

DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20190303001

刘玉斌, 张艺蕾, 李科, 等. 日常衣物中的邻苯二甲酸酯污染及其人体暴露风险[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(1): 186-192

Liu Y B, Zhang Y L, Li K, et al. Phthalates in daily clothes: Occurrence and human exposure [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(1): 186-192 (in Chinese)

日常衣物中的邻苯二甲酸酯污染及其人体暴露风险

刘玉斌¹, 张艺蕾¹, 李科¹, 吴颖虹², 汪磊^{1,*}

1. 南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室/天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071

2. 天津市疾病预防控制中心理化室, 天津 300011

收稿日期: 2019-03-03 录用日期: 2019-04-17

摘要: 邻苯二甲酸酯(PAEs)作为一类内分泌干扰物,被广泛应用于工业生产。为了查明日常衣物中 PAEs 的污染状况,并评估其通过衣物的皮肤接触可能造成的人体暴露风险,本研究检测了日常生活中的新、旧衣服中 7 种典型 PAEs 的浓度,并通过实验模拟研究了衣物中 PAEs 向汗液的析出行为。结果表明,邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸二异辛酯(DEHP)分别是旧衣服和新衣服中的代表性 PAE。旧衣服中 DEHP 的浓度显著高于新衣服;婴儿衣服中 DEHP 的浓度高于成人衣服。穿着和清洗过程中的二次污染可能对衣服中的 PAEs 有显著影响,衣服材质可能是影响旧衣服中 PAEs 浓度的重要因素。汗液会导致衣物中的 PAEs 析出,从而明显增加 PAEs 的人体暴露风险。

关键词: 邻苯二甲酸酯;日常衣物;皮肤暴露;模拟汗液

文章编号: 1673-5897(2020)1-186-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Phthalates in Daily Clothes: Occurrence and Human Exposure

Liu Yubin¹, Zhang Yilei¹, Li Ke¹, Wu Yinghong², Wang Lei^{1,*}

1. Ministry of Education Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria/Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China

2. Department of Physical and Chemical Test, Tianjin Centers for Disease Control and Prevention, Tianjin 300011, China

Received 3 March 2019 accepted 17 April 2019

Abstract: Phthalate esters (PAEs), a class of endocrine disrupting chemicals, are widely used in industry. To evaluate the occurrence of PAEs in daily clothes and the risk of exposure via skin contact, the concentrations of seven typical PAEs in daily clothes were detected. The role of sweat on PAEs release from clothes was evaluated in simulated experiments. The results show that di-*n*-butyl phthalate (DBP) and di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) were the dominant PAEs in the used clothes and new clothes, respectively. Higher levels of DEHP was detected in the used clothes and the infant clothes, compared with those in the new clothes and the adult clothes, respectively. These results suggest that further PAEs contamination in clothes may occur during wearing or laundering, and the clothing material may be an important factor influencing PAEs contamination in the used clothes. Sweat can increase the release of PAEs from clothes, inducing a higher risk of human exposure to PAEs.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41722304, 21777075); 教育部“111”引智基地项目(T2017002); 中央高校基本科研专项

作者简介: 刘玉斌(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境化学, E-mail: 15900366759@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: wang2007@nankai.edu.cn

Keywords: phthalates; daily clothes; dermal exposure; artificial sweat

邻苯二甲酸酯(phthalates esters, PAEs)作为塑化剂被大量应用于聚氯乙烯(PVC)产品、食品包装以及纺织品等的生产过程中^[1]。作为一类环境内分泌干扰物,PAEs具有类雌激素作用^[2-4],在机体内可与激素受体结合,引起机体的神经系统失调、内分泌紊乱和免疫能力下降^[5],导致生殖及发育损害等健康问题^[6-8],并在生物实验中表现出累积性^[9],因此各国纷纷对PAEs的使用做出限制^[10]。例如全球纺织行业公认的权威生态纺织标准“Oeko-Tex Standard 100 标准”即限制了邻苯二甲酸二异辛酯(DEHP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)及邻苯二甲酸丁苄酯(BBP)在所有儿童玩具和服装以及其他物品所使用的PVC材料中的添加^[11]。我国已把邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)和邻苯二甲酸二正辛酯(DOP)纳入环境优先污染物的名单^[12]。

