

生活垃圾焚烧二噁英排放对人群健康影响研究进展

吉贵祥, 顾杰, 郭敏, 吴冠群, 石利利*

(生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 综述了二噁英对人体健康的危害特性, 以及我国生活垃圾焚烧厂二噁英排放浓度水平, 及其周边环境空气和土壤中二噁英污染浓度水平、人群暴露途径、剂量和健康影响。指出, 现有研究显示, 我国生活垃圾焚烧排放的二噁英浓度在合理范围之内, 垃圾焚烧厂周边人群二噁英暴露量普遍低于世界卫生组织(WHO)推荐的容许标准, 但也有研究发现, 垃圾焚烧会导致周边环境介质中二噁英浓度水平增高。提出, 应重点关注垃圾焚烧排放二噁英的长期低剂量暴露对人群健康的影响。

关键词: 垃圾焚烧; 二噁英; 污染状况; 暴露途径; 健康影响

中图分类号: X799.3; X503.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-6732(2020)05-0075-07

Research Progress on the Health Effects of Dioxin Emission from Domestic Waste Incineration

Ji Gui-xiang, Gu Jie, Guo Min, Wu Guan-qun, Shi Li-li*

(Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract: This paper summarized the harmful characteristics of dioxin to human health, the emission level of dioxin from Municipal solid waste incineration (MSWI), the concentration of dioxin in the air and soil, the exposure routes, dose and health impact of dioxin in the surrounding environment in China. The existing studies show that the concentration of dioxin emitted from MSWI in China is within a reasonable range. The exposure level of dioxin in the people around the waste incineration plant is generally lower than the allowable standard recommended by the World Health Organization (WHO). However, some studies have found that the concentration of dioxin in the surrounding environment were increased due to the incineration of garbage. It is suggested that more attention should be paid to the effects of long-term and low-dose exposure of dioxins from MSWI on human health.

Key words: Waste incineration; Dioxins; Pollution situation; Exposure pathways; Health effects

生活垃圾焚烧是我国城市垃圾无害化处理的重要技术手段, 垃圾焚烧产生的二噁英对周围环境及人群健康的影响是当前公众关注的热点问题。城市生活垃圾无害化处理是城市管理和环境保护的重要内容, 也是现代社会文明程度的重要标志, 直接关系到人民群众的切身利益和城市的可持续发展。目前, 生活垃圾焚烧已成为我国城市垃圾无害化处理的重要技术手段, 垃圾焚烧法处置具有减容、减量和能量回收等显著优点^[1]。随着人们对二噁英的认识逐渐加深, 垃圾焚烧过程中二噁英排

放对生态环境和人群健康的影响引起了广泛关注。目前我国针对垃圾焚烧过程的二噁英排放对周围大气、土壤、植物和水体等的影响研究较少, 特别是针对生活垃圾焚烧二噁英排放对周围生态环境和居民健康影响的研究近几年才刚刚开始。现对各国学者在垃圾焚烧二噁英排放的环境和健康影响研究成果进行阐述分析, 以期初步掌握我国垃圾焚烧发电项目对人群健康影响的基本情况, 为我国的垃圾焚烧规划及二噁英排放管理提供理论依据。

收稿日期: 2020-06-23; 修订日期: 2020-06-28

基金项目: 江苏环保科研课题基金资助项目(2018001); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金资助项目(GYZX200102)

作者简介: 吉贵祥(1982—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事环境与健康研究工作。

* 通讯作者: 石利利 E-mail: sll@nies.org

1 二噁英的健康危害特性

二噁英 (dioxin), 化学名为二氧杂环乙烷, 共有 200 余种同系物异构体, 其毒性与所含氯原子数及其取代的位置不同而有所差异^[2]。在 2,3,7,8 四个共平面取代位置均有氯原子的 17 个二噁英异构体是有毒的, 其中 6 种为多氯二苯并二噁英 (polychlorinated dibenzodioxin, PCDDs), 11 种为多氯二苯并呋喃 (polychlorinated dibenzofuran, PCDFs)。其中毒性最强的为 2,3,7,8-四氯二苯并-对-二噁英 (2,3,7,8-TCDD), 是目前毒性最强的化合物, 其急性毒性相当于氰化钾的 130 倍, 砒霜的 900 倍, 对豚鼠的经口半数致死量 (LD_{50}) 仅为 $1 \mu\text{g}/\text{kg}$, 且在人体中的生物半衰期约为 7~11 年^[3]。急性中毒主要表现为体重降低, 皮肤接触或全身暴露可致氯痤疮, 表现为皮肤过度角化和色素沉着。除极强的急性毒性外, 二噁英还具有致癌性、免疫毒性、肝脏毒性、生殖毒性、内分泌毒性和神经毒性等慢性毒性^[4-6]。

