

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0226

周长风, 青宪, 廖海婷, 等. 空调滤网和风扇积尘中二噁英类污染特征及暴露风险[J]. 环境科学学报

ZHOU Changfeng, QING Xian, LIAO Haiting, et al. Contamination characteristics and exposure risks of PCDD/Fs in dust from fans and air conditioning filters[J]. Acta Scientiae Circumstantiae

空调滤网和风扇积尘中二噁英类污染特征及暴露风险

周长风¹, 青宪^{1,*}, 廖海婷¹, 吴明亮¹, 李晶晶², 黄锦琼¹, 付建平¹, 冯桂贤¹, 张漫雯¹, 张素坤¹

1. 生态环境部华南环境科学研究所, 国家环境保护环境污染健康风险评估重点实验室, 广州 510655

2. 广东环境保护工程职业学院, 佛山 528216

摘要: 选取广州和东莞地区的普通住宅和工厂内常用风扇、排气扇叶片和空调滤网上的积尘为研究对象, 利用同位素稀释高分辨气相色谱高分辨磁质谱方法分析积尘样品中 17 种 2, 3, 7, 8 氯取代二噁英类浓度, 揭示室内风扇和空调滤网积尘中二噁英类的污染水平与单体特征并计算暴露风险. 结果表明, 样品中 PCDD/Fs 的质量浓度为 316~13266 ng·kg⁻¹, 平均值为 3122 ng·kg⁻¹, 贡献最大的单体是 OCDD; PCDD/Fs 的毒性当量浓度为 5.19~561 ng·kg⁻¹, 平均值为 99.8 ng·kg⁻¹, 贡献最大的单体是 23478-PeCDF. 相较于其他城市住宅区灰尘, 本研究样品的毒性当量浓度处于较高水平, 个别点位高于工业区住宅灰尘. 风扇和空调滤网积尘中儿童和成人的总估计日摄入量分别为: 1.49×10⁻⁵~1.61×10⁻³ ng·kg⁻¹·d⁻¹ 和 1.26×10⁻⁶~1.36×10⁻⁴ ng·kg⁻¹·d⁻¹, 儿童和成人的非致癌风险分别为: 2.12×10⁻²~2.30 和 1.80×10⁻³~1.95×10⁻¹, 儿童和成人的终生癌症风险增量的分别为 2.23×10⁻⁶~2.41×10⁻⁴ 和 1.89×10⁻⁷~2.04×10⁻⁵. 因此, 风扇叶片和空调滤网上积尘中的二噁英类含量可能危及人体健康, 应定期清理, 且在清理时带上手套口罩, 做好防护.

关键词: 二噁英类; 室内积尘; 污染特征; 暴露风险

文章编号: 0253-2468(XXXX)XX-0001-09

中图分类号: X51

文献标识码: A

Contamination characteristics and exposure risks of PCDD/Fs in dust from fans and air conditioning filters

ZHOU Changfeng¹, QING Xian^{1,*}, LIAO Haiting¹, WU Mingliang¹, LI Jingjing², HUANG Jinqiong¹, FU Jianping¹, FENG Guixian¹, ZHANG Manwen¹, ZHANG Sukun¹

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655

2. Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216

Abstract: Dust samples were collected from fan blades and air conditioning filters in residential buildings and factories in Guangzhou and Dongguan. The concentrations of the seventeen 2, 3, 7, 8-substituted polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) in the dust samples were analyzed by isotope dilution high resolution gas chromatographic-high resolution mass spectrometric method to reveal the contamination levels and congener profiles of PCDD/Fs and evaluate the exposure risks. The concentrations of PCDD/Fs ranged from 316 ng·kg⁻¹ to 13266 ng·kg⁻¹, with a mean value of 3122 ng·kg⁻¹. OCDD was the most abundant congener. The toxic equivalent quantity (I-TEQ) values of PCDD/Fs ranged from 5.19 to 561 ng·kg⁻¹ (mean value: 99.8 ng·kg⁻¹), with 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF being the most abundant congener. Compared with other urban residential indoor dust, the I-TEQ values in this study are at a higher level, and the I-TEQ values in some dust samples are even higher than that of residential dust in industrial areas. The total estimated daily intakes for children and adults were in the range of 1.49×10⁻⁵~1.61×10⁻³ ng·kg⁻¹·d⁻¹ and 1.26×10⁻⁶~1.36×10⁻⁴ ng·kg⁻¹·d⁻¹, respectively. The non-carcinogenic risks for children and adults were in the range of 2.12×10⁻²~2.30 and 1.80×10⁻³~1.95×10⁻¹, respectively. Incremental lifetime cancer risks for children and adults were in the range of 2.23×10⁻⁶~2.41×10⁻⁴ and 1.89×10⁻⁷~2.04×10⁻⁵, respectively. The results indicated that PCDD/Fs in the dust of fan blades and air conditioning filters may endanger human health. Therefore, it is recommended to clean the dust on fan blades and air conditioning filters regularly. Gloves and masks should be worn to protect yourself when cleaning.

Keywords: dioxins; indoor dust; contamination characteristics; health risk

收稿日期: 2023-06-26

修回日期: 2023-07-20

录用日期: 2023-07-24

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No.PM-zx703-202112-337)

作者简介: 周长风(1994—), 女, 助理工程师, E-mail: 724378197@qq.com; * 责任作者, E-mail: qingxian@scies.org

1 引言(Introduction)

二噁英类化合物共有 210 种结构和性质相似的同类物或异构体,包括 75 种多氯代二苯并-对-二噁英(PCDDs)和 135 种多氯代二苯并呋喃(PCDFs).其中 17 种 2,3,7,8 位同时被氯原子取代的二噁英/呋喃具有致畸、致癌、致突变的生物毒性,关注度最高,是迄今为止毒性最强的化合物,被称为“世纪之毒”.2001 年,《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》将其列为首批优先控制的持久性有机污染物之一.长期接触低水平二噁英可导致机体蓄积量增加,从而引起多系统的健康损害,包括皮肤毒性、神经毒性、生殖毒性、内分泌干扰毒性和免疫毒性等(Tue *et al.*, 2010;徐培佩等,2017).

