNAp 浓度水平约为女性 2 倍的一个重要因素. 同时, 城市居民采暖期的取暖方式为集中供暖, 冬季燃煤量的增加会导致大气中颗粒物含量增大, 而萘在空气中主要以气态形式存在, 因此, 季节差异对城市居民尿液中 2-OHNAp 的影响不大.

城市居民尿液中三环 PAHs 中芴和菲的代谢产物 2-OHFlu、3-OHPhe、9-OHPhe 的总浓度水平依次为 1.13、0.19、0.18  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 其中, 男性尿液中的 2-OHFlu 浓度水平高于女性, 但 3-OHPhe 和 9-OHPhe 的浓度水平平均比女性低 ( $p < 0.05$ ). 同时, 城市居民尿液中 2-OHFlu 和 3-OHPhe 在采暖期的浓度水平低于非采暖期, 而 9-OHPhe 在采暖期的浓度水平比非采暖期高 ( $p < 0.05$ ).

城市居民尿液中 1-OHPy 的浓度为 0.34  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ . 段小丽等(2008) 报道的东北某市 25 名清洁区办公室人员尿液中 1-OHPy 的浓度水平为 0.1  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ; 王秦等(2009) 报道的北京市城市郊区居民尿液中 1-OHPy 的浓度范围为 0.34~0.62  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 本研究中 1-OHPy 的浓度居于两者之间. 同时, 根据段小丽等(2005) 研究提出的一般人群尿液中 1-OHPy 的生物暴露限值(0.11  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) 可知, 太原市的城市居民超出了暴露限值, 超标倍数为 2.1. 同时, 从表 1 中可以看出, 男性尿液中 1-OHPy 的浓度水平高于女性, 采暖期的 1-OHPy 浓度水平是非采暖期的 2 倍.

1-OHPy 是四环 PAHs 中芘的代谢产物, 芘主要来源于煤炭的燃烧和汽车燃油. 而采暖期由于供暖从而导致煤炭燃烧量的增加, 这与本研究中采暖期城市居民尿液中 1-OHPy 浓度水平是非采暖期的 2 倍多的结论相符. 同时, 由于香烟中含有芘, 每 100 支香烟烟雾中含有芘 5~27  $\mu\text{g}$ (Lafontaine *et al.*, 2006), 吸烟者对烟雾的接触会增加人体对芘的摄入量, 这也是导致男性尿液中 1-OHPy 含量比女性高的原因.

城市居民尿液中, 五环 PAHs 中苯并(a)芘的代谢产物 3-OHBap 的浓度很低, 小于 0.01  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 可能是由于 3-OHBap 对分析方法的要求很高, 再加上苯并(a)芘代谢产物的复杂性, 从而导致本实验结果较低.