动物实验表明, 二噁英具有强致癌性, 以啮齿类最为敏感, 大鼠最低致肝癌剂量为 $10 \text{ ng}/\text{kg}$ 。1997 年国际癌症研究机构 (IARC) 将 2,3,7,8-TCDD 确定为 I 类人类致癌物^[7]。流行病学调查发现, 人类暴露二噁英类化合物有致畸、致癌、致突变的风险, 同时会引起激素水平变化、胎儿和新生儿畸形以及免疫功能下降等。在越南战争中, 美军广泛使用含二噁英的落叶剂, 导致妇女流产、死胎、畸胎发生率增加, 而使用落叶剂的美军后来也发生癌症或婴儿出生缺陷。陈卫红研究团队^[8]在 1998—2005 年开展的一项队列研究结果表明, 汽车铸造工人恶性肿瘤死亡风险与二噁英暴露之间存在显著的剂量-反应关系, 其中高二噁英暴露组工人的恶性肿瘤死亡风险是低(或无)二噁英暴露组工人恶性肿瘤死亡风险的 2.44 倍 (95% CI: 1.38~4.32)。一项来自德国的研究发现, 2,4,5-三氯苯酚和 2,4,5-涕生产工人, 循环系统疾病的死亡率与血清 2,3,7,8-TCDD 的水平呈正相关, 血清二噁英浓度高于 $39 \text{ pg TEQ}/\text{g}$ (WHO) 脂肪的工人因循环系统疾病死亡的风险显著增高^[9]。Egeland 等^[10]研究发现, 2,3,5-三氯苯酚生产工人的血清中 2,3,7,8-TCDD 与血清黄体生成素 (LH) 和卵泡刺激素 (FSH) 浓度呈正相关, 与总睾酮呈负相关 ($P < 0.05$)。天津市某化工厂生产五氯酚钠车间男性作业工人存在二噁英高暴露风险,

血浆中睾酮出现明显下降 ($P < 0.05$), 促卵泡生成素则出现明显增加 ($P < 0.05$)^[11]。

研究发现, 免疫系统是二噁英毒性作用最敏感的靶器官之一。二噁英暴露后能够显著改变机体各种免疫因子的表达, 并显著抑制免疫系统的发育^[12-13]。Mustaf 等^[14]研究发现, 小鼠暴露于 $0.04 \mu\text{g}/\text{kg}$ 的 2,3,7,8-TCDD 即可以产生持续性的杀伤性 T 细胞抑制作用, 并长期抑制辅助性 T 细胞功能, 对骨髓、胸腺、肝脏、肺脏中的淋巴干细胞都有毒性作用。一项人群研究结果表明, 与对照人群相比, 垃圾焚烧工人所有类型的免疫球蛋白及 2 种细胞因子 IL-4 和 $\text{INF}\gamma$ 的含量显著降低, T 细胞活化增高^[15]。中国台湾地区食用受二噁英和多氯联苯 (PCBs) 污染的米糠油的居民血清中的 IgA 和 IgM 浓度下降, 血液中 T 淋巴细胞百分含量下降^[16]。二噁英进入机体后主要在肝脏中进行生物转化, 可对肝脏产生损害作用。较高剂量或急性暴露可造成大鼠肝细胞变性坏死、转氨酶升高、肝脏肿大、脂肪肝、肝实质细胞增生、肝细胞氧化损伤等改变^[17]。二噁英长期低剂量暴露可导致肝脏肿瘤的发生, 大、小鼠最低致癌剂量为 $10 \text{ ng}/\text{kg}$ ^[18]。

伴随着二噁英导致的食品安全以及中毒事件的恶性影响, 2001 年国际社会通过了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》, 二噁英类化合物所造成的环境及公共卫生问题受到世人的关注。

2 我国生活垃圾焚烧厂二噁英排放状况

二噁英类污染物是生活垃圾焚烧行业的特征污染物之一。自从在垃圾焚烧的废气和废渣中检测出二噁英^[19], 垃圾焚烧产生的二噁英问题一直是各国研究的热点。20 世纪 80—90 年代, 因为垃圾焚烧技术不成熟, 对垃圾焚烧中产生的污染物缺乏控制, 致使二噁英排放浓度较高, 垃圾焚烧也成为许多国家二噁英的主要来源^[20-21]。