二噁英类化合物因极强的热稳定及化学稳定性,可在环境介质中长期存在,且不断循环于不同介质中(青宪等,2014;Klees *et al.*, 2015;徐培佩等,2017).自然界中二噁英类化合物的主要来源为燃烧过程和工业活动(Franzblau *et al.*, 2009;Liang *et al.*, 2021).人群主要的二噁英类暴露途径可分为饮食摄入和非饮食性接触途径(如非饮食性摄取、吸入和皮肤接触室内灰尘)(Zhang *et al.*, 2022).对于大部分城市生活的人们,约有 90% 的时间在室内度过,因此室内环境的暴露作为一种重要的暴露途径为人们所关注(Maertens *et al.*, 2004;Tue *et al.*, 2013;Deziel *et al.*, 2017).室内无处不在的灰尘作为多种污染物的主要载体,会使二噁英等污染物长期滞留于室内,可通过呼吸吸入、经手口接触意外摄入或者经皮肤吸收进入人体,被污染的灰尘颗粒是人类接触二噁英的主要途径之一(Suzuki *et al.*, 2007;Deziel *et al.*, 2012;Hinwood *et al.*, 2014;曹治国等,2017;Melymuk *et al.*, 2020;陈琳钰等,2021).

风扇和空调作为调节室内空气的电器,在工作过程中,空气和叶片、滤网摩擦产生静电,将在风扇叶片和空调滤网上吸附一定量的积尘.由于这些积尘具有松散多孔的形态,有较大的比表面积和较强的吸附性能,因此,除积尘本身携带的污染物外,其对室内空气中的污染物也有吸附作用.所以,研究风扇和空调滤网灰尘中污染物的含量特征能够帮助掌握室内空气的污染情况(Wang *et al.*, 2015;夏晓阳等,2017;陈琪,2020).另一方面,吸附了灰尘的风扇和空调可能成为房间中的“污染源”,在运转过程中,其上的灰尘和污染物将再次释放,污染室内空气.在清洗时,也可能与灰尘直接接触,或吸入扬起的飞灰,从而带来健康风险.

本研究选取广州和东莞地区的普通住宅和工厂内常用风扇、排气扇叶片和空调滤网上的积尘为研究对象,利用同位素稀释高分辨气相色谱高分辨磁质谱方法分析积尘样品中 17 种 2,3,7,8 氯取代二噁英类浓度,揭示室内风扇和空调滤网积尘中二噁英类的污染水平与单体特征,提示由该类家电带来的二噁英类的室内暴露风险.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 样品采集

选取广州 5 处普通住宅(GZ1~GZ5)、东莞的 1 处普通住宅(DG6)以及 2 处纸业厂(DG7~DG8)作为采集点.从采集点常用风扇、排气扇叶片和空调滤网上直接收集积尘,每个样品用锡纸刮板收集,包裹,存放于密封袋中待分析.采集点信息详见表 1.

表 1 采集点详细信息

Table 1 Detailed information of collection points

编号	采集途径	采集地点	清洗时间	通风情况	场地面积大小/m ²	采集质量/g
GZ1	空调	广州住宅	半年	经常	25	0.581
GZ2	风扇	广州住宅	7 个月	经常	20	1.922
GZ3	风扇	广州住宅	7 个月	经常	20	0.133
GZ4	风扇	广州住宅	从未	经常	15	0.295
GZ5	排气扇	广州住宅	半年	经常	5	0.388
DG6	风扇	东莞住宅	1 年	经常	15	3.276
DG7	风扇	东莞纸厂	从未	经常	300	0.841
DG8	风扇	东莞纸厂	从未	经常	300	2.044

2.2 主要实验仪器与试剂

仪器:高分辨气相色谱-高分辨双聚焦磁质谱联用仪(HP6890GC/AutoSpec Premier, HRMS, Waters);旋转蒸发仪(R-215型,瑞士Buchi公司);MGS氮吹仪(MG-2200型,日本Eyela公司)。

试剂及材料:PCDD/Fs标样购自Cambridge Isotope Laboratory;甲苯、正己烷、二氯甲烷均为农残级,其中甲苯购自Fisher公司,正己烷、二氯甲烷购自Honeywell公司;GPC, 200~400目,购自Bio-Beads公司;硅胶, 100~200目,购自默克公司;碱性氧化铝, 150目,购自sigma公司;弗罗里硅土, 60~100目,购自安谱公司;无水 Na_2SO_4 、 NaOH ,分析纯,购自广州化学试剂厂;浓 H_2SO_4 ,优级纯,购自广州化学试剂厂。

2.3 样品的提取与净化

采集的样品用甲苯进行索氏抽提24 h,抽提前加入 ^{13}C 标记的提取内标,抽提液经旋转蒸发浓缩后过硅胶-氧化铝-弗罗里硅土复合柱净化(从上至下:无水 Na_2SO_4 、40 g酸性硅胶、3 g中性硅胶、4 g碱性硅胶、3 g碱性氧化铝、1 g弗洛里硅土、无水 Na_2SO_4):用80 mL正己烷预淋洗净化柱,加入浓缩液后先用120 mL正己烷淋洗,再用25 mL正己烷、二氯甲烷混合液(95:5, V/V)淋洗去除干扰物,最后用100 mL二氯甲烷洗脱净化柱并收集洗脱液。洗脱液经旋转蒸发浓缩后过凝胶渗透色谱柱(GPC)净化:全程使用正己烷、二氯甲烷混合液(1:1, V/V)淋洗,先用50 mL混合液预淋洗柱子,将样品浓缩液转移至GPC柱(内径25 mm,高350 mm,含GPC填料30 g)后用70 mL混合液淋洗,此部分洗脱的主要为高分子类物质,弃掉,接着用50 mL混合液淋洗并接收。接收液经旋转蒸发及氮吹浓缩至30 μL 后加入 ^{13}C 标记的进样内标。