表 1 城市居民尿液中 6 种 OH-PAHs 的浓度水平

Table 1 The concentration of urinary six OH-PAHs of the urban residents

 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 

性别	采样时期	数据类型	2-OHNap	2-OHFlu	3-OHPhe	9-OHPhe	1-OHPy	3-OHBap
男	采暖期 (N=30)	中位值	14.23	0.88	0.08	0.25	0.54	0.001
		25% 百分位值	4.34	0.58	0.05	0.11	0.13	0.001
		75% 百分位值	26.49	1.45	0.24	0.35	0.88	0.002
		均值	21.51	1.24	0.24	0.40	0.58	0.002
		标准偏差	15.51	0.65	0.70	0.65	0.59	0.018
	非采暖期 (N=30)	中位值	12.68	1.63	0.41	0.12	0.22	0.020
		25% 百分位值	1.77	0.30	0.07	0.01	0.04	0.002
		75% 百分位值	33.31	4.16	0.96	0.35	0.62	0.190
		均值	20.01	2.51	0.64	0.35	0.44	0.240
		标准偏差	24.27	1.15	0.39	0.84	0.56	0.001
	两季平均	中位值	13.21	1.22	0.18	0.16	0.35	0.002
		25% 百分位值	3.63	0.50	0.05	0.05	0.11	0.001
		75% 百分位值	29.14	2.28	0.64	0.35	0.73	0.020
		均值	20.73	1.84	0.43	0.38	0.51	0.120
		标准偏差	14.68	1.09	0.59	0.75	0.58	0.140
	女	采暖期 (N=30)	中位值	8.24	1.10	0.12	0.25	0.42
25% 百分位值			2.46	0.56	0.06	0.08	0.23	0.001
75% 百分位值			24.36	2.15	0.23	0.45	0.95	0.002
均值			19.20	1.46	0.20	0.30	0.99	0.002
标准偏差			9.25	1.81	0.34	0.16	0.21	0.024
非采暖期 (N=30)		中位值	6.38	1.17	0.28	0.15	0.14	0.002
		25% 百分位值	3.45	0.81	0.20	0.02	0.04	0.001
		75% 百分位值	13.53	1.89	0.51	0.30	0.38	0.030
		均值	9.49	1.77	0.38	0.19	0.23	0.040
		标准偏差	8.66	1.19	0.21	0.26	1.65	0.032
两季平均		中位值	7.20	1.12	0.20	0.22	0.31	0.002
		25% 百分位值	3.24	0.69	0.07	0.07	0.12	0.001
		75% 百分位值	16.97	2.00	0.36	0.36	0.64	0.003
		均值	14.34	1.61	0.29	0.24	0.61	0.020
		标准偏差	19.10	1.53	0.29	0.22	1.23	0.039
男女平均		采暖期 (N=30)	中位值	9.57	0.96	0.11	0.25	0.49
	25% 百分位值		3.88	0.60	0.06	0.11	0.15	0.001
	75% 百分位值		25.78	1.59	0.23	0.39	0.89	0.002
	均值		19.64	1.34	0.22	0.35	0.77	0.002
	标准偏差		15.20	2.29	0.57	0.49	0.46	0.046
	非采暖期 (N=30)	中位值	8.41	1.46	0.31	0.13	0.21	0.004
		25% 百分位值	3.06	0.68	0.07	0.01	0.04	0.002
		75% 百分位值	19.47	2.82	0.74	0.32	0.42	0.080
		均值	15.70	2.15	0.51	0.27	0.34	0.140
		标准偏差	24.26	1.16	0.32	0.64	1.20	0.053
	两季平均	中位值	8.97	1.13	0.19	0.18	0.34	0.002
		25% 百分位值	3.36	0.64	0.06	0.06	0.12	0.001
		75% 百分位值	23.05	2.08	0.48	0.36	0.65	0.004
		均值	17.72	1.74	0.36	0.31	0.56	0.070
		标准偏差	22.37	1.84	0.48	0.57	0.94	0.060

### 3.2 农村居民尿液中 OH-PAHs 的浓度水平

表 2 给出了农村居民尿液中 OH-PAHs 的浓度水平. 从表 2 可以看出, 农村居民尿液中 2-OHNap、2-OHFlu、3-OHPhe、9-OHPhe、1-OHPy 和 3-OHBap 浓度水平分别为 5.01、0.85、0.18、0.24、0.61 和 0.001  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  (以肌酐计). 目前, 有关农村居民尿液

中 OH-PAHs 的研究较少, 仅见少量报道. 陆少游等 (2010) 对国内某地区 50 名农民尿液中的 OH-PAHs 浓度水平进行了研究, 结果显示 2-OHNap、2-OHFlu 和 1-OHPy 的浓度中位值分别为 10.18、7.14 和 1.77  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  (以肌酐计) 均高于本研究的内暴露水平.

农村居民中,男性尿液中各 OH-PAHs(除了采暖期的 1-OHPy、非采暖期的 2-OHFlu) 的浓度水平均比女性高( $p < 0.05$ ). 农村居民尿液中低环 OH-PAHs(2-OHNap 和 2-OHFlu) 的浓度水平在采暖期

高于非采暖期( $p < 0.05$ ),而 3-OHPhe、9-OHPhe、1-OHPy 和 3-OHBap 的浓度水平则相反,非采暖期高于采暖期( $p < 0.05$ ).

