

居室积尘邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯污染特征及其影响因素分析

张文颖¹, 曹赞¹, 张晓彤¹, 刘萌萌¹, 蒋林霖¹, 刘婷婷¹, 宋风景¹, 陈城宇¹, 樊琳¹, 韩旭¹, 王超¹, 李莉¹,
刘航¹, 孙一铭¹, 罗斌², 王先良¹

1. 中国疾病预防控制中心环境与人群健康重点实验室 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100021;
2. 兰州大学公共卫生学院

摘要: **目的** 探索日常生活中居室积尘邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)的污染水平、时空污染特征和潜在的家庭环境及个人生活习惯的影响因素, 为防控居室积尘 DEHP 污染提供科学依据。**方法** 综合考虑气候、经济和污染水平多方面因素, 对兰州、洛阳、盘锦、绵阳、青岛、深圳、石家庄、无锡和西安 9 个典型城市开展入户积尘采样并进行问卷调查, 应用气相色谱-质谱法(GC-MS)对经过处理后的积尘样本中 DEHP 含量进行检测; 应用 Wilcoxon 秩和检验分析不同季节、不同主导风向、不同装修和不同生活习惯之间的差异; 运用多重线性回归对居室积尘 DEHP 含量进行影响因素分析。**结果** 部分城市居室积尘 DEHP 存在季节和主导风向差异, 洛阳和绵阳居室积尘 DEHP 含量为非采暖季高于采暖季($P < 0.05$), 而深圳和石家庄积尘中 DEHP 含量为非采暖季低于采暖季($P < 0.05$)。且绵阳上风向区居室积尘 DEHP 含量显著高于下风向区 ($P < 0.05$)。影响因素分析中发现居室积尘 DEHP 含量主要与 $PM_{2.5}$ ($\beta = 0.003, 95\% CI: 0.001 \sim 0.005$)、 PM_{10} ($\beta = -0.003, 95\% CI: -0.005 \sim -0.001$)、甲醛 ($\beta = 3.626, 95\% CI: 0.195 \sim 7.057$) 和人均 GDP ($\beta = -0.072, 95\% CI: 0.050 \sim 0.095$) 相关。**结论** 日常生活中, DEHP 普遍存在于居室积尘中, 不同城市的家庭中存在一定非采暖、采暖季及上下风向区域之间差异, 但各城市间并未发现一致的污染特征。此外, 居室积尘 DEHP 含量可能与温度、 PM_{10} 、二甲苯、使用电脑、使用地毯、种植花草和使用净水设备等因素相关。

关键词: DEHP; 居室; 积尘; 污染特征; 影响因素

中图分类号: X508 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)11-1956-07

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202312153

Analysis of pollution characteristics and influencing factors of di (2-ethylhexyl) phthalate in indoor dust

ZHANG Wen-ying*, CAO Bin, ZHANG Xiao-tong, LIU Meng-meng, JIANG Lin-lin, LIU Ting-ting, SONG Feng-jing, CHEN Cheng-yu, FAN Lin, HAN Xu, WANG Chao, LI Li, LIU Hang, SUN Yi-ming, LUO Bin, WANG Xian-liang
*Key Laboratory of Environment and Human Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Institute of Environment and Health-related Products, China Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100021, China

Abstract: **Objective** To explore the pollution level and spatiotemporal characteristics of indoor dust di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in daily life and the influencing factors of potential family environment and personal living habits, providing scientific basis for the prevention and control of DEHP pollution in indoor dust. **Methods** Considering the factors of climate, economy and pollution level, household dust samples were collected and investigated in 9 typical cities of Lanzhou, Luoyang, Panjin, Mianyang, Qingdao, Shenzhen, Shijiazhuang, Wuxi, and Xi'an. DEHP content in the treated dust samples was measured using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The Wilcoxon rank sum test was employed to examine differences in DEHP levels across various seasons, dominant wind directions, types of home decoration, and living habits. Multiple linear regression was used to identify factors influencing DEHP content in indoor dust. **Results** DEHP levels in indoor dust varied significantly with season and dominant wind direction in some cities ($P < 0.05$). Specifically, Luoyang and Mianyang exhibited higher DEHP levels during the heating season compared to other periods, while Shenzhen and Shijiazhuang showed lower levels during the heating season ($P < 0.05$). In Mianyang, the upwind areas had significantly higher DEHP levels than the downwind areas ($P < 0.05$). Factors influencing household dust DEHP levels included $PM_{2.5}$ ($\beta = 0.003$,

基金项目: 国家自然科学基金项目(21976169); 国家科技基础资源调查专项(2023FY100603); 典型城市室内环境健康影响调查与防护措施效果评估(中央财政专项)

