

# 上海某生活垃圾焚烧炉周边大气中二噁英类化合物监测以及人群呼吸暴露量评估

邓芸芸<sup>1,2,3</sup>, 贾丽娟<sup>3</sup>, 殷浩文<sup>3</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 上海市检测中心生物与安全检测实验室, 上海 201203

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2019.19355

## 摘要：

**[背景]** 焚烧发电是目前城市生活垃圾处理的一种主要方式, 同时也会产生二噁英污染, 其可直接进入呼吸系统, 影响人体健康。

**[目的]** 利用被动采样技术获取上海某生活垃圾焚烧炉周边大气环境中二噁英类化合物 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/furans, PCDD/Fs) 的浓度、污染特征以及季节变化, 并且评估周边人群的二噁英类化合物呼吸暴露量。

**[方法]** 选取上海地区某生活垃圾焚烧炉主导风向下风向距离焚烧炉950 m (西北向, 采样点A) 和700 m (东南向, 采样点B) 左右两个点位, 利用被动采样技术在2017年逐月采集并分析环境大气中17种2, 3, 7, 8位被氯取代的PCDD/Fs的含量, 比较不同季节污染特征, 并分析同系物的组成特征。利用主成分分析对生活垃圾焚烧炉周边环境大气中PCDD/Fs进行溯源分析。根据分析所得环境大气含量数据计算生活垃圾焚烧炉周边人群PCDD/Fs呼吸暴露量。

**[结果]** 上海地区某生活垃圾焚烧炉周边大气中PCDD/Fs的浓度平均值 (范围) 为1.23 (0.378~2.49) pg/m<sup>3</sup> (采样点A) 和1.37 (0.487~3.36) pg/m<sup>3</sup> (采样点B); 对应的毒性当量 (TEQ) 平均值 (范围) 为113 (30.9~195) fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点A) 和119 (43.2~409) fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点B)。溯源结果表明研究区域环境大气中PCDD/Fs的主要来源为垃圾焚烧和交通污染。该生活垃圾焚烧厂周边成人的PCDD/Fs呼吸暴露量为9.16~39.1 fg WHO-TEQ/(kg·d); 儿童的PCDD/Fs呼吸暴露量为18.5~79.0 fg WHO-TEQ/(kg·d)。

**[结论]** 上海某生活垃圾焚烧炉周边大气样品 (被动采样) 中PCDD/Fs的含量略高于上海城市背景 (被动采样) 中PCDD/Fs的含量。研究区域大气中PCDD/Fs可能主要来源于垃圾焚烧源和交通污染源。该焚烧厂周边成人和儿童的PCDD/Fs呼吸暴露量均低于人体每日可耐受摄入量的10%。

**关键词：** 二噁英；被动采样；垃圾焚烧炉；呼吸暴露量

**Monitoring of atmospheric PCDD/Fs and evaluation of human inhalation exposure levels in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai** DENG Yun-yun<sup>1,2,3</sup>, JIA Li-juan<sup>3</sup>, YIN Hao-wen<sup>3</sup> (1.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Bioassay and Safety Assessment Laboratory, Shanghai Academy of Public Measurement, Shanghai 201203, China)

## Abstract:

**[Background]** Waste incineration power generation is a main municipal waste disposal method, but it also releases dioxins into the air, which can directly enter respiratory system and produce adverse health effects.

**[Objective]** Passive sampling technique is used to obtain the concentration, pollution characteristics, and seasonal changes of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/furans (PCDD/Fs) in the atmosphere around a municipal solid waste incinerator (MSWI) in Shanghai, and to assess the exposure levels of PCDD/Fs in surrounding population.

**[Methods]** The atmospheric samples were collected every month in 2017 using passive sampling technique from two sampling sites, 950 m (northwest, site A) and 700 m (southeast, site B)

## 组稿专家

陈卫红 (华中科技大学同济医学院公共卫生学院)

E-mail: wchen@mails.tjmu.edu.cn

殷浩文 (上海市检测中心生物与安全实验室)

E-mail: yinhaowen@126.com

## 基金项目

上海市浦东新区科技发展基金 (PKJ2015-C04);

上海市自然科学基金 (16ZR1430300)

## 作者简介

邓芸芸 (1982—), 女, 硕士, 工程师;

E-mail: dengyy@apm.sh.cn

## 通信作者

邓芸芸, E-mail: dengyy@apm.sh.cn

利益冲突 无申报

收稿日期 2019-05-23

录用日期 2019-10-10

文章编号 2095-9982(2019)11-1017-07

中图分类号 R122

文献标志码 A

## ►引用

邓芸芸, 贾丽娟, 殷浩文. 上海某生活垃圾焚烧炉周边大气中二噁英类化合物监测以及人群呼吸暴露量评估 [J]. 环境与职业医学, 2019, 36 (11): 1017-1023.