我国在 20 世纪 90 年代中后期开始对二噁英进行研究。2001 年, 田洪海等^[22]在全国范围内选取有代表性的 15 座垃圾焚烧厂进行了二噁英的监测, 结果发现约一半的垃圾焚烧厂排放二噁英超过《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2001) 原国家标准限值 $1.0 \text{ ng I-TEQ}/\text{m}^3$ 。2006 年, 有学者对国内 19 家城市生活垃圾焚烧厂进行调查, 绝大多数垃圾焚烧厂能满足 $1.0 \text{ ng I-TEQ}/\text{m}^3$ 的标准^[23]。谭灵芝等^[24]收集了 2006—2015 年 6 个

国控标准的生活垃圾焚烧厂二噁英检测数据,发现2006—2010年6个国控垃圾焚烧厂二噁英年平均浓度为 $1.52 \text{ ng I-TEQ/m}^3$,2011—2015年为 $0.74 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ 。

随着我国缔约《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》及垃圾焚烧行业技术水平与环保管理要求的提高,2014年原国家环保部和国家质检局发布的《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)要求生活垃圾焚烧炉从2016年1月1日起执行与欧美发达国家相同的排放限值(0.1 ng I-TEQ/m^3)。新标准实施以来,我国垃圾焚烧烟气二噁英排放浓度明显下降。最近的一项研究发现,国内13家生活垃圾焚烧企业烟气中二噁英排放浓度为 $0.0015 \sim 0.27 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ ^[25]。钱莲英等^[26]于2014—2015年,对浙江省14家企业32台生活垃圾焚烧炉的监测结果表明,烟气二噁英排放浓度为 $0.013 \sim 0.100 \text{ ng I-TEQ/m}^3$,平均值 $0.059 \text{ ng I-TEQ/m}^3$,能达到现行标准的限值要求,炉排炉的监测结果优于循环流化床焚烧炉。但相比欧盟国家,实际排放水平还存在一定差距。2004年德国对境内超过一半的垃圾焚烧设施的二噁英排放量调查发现,二噁英排放浓度为 $0.001 \sim 0.01 \text{ ng I-TEQ/m}^3$,为标准限值的1%~10%^[26]。

3 生活垃圾焚烧厂周围环境中二噁英污染状况

研究证明,大部分生活垃圾焚烧厂周围环境空气中二噁英浓度与生活垃圾焚烧厂排放烟气浓度成正比^[27]。环境空气中低氯代二噁英主要存在气相中,高氯代二噁英主要吸附于空气悬浮颗粒物中^[28]。气相中的二噁英易在光化作用下降解,存在于固相的二噁英不易降解,易通过干湿沉降进入土壤^[29],在土壤中半衰期可达10年之久。环境空气中的二噁英分布特征通常受气象条件、温度和排放源距离等因素影响。

通过对2006—2019年国内相关文献报道的分析发现(表1),我国生活垃圾焚烧厂周边环境空气中二噁英浓度为 $0.051 \sim 3.032 \text{ pg I-TEQ/m}^3$ 。对照日本环境空气质量标准限值 0.6 pg I-TEQ/m^3 ,大部分结果并未超过标准限值。2006—2007年浙江杭州某垃圾焚烧厂周边环境空气二噁英浓度出现超标,最高浓度 $3.032 \text{ pg I-TEQ/m}^3$ 。齐丽等^[30]于2014年4月—2015年1月对北京市某生活垃圾焚烧厂周边6 km范围内的大气二噁英污染状况调查发现,环境空气毒性当量(TEQ)变化范围为 $0.11 \sim 1.8 \text{ pg/m}^3$,其中秋季霾天4个采样点和冬季全部采样点超出日本环境空气质量标准限值。

表1 文献报道国内垃圾焚烧厂周边环境二噁英污染水平

研究地区	年份	样品类型	浓度水平	参考文献
杭州	2006—2007	环境空气	$0.059 \sim 3.032 \text{ pg I-TEQ/m}^3$	[29]
广东	2013	环境空气	$0.051 \sim 0.267 \text{ pg I-TEQ/m}^3$	[27]
北京	2014—2015	环境空气	$0.11 \sim 1.8 \text{ pg I-TEQ/m}^3$	[30]
嘉兴、南昌、淮安	2015—2016	环境空气	$0.0726 \sim 0.176 \text{ pg I-TEQ/m}^3$	[27]
北京	2016	环境空气	$0.15 \sim 0.19 \text{ pg I-TEQ/m}^3$	[34]
南京	2016	环境空气	$0.236 \sim 0.331 \text{ pg I-TEQ/m}^3$	[35]
南京	未知	环境空气	$0.100 \sim 0.200 \text{ pg I-TEQ/m}^3$	[35]
杭州	2006—2007	土壤	$0.390 \sim 6.38 \text{ ng I-TEQ/kg}$	[29]
珠三角地区	2012	土壤	$0.198 \sim 0.863 \text{ ng I-TEQ/kg}$	[31]
珠三角地区	2017—2019	土壤	$0.812 \sim 3.88 \text{ ng I-TEQ/kg}$	[31]
北京	2016	土壤	$6.1 \sim 20.2 \text{ ng I-TEQ/kg}$	[34]
南京	2016	土壤	$1.94 \sim 2.71 \text{ ng I-TEQ/kg}$	[35]
成都	2019	土壤	$0.25 \sim 7.5 \text{ ng I-TEQ/kg}$	[36]
天津	未知	土壤	$0.77 \sim 3.10 \text{ ng I-TEQ/kg}$	[37]