作者简介: 张文颖(2000—), 女, 硕士在读, 研究方向: 室内环境与健康

通信作者: 王先良, E-mail: wangxianliang@nich.chinacdc.cn

95%CI: 0.001–0.005), PM_{10} ($\beta=-0.003$, 95%CI: -0.005 to -0.001), formaldehyde ($\beta=3.626$, 95%CI: 0.195–7.057), and per capita GDP ($\beta=-0.072$, 95%CI: 0.050–0.095). **Conclusion** DEHP is commonly found in indoor dust in daily life. Seasonal variations and wind direction affect its levels in different cities, though no consistent pattern of pollution characteristics is observed across the cities. Additionally, DEHP content in indoor dust may be influenced by temperature, PM_{10} , xylene, computer use, carpet use, and indoor plant cultivation.

Keywords: DEHP; Room; Dust accumulation; Pollution characteristics; Influencing factors

邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 [di-(2-ethylhexyl) phthalate, DEHP] 是在日常生活中普遍应用的邻苯类增塑剂之一,主要用于改善一些塑料产品的柔韧性、耐久性及延展性等。目前广泛添加于日用高分子塑料制品中,如食品加工和包装、清洁剂、地板、壁纸等。因此它与我们日常生活密切相关。

DEHP 在塑料制品中并不是以化学键和的形式存在,而是通过范德华力和氢键与聚合物聚合,因此,塑料制品中的 DEHP 在使用过程中很易将其迁移到室内环境中^[1]。目前,DEHP 已在地表水^[2]、室内/室外空气^[3-4]、灰尘^[5]、土壤^[6]和沉积物^[7]均有报道。研究发现,DEHP 不仅具有生殖毒性^[8]、免疫毒性^[9]、肝脏毒性^[10-11],同时也具有致癌效应^[12]。因此室内 DEHP 污染水平值得关注。

在室内环境中,DEHP 是很常见的一种半挥发性有机物 (semi-volatile organic compounds, SVOCs),大多可以很容易地附着在室内颗粒物进而落在地面逐渐成为居室积尘,因此,积尘是一个重要的室内介质。DEHP 在室内环境的污染水平不仅受到室内温度和相对湿度等小气候影响^[13],而且很大程度上受到室内装修情况和个人生活习惯的影响。有研究表明,随着温度升高,DEHP 更容易挥发出来^[14],进而使室内污染加重。但目前对于室内装修和个人生活习惯对其污染水平的研究相对较少,室内积尘 DEHP 的污染特征及其影响因素有待进一步研究。

1 对象与方法

1.1 研究对象 考虑到气候、位置、空气污染水平以及社会经济地位等多种因素,选取盘锦、兰州、西安、绵阳、石家庄、无锡、青岛、洛阳、深圳等 9 个代表性城市,调查内容包括居室积尘采集与检测、空气理化因素测量以及家庭生活行为习惯的问卷调查。从被调查城市分别选择一个上风向和下风向两个站点,距离这两个站点最近的两所小学作为被调查对象(3 千米以内)。每个城市招募家庭约 20 户,对其进一步调查。从中筛选的住宅需满足以下条件:(1)在现有房屋连续居住 3 年以上,未来 3 年无迁出计划;(2)家庭成员为非环境污染高危职业人群(例如交警、快递员、环卫工人、化工厂工人等);(3)家中无人吸烟;(4)愿意参加本项目,并同意签署知情同意书。已通过中国疾病

预防控制中心环境与健康相关产品安全所伦理审查委员会批准,编号:2017019。

1.2 积尘样品采集 在 2018—2019 年的非采暖季(2018 年 4—9 月)和采暖季(2018 年 11 月—2019 年 3 月),使用灭菌后的毛刷从空调过滤器、灯罩、橱柜顶部、未接触的桌面等受人为因素影响较小的地方扫集灰尘样品,将积尘扫集到 A4 纸上,样品量采集足够后,将 A4 纸上的积尘倒入广口瓶中,密封好后,瓶身贴上标签纸并写好样品编号。由于意外中断,来自无锡、西安、青岛的积尘样品仅在非采暖季节采集,来自盘锦的粉尘样品仅在采暖季节采集,西安的积尘样品仅在下风向采集。共成功收集了 246 份家庭积尘样本,以供评估。将样品置于泡沫箱,箱内放入冰袋,4℃冷藏,尽快检测。

1.3 居室积尘 DEHP 含量测定 首先对积尘样品进行处理,去除其杂质如毛发,将其置于离心管中,加入正己烷-丙酮混合溶剂,使其混匀,然后超声提取 30 min,接着于高速离心机中 4 000 r/min 离心 10 min,将上清液转移到 25 ml 具塞玻璃离心管。上述操作重复 3 次,合并提取液并将其转移至氮吹管中,氮吹至约 0.5 ml,将该浓缩液充分转移至 1.5 ml 棕色液相小瓶并采用正己烷定容至 1 ml。