## ►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2019.19355

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

DENG Yun-yun, E-mail: dengyy@apm.sh.cn

Competing interests None declared

Received 2019-05-23

Accepted 2019-10-10

## ►To cite

DENG Yun-yun, JIA Li-juan, YIN Hao-wen. Monitoring of atmospheric PCDD/Fs and evaluation of human inhalation exposure levels in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2019, 36(11): 1017-1023.

## ►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2019.19355

downwind of the MSWI in Shanghai. Seventeen kinds of 2, 3, 7, 8 substituted PCDD/Fs in the atmosphere were analyzed to compare the seasonal variation and composition characteristics of the homologues. Principal component analysis was applied for source identification of PCDD/Fs in the ambient atmosphere around the MSWI. According to the atmospheric concentration data, the PCDD/Fs inhalation exposure levels of the surrounding population were calculated.

**[Results]** The mean concentrations (ranges) of PCDD/Fs in the atmosphere around the MSWI in Shanghai were 1.23 (0.378-2.49)  $\text{pg}/\text{m}^3$  (Site A) and 1.37 (0.487-3.36)  $\text{pg}/\text{m}^3$  (Site B), respectively; the toxic equivalent quantity (TEQ) concentration ranges (means) were 30.9-195 (113)  $\text{fg WHO-TEQ}/\text{m}^3$  (Site A) and 43.2-409 (119)  $\text{fg WHO-TEQ}/\text{m}^3$  (Site B), respectively. The results of source identification showed that the main sources of PCDD/Fs in the atmosphere of the study area were waste incineration and traffic pollution. The PCDD/Fs inhalation exposure level for surrounding adults was in the range of 9.16-39.1  $\text{fg WHO-TEQ}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ , and the level for surrounding children was in the range of 18.5-79.0  $\text{fg WHO-TEQ}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ .

**[Conclusion]** The concentration of PCDD/Fs in atmosphere (passive sampling) around the MSWI in Shanghai is slightly higher than that (passive sampling) in the background area of Shanghai. PCDD/Fs in the atmosphere of the study area are probably released from waste incineration and traffic pollution. The PCDD/Fs inhalation exposure levels for surrounding adults and children are all below 10% of the acceptable daily intake amount.

**Keywords:** dioxins; passive sampling; waste incinerator; inhalation exposure level

随着中国城市化进程的加快,垃圾围城成为许多城市面临的困境。目前垃圾处理的方式主要为焚烧发电和填埋。截至2017年,上海日产生生活垃圾约2.5万t,其中60%焚烧处理,其余为填埋和综合处理。城市的土地资源十分宝贵,焚烧是未来城市生活垃圾的主要处置方式。但是生活垃圾焚烧技术带来的二次污染,引发了人们对二噁英这种污染物的关注<sup>[1]</sup>。环境大气中的二噁英可直接进入呼吸系统,影响人体健康。然而,由于采样、分析仪器和费用的限制,上海地区环境大气中二噁英类化合物 (polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans, PCDD/Fs) 的数据非常有限<sup>[2-4]</sup>。

目前,大多数研究获取环境大气中二噁英类化合物浓度的方式为主动采样,虽然主动采样能在较短时间内获取空气中PCDD/Fs的日均浓度,但是主动采样设备往往要在有电源供电的情况下长时间连续运行,不易管理<sup>[5]</sup>。诸多不足之处都限制了主动采样器的广泛使用以及环境大气中PCDD/Fs监测研究的深度与广度。而大气被动采样技术则是以污染物在不同环境介质之间的逸度差为驱动力,通过污染物的自然扩散作用被采样材料吸附。由于结构简单、成本低廉、携带方便、无须电源的特点,被动采样技术适合大区域范围的多点同时采样和野外采样,能通过较长时间(一般几个月)的采样获得空气中PCDD/Fs长时间平均浓度,更有利于开展长时间低剂量暴露的健康风险评价。国内外已有研究采用被动采样技术评估污染源周边人群健康风险<sup>[1, 6-8]</sup>。