由表1可知,我国生活垃圾焚烧厂周边土壤二噁英浓度为 $0.198 \sim 20.2 \text{ ng I-TEQ/kg}$ 。对比加拿大农用地二噁英标准值 4 ng I-TEQ/kg ,北京某垃圾焚烧厂周边土壤二噁英浓度较高,建厂前土壤二噁英背景浓度为 0.19 ng I-TEQ/kg ,正式投产

1年后土壤二噁英浓度显著增高,3个监测点浓度为 $6.1 \sim 20.2 \text{ ng I-TEQ/kg}$,均超过加拿大农用地二噁英标准^[24]。王宇珊等^[31]通过对垃圾焚烧厂投产前后周边土壤中二噁英含量的对比研究发现,2012年投产前垃圾焚烧厂周边土壤二噁英含量为

163 ~ 591 ng/kg, 毒性当量为 0.198 ~ 0.863 ng I-TEQ/kg; 2017—2019 年投产后周边土壤二噁英含量为 151 ~ 1 750 ng/kg, 毒性当量为 0.812 ~ 3.88 ng I-TEQ/kg, 较投产前有所增加。Xu 等^[32]研究了杭州地区一座循环流化床垃圾焚烧炉对周边地区的环境影响, 发现该焚烧厂运行 1 年后, 其周边土壤中的二噁英 PCDD/Fs 总浓度和毒性当量分别增加了 33% 和 39%。邓芸芸等^[33]对上海地区 2 个垃圾焚烧厂周围 3 km 区域的土壤样品进行分析检测, 发现土壤样品中的二噁英含量最高值出现在 1 km 左右, 下风向样品的二噁英含量均值明显高于上风向。徐梦侠等^[29]对杭州市某垃圾焚烧厂周边土壤中的二噁英浓度水平进行跟踪调查, 2006—2010 年, 焚烧厂周边土壤中二噁英毒性当量增加了 1.11 ng I-TEQ/kg, 垃圾焚烧厂烟气排放对周边农田土壤中二噁英浓度的影响主要集中在周边 0 ~ 500 m 的范围内, 对 1.5 km 半径外的区域影响非常小。上述结果说明, 垃圾焚烧厂二噁英排放会对周边土壤造成一定程度的影响。

4 生活垃圾焚烧厂周边人群二噁英暴露与健康影响

研究发现, 虽然生活垃圾焚烧二噁英浓度控制在合理范围内, 不会对人群产生超额的风险, 但会造成周边普通人群和垃圾焚烧厂员工体内二噁英内负荷水平显著增高。刘帅等^[34]基于北京某垃圾焚烧厂的二噁英排放数据, 采用 AERMOD 模型和多介质扩散模型, 模拟了垃圾焚烧厂排放二噁英在大气中的扩散情况。研究表明, 垃圾焚烧厂周边居民通过呼吸、皮肤接触、泥土摄入和母乳喂养等途径暴露于二噁英的终身致癌风险为 5.28×10^{-7} , 其中呼吸和母乳喂养是最主要的暴露途径, 结果提示在现有排放状况下, 垃圾焚烧厂周边居民面临的健康风险在安全边际内。穆乃花等^[27]研究发现, 广东省某生活垃圾焚烧厂周边成人及儿童二噁英呼吸暴露量分别为 0.011 ~ 0.057 pg I-TEQ/(kg·d)、0.019 ~ 0.102 pg I-TEQ/(kg·d), 其风险水平处于可接受范围内。孙杰等^[38]研究发现, 浙江嘉兴、江西南昌和江苏淮安的 3 个垃圾焚烧厂周围的人群健康处于较为安全的状态, 但儿童二噁英日呼吸暴露量约是成人的 11 倍。杨文武等^[35]调查发现, 南京某典型生活垃圾焚烧发电厂周边成人和儿童通过环境空气、土壤、食物等暴露介质摄入二噁英