采用配备电子轰击(EI)电离源的安捷伦气相色谱-质谱仪(GC 6890/5973 MSD,美国安捷伦科技公司)对 DEHP 进行了分析。在单离子监测模式下,定量分析每个目标同源物。分析物在毛细管柱(石英毛细管柱,长 30 m,内径 0.53 mm,膜厚 0.3 μ m。固定相为 1%乙烯基-5%苯基甲基聚硅氧烷)上分离,以超高纯度的氦气(纯度 99.999%)为流动相,流速为 1.0 ml/min。温度柱的温度程序从 50℃(保持 1 min)开始,然后以 20℃/min 上升到 220℃(保持 1 min),最后以 4℃/min 时增加到 280℃(保持 4 min)。质谱参考条件:离子源、接口、四极杆温度分别保持在 230℃、280℃、150℃。

1.4 问卷调查 采用面对面访谈入户调查的方式,针对目标家庭开展居住环境、居家生活习惯进行问卷调查。主要包括居民居住环境、室内环境健康防护用品(净水器和净化器等)、个人的生活习惯等。主要内容包括:(1)暴露情况:近五年是否装修(地板、地砖、刷漆、墙纸)、一年内是否购买新家具、是否有地毯等;

(2)生活习惯:室内养育鲜花绿植情况、燃香情况、是否经常做饭等;(3)防护产品:空气净化器、净水设备等;(4)电子产品:是否有电脑、是否有电视等。

1.5 其他因素检测 室内温度、相对湿度、甲醛、CO₂、菌落总数、真菌总数测定方法参考《公共场所卫生检验方法第 2 部分:化学污染物》(GB/T 18204.2-2014)、《公共场所卫生检验方法第 1 部分:物理因素》(GB/T 18204.1-2013)、《公共场所卫生检验方法第 3 部分:空气微生物》(GB/T 18204.3-2014)。

1.6 质量控制 采样工作人员需经过相关培训,达到工作要求或具备专业技能,实验室测试分析人员还应准确掌握本方案中相关各项指标检测方法和实验分析具体要求,发现故障或异常情况及时处置。样品的采集应满足国家相关标准规范对项目的要求,按要求填好采样信息,采样人员应认真核对,记录其状态是否异常。问卷调查时,确保调查表和数据质量的准确性和完整性。实验室质控使用加标回收和重复检测的方法,每批质控样品按被测样品数量的 5%进行加标回收,加标回收率应控制于 80%,重复检测的平均差值应控制在 20%以内。

1.7 统计分析 使用 SPSS 27.0 和 Origin 2021 软件进行统计分析和绘图,对于低于检出限的污染物浓度,采用 1/2 检出限值(limit of quantitation, LOQ)值计算。使用 Shapiro-Wilk 进行正态检验,对于不符合正态分布的定量资料使用中位数和四分位数描述;使用 Mann-Whitney *U* 检验或 Kruskal-Wallis *H* 检验对不同季节、不同风向、不同装修、不同家庭生活习惯和不同经济水平之间进行组间差异比较;使用多重线性回归对 DEHP 的影响因素进行多因素分析,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 不同城市居室积尘 DEHP 污染水平 在本研究中,共有来自 9 个北方城市的 246 个实际住宅中的灰尘样本纳入分析,样本分别为兰州 40 个、洛阳 40 个、绵阳 30 个、盘锦 14 个、青岛 8 个、深圳 34 个、石家庄 40 个、无锡 20 个、西安 20 个。室内积尘中 DEHP 的浓度范围为 0.250 ~ 7 168.412 $\mu\text{g/g}$,不同城市中位数相差较大,其中无锡中位数为 12.626 $\mu\text{g/g}$,相对较小,而深圳中位数为 449.682 $\mu\text{g/g}$,远远高于无锡。不同城市居室积尘中 DEHP 污染水平见表 1。

表 1 居室积尘中 DEHP 污染水平概况($\mu\text{g/g}$)

