

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

杨文武^{1,2}, 苏文鹏², 吴晶², 吉贵祥³, 徐怀洲³

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 泰州市环境监测中心站, 江苏 泰州 225300;
3. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要:选取某典型生活垃圾焚烧发电厂为研究对象, 监测其周边环境空气、土壤、地下水、农作物等环境介质中二噁英的浓度水平, 初步评估周边人群二噁英暴露水平。研究表明, 该厂周边环境空气、土壤、地下水中二噁英测定值分别为 0.236 pgTEQ/m³ ~ 0.331 pgTEQ/m³、1.94 ngTEQ/kg ~ 2.71 ngTEQ/kg、0.17 pgTEQ/L ~ 0.26 pgTEQ/L, 企业排放的二噁英对周边环境影响较小; 成人和儿童在暴露介质中摄入二噁英总量分别为 0.959 pgTEQ/(kg·d) 和 1.59 pgTEQ/(kg·d), 均低于 4 pgTEQ/(kg·d) 的标准, 经大米和面粉摄入二噁英的量超过总暴露量的 90%, 提示食物是人群二噁英暴露的主要介质。

关键词:生活垃圾焚烧; 二噁英; 环境污染; 暴露评估

中图分类号: X508; X820.4

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2019)01-0044-04

Dioxins Pollution Levels and Exposure Assessment in A Domestic Waste Incineration Power Plant Surroundings

YANG Wen-wu^{1,2}, SU Wen-peng², WU Jing², JI Gui-xiang³, XU Huai-zhou³

(1. *Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*;
2. *Taizhou Environmental Monitoring Center, Taizhou, Jiangsu 225300, China*; 3. *Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing, Jiangsu 210042, China*)

Abstract: A typical domestic waste incineration power plant was selected as the research objective, and the concentration of dioxins in ambient air, soil, groundwater and crops were monitored for assessing human exposure level. The concentration of dioxins in ambient air, soil and groundwater in the surrounding area of the power plant were 0.236 pgTEQ/m³ ~ 0.331 pgTEQ/m³, 1.94 ngTEQ/kg ~ 2.71 ngTEQ/kg and 0.17 pgTEQ/L ~ 0.26 pgTEQ/L, respectively. Dioxins emissions had less impact on the surrounding environment. Dioxin exposure dose estimation showed that dioxin exposure levels for adults and children living in the study area were 0.959 pgTEQ/(kg·d) and 1.59 pgTEQ/(kg·d), respectively, which were below the tolerable intake level of 4 pgTEQ/(kg·d). Dioxin exposure dose through rice and flour were more than 90% of the total, revealing that food was the dominant source of dioxin exposure.

Key words: Domestic waste incineration; Dioxins; Environmental pollution; Exposure assessment

随着我国经济的发展和人们生活水平的提高, 垃圾产生量也逐年增加。据报道, 我国城市垃圾每年以 7.84% 的速度增长, 2017 年城市生活垃圾总量达到近 4 亿 t, 垃圾焚烧厂的投运数量也随之逐年增加。我国的垃圾焚烧厂已由 2000 年之前不足

10 座快速增加到 2017 年底的 285 座, 总焚烧规模

收稿日期: 2018-05-02; 修订日期: 2018-11-01

基金项目: 江苏省环保科研课题“江苏省垃圾焚烧及危废焚烧行业二噁英排放现状及特点研究”基金资助项目(2014013)

作者简介: 杨文武(1979—), 男, 江苏泰兴人, 高级工程师, 本科, 主要从事二噁英监测分析与研究工作。

达到近 30 万 t/d, 约占垃圾无害化处理能力的 40%, 垃圾的处置能力得到大幅提升。

垃圾焚烧厂在兴建和运行过程中给环境和人类带来的安全隐患值得关注, 尤其是焚烧过程中产生的二噁英污染。近年来, 各地发生多起因新建生活垃圾焚烧厂而引发的群体性事件, 造成了较大影响。2001 年, 联合国环境署通过了《关于持久性有机污染物 (POPs) 的斯德哥尔摩公约》, 二噁英污染问题受到了人类社会的广泛关注。自从 Olie 等^[1]首次发现城市生活垃圾焚烧的烟气和飞灰中存在二噁英等化合物之后, 众多学者针对其环境影响开展了深入研究, 内容涉及生活垃圾焚烧厂二噁英的排放特性、周围各种环境介质 (包括大气、土壤、水体和食物等) 中二噁英的浓度水平和分布规律^[2-3]。二噁英因其极强的亲脂性和环境稳定性, 会沉积储存于各种环境介质中, 并通过食物、水体等传递和富集到人体内, 最终危害人类健康和生态系统安全。