2.4 仪器分析条件

净化后样品的仪器分析由高分辨气相色谱-高分辨双聚焦磁质谱联用仪完成。仪器条件:色谱柱为DB-5(60 m \times 0.25 mm, 0.25 μm),载气流速为1.0 mL \cdot min $^{-1}$,进样量为1 μL ,不分流进样。色谱柱升温程序:初始温度为120 $^{\circ}\text{C}$,保持2 min,然后以8 $^{\circ}\text{C}\cdot$ min $^{-1}$ 的速率升至220 $^{\circ}\text{C}$,再以1.4 $^{\circ}\text{C}\cdot$ min $^{-1}$ 的速率升至260 $^{\circ}\text{C}$,最后以4 $^{\circ}\text{C}\cdot$ min $^{-1}$ 的速率升至310 $^{\circ}\text{C}$,保持4 min。进样口温度为280 $^{\circ}\text{C}$ 。质谱条件:电离能:35 eV;离子化电流:600 μA ;EI源温度:280 $^{\circ}\text{C}$;分辨率>10000。

2.5 质量保证与质量控制

分析样品时,同步进行方法空白与空白加标实验。样品检测限定义为3倍信噪比。空白加标回收率为70.2%~94.5%。标准曲线中间点浓度范围在 $\pm 25\%$ 以内。样品的 $^{13}\text{C}_{12}$ 标记的2,3,7,8-氯取代PCDD/Fs提取标回收率为53.7%~93.0%。

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 二噁英类含量

如表2所示为8个采集点样品中PCDD/Fs的浓度,总浓度为316~13266 ng \cdot kg $^{-1}$,平均值为3122 ng \cdot kg $^{-1}$,中值为1862 ng \cdot kg $^{-1}$ 。毒性当量浓度为5.19~561 ng \cdot kg $^{-1}$,平均值为99.8 ng \cdot kg $^{-1}$,中值为40.4 ng \cdot kg $^{-1}$ 。

本研究在采样的同时调查了清洗频率、通风情况、室内面积等信息,可能由于数据有限,未发现样品的二噁英类浓度与这些信息具有相关性。值得注意的是GZ4的二噁英类化合物浓度特别高,可能的原因是此风扇所在房间为单间宿舍,面积小、无抽油烟机,居住者曾在房间内烹饪。已有研究报道广泛存在于食品中的含氯添加剂(如三氯蔗糖和三氯丙醇)在高温条件下会造成油烟中的二噁英类污染(Wu *et al.*, 2011; 蔡铭伟, 2011),我国烹饪方式多用煎、炒、炸、煮等方式,且餐饮次数多、烹饪时间长、通风条件较差(余莉萍, 2007),所以油烟也是一大污染源。此风扇从未清洗过,风扇灰二噁英类浓度特别高可能是油烟带来的二次污染累积造成的。

对比其它文献报道室内积尘、土壤中二噁英类浓度,本研究结果接近广东省工业园区住宅(935~4.14 \times 10 3 ng \cdot kg $^{-1}$,均值2521 ng \cdot kg $^{-1}$),而高于商住区住宅(121~914 ng \cdot kg $^{-1}$,均值434 ng \cdot kg $^{-1}$)(钟英立等, 2019),高于长江中下游地区生活垃圾焚烧厂周边小区住宅自然沉降灰尘浓度(42.9~152 ng \cdot kg $^{-1}$),也高于同小区土壤浓度(34.1~348 ng \cdot kg $^{-1}$)(毛慧等, 2023),高于华东地区生活垃圾焚烧厂周边小区住宅自然沉降灰尘浓度(44.1~211 ng \cdot kg $^{-1}$),也高于同小区土壤浓度(25.2~377 ng \cdot kg $^{-1}$),高于澳大利亚住宅积尘浓度(总共30个样品,中值为

3.75 ng·kg⁻¹,未检出的比例非常高)(Hinwood *et al.*, 2014);低于香港空调过滤器积尘(2.94~41.6×10³ ng·kg⁻¹,均值为 15.4 ×10³ ng·kg⁻¹)(Yuan *et al.*, 2011). 相比其他类型的室内积尘,本研究中风扇和空调滤网积尘的质量浓度处于较高水平,原因可能是空调滤网、风扇上的积尘较为隐蔽、清理难度大,清扫频率一般低于地板落尘等其他室内积尘,来源也更复杂,会受到油烟、周边交通源污染的影响.但本研究结果低于同类型的香港空调过滤器积尘,则可能因为相较于广州、东莞的城市环境,香港密集的高层建筑环境以及多山的地形限制了空气流通,从而增加了污染物在室内环境中的积累.

表2 样品中二噁英浓度分布

目标化合物	GZ1	GZ2	GZ3	GZ4	GZ5	DG6	DG7	DG8
2378-TCDF	24.80	9.05	12.48	236.68	19.18	0.71	29.42	7.10
12378-PeCDF	17.45	13.16	9.55	338.10	17.14	2.60	40.25	6.15
23478-PeCDF	24.97	22.84	35.56	465.83	31.24	2.06	55.47	9.62
123478HxCDF	30.76	28.67	36.02	382.24	38.74	4.77	55.35	6.77
123678-HxCDF	27.38	28.71	35.41	376.27	37.99	4.42	54.36	6.71
234678-HxCDF	35.22	36.00	49.55	358.03	53.02	5.73	49.48	6.81
123789-HxCDF	2.98	4.14	10.53	77.12	6.73	1.52	7.73	0.86
1234678-HpCDF	115.85	144.60	208.05	1030.34	196.70	21.25	165.03	20.13
1234789-HpCDF	18.83	22.03	29.25	120.85	25.34	5.74	20.15	2.61
OCDF	190.36	226.55	310.08	764.47	332.76	47.66	145.34	19.98
2378-TCDD	1.94	0.73	3.68	21.66	0.31	0.09	0.31	0.36
12378-PeCDD	3.94	4.11	2.11	107.97	2.91	1.37	10.93	0.87
123478-HxCDD	5.83	6.09	1.65	84.20	8.51	2.33	8.87	1.02
123678-HxCDD	10.81	13.15	ND*	276.07	15.85	2.13	16.12	2.94
123789-HxCDD	11.51	12.59	2.78	206.51	18.14	1.48	13.63	1.86
1234678-HpCDD	122.20	137.58	244.29	1728.98	208.84	33.50	124.16	22.05
OCDD	1340.22	1028.64	1815.11	6691.56	1837.89	297.42	783.00	200.59
PCDFs	488.60	535.75	736.48	4149.93	758.84	96.46	622.58	86.74
PCDDs	1496.45	1202.89	2069.62	9116.95	2092.45	338.32	957.02	229.69
PCDFs/PCDDs	0.33	0.45	0.36	0.46	0.36	0.29	0.65	0.38
∑ PCDD/Fs	1985.08	1738.63	2806.09	13266.88	2851.26	434.79	1579.60	316.40
I-TEQ	36.30	33.00	44.78	561.43	44.54	5.19	63.04	9.99
WHO-TEQ	31.85	29.35	37.04	510.27	37.88	5.17	55.96	8.22

注:1)*ND为未检出.