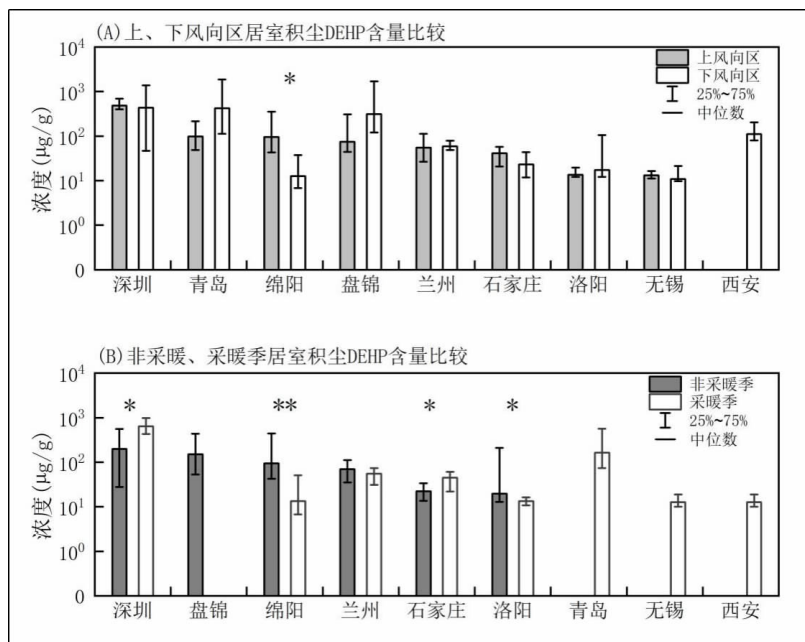
Table 1 The pollution level of indoor dust DEHP ($\mu\text{g/g}$)

城市	N	M	s	Min	P_{25}	P_{50}	P_{75}	Max
兰州	40	109.385	178.069	14.614	32.190	58.846	105.622	1 074.694
洛阳	40	156.829	506.826	3.240	12.126	14.243	34.488	2 452.158
绵阳	30	130.608	181.513	2.808	11.754	47.008	188.290	561.020
盘锦	14	432.611	643.870	31.755	48.595	151.736	483.498	2 078.536
青岛	8	435.935	616.904	27.305	61.208	163.338	640.287	1 851.021
深圳	34	1 127.464	1 778.789	0.829	64.908	449.682	940.651	7 168.412
石家庄	40	40.782	38.842	0.250	15.447	25.986	56.799	207.123
无锡	20	38.237	103.845	9.533	10.040	12.626	20.170	478.357
西安	20	202.568	329.735	41.140	78.500	111.573	203.990	1 574.907
总计	246	2 674.419	4 378.393	131.474	334.768	1 035.038	2 673.795	17 446.228

2.2 季节、主导风向对 DEHP 污染水平的影响 住宅的风向区是根据该城市的主导风向所决定的,室内积尘中 DEHP 来源之一为室外,而风向为影响室外污染物排放的重要因素。本研究中,上风向区与下风向区比较,绵阳室内积尘 DEHP 浓度差异存在显著性意义($P<0.05$);对采暖季和非采暖季不同城市室内积尘 DEHP 污染水平进行比较,发现深圳、石家庄、洛阳的室内积尘中的 DEHP 存在显著性差异($P<0.05$),绵阳室内积尘 DEHP 的差异更为显著($P<0.001$),其中,深圳和石家庄采暖季居室积尘 DEHP 浓度高于非采暖季,而洛阳和绵阳非采暖季居室积尘 DEHP 浓度高于采暖季。见图 1。

2.3 影响室内积尘 DEHP 浓度的单因素分析 本研究发现是否为采暖季对居室积尘 DEHP 含量影响较大,为探究不同时期室内积尘 DEHP 污染水平的影响因素是否存在差异,将可能的影响因素分为室内装修、个人生活习惯和当地经济水平。采用 Mann-Whitney *U* 或 Kruskal-Wallis *H* 检验分析不同条件室内积尘 DEHP 的浓度是否具有差异。结果显示家里是否有电脑、是否有地毯、是否种植花草、是否使用加湿器及不同经济水平的组间差异具有统计学差异($P<0.05$)。见表 2。

2.4 居室积尘 DEHP 影响因素的多因素分析 室内积尘 DEHP 浓度呈非正态分布,对其进行对数转换。



注: * 代表 $P < 0.05$; ** 代表 $P < 0.001$; 由于意外中断, 来自无锡、西安、青岛的粉尘样品仅在采暖季节采集, 来自盘锦的粉尘样品仅在非采暖季节采集, 西安的积尘样品仅在下风向区采集。

图 1 居室积尘 DEHP 污染水平的上、下风向区和非采暖、采暖季比较

Figure 1 Comparison of indoor dust DEHP pollution levels in different wind direction areas and different seasons