本研究利用聚氨酯泡沫大气被动采样技术逐月采集并分析大气样品,研究上海某生活垃圾焚烧炉周边大气中PCDD/Fs的浓度与污染特征,并对焚烧炉周边

大气中PCDD/Fs的来源进行分析,以期对环境管理部门有效开展垃圾焚烧处理提供数据参考和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况以及样品采集

选取上海浦东某大型生活垃圾焚烧厂周边作为研究区域。该生活垃圾焚烧厂有3台焚烧炉和2台8500kW发电机组,每天可处理生活垃圾1000t。上海地区主导风向为东南向(夏季)和西北向(冬季)。结合垃圾焚烧炉最大落地浓度、上海地区主导风向以及采样现场情况,分别以主导风向下风向距离垃圾焚烧炉950m(西北向)和700m(东南向)左右的苗圃园林地作为采样点A和采样点B。

利用户外被动空气采样器(TE-200-PAS,美国Tisch)按月采集焚烧炉附近大气样品,采集时间为2017年1月1日—2017年12月31日:3、4、5月(春季);6、7、8月(夏季);9、10、11月(秋季);12、1、2月(冬季)。2个采样点的土壤样品于同年5月采集。PCDD/Fs被动大气采样速率设为 $2.0\text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[5]</sup>。用于采样的聚氨酯泡沫棉事先通过索氏抽提仪(B-811,瑞士Buchi)进行清洗(二氯甲烷:正己烷=1:1)16h,抽提过的聚氨酯泡沫棉干燥后立即用干净的锡箔纸包裹并放入密封袋中置于 $-20^\circ\text{C}$ 保存备用。大气被动采样样品在采样前加入 $^{13}\text{C}$ 标记的二噁英同位素采样内标。

### 1.2 样品前处理

将采集的大气、土壤放入索式抽提仪中,加入 $^{13}\text{C}$ 标记的二噁英同位素净化内标进行萃取。萃取液依照EPA 1613<sup>[8]</sup>方法经过酸性硅胶床、多层硅胶柱以及佛罗里硅土柱进行净化,氮吹浓缩后由高分辨质谱质

联用仪 (AutoSpec Premier, 美国 Waters) 分析。检测 17 种 2, 3, 7, 8 位被氯取代的 PCDD/Fs 的含量。见表 1。

表 1 17 种 PCDD/Fs 的中文名称和英文缩写

Table 1 Chinese names and English abbreviations of 17 kinds of PCDD/Fs

| 序号 (No.) | 中文名称 (Chinese name)              | 缩写 (English abbreviation) |
|----------|----------------------------------|---------------------------|
| 1        | 2, 3, 7, 8-四氯代二苯并-对-二噁英          | 2, 3, 7, 8-TCDD           |
| 2        | 1, 2, 3, 7, 8-五氯代二苯并-对-二噁英       | 1, 2, 3, 7, 8-PeCDD       |
| 3        | 1, 2, 3, 4, 7, 8-六氯代二苯并-对-二噁英    | 1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDD    |
| 4        | 1, 2, 3, 6, 7, 8-六氯代二苯并-对-二噁英    | 1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDD    |
| 5        | 1, 2, 3, 7, 8, 9-六氯代二苯并-对-二噁英    | 1, 2, 3, 7, 8, 9-HxCDD    |
| 6        | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-七氯代二苯并-对-二噁英 | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDD |
| 7        | 八氯代二苯并-对-二噁英                     | OCDD                      |
| 8        | 2, 3, 7, 8-四氯代二苯并呋喃              | 2, 3, 7, 8-TCDF           |
| 9        | 1, 2, 3, 7, 8-五氯代二苯并呋喃           | 1, 2, 3, 7, 8-PeCDF       |
| 10       | 2, 3, 4, 7, 8-五氯代二苯并呋喃           | 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF       |
| 11       | 1, 2, 3, 4, 7, 8-六氯代二苯并呋喃        | 1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDF    |
| 12       | 1, 2, 3, 6, 7, 8-六氯代二苯并呋喃        | 1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDF    |
| 13       | 1, 2, 3, 7, 8, 9-六氯代二苯并呋喃        | 1, 2, 3, 7, 8, 9-HxCDF    |
| 14       | 2, 3, 4, 6, 7, 8-六氯代二苯并呋喃        | 2, 3, 4, 6, 7, 8-HxCDF    |
| 15       | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-七氯代二苯并呋喃     | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDF |
| 16       | 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9-七氯代二苯并呋喃     | 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9-HpCDF |
| 17       | 八氯代二苯并呋喃                         | OCDF                      |