表3为本研究及各地区文献报道的室内积尘毒性当量浓度.为了便于比较,使用WHO 2005 TEF计算本研究的毒性当量浓度,范围为5.17~510 ng·kg⁻¹,均值89.5 ng·kg⁻¹.此结果高于日本熊谷市和仙台市用真空吸尘器从地板上收集的室内灰尘浓度(Saito *et al.*, 2003),低于美国伊利诺伊州的索格特工业区周边住宅的阁楼积尘浓度(Gonzalez *et al.*, 2011),低于广东汕头贵屿镇印刷电路板回收车间地板、道路、校园和露天食品市场收集的表面灰尘(Leung *et al.*, 2011),低于美国路易斯安那州、密西西比州、阿拉巴马州前木材处理设施周边2 km内房屋阁楼积尘(Dahlgren *et al.*, 2007; Hensley *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2011),也低于德国不同城市和工业区普通住宅中用真空吸尘器从地板上收集的室内灰尘浓度(Wittsiepe *et al.*, 1997).本研究采样地点多为城市普通住宅,虽有两处造纸厂的风扇积尘,但毒性当量浓度水平较低.总体来说,本研究中风扇和空调滤网积尘的二噁英类毒性当量浓度水平相较于其他城市住宅区积尘更高,但低于其它地区的工业区住宅积尘.

3.2 同系物分布特征

所有采集点PCDFs/PCDDs比值均小于1,可认为样品中二噁英类并非来自固定焚烧源(唐雨慧,2015),主要来源于周边环境空气的迁移.各单体质量浓度占总浓度的百分比值见图1,可以看出,对PCDD/Fs质量

表3 各地区室内积尘毒性当量浓度和平均值

Table 3 Toxic equivalent concentrations and mean values of indoor dust accumulation by region

地区	灰尘类型	毒性当量浓度/ (ng·kg ⁻¹)	毒性当量浓度平均值/ (ng·kg ⁻¹)	参考文献
广东广州和东莞	风扇、空调滤网尘	5.17~510	89.5	本研究
广东工业园区	室内积尘	33.8~160	90.1	钟英立等, 2019
广东商住区	室内积尘	1.31~16.9	6.19	
香港	空调滤网尘	35.8~245	130	Yuan <i>et al.</i> , 2011
美国伊利诺伊州 工业区	室内积尘	29.4~136964	10203	Gonzalez <i>et al.</i> , 2011
广东汕头贵屿	积尘	21.8~1514	579	Leung <i>et al.</i> , 2011
美国路易斯安那州、 密西西比州、阿拉巴马州	室内积尘	8.2~13936	336	Feng <i>et al.</i> , 2011
美国密西西比州	室内积尘	0.91~22000	930	Dahlgren <i>et al.</i> , 2007
美国阿拉巴马州	室内积尘	8.4~502	145	Hensley <i>et al.</i> , 2007
日本熊谷市	室内积尘	8.60~26.0	15.6	Saito <i>et al.</i> , 2003
日本仙台市	室内积尘	5.9~30.5	16	
德国鲁尔、巴伐利亚	室内积尘	7.83~332	101	Wittsiepe <i>et al.</i> , 1997

浓度贡献最大的是 OCDD (49.6%~68.4%, 平均贡献率为 61.0%), 其次是 1234678-HpCDD (6.2%~13.0%, 平均贡献率为 8.2%)、OCDF (5.8%~13.0%, 平均贡献率为 9.7%) 和 1234678-HpCDF (4.9%~10.4%, 平均贡献率为 7.2%)。这与广东商住居民区住宅积尘 (钟英立等, 2019)、香港空调过滤器积尘 (Yuan *et al.*, 2011) 的二噁英类污染物分布特征相似。本研究中各单体质量浓度贡献率与广州商住区大气 (青宪等, 2013)、广州城区大气 PM₁₀ (刘丽君等, 2016) 中二噁英类污染物分布特征相比, OCDD 的贡献率更高; 与珠三角城市土壤 (迭庆杞等, 2014)、上海非工业区土壤 (邓芸芸等, 2008)、美国城市土壤 (Urban *et al.*, 2014) 相比, 相似的是 OCDD 的贡献率最高, 且远高于其他单体, 但比土壤样品 OCDD 贡献率占比低。