人体可并通过摄食、呼吸和皮肤接触等途径暴露于PAEs。其中饮食被认为是DEHP进入人体的主要途径^[13-15],而呼吸和皮肤接触被认为是DMP、DEP和DBP等进入体内的重要途径^[16-18]。纺织品如衣物等含有的污染物可能导致污染物的皮肤暴露^[19-21]。然而,对于衣物等纺织品中含有PAEs的人体暴露风险,尚有待评估。此外,对于衣物中污染物的调查,往往以新衣服为研究对象,而对于日常穿用的旧衣服,其与新衣服的污染特征差异往往被忽视。本研究选择7种PAEs,包括DMP、DEP、DBP、邻苯二甲酸二异丁酯(DiBP)、DOP、DEHP和BBP为研究对象,检测了新旧衣物中的PAEs污染水平和分布特征,并对服装中PAEs人体暴露的风险开展了模拟研究。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集

本研究调查的目标衣物包含随机从全国各地城市居民衣柜中采集的49件清洗过的旧衣物,以及通过商场或网络购物得到的12件新衣物。

实验用试剂:乙酸乙酯(色谱级),购自上海安普实验科技股份有限公司。PAEs标准物质DMP、DEP、DBP、DiBP、DOP、BBP和DEHP(>99.5%)与内标物DEP-D₄和DEHP-D₄(>99.5%)购自德国Dr. Ehrenstorfer公司。

实验仪器:Agilent 7890A-5977B气相色谱质谱

联用仪(GC-MS)购自美国安捷伦科技有限公司,色谱柱为Agilent HP5-MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm,美国安捷伦科技有限公司);KH400KDB超声波清洗器(中国昆山禾创超声仪器有限公司)。

1.2 样品预处理及仪器分析

PAEs提取:随机从收集来的衣物上裁剪下10 cm×10 cm的正方形布块(选择时避免印花图案),然后称重计算面积密度(mg·cm⁻²)。将1.0 g的衣物碎片置于50 mL三角锥形瓶中,再分别加入50 ng DEP-D₄和DEHP-D₄,之后加入20 mL乙酸乙酯,再用铝箔将瓶口封闭。超声处理30 min,10 mL的上清液移入40 mL EPA瓶中,1 000×g离心5 min。将上清液移入另一个40 mL干净EPA瓶中,45 ℃水浴条件下,用高纯氮气缓慢浓缩至几乎干燥,加入2 mL正己烷,涡旋混匀,移入棕色样品瓶中,用气相色谱-质谱联用仪检测PAEs浓度。

GC-MS参数设置:Agilent HP5-MS色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);进样口温度为250 ℃;高纯氮气作为载气(纯度≥99.999%),流速为1.0 mL·min⁻¹;不分流进样,进样量1.0 μL;升温程序,初始柱温为60 ℃,以15 ℃·min⁻¹升至220 ℃,保持1 min,再以5 ℃·min⁻¹升温至280 ℃,保持3 min;传输线温度为280 ℃;离子源温度为230 ℃;四级杆温度为150 ℃;EI源,离子检测模式(SIM);电离能量为70 eV。

1.3 模拟实验设计

模拟汗液PAEs浸出实验:参照ISO 105-E04-2008E标准方法^[22],配制pH=8.0和pH=5.5的2种模拟汗液。在所采集的日常旧服装中,选择一件材质为聚酯纤维,PAEs总浓度为52.88 μg·g⁻¹的运动紧身衣为实验材料。并利用Oasis® HLB固相萃取小柱(500 mg/6 cc; Waters, Milford, MA)接收从衣物上浸泡出的PAEs。在本实验中假设一个成年人持续运动2 h,出汗速率为1.5 L·h⁻¹^[23-24],皮肤面积为1.63 m²^[25],模拟实验中衣物面积为16 cm²(4 cm×4 cm),对应模拟汗液体积为3 mL。预先使用10 mL乙酸乙酯清洗SPE小柱,并使用10 mL空白模拟汗液活化小柱,再将加有15 ng的DEP-D₄和DEHP-D₄的织物碎片放入SPE小柱中,关闭SPE流速控制开关,加入3 mL模拟汗液浸泡2 h,再利用真空泵抽滤分离汗液与织物,用镊子取出织物,再用15

mL 乙酸乙酯洗脱 SPE 小柱,洗脱液以氮吹浓缩至 1 mL,以 GC-MS 检测 PAEs 浓度。

1.4 PAEs 日暴露评估

对于日常衣物穿着过程中的 PAEs 皮肤接触暴露,可采用公式(1)进行估算^[19]。

$$\text{EXP}_{\text{cloth}} = \frac{C \times D \times SA \times F_{\text{mig}} \times F_{\text{contact}} \times F_{\text{pen}} \times T}{\text{BW}} \quad (1)$$