### 1.3 色谱和质谱分析条件

DB-5 色谱柱：60 m×0.25 mm×0.25 μm；进样口温度：270℃；无分流进样；载气：氦气；流量：1 mL/min。升温程序：120℃保持 2 min，以 10℃/min 升温到 220℃，保持 7 min，以 3℃/min 升温到 235℃，保持 7 min，最后以 3℃/min 升温到 310℃，保持 10 min。

电子电离离子源；电子能量：35 eV；检测方式：多离子检测；加速电压：8000 V；分辨率：10000 以上。定量方式为同位素稀释法，标准曲线相对响应因子的相对标准偏差平均为 6.40%。

### 1.4 质量保证与质量控制

分析样品前，使用全氟煤油对每个通道的质量数进行校准，并且在分析样品过程中高分辨色谱质谱联用仪分辨率保持在 10000 以上。

实验过程中每月分析 1 个全程序空白，全程序空白结果表明实验过程中无背景干扰物影响，<sup>13</sup>C 标记采样内标回收率范围为 77.1%~98.2%，<sup>13</sup>C 标记净化内标回收率范围为 75.5%~93.9%，符合 HJ 77.2—2008《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》<sup>[9]</sup> 和 EPA 23<sup>[10]</sup> 方法的定量要求，方法检出限为 0.023 5~0.235 pg/m<sup>3</sup>。

### 1.5 数据处理与源解析

本研究采用 WHO 2005 年提出的二噁英毒性当

量因子计算毒性当量浓度，对于低于样品检出限的测定结果使用样品检出限的 1/2 计算毒性当量 (toxic equivalent quantity, TEQ) 浓度<sup>[9]</sup>。

根据研究区域内可能污染源的调研，以及初步的主成分分析，选定垃圾焚烧、危险废物焚烧、交通源 (无铅和含铅汽油、柴油)、金属冶炼作为研究区域大气中 PCDD/Fs 的可能来源<sup>[11]</sup>，将可能污染源中同系物组成与研究区域焚烧炉周边大气样品 (被动采样) 中同系物组成利用 XLSTAT (2016 版) 进行主成分分析。

### 1.6 呼吸暴露量

假设个体对空气的暴露时间是 24 h/d，且室外和室内空气的暴露浓度相同。计算公式： $Inh = V \times C \times f \times t / BW$ <sup>[12]</sup>。式中：*Inh* 为呼吸暴露量，pg TEQ / (kg·d)；*V* 为呼吸量，m<sup>3</sup>/d，常数，成人该值设为 15.8 (上海地区)，儿童 (0~6 岁) 为 6.78 (上海地区)<sup>[13-14]</sup>；*c* 为空气中 PCDD/Fs 的平均 TEQ 浓度，pg TEQ/m<sup>3</sup>；*f* 为空气在肺泡中气体交换的保留分数，成人和儿童取均值 0.75<sup>[11]</sup>；*t* 为暴露时间分数，即暴露时间与 24 h 的比值，该值取最大值为 1；*BW* 为体重，成人取我国居民成人平均体重 62.2 kg，儿童 (0~6 岁) 取 13.2 kg (均为上海地区)<sup>[13-14]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 焚烧炉周边大气和土壤中 PCDD/Fs 含量

2017 年 1 月 1 日—12 月 31 日期间，共采集 24 个样品，采样点 A 和 B 大气中 PCDD/Fs 的质量浓度分别为 0.378~2.49 pg/m<sup>3</sup> (平均值为 1.23 pg/m<sup>3</sup>) 和 0.487~3.36 pg/m<sup>3</sup> (平均值为 1.37 pg/m<sup>3</sup>)。见图 1。采样点 A 和 B 大气中 PCDD/Fs 的 TEQ 浓度分别为 30.9~195 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (平均值为 113 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup>) 和 43.2~409 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (平均值为 119 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup>)。采样点 A 和 B 土壤中 PCDD/Fs 的质量浓度分别为 120、1 273 pg/g，对应的 TEQ 浓度分别为 1.58、5.86 pg WHO-TEQ/g。