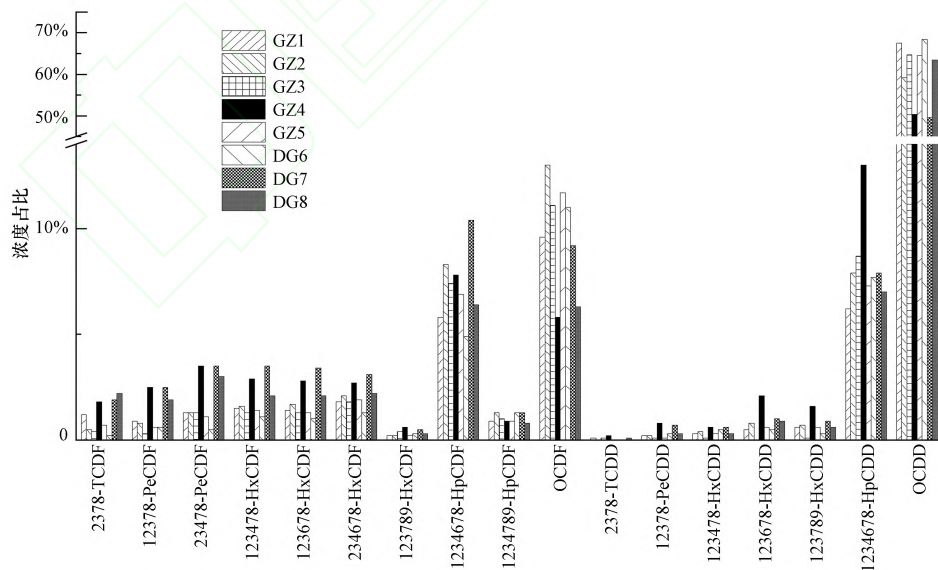


图1 各单体浓度比值

Fig. 1 Concentration ratio of each monomer

各单体毒性当量浓度占总浓度的百分比值见图2, PCDFs 的总 I-TEQ 高于 PCDDs, 对 PCDD/Fs 的 I-TEQ 贡献最大的是 23478-PeCDF (19.8%~48.2%, 平均贡献率为 37.2%), 其次是 123478-HxCDF (6.8%~9.2%, 平均贡献率为 8.2%)、123678-HxCDF (6.7%~8.7%, 平均贡献率为 7.9%) 和 234678-HxCDF (6.4%~11.9%, 平均贡献

率为9.5%).这与广州市区大气中二噁英类污染物毒性当量浓度分布相似(余莉萍,2007).

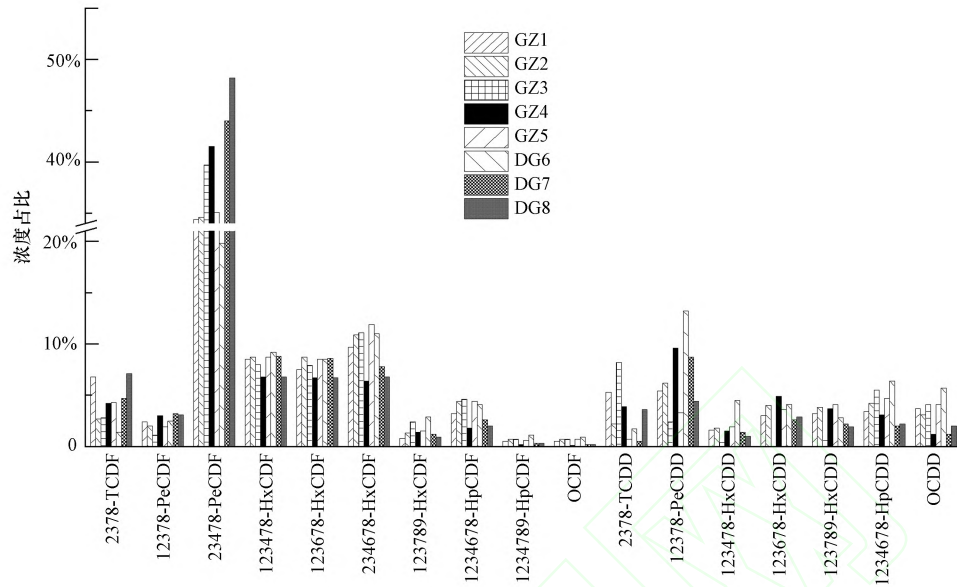


图2 I-TEQ 毒性当量浓度比值

Fig. 2 I-TEQ Toxic Equivalent Concentration Ratio

4 健康风险评估(Health risk assessment)

呼吸吸入、经口摄入和皮肤接触是人体对二噁英类化合物的3种主要暴露途径,对于室内积尘中二噁英类而言,经口摄入和皮肤接触是其进入人体的途径(陈文婷,2018).计算公式分别见式(1)~(2)(Klinčić *et al.*, 2021).

$$EDI_{ing} = (C_{dust} \times IR_{dust} \times AF_{gastro} \times HEF) / BW \quad (1)$$

$$EDI_{derm} = (C_{dust} \times DAS \times ESA \times AF_{derm} \times HEF) / BW \quad (2)$$

式中, EDI_{ing} 为经口摄入估计日摄入量($ng \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); C_{dust} 为室内积尘样品中测量的二噁英类浓度($ng \cdot kg^{-1}$); IR_{dust} 为室内积尘的灰尘摄入量,儿童取 $50 mg \cdot d^{-1}$,成人取 $20 mg \cdot d^{-1}$ (Lin *et al.*, 2022); AF_{gastro} 为胃肠道吸收分数,二噁英类为100%(国家环境保护部,2014); HEF 是室内家庭暴露分数,儿童为86.1%,成人为63.8%(Pawar *et al.*, 2017); BW 为体重,儿童取15.9 kg,成人取56.8 kg(国家环境保护部,2014). EDI_{derm} 为皮肤接触估计日摄入量($ng \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); DAS 为附着在皮肤上的灰尘率,幼儿为 $0.04 mg \cdot cm^{-2}$,成人为 $0.01 mg \cdot cm^{-2}$ (de la Torre *et al.*, 2020); ESA 是暴露的皮肤面积,儿童取 $2448 cm^2$,成人取 $5075 cm^2$ (国家环境保护部,2014); AF_{derm} 为皮肤吸收分数,二噁英类为0.03(国家环境保护部,2014).

随后将每种暴露途径的EDI除以口服参考剂量(RfD),得出危害商数HQ(或非致癌风险),分别见式(3)~(4).

$$HQ_{ing} = EDI_{ing} / RfD \quad (3)$$

$$HQ_{derm} = EDI_{derm} / RfD \quad (4)$$

式中, HQ_{ing} 为经口摄入危害商数, HQ_{derm} 为皮肤摄入危害商数.二噁英类的口服参考剂量RfD为 $7.00 \times 10^{-10} mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ (国家环境保护部,2014).