表 2 农村居民尿中 6 种 OH-PAHs 的浓度水平

Table 2 The concentration of urinary six OH-PAHs of the rural residents

 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 

性别	采样时期	数据类型	2-OHNap	2-OHFlu	3-OHPhe	9-OHPhe	1-OHPy	3-OHBap
男	采暖期 ( $N=30$ )	中位值	7.13	1.15	0.11	0.25	0.51	0.001
		25% 百分位值	3.57	0.62	0.03	0.12	0.24	0.001
		75% 百分位值	15.36	1.68	0.26	0.50	0.76	0.002
		均值	10.41	1.19	0.17	0.33	0.77	0.001
		标准偏差	10.13	0.99	0.26	0.35	0.87	0.04
	非采暖期 ( $N=30$ )	中位值	4.72	0.69	0.24	0.27	0.71	0.001
		25% 百分位值	2.43	0.54	0.12	0.13	0.47	0.001
		75% 百分位值	15.52	1.74	0.38	0.61	1.35	0.002
		均值	9.48	1.15	0.30	0.40	1.02	0.008
		标准偏差	9.87	0.72	0.17	0.31	1.19	0.001
	两季平均	中位值	6.25	0.90	0.18	0.25	0.63	0.001
		25% 百分位值	3.01	0.56	0.09	0.13	0.36	0.001
		75% 百分位值	15.52	1.67	0.33	0.54	1.15	0.002
		均值	9.91	1.17	0.24	0.37	0.90	0.005
		标准偏差	9.94	0.87	0.23	0.33	1.02	0.030
	女	采暖期 ( $N=30$ )	中位值	4.94	1.18	0.11	0.16	0.59
25% 百分位值			2.34	0.62	0.05	0.09	0.34	0.001
75% 百分位值			11.48	2.05	0.32	0.40	0.93	0.004
均值			23.70	3.07	0.21	0.67	1.32	0.004
标准偏差			19.24	2.63	0.36	1.31	1.71	0.010
非采暖期 ( $N=30$ )		中位值	3.34	0.82	0.20	0.22	0.56	0.002
		25% 百分位值	1.47	0.49	0.12	0.18	0.30	0.001
		75% 百分位值	7.17	1.39	0.32	0.33	1.08	0.003
		均值	5.27	0.97	0.24	0.33	0.82	0.002
		标准偏差	5.70	0.68	0.18	0.30	0.70	0.001
两季平均		中位值	4.02	0.84	0.17	0.21	0.58	0.002
		25% 百分位值	2.02	0.56	0.06	0.13	0.32	0.001
		75% 百分位值	8.12	1.70	0.32	0.34	0.98	0.003
		均值	14.8	2.06	0.23	0.50	1.08	0.003
		标准偏差	13.41	6.26	0.29	1.67	2.70	0.007
男女平均		采暖期 ( $N=30$ )	中位值	6.44	1.15	0.11	0.23	0.56
	25% 百分位值		3.09	0.62	0.04	0.10	0.32	0.001
	75% 百分位值		14.43	1.82	0.28	0.48	0.80	0.003
	均值		17.29	2.16	0.19	0.51	1.05	0.003
	标准偏差		17.32	2.25	0.28	0.67	0.79	0.010
	非采暖期 ( $N=30$ )	中位值	4.36	0.74	0.21	0.25	0.68	0.002
		25% 百分位值	1.92	0.53	0.12	0.17	0.39	0.001
		75% 百分位值	10.5	1.47	0.37	0.43	1.28	0.002
		均值	7.55	1.07	0.28	0.37	0.92	0.005
		标准偏差	8.59	0.86	0.23	0.33	0.79	0.030
	两季平均	中位值	5.01	0.85	0.18	0.24	0.61	0.001
		25% 百分位值	2.34	0.57	0.07	0.13	0.34	0.001
		75% 百分位值	10.91	1.70	0.32	0.48	1.01	0.002
		均值	12.29	1.60	0.23	0.43	0.99	0.004
		标准偏差	10.60	1.42	0.26	0.48	1.02	0.020

### 3.3 城市和农民居民尿中 OH-PAHs 的比较

由于生活条件、生活习惯和基础设施等的差异,导致城市和农村居民对 PAHs 的暴露方式和暴露水平不同,进而致使尿液中 OH-PAHs 的浓度水平也不相同。从表 1 和表 2 可以看出,无论是男性还是女性,无论是采暖期还是非采暖期,城市居民尿液中 2-OHNap 的浓度水平均高于农村居民 ( $p < 0.05$ )。2-OHNap 是萘的代谢产物,主要来源于室内卫生球、油漆等装饰材料的挥发(陆少游等,2010)。由于城市居民对挥发材料的使用量比农村居民多,并且城市居民在室内活动的时间也远高于农村居民,因此,理论上城市居民对萘的暴露水平比农村居民高,尿液中低环 OH-PAHs 的浓度水平也高。整体而言,城市居民尿液中 2-OHFlu、3-OHPhe 和 9-OHPhe 的浓度水平比农村居民高( $p < 0.05$ )。

农村居民尿液中 1-OHPy 的浓度水平显著高于城市居民 ( $p < 0.05$ )。1-OHPy 是 PAHs 中芘的代谢产物,主要以吸附于颗粒物的形式存在于大气中。城市居民对 PAHs 的暴露源主要为燃煤和交通尾气(Chen *et al.*, 2007; 岳强等,2010),而农村居民的生活环境比城市居民复杂,芘的暴露来源多,主要为做饭和取暖时燃料(该地居民主要以煤和秸秆为燃料)的燃烧、烧田埂草等。同时,由于厨房及供暖设施中燃料的使用方式和排烟状况的不同,致使农村居民直接暴露燃烧的机会显著高于城市居民,并且暴露时间也比城市居民长,因此,农村居民对芘的暴露高于城市居民,最终导致尿液中 1-OHPy 的浓度也比城市居民高。