### 2.2 焚烧炉周边大气中 PCDD/Fs 的季节变化

秋季焚烧炉周边大气中 PCDD/Fs 的 TEQ 浓度最低，分别为 84.9 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 A) 和 47.9 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 B)。冬季和春季两个采样点大气中 PCDD/Fs 的 TEQ 浓度相当，冬季分别为 142 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 A) 和 121 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 B)，春季分别为 127 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 A) 和 100 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 B)。夏季采样点 A 和 B 大气中 PCDD/Fs 的 TEQ 浓度差异较大，分别为 99.2 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 A) 和 205 fg WHO-TEQ/m<sup>3</sup> (采样点 B)。

见图 2。

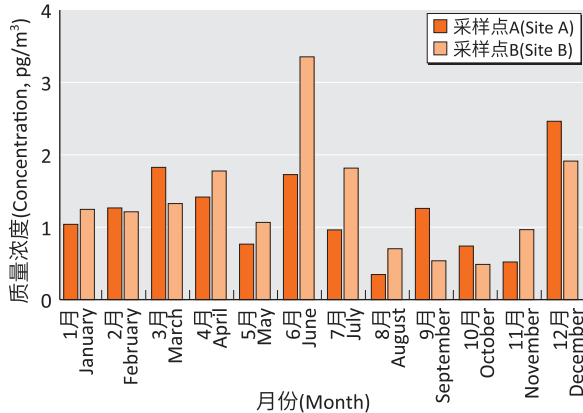


图 1 2017 年上海某焚烧炉周边大气中 PCDD/Fs 的质量浓度  
Figure 1 Atmospheric PCDD/Fs concentrations in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai in 2017

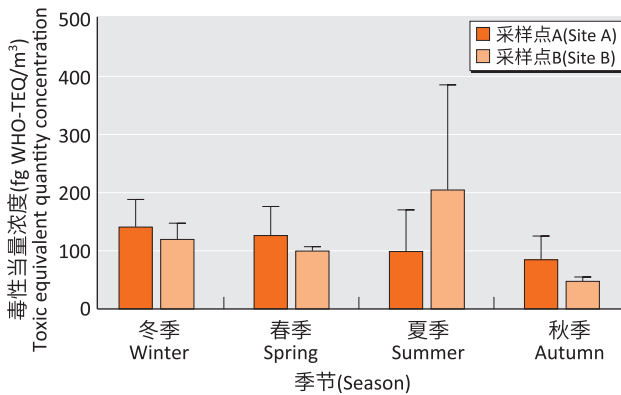


图 2 2017 年上海某焚烧炉周边不同季节大气中 PCDD/Fs 的毒性当量浓度  
Figure 2 Seasonal atmospheric PCDD/Fs toxic equivalent quantity concentrations in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai in 2017

### 2.3 焚烧炉周边大气中 PCDD/Fs 同系物分布特征

大多样品中检测到 10 种 PCDD/Fs，少数样品中 1, 2, 3, 7, 8, 9-HxCDF 和 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9-HpCDF 低于检出限；约 30% 的样品中有 1~5 种 PCDD/Fs 低于检出限。如图 3 所示，两个采样点中 17 种 PCDD/Fs 同系物优势组分基本相同，百分含量中贡献最大的 2 个优势组分分别为 OCDD 和 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDF，平均占总含量 20.4% 和 13.9%；其他有较大贡献率的组分 1, 2, 3, 7, 8-PeCDF、2, 3, 4, 7, 8-PeCDF、1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDF、1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDF、2, 3, 4, 6, 7, 8-HxCDF、OCDF 和 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDD 百分含量相当，平均占总含量 6.36%~7.65% 之间；其余同系物的百分含量都小于 2%。

如图 4 所示，使用 WHO 最新的 TEQ 因子计算环境大气样品的毒性当量，TEQ 浓度贡献最大的 3 个优势

组分分别为 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF、2, 3, 7, 8-TCDD 和 1, 2, 3, 7, 8-PeCDD，平均占总 TEQ 浓度的 25.70%、16.92% 和 14.78%；其他有较大贡献率的组分依次是 2, 3, 7, 8-TCDF、1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDF、2, 3, 4, 6, 7, 8-HxCDF 和 1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDF，平均分别占 8.47%、7.86%、7.34% 和 7.31%；其余异构体对总 TEQ 浓度的贡献率都小于 3%。