总量分别为 0.959 pg I-TEQ/(kg·d)、1.59 pg I-TEQ/(kg·d), 低于 4 pg I-TEQ/(kg·d) 的标准。颜炳捷^[39]对上海某新建生活垃圾焚烧厂周边调查发现, 焚烧厂周边成人二噁英日均呼吸暴露量为 0.013 ~ 0.017 pg I-TEQ/(kg·d), 儿童为 0.032 ~ 0.041 pg I-TEQ/(kg·d)。刘帅等^[34]发现, 北京某垃圾焚烧厂周边居民呼吸途径的终身致癌风险为 9.55×10^{-6} ~ 1.21×10^{-5} , 皮肤接触途径的终身致癌风险为 1.65×10^{-7} ~ 5.50×10^{-7} , 居民在泥土摄入, 食用蔬菜、鸡蛋、鸡肉的暴露途径下的终身致癌风险在 2.08×10^{-6} ~ 6.30×10^{-9} 范围内。齐丽等^[30]于 2014 年 4 月—2015 年 1 月对北京市某生活垃圾焚烧厂周边 6 km 范围内的大气二噁英污染状况调查发现, 秋季雾霾天的 4 个采样点和冬季全部采样点均超出日本环境空气质量标准限值 (TEQ: 6 pg/m³), 人群呼吸暴露量为 0.060 ~ 0.224 pg/(kg·d), 大气颗粒物重污染天气发生时的呼吸暴露风险需重点关注。

陈志健等^[40]对浙江省某垃圾焚烧厂周边儿童二噁英暴露调查发现, 距离垃圾焚烧厂 1 km 某镇 (污染区) 90 名儿童外周静脉血二噁英毒性当量浓度为 0.187 I-TEQ pg/g, 距离垃圾焚烧厂 200 km 外的某镇 (对照区) 60 名儿童外周静脉血二噁英毒性当量浓度为 0.054 I-TEQ pg/g, 两地儿童血液中二噁英浓度存在显著差异 ($P < 0.01$); 同时, 污染区鸡蛋、鲫鱼和土壤中二噁英浓度均显著高于对照区 ($P < 0.05$)。刘丽君^[41]采集了 20 名垃圾焚烧厂工人和 9 名周边村民的头发样品, 研究发现垃圾焚烧厂工人头发中二噁英毒性当量平均值为 3.363 ng I-TEQ/kg, 显著高于周边居民头发中二噁英毒性当量 (平均值为 1.518 ng I-TEQ/kg)。刘红梅^[42]对垃圾焚烧厂员工及背景区普通居民头发中二噁英的研究也有相同结论, 垃圾焚烧厂员工头发中二噁英含量略高于背景区域内普通居民。2009 年韩国的一项研究结果显示^[43], 工业废物焚烧厂工人和生活垃圾焚烧发电厂工人血清中二噁英的平均浓度水平分别为 41.57 和 9.86 pg-TEQ/g (WHO) 脂肪, 工业废物焚烧厂、生活垃圾焚烧发电厂和 10 km 范围外居民的血清中二噁英平均浓度水平分别为 17.64、13.31 和 6.91 pg TEQ/g (WHO) 脂肪。研究结果提示, 垃圾焚烧发电厂不仅增加了周边环境二噁英的浓度, 当地儿童的二噁英外暴露和内负荷水平也有所增加。

目前,关于垃圾焚烧厂对人群疾病发生的影响研究较少。最近的一项研究发现,二噁英污染地区成年男性血清中双氢睾酮、睾酮、雌二醇的水平与部分二噁英同类物浓度存在显著性相关,二噁英暴露可导致成年男性类固醇激素中的性激素变化异常^[44]。美国一项开展于1989—2013年的前瞻性队列研究结果表明^[45],居住区10 km范围内有二噁英排放设施的女性乳腺癌发生率显著增高(校正风险比=1.15,95%置信区间为1.03~1.28),当范围减小至5 km范围时,这种关联性更强(校正风险比=1.25,95%置信区间为1.04~1.52);在3.5和10 km范围内,较长的停留时间和较高的二噁英排放量与女性乳腺癌发生率具有显著的相关性。一项来自法国的人群研究结果显示^[46],生活在城市固体垃圾焚烧厂周边的人群发生非霍奇金淋巴瘤(NHL)的风险与血清中二噁英水平显著相关(比值比=1.12,95%置信区间为1.03~1.26)。Salerno等^[47-48]研究发现,在意大利维切利,居住在垃圾焚烧厂几公里附近居民的神经系统疾病、肝脏疾病、癌症的总体风险和结直肠癌、肺癌的风险均显著增加。一项回顾性队列研究发现,生活在意大利比萨垃圾焚烧厂附近的男性,由于自然原因、淋巴造血系统肿瘤和心血管疾病造成的死亡率呈上升趋势^[49]。