城市居民尿液中 3-OHBap 的浓度水平高于农村居民 ( $p < 0.05$ )。3-OHBap 是 PAHs 中苯并(a)芘的代谢产物,主要以吸附于颗粒物的形式存在于大气中。苯并(a)芘主要来源于煤炭的燃烧,因此,农村居民暴露于苯并(a)芘的程度要比城市居民高,但本文中农村居民尿液中的 3-OHBap 浓度水平却比城市居民低,这与段小丽等(2008)研究发现的高暴露焦炉工人尿液中 3-OHBap 的浓度低于一般人群的研究结果相似。

### 3.4 与国外水平的比较

由于我国与发达国家的能源结构、环境空气质量状况及居民的生活水平条件存在明显的差异,因此,相应人群的 PAHs 暴露水平也可能不相同,再加上人体代谢吸收机能的差异,导致人群 OH-PAHs 的内暴露水平不一样。

图 1 为本文研究结果与美国“National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals”中关于美国 2000 余例人群 OH-PAH 暴露水平的比较(American Centers for Disease Control and Prevention, 2010)。从图 1 可以看出,太原地区居民尿液中 OH-PAHs(1-OHPy、2-OHNap、2-OHFlu 和 3-OHPhe) 的平均浓度水平均高于美国人群,分别是美国人群的 5.8、1.7、3.3 和 2.0 倍。

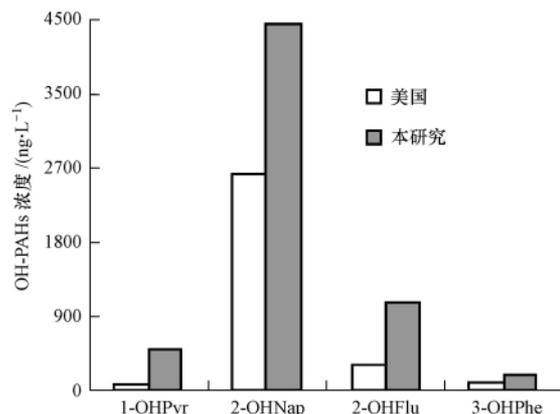


图 1 美国居民与太原地区居民尿液中 OH-PAHs 浓度水平的比较

Fig. 1 The compare of concentration of urinary OH-PAHs of American and Taiyuan City

## 4 结论(Conclusions)

1) 太原市城市居民尿液中 2-OHNap 和 1-OHPy 的浓度分别为  $8.97$  和  $0.34 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  (以肌酐计),其中,男性尿液中的浓度水平均高于女性。同时,由于冬季燃煤量的增加,致使城市居民尿液中 1-OHPy 在采暖期的浓度水平显著高于非采暖期,但 2-OHNap 的季节性差异不大。

2) 从整体上看,男性农村居民尿液中各 OH-PAHs 的浓度水平均比女性高;采暖期尿液中低环 OH-PAHs(2-OHNap 和 2-OHFlu) 的浓度水平高于非采暖期,但 3-OHPhe、9-OHPhe 和 1-OHPy 的浓度水平则相反,非采暖期高于采暖期。

3) 城市居民尿液中低环 OH-PAHs(2-OHNap、2-OHFlu 和 3-OHPhe) 的浓度水平高于农村居民,9-OHPhe 和 1-OHPy 的浓度水平低于农村居民,3-OHBap 的浓度高于农村居民。

4) 太原地区城市和农村居民尿液中 OH-PAHs(1-OHPy、2-OHNap、2-OHFlu 和 3-OHPhe) 的平均浓度水平均高于美国人群。

5) 由于城市居民和农村居民对多环芳烃的暴露源不同,致使体内多环芳烃代谢产物的水平也迥异。考虑到不同环数多环芳烃的致癌强弱不同,因此,建议下一步开展城市和农民居民 PAHs 外暴露水平的研究。

致谢 (Acknowledgement): 太原市环境科学设计研究院的卢彬、胡新新、王志强、张开先、李娟等同志及现场 120 名受试者在本次采样工作中给予了大力帮助,在此表示感谢。

责任作者简介: 段小丽 (1977—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事环境暴露和健康风险评估方面的研究, E-mail: duanxiaoli0219@yahoo.com.cn.