表 2 影响居室积尘 DEHP 含量的单因素分析

Table 2 Univariate analysis of the DEHP content of indoor dust accumulation

影响因素	非采暖季				采暖季			
	n	IQR	Z/H	P 值	n	IQR	Z/H	P 值
装修								
房屋近五年是否装修								
否	60	167.269	-1.287	0.198	102	128.590	-0.978	0.328
是	36	220.644			41	98.791		
一年内是否购买新家具								
否	79	163.764	-0.153	0.608	114	93.949	-1.486	0.137
是	17	328.926			29	292.939		
家里是否有电视								
否	3	30.120	-0.916	0.360	8	26.135	-1.651	0.099
是	93	215.256			135	141.668		
家里是否有电脑								
否	20	77.811	-1.913	0.056	32	51.260	-2.470	0.014*
是	76	226.424			111	181.088		
家里是否有地毯								
否	87	158.135	-2.797	0.005*	135	123.611	-0.659	0.510
是	9	1 473.557			8	86.594		
生活习惯								
室内是否种植花草								
否	21	287.810	-1.219	0.223	41	51.163	-2.482	0.013*
是	75	197.650			102	167.047		
室内是否燃香								
否	88	197.346	-0.331	0.740	130	113.783	-0.154	0.877
是	8	323.641			13	462.230		
室内是否使用加湿器								
否	78	189.244	-2.093	0.036*	117	134.695	-0.167	0.867
是	18	252.582			26	93.572		
是否经常做饭								
否	12	201.836	-0.244	0.807	16	77.142	-0.743	0.458
是	84	196.189			127	141.668		
房间内是否使用空气净化器								
否	75	153.452	-0.075	0.940	111	107.750	-0.794	0.427
是	21	431.503			32	144.841		
家中是否使用净水设备								
否	55	103.847	-1.981	0.048*	84	87.584	-1.849	0.064
是	41	472.282			59	176.168		
经济水平								
人均 GDP(万元)								
<5	17	672.434	5.938	0.051	25	819.188	54.618	<0.001*
5~10	69	101.938			85	69.355		
>10	15	397.824			35	15.380		

注: * 代表差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。

以经过对数转换后的室内积尘中 DEHP 污染情况为因变量,以影响室内积尘 DEHP 浓度的单因素分析中有统计学意义的项为自变量($P < 0.05$),应用多重线性回归分析室内积尘 DEHP 污染相关因素。结果显示,温度、PM₁₀ 和二甲苯会对居室积尘 DEHP 浓度产生影响,PM_{2.5}、甲醛为室内 DEHP 污染的危险因素,而 PM₁₀ 和人均 GDP 为它的保护因素。随着 PM_{2.5} 和

甲醛浓度的升高,居室积尘 DEHP 浓度增加 ($P < 0.05$);然而,居室 PM₁₀ 增加时,DEHP 的浓度会有所降低($P < 0.05$)。此外,分析发现人均 GDP 越高的家庭污染水平相对越低。每个自变量的方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 均小于 10,表明此模型的共线性的相对较小。见表 3。

表 3 居室积尘 DEHP 含量的多重线性回归分析

Table 3 Multiple linear regression analysis of indoor dust DEHP

影响因素	β 值(95%CI)	s_e	t 值	P 值	VIF
家里是否有电脑	0.009(-0.248 ~ 0.267)	0.130	0.072	0.942	1.662
家里是否有地毯	0.203(-0.143 ~ 0.55)	0.176	1.157	0.249	1.140
室内是否种植花草	0.049(-0.165 ~ 0.262)	0.108	0.449	0.654	1.237
家中是否使用净水设备	-0.027(-0.228 ~ 0.174)	0.102	-0.265	0.791	1.467
温度(°C)	0.001(-0.016 ~ 0.019)	0.009	0.125	0.901	1.625
湿度(%)	-0.001(-0.008 ~ 0.006)	0.003	-0.304	0.761	1.304
PM _{2.5} (g/m ³)	0.003(0.001 ~ 0.005)	0.001	2.829	0.005*	6.586
PM ₁₀ (μg/m ³)	-0.003(-0.005 ~ -0.001)	0.001	-3.128	0.002*	6.390
CO(mg/m ³)	-0.031(-0.101 ~ 0.039)	0.036	-0.877	0.381	1.219
CO ₂ (%)	0.077(-0.736 ~ 0.890)	0.412	0.186	0.852	1.933
NO ₂ (mg/m ³)	0.227(-2.214 ~ 2.669)	1.238	0.184	0.854	1.192
甲醛(mg/m ³)	3.626(0.195 ~ 7.057)	1.739	2.085	0.038*	1.373
苯(mg/m ³)	-1.307(-19.636 ~ 17.023)	9.291	-0.141	0.888	1.465
甲苯(mg/m ³)	-0.04(-0.154 ~ 0.075)	0.058	-0.679	0.498	1.071
二甲苯(mg/m ³)	-4.142(-9.849 ~ 1.564)	2.893	-1.432	0.154	1.355
菌落总数(cfu/m ³)	0(0 ~ 0)	0	0.562	0.575	1.511
真菌总数(cfu/m ³)	0(0 ~ 0)	0	0.114	0.909	1.659
人均 GDP(万元)	0.072(0.050 ~ 0.095)	0.011	6.339	<0.001*	1.990