式中: $\text{EXP}_{\text{cloth}}$ 为 PAEs 日暴露量 ($\mu\text{g} \cdot (\text{kg BW})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), C 为原始衣物中 PAEs 浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), D 为衣物密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), SA 为皮肤接触面积 (cm^2), F_{mig} 为污染物转移至皮肤的转移率 (0.005 d^{-1}), F_{contact} 为皮肤接触比例 (100%), F_{pen} 为污染物侵入体内的比例 (0.01), T 为接触时间 (1 d), BW 为成年人平均体重 (kg)。

同时,参照公式(1)改进得到公式(2),用于估算在 2 h 的汗液浸泡条件下,衣物中 PAEs 的人体暴露量。

$$\text{EXP} = \frac{\text{MR} \times \text{SA} \times F_{\text{pen}}}{\text{BW}} \quad (2)$$

式中: EXP 为 PAEs 日暴露量 ($\mu\text{g} \cdot (\text{kg BW})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), MR 为衣物在汗液中释放的 PAEs 的浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), SA 为皮肤接触面积 (cm^2), F_{pen} 为污染物侵入体内的比例 (0.01), BW 为成年人平均体重 (kg)。

1.5 质量控制与质量保证(QC/QA)

使用同位素稀释法对 PAEs 浓度进行校正,其中, DMP、DBP 和 DiBP 用 DEP-D₄ 校正, DEHP、DOP 和 BBP 用 DEHP-D₄ 校正。7 种 PAEs 的样品加标回收率均在 97.7% ~ 106% 范围内。空白对照实验表明,样品前处理和模拟实验过程中的 PAEs 背景污染相较于实验结果均可忽略 (<2%)。污染物浓度的组间差异采用单因素方差分析和 T 检验分析 (SPSS V.22.0)。

2 结果 (Results)

2.1 PAEs 在新旧衣物中的成分分布

在 7 种 PAEs,有 4 种 (DMP、DBP、DiBP 和 DEHP) 可在衣物中检出。总体上,碳链较长的 PAEs 如 DBP 和 DEHP 在衣物中含量较高,而碳链较短的 DMP 在衣物中含量较低 (图 1)。新衣物中的 4 种 PAEs 含量占比为 DBP (52.7%) > DiBP (24.2%) > DEHP (19.8%) > DMP (3.3%); 旧衣物中的 PAEs 含量占比为 DEHP (79.1%) > DBP (12.4%) > DiBP (7%) > DMP (1.5%)。新衣物中 DBP 的比例最高,而旧衣物中占优势的 PAEs 为 DEHP。

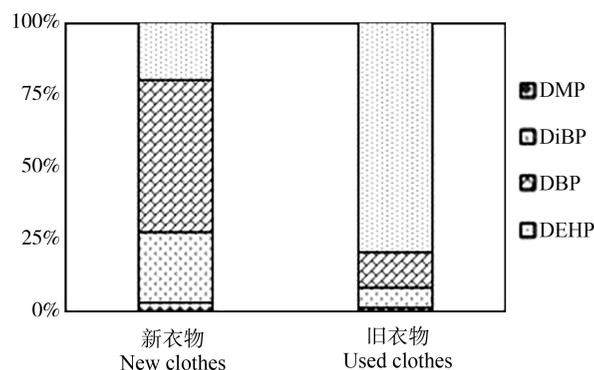


图 1 4 种邻苯二甲酸酯 (PAEs) 在衣物中含量占比

注: DMP 表示邻苯二甲酸二甲酯, DiBP 表示邻苯二甲酸二异丁酯, DBP 表示邻苯二甲酸二丁酯, DEHP 表示邻苯二甲酸二异辛酯。

Fig. 1 Proportion of four phthalates esters (PAEs) in clothes

Note: DMP is di-methyl phthalate; DiBP is di-iso-butyl phthalate; DBP is di-*n*-butyl phthalate; DEHP is di(2-ethylhexyl) phthalate.