今以某典型生活垃圾焚烧发电厂为研究对象, 通过监测厂区周边环境空气、土壤、地下水、农作物等环境介质中二噁英的浓度水平, 分析该厂二噁英排放对周边环境的影响, 并采用污染物人体暴露评估模型, 初步评估厂区周边人群二噁英暴露水平。该研究有助于正确认识生活垃圾焚烧厂造成的二噁英污染问题, 为科学评估生活垃圾焚烧方式对周围人群的健康风险提供支持, 为生活垃圾焚烧设施的规划和选址提供依据。

1 研究方法

1.1 试验仪器与试剂

高分辨气相色谱-高分辨质谱联用仪 (HRGC-HRMS) (DFS, Thermo Corporation USA); 色谱柱 DB-5MS (J&W Scientific USA); 二噁英环境空气采样器 (Shibata, HV-1000F, Japan)。二噁英标准品: 采样内标 EPA23 SS, 提取内标 EPA23 IS, 进样内标 EPA23 RS (Weillington Laboratories CNA); 甲苯、丙酮、二氯甲烷、正己烷 (农残级) (J. T. Baker, USA); 壬烷 (优级纯); XAD-2 树脂 (Sigma Aldrich, USA); 试验用水为超纯水。

1.2 样品采集

为保证数据的一致性, 在同一地点采集环境空气和土壤样品。

环境空气共设置 4 个采样点, 1 个位于上风

向, 其余 3 个位于下风向最大落地点附近。按照《环境空气和废气 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.2-2008) (以下简称《HJ 77.2-2008》), 采用大流量空气采样器, 采样流量为 700 L/min, 每个样品采样总体积为 1 080 m³。采样前, 在每个样品中添加 ¹³C 同位素标记的二噁英类采样内标, 采集的样品避光低温保存。

在企业周边 1 km 范围内布设 3 个土壤采样点, 1 个位于上风向, 其余 2 个位于下风向最大落地点附近。按照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395-2000), 采集 0 cm~20 cm 表层土壤样品。

地下水样品在厂区内预留的地下水监测井采集。按照《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164-2004), 用棕色玻璃瓶采集 10 L 水样。

农作物共采集 3 个点位样品, 1 个位于上风向, 其余 2 个位于常年主导下风向。在夏季和秋季, 分别采集 2 kg 小麦和水稻样品。

1.3 样品前处理

分别按照《HJ 77.2-2008》《土壤和沉积物 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.4-2008)《水质 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.1-2008) 和《饲料中二噁英及二噁英类多氯联苯的测定 同位素稀释-高分辨气相色谱/高分辨质谱法》(GB/T 28643-2012) 处理环境空气、土壤、地下水和农作物样品, 包括提取、浓缩、多段硅胶柱和活性炭净化, 浓缩、添加进样内标, 以及定容测定。

1.4 质量保证与质量控制

在样品测定的同时进行空白和空白加标试验, 样品检出限定义为 3 倍信噪比。采样内标回收率为 70%~130%, 提取内标回收率为 30%~160%, 质控结果满足上述标准要求。

2 企业周边环境二噁英污染水平

2.1 环境空气

环境空气中二噁英监测结果表明, 下风向 3 个采样点二噁英类测定值分别为 0.260 pgTEQ/m³、0.331 pgTEQ/m³、0.315 pgTEQ/m³, 略高于上风向采样点测定值 0.236 pgTEQ/m³。我国目前尚未制定环境空气中二噁英浓度标准, 参照日本环境空气

质量标准(年均值 0.6 pgTEQ/m^3), 企业周边环境空气中二噁英浓度水平未超标。

2.2 土壤

土壤中二噁英监测结果表明, 下风向2个采样点二噁英类的测定值分别为 2.63 ngTEQ/kg 和 2.71 ngTEQ/kg , 高于上风向采样点测定值 1.94 ngTEQ/kg 。我国目前尚未制定土壤中二噁英浓度标准, 参照加拿大农用地标准(4 ngTEQ/kg)^[4]和荷兰乳牛业土壤标准(10 ngTEQ/kg)^[5], 企业周边土壤中二噁英浓度水平未超标。徐梦侠^[6]曾对某生活垃圾焚烧发电厂周围土壤中的二噁英进行调查, 其测定值为 $0.39 \text{ ngTEQ/kg} \sim 6.38 \text{ ngTEQ/kg}$, 平均值为 1.34 ngTEQ/kg , 与本研究结果相近。