注:*代表差异具有统计学意义($P < 0.05$)。

3 讨论

DEHP 是塑料产品中的出现较多的增塑剂之一,随着塑料产品在住宅居室内的广泛使用,人们越发关注室内 DEHP 的污染问题。本研究共调查全国 9 个典型城市,共计 246 份样本,本次调查结果表明,我国住宅室内积尘 DEHP 存在不同程度的污染,总体浓度中位数为 48.739 μg/g,高于另一项全国性研究(25.6 μg/g)^[15]。由于室内环境相对较封闭,且包含大量塑料制品,如地板、家具和生活用品等,使其在室内积尘中累积,污染水平往往高于室外环境,杭州的研究也证明了这一点^[16]。

本研究中室内积尘 DEHP 浓度在绵阳存在主导风向差异,上风向区高于下风向区,但另一项研究表明,下风向区 DEHP 的浓度高于上风向区的浓度^[17],因此来自上风向区或下风向区对居室积尘中的 DEHP 含量的影响有所差异;除空间差异外,本研究还发现,室内积尘 DEHP 的含量也存在着一定的季节性差异,结果表明,石家庄和深圳采暖季的 DEHP 含量高于非采暖季,可能是因为采暖季室内温度相对

较高,因此造成塑料制品中的 DEHP 挥发速度加快。这一发现与来自北京的一项研究结果相似^[18];而绵阳、洛阳的 DEHP 含量非采暖季更高,其原因可能是不同城市不同季节,室内积尘的主要 PAEs 种类有所区别,季节对室内积尘 DEHP 含量的影响可能受到多方面的影响,因此并没有发现季节对室内积尘中 DEHP 含量的统一影响。

在本研究中,发现了几个居室住宅积尘中 DEHP 含量的影响因素。在单因素分析中,装修方面,有电脑和有地毯的家庭中,DEHP 含量相对较高,这说明室内环境中,装修材料^[19-20]和电子产品^[21]可能是室内积尘 DEHP 的来源之一。但采暖季和非采暖季的影响因素存在差异,采暖季 DEHP 污染主要与电脑的使用相关,其原因可能为采暖期室内温度高,加速了电脑材料中 DEHP 的挥发,而在非采暖季 DEHP 浓度主要与地毯的使用有关;在个人生活习惯方面,本研究发现,生活习惯与室内积尘中 DEHP 含量密切相关,室内种植花草、使用加湿器和使用净水设备与积尘 DEHP 含量显著相关($P < 0.05$),室内种植花草比不种植花草的住宅室内积尘 DEHP 含量更高,尤

其在采暖季,这可能是由于种植花草的相关工具会释放 DEHP。非采暖季节中,使用加湿器的家庭,居室积尘 DEHP 浓度明显高于不使用加湿器的家庭,造成这种情况的原因可能是加湿器增加了空气湿度,从而使 DEHP 在室内聚集,难以向室外扩散。目前,DEHP 在饮用水中被广泛检出,在本研究中使用净水设备的住宅中,DEHP 含量相对更高,有研究显示净水设备可能会使水中 DEHP 含量降低^[23],但该设备是否与积尘中 DEHP 浓度有关尚不清楚。多重线性回归结果发现 PM_{2.5} 和甲醛是居室积尘 DEHP 含量较高的危险因素,而 PM₁₀ 和人均 GDP 是 DEHP 污染水平的保护因素。有研究表明 PM_{2.5} 中广泛存在邻苯二甲酸酯^[23],因而 PM_{2.5} 含量高时,DEHP 浓度也会随之增高,与本研究结果一致,但对于甲醛尚未有研究发现它与 DEHP 含量存在关系;目前对 PM₁₀ 与 DEHP 含量关系的研究中,发现 DEHP 为 PM₁₀ 中主要污染物^[24],与本研究结果有所区别。经济水平相对高的家庭中,成员大多教育程度较高,有很好的防护意识也更有能力购买一些污染相对小的装修材料。此外有研究表明温度升高促进了 DEHP 的释放^[25],但本研究并未发现该结论,温度和湿度等对居室积尘 DEHP 污染浓度的影响有待进一步研究。