2.2 不同衣物中 PAEs 在的浓度差异

通过比较新旧衣物中 4 种可检出的 PAEs (DMP、DiBP、DBP 和 DEHP) 浓度 (图 2) 发现,新衣物中 PAEs 总浓度为 $1.153 \sim 647.7 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其几何平均值 (GM) 为 $11.17 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,不同 PAEs 的浓度之间没有显著差异 ($P > 0.05$); 旧衣物中 PAEs 总浓度为 $4.802 \sim 1705 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其 GM 值为 $80.82 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其中 DEHP 浓度为 $2.654 \sim 1543 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其 GM 值为 $85.36 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于其他 3 种酯 ($P < 0.05$)。新旧衣物之间 DMP、DiBP 和 DBP 这 3 种酯的浓度没有显著差异,而旧衣物中的 DEHP 浓度显著高于新衣物。

为探究不同年龄段群体所穿衣物中 PAEs 的浓度,将所采集的旧衣物按照年龄分为 3 组,即婴儿 ($n=22$)、儿童 ($n=11$) 和成人 ($n=16$)。通过比较不同年龄组之间的 PAEs 浓度差异 (图 3) 发现,浓度较低的 DMP、DBP 和 DiBP 在不同年龄段的衣物中没有显著差异,但婴儿衣物中的 DEHP 浓度远高于成人衣物。

不同材质类型 (含棉、聚酯纤维和未知材质) 的衣物中 DMP、DBP 或 DiBP 的浓度没有明显差异。而检出浓度最高的 DEHP,在棉质衣物中浓度的 GM 为 $92.00 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,远高于聚酯纤维和未知材质的衣物中的 DEHP 浓度的 GM 为 8.023、21.15 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 1)。

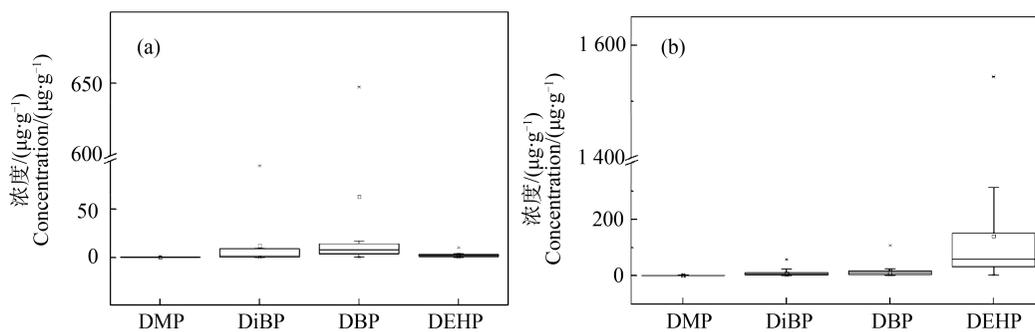


图 2 新旧衣物中 4 种邻苯二甲酸酯浓度

注:(a). 新衣物,(b). 旧衣物。

Fig. 2 Concentration of four PAEs in new or used clothes

Note: (a). New clothes; (b). Used clothes.