危害商数(HI)是 $HQ_{(ing/derm)}$ 的总和,可表示为式(5).

$$HI = \sum HQ_{(ing/derm)} \quad (5)$$

式中,HI为指由多种途径引起的非致癌风险. $HI \leq 1$ 表示没有明显的非致癌风险,而 $HI > 1$ 表示某些化合物可能对暴露人群造成非致癌风险,其概率随着HQ或HI值的增加而增加.

$$ILCR=EDI_{(ing/dem)} \times SF \quad (6)$$

式中,ILCR为终生癌症风险增量,它代表了个人因终生暴露于特定致癌物而患上任何类型癌症的可能性,ILCR低于 1×10^{-6} 表示不会引发任何健康影响,处于 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 表示风险在可接受的范围内,而高于 1×10^{-4} 表示存在致癌风险;SF是致癌斜率因子,二噁英类取 $0.15 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (徐梦侠,2009)。

本研究中风扇和空调滤网灰尘的二噁英类经不同途径的环境暴露量(EDI)、非致癌风险(HI)和终生癌症风险增量(ILCR)详见表4。

表4 广州、东莞空调和风扇积尘中二噁英类的环境暴露量和暴露风险

Table 4 Environmental exposure and exposure risk of dioxins in air conditioning and fan dust in Guangzhou and Dongguan

采样点	受众	经口摄入估计日摄入量/ ($\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	皮肤接触估计日摄入量/ ($\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	总估计日摄入量/ ($\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	总危害商数	终生癌症风险增量
GZ1	儿童	9.82×10^{-5}	5.77×10^{-6}	1.04×10^{-4}	1.48×10^{-1}	1.56×10^{-5}
	成人	8.18×10^{-6}	6.23×10^{-7}	8.80×10^{-6}	1.26×10^{-2}	1.32×10^{-6}
GZ2	儿童	8.92×10^{-5}	5.24×10^{-6}	9.45×10^{-5}	1.35×10^{-1}	1.42×10^{-5}
	成人	7.44×10^{-6}	5.66×10^{-7}	8.00×10^{-6}	1.14×10^{-2}	1.20×10^{-6}
GZ3	儿童	1.21×10^{-4}	7.11×10^{-6}	1.28×10^{-4}	1.83×10^{-1}	1.92×10^{-5}
	成人	1.01×10^{-5}	7.68×10^{-7}	1.09×10^{-5}	1.55×10^{-2}	1.63×10^{-6}
GZ4	儿童	1.52×10^{-3}	8.92×10^{-5}	1.61×10^{-3}	2.30	2.41×10^{-4}
	成人	1.27×10^{-4}	9.63×10^{-6}	1.36×10^{-4}	1.95×10^{-1}	2.04×10^{-5}
GZ5	儿童	1.20×10^{-4}	7.08×10^{-6}	1.28×10^{-4}	1.82×10^{-1}	1.91×10^{-5}
	成人	1.00×10^{-5}	7.64×10^{-7}	1.08×10^{-5}	1.54×10^{-2}	1.62×10^{-6}
DG6	儿童	1.40×10^{-5}	8.25×10^{-7}	1.49×10^{-5}	2.12×10^{-2}	2.23×10^{-6}
	成人	1.17×10^{-6}	8.91×10^{-8}	1.26×10^{-6}	1.80×10^{-3}	1.89×10^{-7}
DG7	儿童	1.70×10^{-4}	1.00×10^{-5}	1.81×10^{-4}	2.58×10^{-1}	2.71×10^{-5}
	成人	1.42×10^{-5}	1.08×10^{-6}	1.53×10^{-5}	2.18×10^{-2}	2.29×10^{-6}
DG8	儿童	2.70×10^{-5}	1.59×10^{-6}	2.86×10^{-5}	4.09×10^{-2}	4.29×10^{-6}
	成人	2.25×10^{-6}	1.71×10^{-7}	2.42×10^{-6}	3.46×10^{-3}	3.63×10^{-7}

由表4可知总估计日摄入量的范围:儿童为 $1.49 \times 10^{-5} \sim 1.61 \times 10^{-3} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,成人为 $1.26 \times 10^{-6} \sim 1.36 \times 10^{-4} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。经口摄入途径环境日摄入量的范围:儿童为 $1.40 \times 10^{-5} \sim 1.52 \times 10^{-3} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,成人为 $1.17 \times 10^{-6} \sim 1.27 \times 10^{-4} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;皮肤接触途径环境日摄入量范围:儿童为 $8.25 \times 10^{-7} \sim 8.92 \times 10^{-5} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,成人为 $8.91 \times 10^{-8} \sim 9.63 \times 10^{-6} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。儿童和成人的经口摄入途径环境日摄入量都大于皮肤接触途径,儿童的环境日摄入量高于成人,可能原因是前者体重更轻。儿童的承受能力较成人更弱,应多关注儿童的环境污染暴露问题。

非致癌风险的范围:儿童为 $2.12 \times 10^{-2} \sim 2.30$,成人为 $1.80 \times 10^{-3} \sim 1.95 \times 10^{-1}$ 。终生癌症风险增量的范围:儿童为 $2.23 \times 10^{-6} \sim 2.41 \times 10^{-4}$,成人为 $1.89 \times 10^{-7} \sim 2.04 \times 10^{-5}$ 。只有GZ4的儿童危害商数大于1,表示可能对儿童造成非致癌风险,同时也只有此采集点的终生癌症风险增量高于 1×10^{-4} ,表示存在致癌风险,应引起重视,该采集点应采取增加风扇叶片的清洗频率、及时清理积尘、开窗通风等措施减少灰尘的堆积,避免带来更大的健康风险。

图3显示了17种2,3,7,8氯取代二噁英类单体相对贡献率,其中风险贡献率最大的单体二噁英类化合物为23478-PeCDF(19.83%~48.16%),远高于贡献率第二的234678-HxCDF(6.38%~11.90%)。

5 结论(Conclusions)

1) 取自广州和东莞的普通居民住宅和造纸厂的风扇和空调滤网的积尘中PCDD/Fs的浓度为 $316 \sim 13266 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $3122 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$;PCDD/Fs的毒性当量浓度为 $5.19 \sim 561 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $99.8 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。风扇和空调滤网的积尘中二噁英类毒性当量浓度高于普通住宅区房屋积尘,但低于工业区住宅灰尘。

2) 对风扇和空调滤网的积尘中PCDD/Fs的质量浓度贡献最大的是OCDD,贡献率为49.6%~68.4%;对毒

性当量浓度贡献最大的是 23478-PeCDF, 贡献率为 19.8%~48.2%.