垃圾焚烧厂对人群的不良健康影响也存在一些不一致甚至结论相反的研究。Federico等^[50]发现,生活在意大利摩德纳一家垃圾焚烧厂附近的居民,患癌症的风险未出现明显增加。同样,Ranzi等^[51]也未观察到居住在垃圾焚烧厂周围3.5 km半径范围内人群的发病和死亡风险显著增加。Viel等^[52]根据垃圾焚烧设施的位置结合扩散模型,将人群按照4个暴露级别,研究二噁英排放与女性浸润性乳腺癌风险之间的关系,结果发现,在60岁以下的妇女浸润性乳腺癌与二噁英暴露无相关性,相反生活在最高暴露区的60岁以上妇女患浸润性乳腺癌的可能性降低了0.31倍(95%可信区间0.08~0.89)。因此,对于垃圾焚烧厂二噁英排放对周边人群健康的影响亟须进一步研究。

5 结语

生活垃圾焚烧发电项目作为公众关注度极高的热点社会问题,虽然目前的研究提示生活垃圾焚烧二噁英的控制浓度在合理的范围之内,垃圾焚烧

厂周边人群二噁英暴露量普遍低于世界卫生组织(WHO)推荐的容许标准,但也有较多的研究发现,垃圾焚烧会导致周边环境介质(如环境空气、土壤)中二噁英浓度水平增高,普通人群和垃圾焚烧厂员工体内二噁英内负荷水平也显著增高。此外,有限的流行病学研究结果也提示,生活垃圾焚烧产生的二噁英暴露与人群肿瘤发病的风险存在显著关联。因此二噁英作为一种强致癌物,垃圾焚烧排放的二噁英长期低剂量暴露对人群健康的影响还需要开展更为深入的调查和研究。

[参考文献]

- [1] 张益,赵由才. 生活垃圾焚烧技术[M]. 北京:化工出版社,2000.
- [2] 陆胜勇. 垃圾和煤燃烧过程中二噁英的生成、排放和控制机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [3] 刘云儒. 二噁英的毒理学研究进展[J]. 中华劳动卫生职业病杂志,2003(2):61-64.
- [4] VOS J G, MOORE J A, ZINKL J G. Effect of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin on the immune system of laboratory animals[J]. Environ Health Perspect, 1973(5):149-162.
- [5] WILLIAMSON M A, GASIEWICZ T A, OPANASHUK L A. Aryl hydrocarbon receptor expression and activity in cerebellar granule neuroblasts: implications for development and dioxin neurotoxicity[J]. Toxicol Sci, 2005, 83(2):340-348.
- [6] TAURA J, TAKEDA T, FUJII M, et al. 2,3,4,7,8-Pentachlorodibenzofuran is far less potent than 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin in disrupting the pituitary-gonad axis of the rat fetus[J]. Toxicol Appl Pharmacol, 2014, 281(1):48-57.
- [7] 林海鹏,于云江,李琴,等. 二噁英的毒性及其对人体健康影响的研究进展[J]. 环境科学与技术,2009,32(9):99-103.
- [8] 王丽华. 汽车铸造厂二噁英类化合物的测定分析及其与工人肿瘤死亡的关联研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [9] FLESCH-JANYS D, BERGER J, GURN P, et al. Exposure to polychlorinated dioxins and furans (PCDD/F) and mortality in a cohort of workers from a herbicide-producing plant in Hamburg, Federal Republic of Germany[J]. Am J Epidemiol, 1995, 142(11):1165-1175.
- [10] EGELAND G M, SWEENEY M H, FINGERHUT M A, et al. Total serum testosterone and gonadotropins in workers exposed to dioxin[J]. Am J Epidemiol, 1994, 139(3):272-81.
- [11] 董丽,张春梅,张芑,等. 职业接触二噁英对男工血浆中生殖激素水平的影响[C]//中国工程院2005"环境污染与健康"国际研讨会.北京,2005.
- [12] GASCON M, MORALES E, SUNYER J, et al. Effects of persistent organic pollutants on the developing respiratory and immune systems: a systematic review[J]. Environ Int, 2013, 52(2):