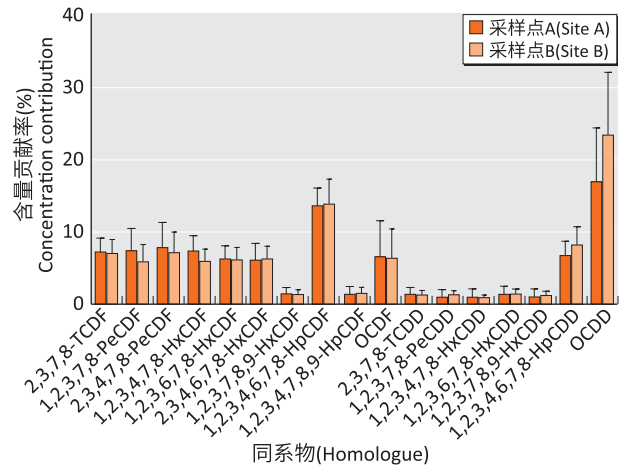


图 3 2017 年上海某焚烧炉周边大气中 17 种 PCDD/Fs 同系物分布特征  
Figure 3 Concentration distribution of 17 kinds of PCDD/Fs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai in 2017

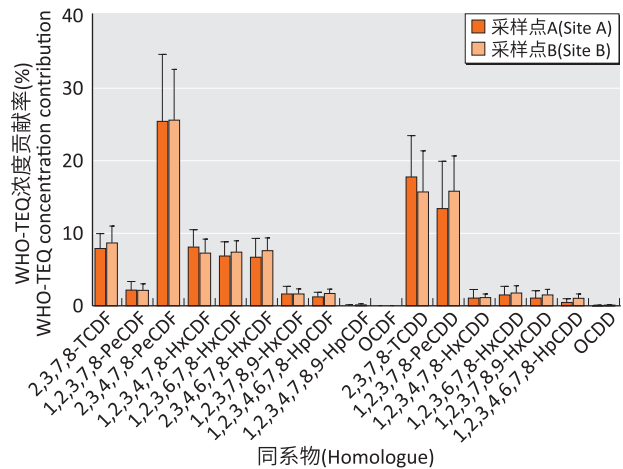


图 4 2017 年上海某焚烧炉周边大气中 17 种 PCDD/Fs 同系物毒性当量分布  
Figure 4 Toxic equivalent quantity concentration distribution of 17 kinds of PCDD/Fs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai in 2017

### 2.4 焚烧炉周边大气中 PCDD/Fs 来源解析

主成分分析结果表明，前 2 个主成分的贡献率分别为 36.72% 和 28.81%，其主成分分析的散点分布图如图 5 所示。该研究区域大气样品中 PCDD/Fs 同系物组成靠近垃圾焚烧源、含铅汽油源等交通源。对比同

一采样点不同月份, 6月份采样点B和12月份采样点A大气样品中PCDD/Fs含量明显高于其他月份, 6月份采样点B大气样品中PCDD/Fs同系物组成更加靠近含铅汽油源和危险废物焚烧源, 12月份采样点A大气样品中PCDD/Fs同系物组成更加靠近垃圾焚烧源。

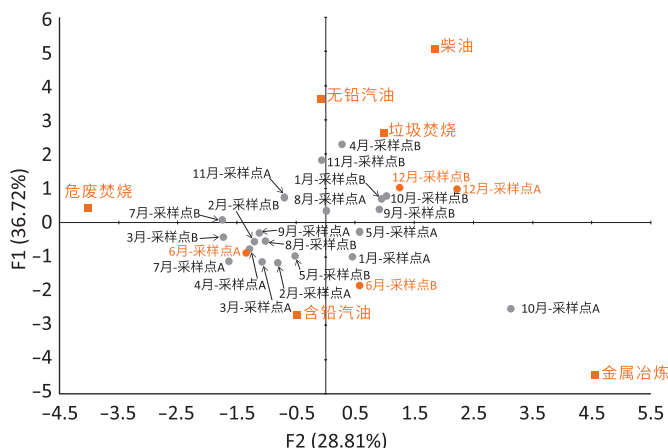


图5 2017年上海某焚烧炉周边环境大气中PCDD/Fs污染源主成分分析散点分布图

Figure 5 Scatter plot of principal component analysis of PCDD/Fs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai in 2017