综上所述,本研究从非采暖、采暖季和上下风向区两方面对居室积尘的 DEHP 污染水平和特征进行了研究,并探索了潜在的家庭及个人影响因素,在一定程度上可以作为现有研究的补充。本研究也存在一些局限性:(1)此研究为一项横断面研究,研究无法确定影响因素与 DEHP 之间是否存在因果关系。(2)深圳、绵阳、石家庄和洛阳居室积尘 DEHP 浓度均存在季节差异,但季节差异不存在一致的特征,造成此结果的具体原因尚不明确。(3)该研究对象的选择受到经济水平、地理位置等方面的影响,建议未来相关研究进一步扩大样本范围、深入分析影响因素间的相互作用,并加强监测与评估工作,以提高人们对居住环境中 DEHP 污染问题的认识水平并促进解决该问题的措施落地。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Lin WT, Chen CY, Lee CC, et al. Air phthalate emitted from flooring building material by the Micro-Chamber method: Two-Stage emission evaluation and comparison[J]. *Toxics*, 2021, 9(9): 216.

[2] Luo X, Shu S, Feng H, et al. Seasonal distribution and ecological risks of phthalic acid esters in surface water of Taihu Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144517.

[3] Yoshida T, Mimura M, Sakon N. Intakes of phthalates by Japanese children and the contribution of indoor air quality in their residences [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*,

2020, 27(16): 19577-19591.

[4] Škrbić BD, Ji YQ, Đurišić-Mladenović N, et al. Occurrence of the phthalate esters in soil and street dust samples from the Novi Sad city area, Serbia, and the influence on the children's and adults' exposure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 312: 272-279.

[5] Li X, Zhang W, Lv J, et al. Distribution, source apportionment, and health risk assessment of phthalate esters in indoor dust samples across China[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2021, 12: 33.

[6] Wang LJ, Liu MM, Tao WD, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of phthalate esters in urban soil in the typical semi-arid city of Xi'an, Northwest China [J]. *Chemosphere*, 2018, 191: 467-476.

[7] Yang YY, Wang HY, Chang Y, et al. Distributions, compositions, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in surface sediment of Songhua river, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 152: 110923.

[8] 李亚妮,张晨曦,冯婉婷. DEHP 对哺乳动物生殖毒性的研究进展[J]. *延安大学学报:自然科学版*, 2021, 40(4): 108-112.

Li YN, Zhang CX, Feng WT. Research progress of DEHP to reproductive toxicity in mammalian animals [J]. *Journal of Yanan University(Natural Science Edition)*, 2021, 40(4): 108-112.

[9] Zhang Y, Lyu L, Tao Y, et al. Health risks of phthalates: A review of immunotoxicity[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 313: 120173.

[10] 蒋佩芸,贺真,李耀福,等. 邻苯二甲酸单乙基己基酯暴露对肝脏脂质代谢的影响及调控机制 [J]. *环境化学*, 2023, 42(10): 3317-3326.

Jiang PY, He Z, Li YF, et al. Effects of mono-(2-ethylhexyl) phthalate exposure on liver lipid metabolism and its regulatory mechanism[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(10): 3317-3326.

[11] 王小红,方瑾,张倩男,等. 基于斑马鱼幼鱼的塑化剂肝毒性危害识别研究[J]. *中国食品卫生杂志*, 2022, 34(5): 916-923.

Wang XH, Fang J, Zhang QN, et al. Hazard identification of phthalates based on hepatotoxicity of zebrafish larvae [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2022, 34(5): 916-923.

[12] 胡永毅. 增塑剂人体暴露后的致癌作用研究[J]. *自我保健*, 2021, 6(5): 274.

Hu YY. Study on carcinogenic effects of plasticizers after human exposure[J]. *Self Care*, 2021, 6(5): 274.

[13] Zhou XJ, Lian JL, Cheng Y, et al. The gas/particle partitioning behavior of phthalate esters in indoor environment: Effects of temperature and humidity [J]. *Environmental Research*, 2021, 194: 110681.

[14] 芮兴,熊波,沈伟,等. 温度及酸碱度对中药代煎包装袋中 DEHP 迁移量的影响研究[J]. *实用药物与临床*, 2020, 23(12): 1125-1128.

Rui X, Xiong B, Shen W, et al. Study on the effects of temperature and PH on DEHP migration in TCM decoction packaging plastic bags [J]. *Practical Pharmacy and Clinical Remedies*, 2020, 23(12): 1125-1128.

[15] Zhu QQ, Jia JB, Zhang KG, et al. Phthalate esters in indoor dust from several regions, China and their implications for human exposure[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1187-1194.