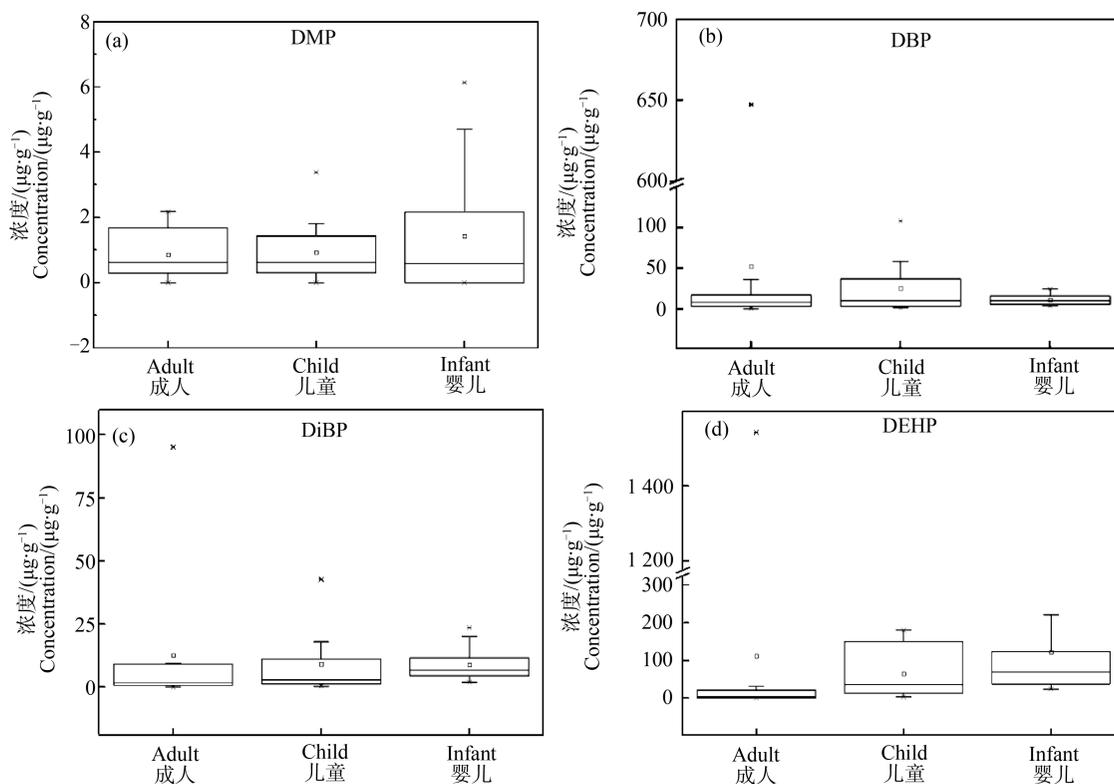


图 3 成人、儿童及婴儿的旧衣物中 4 种邻苯二甲酸酯浓度

Fig. 3 Concentration of four PAEs in used clothes of adults, children and infants

表 1 不同材质的旧衣物中 PAEs 的几何平均浓度

Table 1 Geometric mean of PAEs concentration in used clothes made of cotton, polyester and unknown material

	DMP	DBP	DiBP	DEHP
含棉 Cotton	2.352	13.19	8.490	92.00
聚酯纤维 Polyester	1.554	8.867	2.862	8.023
未知材质 Unknown material	1.625	7.768	3.842	21.15

($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

2.3 衣物中 PAEs 的浸出和人体暴露评估

在旧衣服中,选择一件 DEHP 浓度为 $61.76 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、材质为聚酯纤维的紧身运动衣作为实验对象,在衣物浸泡后,模拟汗液中未检测到 DMP、DiBP 和 DBP 的渗出,但衣物中原始浓度最高的 DEHP 的浸出较为明显。通过比较 2 个不同 pH 的模拟汗液浸泡实验中的 DEHP 浸出量发现,pH 为 8.0 的模拟汗液中,DEHP 从衣物中的浸出量为 $3.700 \mu\text{g}\cdot(\text{g 衣料})^{-1}$,远高于 pH 为 5.5 的模拟汗液中的浸出量 ($0.490 \mu\text{g}\cdot(\text{g 衣料})^{-1}$)。

根据公式(1),在日常活动中的 PAEs 经此衣物的日暴露量估值为 $11.83 \text{ ng}\cdot(\text{kg BW})^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。相比之下,利用公式(2)可估算在 2 h 出汗后人体 PAEs 暴露量,经过计算,汗液 pH 为 5.5 时,PAEs 皮肤暴露量为 $21.92 \text{ ng}\cdot(\text{kg BW})^{-1}$,而汗液 pH 为 8.0 时,其暴露量可高达 $165.5 \text{ ng}\cdot(\text{kg BW})^{-1}$ 。

3 讨论 (Discussion)

在大多数新旧衣物中均仅检出 DMP、DiBP、DBP 和 DEHP 4 种 PAEs。DEP、DOP 和 BBP 未被检出可能是由于这 3 类 PAEs 在纺织品生产过程中不添加使用,同时其环境浓度较低。然而值得注意的是,新衣物中 DBP 浓度最高,而旧衣物中的优势污染物是 DEHP;新衣物中 PAEs 总浓度 GM 值为 $11.17 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而旧衣服中 PAEs 的总浓度 GM 值高达 $80.82 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,表明穿用过的旧衣服可能遭受 PAEs 的二次污染。虽然普通衣物在生产过程中通常不会添加 PAEs,但带有印花和涂层的衣物中可能添加 DBP、DiBP 和 DEHP^[10],这可能是新衣物中 DBP 浓度高的原因。相比之下,旧衣物中 PAEs 总浓度更高,表明清洗过程无法有效去除衣物中的 PAEs。清洗剂和环境中 PAEs 广泛存在。例如,洗涤剂中 DEHP 的浓度可高达 $2\ 000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[26];此外,室内空气颗粒物和灰尘中也含有浓度较高的 PAEs^[27]。这极可能导致 PAEs 对衣物的二次污染。