- 51-65.
- [13] KERKVIET N I. Recent advances in understanding the mechanisms of TCDD immunotoxicity [J]. *Int Immunopharmacol*, 2002, 2(2-3):277-291.
- [14] MUSTAFA A, HOLLADAY S D, GOFF M, et al. An enhanced postnatal autoimmune profile in 24 week-old C57BL/6 mice developmentally exposed to TCDD [J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2008, 232(1):51-59.
- [15] OH E, LEE E, IM H, et al. Evaluation of immuno-and reproductive toxicities and association between immunotoxicological and genotoxicological parameters in waste incineration workers [J]. *Toxicology*, 2005, 210(1):65-80.
- [16] 金军, 李灵军, 蒋可. 二噁英类化合物的毒性[J]. *上海环境科学*, 1995 (9):32-35,45.
- [17] TURKEZ H, GEYIKOGLU F, YOUSEF M I, et al. Propolis alleviates 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin-induced histological changes, oxidative stress and DNA damage in rat liver [J]. *Toxicol Ind Health*, 2013, 29(8):677-685.
- [18] VILUKSELA M, BAGER Y, TUOMISTO J T, et al. Liver tumor-promoting activity of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) in TCDD-sensitive and TCDD-resistant rat strains [J]. *Cancer Res*, 2000, 60(24):6911-6920.
- [19] OLIE K, VERMEULEN P L, HUTZINGER O. Chlorodibenzo-p-dioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in The Netherlands [J]. *Chemosphere*, 1977, 6(8):455-459.
- [20] QUASS U, FERMAN M, BROEKER G. The European dioxin air emission inventory project-final results [J]. *Chemosphere Oxford*, 2004, 54(9):1319-1327.
- [21] National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development. An inventory of sources and environmental releases of dioxin-like compounds in the United States for the years 1987, 1995 and 2000 [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2006.
- [22] 田洪海, 欧阳訥. 我国垃圾焚烧二噁英排放源的初步调查 [J]. *环境化学*, 2003(3):46-49.
- [23] NI Y, ZHANG H, FAN S, et al. Emissions of PCDD/Fs from municipal solid waste incinerators in China [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(9):1153-1158.
- [24] 谭灵芝, 孙奎立. 我国城市生活垃圾焚烧对环境健康的影响 [J]. *企业经济*, 2018, 37 (2):71-79.
- [25] 张萍萍, 邹志芬, 沈冬君, 等. 生活垃圾焚烧二噁英排放水平及特征研究 [J]. *环境与发展*, 2020, 32 (4):134-135,137.
- [26] 钱莲英, 潘淑萍, 徐哲明, 等. 生活垃圾焚烧炉烟气中二噁英排放水平及控制措施 [J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(3):57-60.
- [27] 穆乃花, 张素坤, 任明忠, 等. 垃圾焚烧厂周边空气中二噁英含量水平与暴露风险评估 [J]. *三峡环境与生态*, 2014(2):51-55,59.
- [28] 田振宇. 低氯代二噁英类在废物焚烧和典型化工产品中分布特征研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2014.
- [29] 徐梦侠. 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, 2009.
- [30] 齐丽, 任玥, 刘爱民, 等. 北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 [J]. *环境科学*, 2017, 38(4):1317-1326.
- [31] 王宇珊, 黄道建, 陈继鑫, 等. 某垃圾焚烧厂投产前后周边土壤二噁英的分布 [J/OL]. *环境科学研究*. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929>. 2020.02.14.
- [32] XU M X, YAN J H, LU S Y, et al. Source identification of PCDD/Fs in agricultural soils near to a Chinese MSWI plant through isomer-specific data analysis [J]. *Chemosphere*, 2008, 71(6):1144-1155.
- [33] 邓芸芸, 贾丽娟, 李康, 等. 上海市垃圾焚烧厂周围农业土壤中二噁英的含量以及分布特征 [C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集 (第二卷). 武汉. 2009:1156-1159.
- [34] 刘帅, 张震, 宋国君, 等. 北京某垃圾焚烧厂二噁英多介质扩散风险评估 [J]. *中国公共卫生*, 2018, 34(9):1224-1228.
- [35] 杨文武, 苏文鹏, 吴晶, 等. 生活垃圾焚烧发电厂周边环境二噁英污染水平及人群暴露评估 [J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(1):44-47.
- [36] 邹川. 典型行业 PCDD/Fs 排放特征及其控制研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2012.
- [37] 黄晨, 林晓青, 李晓东, 等. 典型行业周边土壤中二噁英浓度分布特性研究 [J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(6):693-697.
- [38] 孙杰, 李华娟, 周苗苗, 等. 垃圾焚烧厂周围环境空气中二噁英浓度分布及其健康风险评估 [J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(3):280-285.
- [39] 颜炳捷. 华东某市垃圾焚烧厂周围环境空气和土壤中二噁英浓度分布及暴露风险研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2018.
- [40] 陈志健, 王晓峰, 莫哲, 等. 垃圾焚烧发电地区儿童二噁英暴露水平及特征研究 [J]. *卫生研究*, 2013, 42(1):87-91.
- [41] 刘丽君. 南方某城市生活垃圾焚烧厂周围环境中二噁英类环境行为特征及健康风险研究 [D]. 贵阳:贵州大学, 2016.
- [42] 刘红梅. 城市生活垃圾焚烧厂周围环境介质中二噁英分布规律及健康风险评估研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [43] PARK H, IKONOMOU M G, KIM H S, et al. Dioxin and dioxin-like pcb profiles in the serum of industrial and municipal waste Incinerator workers in Korea [J]. *Environment International*, 2009, 35(3):580-587.
- [44] 沈斌, 孙献亮, 施丽丽, 等. 二噁英暴露对成年男性血清类固醇激素的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(6):2345-2352.
- [45] VOPHAM T, BERTRAND K A, JONES R R, et al. Dioxin exposure and breast cancer risk in a prospective cohort study [J]. *Environ Res*, 2020, 186:109516.
- [46] VIEL J F, CLEMENT M C, HAGI M, et al. Dioxin emissions from a municipal solid waste incinerator and risk of invasive