3) 风扇和空调滤网积尘对人体产生的暴露风险如下: 儿童和成人的总估计日摄入量分别为: $1.49 \times 10^{-5} \sim 1.61 \times 10^{-3} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.26 \times 10^{-6} \sim 1.36 \times 10^{-4} \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 儿童和成人的非致癌风险分别为: $2.12 \times 10^{-2} \sim 2.30$ 和 $1.80 \times 10^{-3} \sim 1.95 \times 10^{-1}$, 儿童和成人的终生癌症风险增量分别为 $2.23 \times 10^{-6} \sim 2.41 \times 10^{-4}$ 和 $1.89 \times 10^{-7} \sim 2.04 \times 10^{-5}$. 风扇和空调滤网上的积尘可能危及人体健康, 应定期清理避免灰尘堆积, 清理时应戴好口罩、手套, 做好防护措施.

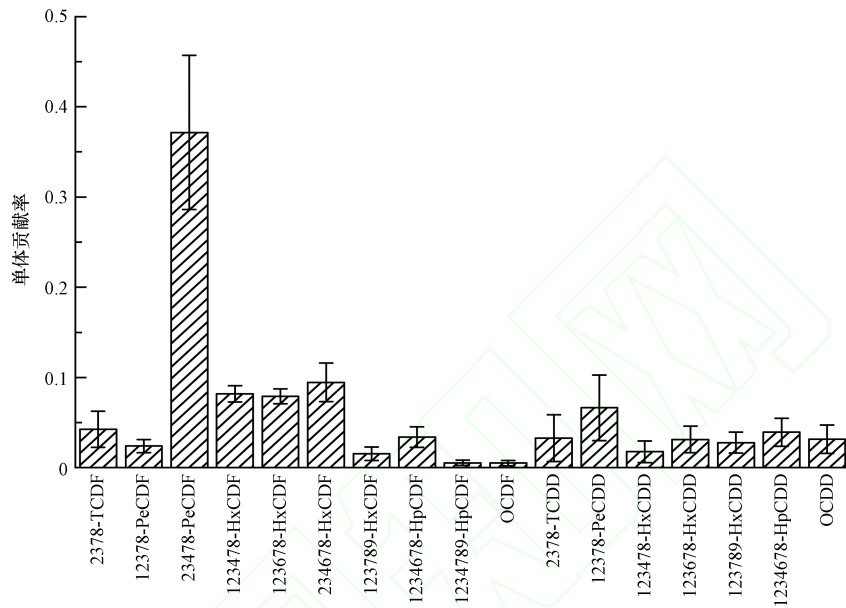


图3 各单体风险贡献率

Fig. 3 Risk contribution rate of each monomer

参考文献 (References):

- 蔡铭伟. 2011. 模拟烹饪对食物中类二恶英污染物存在水平的影响[D]. 沈阳: 东北大学
- 曹治国, 陈惠鑫, 赵磊成, 等. 2017. 室内灰尘中PBDEs的污染特征及人体暴露研究展望[J]. 环境科学与技术, 40(4): 36-44
- 陈琳钰, 陈仙仙, 何欢, 等. 2021. 室内灰尘中多环芳烃及其衍生物的赋存与人体暴露研究进展[J]. 环境化学, 40(2): 404-415
- 陈琪. 2020. 医院空调滤网积尘中耐药菌的生物膜形成能力研究[D]. 武汉: 华中科技大学
- 陈文婷. 2018. 珠江三角洲典型地区土壤中二噁英污染特征及健康风险评估研究[D]. 桂林: 桂林理工大学
- Dahlgren J, Takhar H, Schechter A, *et al.* 2007. Residential and biological exposure assessment of chemicals from a wood treatment plant [J]. *Chemosphere*, 67(9): S279-S285
- 邓芸芸, 贾丽娟, 殷浩文. 2008. 上海地区土壤二噁英污染状况调查[J]. 环境与职业医学, 25(4): 353-355
- de la Torre A, Navarro I, Sanz P, *et al.* 2020. Organophosphate compounds, polybrominated diphenyl ethers and novel brominated flame retardants in European indoor house dust: Use, evidence for replacements and assessment of human exposure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 382: 121009
- Deziel N C, Nuckols J R, Colt J S, *et al.* 2012. Determinants of polychlorinated dibenzo- p -dioxins and polychlorinated dibenzofurans in house dust samples from four areas of the United States [J]. *Science of the Total Environment*, 433: 516-522
- Deziel N C, Nuckols J R, Jones R R, *et al.* 2017. Comparison of industrial emissions and carpet dust concentrations of polychlorinated dibenzo- p -dioxins and polychlorinated dibenzofurans in a multi-center U.S. study [J]. *Science of the Total Environment*, 580: 1276-1286
- 迭庆杞, 聂志强, 黄启飞, 等. 2014. 珠江三角洲地区土壤中二噁英污染水平及其分布特征研究[J]. 环境污染与防治, 36(11): 67-71
- Feng L, Wu C, Tam L, *et al.* 2011. Dioxin furan blood lipid and attic dust concentrations in populations living near four wood treatment facilities in the United States [J]. *Journal of Environmental Health*, 73(6): 34-46
- Franzblau A, Zwica L, Knutson K, *et al.* 2009. An Investigation of Homes with High Concentrations of PCDDs, PCDFs, and/or Dioxin-Like PCBs in House Dust [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(3): 188-199
- Gonzalez J, Feng L, Sutherland A, *et al.* 2011. PCBs and dioxins/furans in attic dust collected near former PCB production and secondary copper facilities in Saugat, IL [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 4: 113-125
- 国家环境保护部. 2014. HJ 25.3—2014, 污染场地风险评估技术导则[S]. 北京: 中国环境科学出版社