衣物材质极可能会影响 PAEs 的二次污染,含棉衣物相对其他材料更易吸附 PAEs。相较于非极性的合成纤维衣物,由于天然纤维素含有羟基等极性官能团,棉质衣物对一些极性有机污染物的吸附更加显著^[28]。婴儿衣物多为含棉材料,且通常洗涤频率远高于儿童与成人衣物,这可能导致本研究中国婴儿衣物中 PAEs 浓度更高。除材质与洗涤频率的

影响外,婴儿往往使用较多人护理品,个人护理品中含有的高浓度 PAEs^[29]也可能导致衣物在穿着时被皮肤上的 PAEs 污染。

碱性汗液有利于衣料中 PAEs 的浸出。浸出量约占衣物中 PAEs 总量的 6%,虽然相比于饮食暴露等 PAEs 主要暴露途径,衣物皮肤暴露的贡献大约低 2 个数量级^[30],但皮肤与衣物的持续接触仍对 PAEs 人体暴露有一定贡献。相比于日常穿用衣物导致的皮肤接触暴露,流汗时 PAEs 的暴露量可能提高 1.89 ~ 14.0 倍,表明长时间高强度运动或劳动时 PAEs 由衣物导致的皮肤接触暴露风险值得进一步关注。

通讯作者简介:汪磊(1979—),男,博士,研究方向为新型污染物的环境化学行为。

参考文献 (References):

- [1] 朱敏,张弛,康嘉玲,等.邻苯二甲酸酯的毒性及其降解研究[J].环境科学与技术,2013,36(12M):433-447
Zhu M, Zhang C, Kang J L, et al. Toxicity of phthalic acid esters and research of degradation [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(12M): 433-447 (in Chinese)
- [2] Meeker J D, Calafat A M, Hauser R. Di(2-ethylhexyl) phthalate metabolites may alter thyroid hormone levels in men [J]. Environmental Health Perspectives, 2007, 115(7): 1029-1034
- [3] Huang P C, Kuo P L, Guo Y L, et al. Associations between urinary phthalate monoesters and thyroid hormones in pregnant women [J]. Human Reproduction, 2007, 22 (10): 2715-2722
- [4] Qu R J, Feng M B, Sun P, et al. A comparative study on antioxidant status combined with integrated biomarker response in *Carassius auratus* fish exposed to nine phthalates [J]. Environmental Toxicology, 2015, 30(10): 1125-1134
- [5] 黄培东,于芳芳.环境激素及其污染防治研究进展[J].广东化工,2007,34(12):86-89
Huang P D, Yu F F. Research development on the environmental hormone and its pollution control [J]. Guangdong Chemical Industry, 2007, 34(12): 86-89 (in Chinese)
- [6] Braun J M, Sathyanarayana S, Hauser R. Phthalate exposure and children's health [J]. Current Opinion in Pediatrics, 2013, 25(2): 247-254
- [7] Valvi D, Casas M, Romaguera D, et al. Prenatal phthalate exposure and childhood growth and blood pressure: Evidence from the Spanish INMA-Sabadell birth cohort stud-