2.3 地下水

厂区内地下水监测结果表明, 3个样品中二噁英类测定值分别为 0.17 pgTEQ/L 、 0.19 pgTEQ/L 、 0.26 pgTEQ/L , 低于荷兰地下水环境质量标准(1 pgTEQ/L), 说明企业排放的二噁英类物质对地下水影响较小。

2.4 农作物

厂区周边1 km范围内农作物监测结果表明, 3个水稻样品中二噁英类测定值分别为 0.19 ngTEQ/kg 、 0.20 ngTEQ/kg 、 0.21 ngTEQ/kg , 平均值为 0.20 ngTEQ/kg ; 3个小麦样品中二噁英类测定值分别为 0.097 ngTEQ/kg 、 0.13 ngTEQ/kg 、 0.097 ngTEQ/kg , 平均值为 0.11 ngTEQ/kg , 水稻和小麦中二噁英处于同一浓度水平。我国目前尚未制定农产品中二噁英类物质的限值标准, 对照欧盟植物源性饲料中二噁英限量标准(0.75 ngTEQ/kg), 厂区周边农作物中二噁英浓度水平未超标。

3 企业周边人群二噁英暴露评估

3.1 毒性评估

二噁英具有高度亲脂性, 可以在食物链中通过脂质发生转移和生物富集。研究表明, 处于食物链底层的蔬菜、水果等植物性食品中二噁英污染水平通常较低, 鱼类等海鲜中二噁英浓度最高, 蛋类、肉类和乳制品次之, 动物性食品中二噁英污染水平高于植物性食品^[7-8]。目前, 对于二噁英的健康危害最受关注的是其致癌性。根据动物实验与流行病学研究结果, 1997年国际癌症研究机构(IARC)将2,3,7,8-四氯二苯并对二噁英(2,3,7,8-TCDD)确定为I类人类致癌物。世界卫生组织

(WHO)规定的二噁英每日可耐受摄入量(TDI)1990年为 10 pgTEQ/kg , 1998年降至 $1 \text{ pgTEQ/kg} \sim 4 \text{ pgTEQ/kg}$ 。2008年发布的《关于进一步加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知》(环发[2008]82号)中, 规定我国二噁英事故及风险评价标准参照人体每日可耐受摄入量 4 pgTEQ/kg 执行, 经呼吸进入人体的允许摄入量按其10%即 0.4 pgTEQ/kg 执行。

3.2 人群暴露剂量估算

3.2.1 暴露评估模型^[9]

经呼吸道途径的暴露剂量估算公式为:

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{C_a \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式中: ADD_{inh} 为经呼吸道途径的暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; C_a 为空气中污染物的质量浓度, mg/m^3 ; IR 为摄取速率, m^3/d ; EF 为暴露频率, d/a ; ED 为暴露期, a ; BW 为人群平均质量, kg ; AT 为平均暴露时间, d 。

经口摄入途径的暴露剂量估算公式为:

$$\text{ADD}_{\text{die}} = \frac{C_f \times \text{IR} \times \text{FI} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

式中: ADD_{die} 为经口摄入途径的暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; C_f 为食物或土壤中污染物的质量比, mg/kg ; IR 为摄取速率, $\text{kg}/\text{餐}$ (食物); FI 为摄取分数(取1.0); EF 为暴露频率, d/a (水)或 $\text{餐}/\text{a}$ (食物); ED 为暴露期, a ; BW 为人群平均质量, kg ; AT 为平均暴露时间, d 。

3.2.2 暴露参数选择

成人和儿童暴露参数取值^[10-11]如下: 空气 IR 值分别为 $15.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $8.8 \text{ m}^3/\text{d}$; 大米 IR 值分别为 $0.246 \text{ kg}/\text{d}$ 和 $0.133 \text{ kg}/\text{d}$; 面粉 IR 值分别为 $0.144 \text{ kg}/\text{d}$ 和 $0.069 \text{ kg}/\text{d}$; 土壤 IR 值分别为 $5 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{d}$ 和 $7.8 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{d}$; BW 值分别为 59.7 kg 和 19.0 kg 。

3.2.3 暴露量估算

根据企业周边环境介质中二噁英类测定均值, 估算人体经不同摄入途径的暴露剂量, 结果见表1。由表1可见, 成人和儿童通过空气吸入及土壤、大米和面粉摄入二噁英的总量分别为 $0.959 \text{ pgTEQ}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 和 $1.59 \text{ pgTEQ}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 未超过 $4 \text{ pgTEQ}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 的标准, 儿童暴露量高于成人, 其中经大米和面粉摄入二噁英的比例超过90%; 成人和儿童每天经环境空气吸入二噁英的量