- Hensley A R, Scott A, Rosenfeld P E, *et al.* 2007. Attic dust and human blood samples collected near a former wood treatment facility [J]. *Environmental Research*, 105(2): 194-199
- Hinwood A L, Callan A C, Heyworth J, *et al.* 2014. Polychlorinated biphenyl (PCB) and dioxin concentrations in residential dust of pregnant women [J]. *Environmental Science. Processes & Impacts*, 16(12): 2758-2763
- Klees M, Hiester E, Bruckmann P, *et al.* 2015. Polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in street dust of North Rhine-Westphalia, Germany [J]. *Science of the Total Environment*, 511: 72-81
- Klinčić D, Lovaković B T, Jagić K, *et al.* 2021. Polybrominated diphenyl ethers and the multi-element profile of house dust in Croatia: Indoor sources, influencing factors of their accumulation and health risk assessment for humans [J]. *Science of the Total Environment*, 800: 149430
- Leung A O W, Zheng J, Yu C K, *et al.* 2011. Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in surface dust at an E-waste processing site in Southeast China [J]. *Environmental Science & Technology*, 45(13): 5775-5782
- Liang Y, Tang Z, Jiang Y, *et al.* 2021. Lipid metabolism disorders associated with dioxin exposure in a cohort of Chinese male workers revealed by a comprehensive lipidomics study [J]. *Environment International*, 155: 106665
- Lin C M, Zeng Z J, Xu R B, *et al.* 2022. Risk assessment of PBDEs and PCBs in dust from an e-waste recycling area of China [J]. *Science of the Total Environment*, 803: 150016
- 刘丽君, 韩静磊, 付建平, 等. 2016. 广州城区大气PM₁₀中二噁英季节分布特征及健康风险评估[J]. *环境与健康杂志*, 33(5): 415-420
- Maertens R M, Bailey J, White P A. 2004. The mutagenic hazards of settled house dust: A review [J]. *Mutation research*, 567(2/3): 401-425
- 毛慧, 于建飞, 张宗祥. 2023. 生活垃圾焚烧厂周边住宅小区内二噁英类物质的暴露特征及健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 18(1): 394-404
- Melymuk L, Demirtepe H, Jílková S R. 2020. Indoor dust and associated chemical exposures [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 15: 1-6
- Pawar G, Abdallah M A E, de Sáa E V, *et al.* 2017. Dermal bioaccessibility of flame retardants from indoor dust and the influence of topically applied cosmetics [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 27(1): 100-105
- 青宪, 冯桂贤, 杨艳艳, 等. 2013. 基于后向轨迹对城市大气中二英长距离迁移来源的探讨[J]. *环境科学学报*, 33(11): 2959-2964
- 青宪, 苏原, 苏青, 等. 2014. 广州某工业区大气中PCDD/Fs含量水平及其季节性变化特征[J]. *环境科学*, 35(2): 464-469
- Saito K, Takekuma M, Ogawa M, *et al.* 2003. Extraction and cleanup methods of dioxins in house dust from two cities in Japan using accelerated solvent extraction and a disposable multi-layer silica-gel cartridge [J]. *Chemosphere*, 53(2): 137-142
- Suzuki G, Takigami H, Nose K, *et al.* 2007. Dioxin-like and transthyretin-binding compounds in indoor dusts collected from Japan: average daily dose and possible implications for children [J]. *Environmental Science & Technology*, 41(4): 1487-1493
- 唐雨慧. 2015. 电子垃圾拆解区及周围环境大气降尘中氯代和溴代二噁英的时空分布[D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)
- Tue N M, Suzuki G, Takahashi S, *et al.* 2010. Evaluation of dioxin-like activities in settled house dust from Vietnamese E-waste recycling sites: Relevance of polychlorinated/brominated dibenzo-p-dioxin/furans and dioxin-like PCBs [J]. *Environmental Science & Technology*, 44(23): 9195-9200
- Tue N M, Suzuki G, Takahashi S, *et al.* 2013. Dioxin-related compounds in house dust from New York State: Occurrence, in vitro toxic evaluation and implications for indoor exposure [J]. *Environmental Pollution*, 181(oct.): 75-80
- Urban D J, Wikoff S D, Bunch T A, *et al.* 2014. A review of background dioxin concentrations in urban/suburban and rural soils across the United States: Implications for site assessments and the establishment of soil cleanup levels[J]. *Science of the Total Environment*, 466-467:586-597
- Wang Y B, Sojinu S O, Sun J L, *et al.* 2015. Are cockroaches reliable bioindicators of persistent organic pollutant contamination of indoor environments [J]. *Ecological Indicators*, 50: 44-49
- Wittsiepe J, Ewers U, Mergner H J, *et al.* 1997. PCDD/F-content in house dust [J]. *Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin= International Journal of Hygiene and Environmental Medicine*, 199(6): 537-550
- Wu J J, Dong S J, Liu G R, *et al.* 2011. Cooking process: a new source of unintentionally produced dioxins [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10): 5444-5449
- 夏晓阳, 税勇, 黄宁宝, 等. 2017. 不同粒径空调灰尘中的多氯联苯分布特征[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 23(3): 473-482
- 徐梦侠. 2009. 城市生活垃圾焚烧厂二噁英排放的环境影响研究[D]. 杭州:浙江大学
- 徐培佩, 张一新, 张婷. 2017. 二噁英的危害及其防治措施[J]. *广东化工*, 44(13): 149-150
- Yuan K, Cheung K C, Cai Z W, *et al.* 2011. Chemical and bioanalytical characterization of dioxins in indoor dust in Hong Kong [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(4): 947-952
- 余莉萍. 2007. 广州大气中二噁英的浓度分布和几种典型二噁英排放源的初步研究[D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)
- Zhang B, Sun H, Wang Q. 2022. Household kindling behaviours and potential health risks of dioxins exposure in rural Northern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(4): 6072-6079
- 张宗祥, 毛慧, 吴晶, 等. 2022. 某生活垃圾焚烧企业周边住宅小区土壤和室内积尘中二噁英类研究及风险评估[J]. *环境科技*, 35(5): 54-57
- 钟英立, 陈蓉, 徐小静, 等. 2019. 工业区住宅积尘二噁英污染特征及暴露风险[J]. *化工管理*, 22: 46-50