[16] Ouyang XZ, Xia M, Shen XY, et al. Pollution characteristics of 15 gas- and particle-phase phthalates in indoor and outdoor air in Hangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences - China*, 2019, 86:

- identification, and health risks of atmospheric Particle-Bound heavy metals in PM_{2.5} in Zhengzhou city: based on high-resolution data[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 1706-1715.
- [15] 唐大镜, 常会云, 张莹, 等. 2017-2019 年石家庄市 PM_{2.5} 中重金属污染及健康风险评价 [J]. *现代预防医学*, 2021, 48(7): 1177-1180, 1197.
- Tang DJ, Chang HY, Zhang Y, et al. Pollution characteristics and health risk evaluation of heavy metal particles in PM_{2.5} in Shijiazhuang, 2017-2019[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2021, 48(7): 1177-1180, 1197.
- [16] 石晓兰, 宗政, 彭辉, 等. 近 10 年华北背景大气 PM_{2.5} 中重金属健康风险及污染来源的变化 [J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5335-5343.
- Shi XL, Zong Z, Peng H, et al. Changes in health risks and pollution sources of atmospheric PM_{2.5}-bound metals in a background site in North China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5335-5343.
- [17] 肖凯, 任学昌, 陈仁华, 等. 典型西北钢铁城市冬季大气颗粒物重金属来源解析及健康风险评价——以嘉峪关为例[J]. *环境化学*, 2022, 41(5): 1649-1660.
- Xiao K, Ren XC, Chen RH, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in air particulates of typical northwest steel cities in winter: A case study in Jiayuguan [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(5): 1649-1660.
- [18] 程馨, 孙家佺, 凌凯. 城市大气颗粒物中锑污染研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(1): 123-127.
- Cheng X, Sun JN, Ling K. Research progress of Antimony pollution in urban atmospheric particulate matter [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2024, 46(1): 123-127.
- [19] 任万辉, 李云丹, 苏枫枫, 等. 沈阳市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1029-1037.
- Ren WH, Li YD, Su CC, et al. Pollution characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Shenyang[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1029-1037.
- [20] Wang X, Wang B, Xiao LL, et al. Sources of 24-h personal exposure to PM_{2.5}-bound metals: results from a panel study in Wuhan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(22): 27555-27564.

收稿日期: 2024-03-13

(上接第 1961 页)

- 107-119.
- [17] Du QZ, Wang JW, Fu XW, et al. Diffusion and accumulation in cultivated vegetable plants of di- (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) from a plastic production factory[J]. *Food Additives & Contaminants. Part a, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 2010, 27(8): 1186-1192.
- [18] Huang LH, Qiao YQ, Deng SX, et al. Phthalates in house dust in Chinese urban residences: Concentrations, partition, origin and determinants[J]. *Chemosphere*, 2022, 286(Pt 2): 131703.
- [19] 肖达, 邵墨, 付焯, 等. 表面印刷型地垫产品质量安全风险调研 [J]. *塑料工业*, 2023, 51(9): 143-147.
- Xiao D, Shao Z, Fu Y, et al. Investigation on quality and safety risk of surface printed floor mats [J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(9): 143-147.
- [20] Liujia F, Lixin W, Kexin W, et al. Phthalates in glass window films of chinese university dormitories and their associations with indoor decorating materials and personal care products [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22): 15297.
- [21] 卢春阳, 马奇菊, 苏福海. 电子电气产品邻苯二甲酸酯管控法规标准及企业应对[J]. *质量与认证*, 2020, (5): 69-72.
- Lu CY, Ma QJ, Su FH. Regulations and standards for the management and control of phthalates in electronic and electrical products and response of enterprises [J]. *China Quality Certification*, 2020, (5): 69-72.
- [22] 张庆, 张颖, 牛志广. 饮用水系统中邻苯二甲酸酯的污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(12): 114-121.
- Zhang Q, Zhang Y, Niu ZG. Contamination profiles and health risk assessment of phthalates in drinking water systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(12): 114-121.
- [23] 吴倩兰, 雷景铮, 王利军. 大学校园室内环境 PM_{2.5} 中 PAEs 污染特征及暴露风险 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(10): 2525-2535.
- Wu QL, Lei JZ, Wang LJ. Pollution characteristics and exposure risks of PAEs in PM_{2.5} of indoor environment on university campus[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(10): 2525-2535.
- [24] Ali N, Alhakamy NA, Ismail IMI, et al. Exposure to phthalate and organophosphate esters via indoor dust and PM₁₀ is a cause of concern for the exposed saudi population [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(4): 2125.
- [25] Mao SH, He CQ. Effect of particle size and environmental conditions on the release of di- (2-ethylhexyl) phthalate from microplastics[J]. *Chemosphere*, 2023, 345: 140474.

收稿日期: 2023-12-12