- breast cancer: a population-based case-control study with GIS-derived exposure[J]. *Int J Health Geogr*, 2008(7):4.
- [47] SALERNO C, MARCIANI P, BARASOLO E, et al. Exploration study on mortality trends in the territory surrounding an incineration plant of urban solid waste in the municipality of Vercelli (Piedmont, Italy) 1988 – 2009 [J]. *Ann Ig*, 2015, 27(4): 633 – 45.
- [48] SALERNO C, BERCHIALLA P, FOSSALE P G, et al. A geographical and epidemiological analysis of cancer incidence in the city of Vercelli, Italy, 2002—2009[J]. *Ig Sanita Pubbl*, 2016, 72(3):249 – 64.
- [49] ROMANELLI A M, BIANCHI F, CURZIO O, et al. Mortality and morbidity in a population exposed to emission from a municipal waste incinerator. A retrospective cohort study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(16):2863.
- [50] FEDERICO M, PIRANI M, RASHID I, et al. Cancer incidence in people with residential exposure to a municipal waste incinerator: an ecological study in Modena (Italy), 1991 – 2005 [J]. *Waste Manag*, 2010, 30(7):1362 – 1370.
- [51] RANZI A, ANCONA C, ANGELINI P, et al. Health impact assessment of policies for municipal solid waste management; findings of the SESPIR Project [J]. *Epidemiol Prev*, 2014, 38(5): 313 – 322.
- [52] VIEL J F, FLORET N, DECONINCK E, et al. Increased risk of non-Hodgkin lymphoma and serum organochlorine concentrations among neighbors of a municipal solid waste incinerator [J]. *Environment International*, 2011, 37(2):449 – 453.

栏目编辑 周立平 李文峻 王 湜

· 征订启事 ·

欢迎订阅 2021 年《环境科技》

《环境科技》是由江苏省生态环境厅主管,江苏省徐州环境监测中心、江苏省环境科学研究院联合主办的集学术性与实用性于一体的环境科学技术类期刊,为"中国科技论文统计源期刊"(中国科技核心期刊)。国内统一刊号:CN32-1786/X,国际标准刊号:ISSN 1674-4829。

本刊以直接为污染防治实践服务为宗旨,重点报道环境科学最新实用技术、科研成果、治理开发及国内外最新信息与动态,内容涉及水、气、声、固等污染处理技术及清洁生产、生态保护等实用技术的推广应用。

常设栏目有:研究报告、污染防治、环境评价与规划、专论与综述、环境管理、环保论坛等,从多角度向读者介绍国内外环境保护新成果、新技术、新动态、新经验等。对环境保护管理、科研院所、污染防治技术开发设计、环保产业、工矿企业等部门从事环保工作的管理和专业技术人员以及大专院校师生均有较强的参考价值,欢迎有关单位和个人订阅。

本刊为双月刊,大16开国际标准版,80页,每逢双月25日出版。国内订价(含邮费)15元/期,全年90元。全国各地邮局均可订阅。

联系方式:地址:徐州市新城区彭祖大道与太行路交叉口路西《环境科技》编辑部 邮编:221018;电话:0516-85635681,85635682,传真:0516-8573712;电子信箱:jshjkj@126.com

订阅方式:

1. 当地邮局订阅:邮发代号:28-179。
2. 银行转账汇款:转入账号:10107501040010729;转入名称:江苏省环境监测协会;开户行:中国农业银行股份有限公司南京茶亭东街支行;行号:103301010751;税号:513200005091823458。

《环境科技》编辑部