#### 参考文献 (References):

- American Centers for Disease Control and Prevention. 2010. National report on human exposure to environmental chemicals [OL]. 2010-07-03. <http://www.cdc.gov/exposurereport/>
- Chen B, Hu Y, Jin T, *et al.* 2007. Higher urinary 1-hydroxypyrene concentration is associated with cooking practice in a Chinese population [J]. *Toxicol Lett*, 171: 119-125
- 段小丽, 魏复盛, 张军峰. 2008. 多环芳烃暴露评价的生物标志物研究 [J]. *工业卫生与职业病*, 34(3): 63-67
- Duan X L, Wei F S, Zhang J F. 2008. Research on biomarkers of personal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Industry Health & Occupation Disease*, 34(3): 63-67 (in Chinese)
- 段小丽, 魏复盛, 张军峰, 等. 2005. 人尿中 1-羟基芘浓度与多环芳烃日暴露量的关系 [J]. *环境化学*, 24(1): 86-88
- Duan X L, Wei F S, Zhang J F *et al.* 2005. The relationship between the concentration of 1-hydroxypyrene in urine and exposure on polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Chemistry*, 24(1): 86-88 (in Chinese)
- 段小丽, 杨洪彪, 张林, 等. 2004. 尿液中多环芳烃羟基代谢产物分析方法的研究 [J]. *环境科学研究*, 17(3): 72-75
- Duan X L, Yang H B, Zhang L, *et al.* 2004. Analysis of hydroxyl polycyclic aromatic hydrocarbons in human urine [J]. *Research of Environmental Sciences*, 17(3): 72-75 (in Chinese)
- 黄传峰. 2010. 羟基萘和 3-羟基菲作为多环芳烃暴露标志物的研究 [D]. 北京: 中国疾病预防控制中心
- Huang C F. 2010. Study on Urinary Naphthol and 3-Phenanthrol as exposure biomarker of polycyclic aromatic hydrocarbons [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention (in Chinese)
- Jongeneelen F J. 2001. Benchmark guideline for urinary 1-hydroxypyrene as biomarker of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 45(1): 3-13
- Lafontaine M, Champmartin C. 2006. 3-Hydroxybenzo[a]pyrene in the urine of smokers and non-smokers [J]. *Toxicology Letters*, 162: 181-185
- 陆少游, 于志强, 袁晶. 2010. 某地区农民尿液中多环芳烃暴露水平调查 [J]. *环境与健康杂志*, 27(7): 611-614
- Lu S Y, Yu Z Q, Yuan J. 2010. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure levels in farmers in an area of China [J]. *Journal of Environmental Health*, 27(7): 611-614 (in Chinese)
- 冷曙光, 郑玉新, 宋文佳. 2003. 尿中萘及其代谢产物作为焦炉工生物监测指标的研究 [J]. *工业卫生与职业病*, 29(5): 284-287
- Leng S G, Zheng Y X, Song W J. 2003. A pilot study on application of Naphthalene and its metabolites in urine to biomonitoring of coke oven workers [J]. *Industry Health & Occupation Disease*, 29(5): 284-287 (in Chinese)
- 牛红云, 蔡亚岐, 魏复盛, 等. 2006. 多环芳烃暴露的生物标志物—尿中羟基多环芳烃 [J]. *化学进展*, 18(10): 1381-1388
- Niu H Y, Cai Y Q, Wei F S, *et al.* 2006. Hydroxyl polycyclic aromatic hydrocarbons in human urine as biomarkers of exposure to PAHs [J]. *Progress in Chemistry*, 18(10): 1381-1388 (in Chinese)
- 王秦. 2009. 北京市交警多环芳烃暴露及 DNA 氧化损伤水平研究 [J]. *环境与健康杂志*, 26(9): 770-774
- Wang Q. 2009. Beijing traffic police PAH exposure and the level of DNA oxidative damage [J]. *Journal of Environmental Health*, 26(9): 770-774 (in Chinese)
- 岳强, 范瑞芳, 于志强. 2010. 焦化工人尿中多种羟基多环芳烃单羟基代谢物的调查 [J]. *环境与健康杂志*, 27(8): 686-689
- Yue Q, Fan R F, Yu Z Q. 2010. Levels of urinary mono-hydroxylated metabolites of PAHs in coke-oven workers [J]. *Journal of Environmental Health*, 27(8): 686-689 (in Chinese)
- 朱利中, 王静, 江斌焕. 2002. 厨房空气中 PAHs 污染特征及来源初探 [J]. *中国环境科学*, 22(2): 142-145
- Zhu L Z, Wang J, Jiang B H. 2002. Preliminary exploration of features and sources of PAHs pollution in air of kitchen [J]. *China Environmental Science*, 22(2): 142-145 (in Chinese)