分别为 0.062 2 pgTEQ/kg 和 0.109 pgTEQ/kg, 低于我国垃圾焚烧发电厂环境影响评价标准限值 0.4 pgTEQ/kg。上述结果表明, 垃圾焚烧发电厂周边地区人群通过呼吸暴露于二噁英的潜在健康风险在可控范围内。

表1 人群暴露剂量估算结果

Table 1 Results of human exposure assessment

| 暴露介质 | 暴露剂量/[pgTEQ·(kg·d) ⁻¹] | |
|------|------------------------------------|---------|
| | 成人 | 儿童 |
| 环境空气 | 0.062 2 | 0.109 |
| 土壤 | 0.001 6 | 0.007 6 |
| 大米 | 0.677 | 1.15 |
| 面粉 | 0.218 | 0.328 |

4 结论

对某典型生活垃圾焚烧发电厂周边环境空气、土壤、地下水和农作物的调查结果表明, 该厂排放的二噁英污染水平较低, 对周边环境影响较小。该研究对于二噁英的暴露评估仅考虑了与垃圾焚烧排放可能相关的人群暴露途径(空气吸入、土壤和农作物摄入), 未对其他暴露途径(如畜禽水产品、蛋类、乳制品摄入)进行评估。通过人群暴露评估发现, 成人和儿童经空气吸入、土壤摄入二噁英的量分别为 0.063 8 pgTEQ/(kg·d) 和 0.117 pgTEQ/(kg·d), 而经大米和面粉摄入二噁英的量分别为 0.895 pgTEQ/(kg·d) 和 1.48 pgTEQ/(kg·d), 提示食物是人群二噁英暴露的主要介质。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 巩宏平, 刘劲松, 潘荷芳, 等. 杭州市环境空气中二噁英类物质检测与分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2012, 24(2): 27-30.
- [4] CCME. Canadian environmental quality guidelines, summary table [S]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2002.
- [5] OTTE P F, LIJZEN J P A, OTTE J G, et al. Evaluation and revision of the CSOIL parameter set, RIVM Report 71170102 [R]. The Netherlands: RIVM, 2001.
- [6] 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.
- [7] 张磊. 我国居民二噁英类物质膳食暴露及机体负荷研究 [D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2014.
- [8] 刘潇, 何金铜, 赵明, 等. 典型地区食品中二噁英的污染水平分析 [J]. *公共卫生与预防医学*, 2016, 27(4): 19-22.
- [9] 环境保护部. HJ 875—2017 环境污染物流人群暴露评估技术指南 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [10] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 221.
- [11] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 0—5岁) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016: 239.

本栏目编辑 谢咏梅 姚朝英

(上接第18页)

- [7] 张雯婷, 王雪松, 刘兆荣, 等. 贵阳建筑扬尘 PM₁₀ 排放及环境影响的模拟研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(2): 258-264.
- [8] 王京, 王初, 陈振楼. 贵阳市城区近地面 PM₁₀/PM_{2.5} 及重金属污染水平研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(4): 74-76, 124.
- [9] 孙广权, 李金娟, 陶芸, 等. 都匀 PM₁₀ 中水溶性无机离子分布特征与来源分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2015, 27(6): 13-16.
- [10] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市秋、冬季 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析 [J]. *地球与环境*, 2015, 43(3): 285-289.
- [11] 房春生, 王思宇, 杨舒媚, 等. 应用 PMF 和 PCA 探究长春市大气中 PM₁₀ 污染来源 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(8): 17-21.
- [12] 张霖琳, 王超, 朱红霞, 等. 北京混合功能区夏冬季细颗粒物组分特征及来源比较 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1): 36-41.
- [13] 胡鸣, 张懿华, 赵倩彪. 上海市冬季 PM_{2.5} 无机元素污染特征

及来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(7): 1993-1999.

- [14] KUANG C, NEUMANN T, NORRA S, et al. Land use-related chemical composition of street sediments in Beijing [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2004, 11(2): 73-83.
- [15] WATSON J G, CHOW J C, HOUCK J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. *Chemosphere*, 2001, 43(8): 1141-1151.
- [16] DUAN F K, LIU X D, YU T, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(9): 1275-1282.
- [17] SHI G L, LI X, FENG Y C, et al. Combined source apportionment, using positive matrix factorization-chemical mass balance and principal component analysis/multiple linear regression-chemical mass balance models [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(18): 2929-2937.