- y [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123(10): 1022-1029
- [8] Zhang B, Zhang T, Duan Y S, et al. Human exposure to phthalate esters associated with e-waste dismantling: Exposure levels, sources, and risk assessment [J]. *Environment International*, 2019, 124: 1-9
- [9] Güven K C, Coban B. Phthalate pollution in fish *Sarda sarda*, *Engraulis encrasicolus*, *Mullus surmuletus*, *Merlangius merlangus* and shrimp *Parapenaeus longirostris* [J]. *Journal of Black Sea/Mediterranean Environment*, 2013, 19: 185-189
- [10] 张驰, 徐周, 保绮蓓, 等. 针织服装中邻苯二甲酸酯检出现状及工艺分析[J]. *针织工业*, 2013(8): 64-67
Zhang C, Xu Z, Bao Q B, et al. Inspection results of phthalate in knitted garments and its process analysis [J]. *Knitting Industries*, 2013(8): 64-67 (in Chinese)
- [11] 李颖. 童装: 邻苯二甲酸酯(增塑剂)质量安全风险分析[J]. *中国纤检*, 2013(10): 38-40
Li Y. Quality and safety risk analysis for phthalates (plasticizers) in the Children's wear [J]. *China Fiber Inspection*, 2013(10): 38-40 (in Chinese)
- [12] 曹龙, 张朝升, 陈秋丽, 等. 邻苯二甲酸酯的环境污染和生态行为及毒理效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(2): 34-46
Cao L, Zhang C S, Chen Q L, et al. Progress in the study of environmental pollution and ecological behavior and toxicological effects of phthalate ester [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(2): 34-46 (in Chinese)
- [13] Rudel R A, Gray J M, Engel C L, et al. Food packaging and bisphenol A and bis(2-ethylhexyl) phthalate exposure: Findings from a dietary intervention [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(7): 914-920
- [14] Koch H M, Lorber M, Christensen K L Y, et al. Identifying sources of phthalate exposure with human biomonitoring: Results of a 48 h fasting study with urine collection and personal activity patterns [J]. *International Journal of Hygiene and Environment*, 2013, 216(6): 672-681
- [15] Fromme H, Gruber L, Schlummer M, et al. Intake of phthalates and di(2-ethylhexyl)adipate: Results of the integrated exposure assessment survey based on duplicate diet samples and biomonitoring data [J]. *Environmental International*, 2007, 3(8): 1012-1020
- [16] Bekö G, Weschler C J, Langer S, et al. Children's phthalate intakes and resultant cumulative exposures estimated from urine compared with estimates from dust ingestion, inhalation and dermal absorption in their homes and daycare centers [J]. *Plos One*, 2013, 8(4): e62442
- [17] Gong M Y, Weschler C J, Liu L P, et al. Phthalate metabolites in urine samples from Beijing children and correlations with phthalate levels in their handwipes [J]. *Indoor Air*, 2015, 25(6): 572-581
- [18] Weschler C J, Bekö G, Koch H M, et al. Transdermal uptake of diethyl phthalate and di(n-butyl) phthalate directly from air: Experimental verification [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123(10): 928-934
- [19] Xue J, Liu W, Kannan K. Bisphenols, benzophenones, and bisphenol A diglycidyl ethers in textiles and infant clothing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(9): 5279-5286
- [20] Wu C C, Wang W J, Bao L J, et al. Impacts of texture properties and airborne particles on accumulation of tobacco-derived chemicals in fabrics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 369: 108-115
- [21] Kraus A, Andersen C, Eriksson A, et al. Excretion of urinary metabolites of the phthalate esters DEP and DEHP in 16 volunteers after inhalation and dermal exposure [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(11): 2514
- [22] Kulthong K, Srisung S, Boonpavanitchakul K, et al. Determination of silver nanoparticle release from antibacterial fabrics into artificial sweat [J]. *Particulate and Fibre Toxicology*, 2010, 7(1): 9
- [23] Sawka M N, Chevront S N, Carter R. Human water needs [J]. *Nutrition Reviews*, 2005, 63(6): 30-39
- [24] Sawka M N, Chevront S N, Kenefick R W. Hypohydration and human performance: Impact of environment and physiological mechanisms [J]. *Sports Medicine*, 2015, 45: 51-60
- [25] Stevenson P H. Height-weight-surface formula for the estimation of surface area in Chinese subjects [J]. *Chinese Journal of Physiology*, 1937, 3: 327-330
- [26] Viñas P, Campillo N, Pastorbelda M, et al. Determination of phthalate esters in cleaning and personal care products by dispersive liquid-liquid microextraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2015, 1376: 18-25
- [27] 王夫美, 陈丽, 焦姣, 等. 冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(5): 1446-1451
Wang F M, Chen L, Jiao J, et al. Phthalates esters pollution in household indoor air particles of Tianjin in winter [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1446-1451 (in

- Chinese)
- [28] Piadé J J, D' Andrés S, Sanders E B. Sorption phenomena of nicotine and ethenylpyridine vapors on different materials in a test chamber [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(12): 2046-2052
- [29] Guo Y, Wang L, Kannan K. Phthalates and parabens in personal care products from China: Concentrations and human exposure [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 66(1): 113-119
- [30] Guo Y, Kannan K. Comparative assessment of human exposure to phthalate esters from house dust in China and the United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(8): 3788-3794 ◆