### 2.5 焚烧炉周边人群PCDD/Fs呼吸暴露水平

评估人群PCDD/Fs呼吸暴露水平, 结果表明上海某生活垃圾焚烧炉周边成人PCDD/Fs呼吸暴露量范围为

9.13~39.1 fg WHO-TEQ/ (kg·d), 儿童PCDD/Fs呼吸暴露量范围为18.5~79.0 fg WHO-TEQ/ (kg·d)。就季节而言, 采样点A的儿童和成人冬季的PCDD/Fs呼吸暴露量大于夏季; 而采样点B的儿童和成人夏季的PCDD/Fs呼吸暴露量大于冬季。除去夏季, 所有采样点的PCDD/Fs呼吸暴露量都为冬季最大, 秋季最小。儿童PCDD/Fs呼吸暴露量高出成人约102%。见表2。

表2 2017年上海某焚烧炉周边区域内居民PCDD/Fs呼吸暴露量

Table 2 Respiratory exposure levels of PCDD/Fs of residents in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Shanghai in 2017

| 采样季节<br>Sampling season | ΣPCDD/Fs 平均浓度<br>(fg WHO-TEQ/m <sup>3</sup> )<br>ΣPCDD/Fs average concentration |       | PCDD/Fs 呼吸暴露量<br>[fg WHO-TEQ/ (kg·d)]<br>PCDD/Fs respiratory exposure |      |            |      |
|-------------------------|---|-------|---|------|------------|------|
|                         | A   | B     | 成人 (Adult)  |      | 儿童 (Child) |      |
| 冬季 (Winter)             | 142   | 121   | 27.1  | 23.1 | 54.7       | 46.6 |
| 春季 (Spring)             | 127   | 100   | 24.2  | 19.1 | 48.9       | 38.5 |
| 夏季 (Summer)             | 99.2  | 205.0 | 18.9  | 39.1 | 38.2       | 79.0 |
| 秋季 (Autumn)             | 84.9  | 47.9  | 16.2  | 9.1  | 32.7       | 18.5 |

[注] A、B分别为采样点A和B。

[Note] A and B are site A and site B respectively.

### 2.6 世界各地(被动采样)PCDD/Fs的TEQ浓度

表3列举了世界各地利用被动采样获取的环境大气中PCDD/Fs的TEQ浓度。

表3 世界各地大气(被动采样)中PCDD/Fs毒性当量浓度

Table 3 Toxic equivalent quantity concentrations of PCDD/Fs (passive sampling) across the world

| 国家和城市<br>Country and city         | 采样点<br>Sampling site                                 | 采样时间<br>Sampling time  | TEQ浓度 (fg TEQ/m <sup>3</sup> )<br>TEQ concentration                                | 参考文献<br>Reference    |
|-----------------------------------|--|--|--|----------------------|
| 中国上海<br>Shanghai, China           | 焚烧厂周边<br>Around a municipal solid waste incinerator  | 2017   | 30.9~409 (M : 116) (WHO-TEQ)   | 本研究<br>Current study |
| 中国上海<br>Shanghai, China           | 城市背景<br>City background                              | 2013.07—2013.08 (夏季) (Summer)<br>2013.11—2014.01 (冬季) (Winter) | 10.8~259 (夏季, M : 63.4) (Summer)<br>24.1~154 (冬季, M : 83.4) (Winter)<br>(WHO-TEQ)  | [4]                  |
| 中国<br>China                       | 某焚烧厂周边<br>Around a municipal solid waste incinerator | 2012.05—2013.08 (夏季) (Summer)<br>2012.10—2013.01 (冬季) (Winter) | 13.5~103 (夏季, M : 54.3) (Summer)<br>20.1~90.3 (冬季, M : 51.2) (Winter)<br>(WHO-TEQ) | [15]                 |
| 中国北京<br>Beijing, China            | 城市背景<br>City background                              | 2011.02—2012.03  | 8.4~179<br>(WHO-TEQ)   | [16]                 |
| 中国天津<br>Tianjin, China            | 城市背景<br>City background                              | 2008.06—2009.01  | 4.08~325 (M : 91.4)<br>(I-TEQ)   | [17]                 |
| 韩国首尔<br>Seoul, South Korea        | 城市/工业<br>City/industry                               | 2011.03—2013.02  | 34.9~231<br>(I-TEQ)  | [18]                 |
| 韩国京畿道<br>Gyeonggi-do, South Korea | 工业<br>Industry                                       | 2010.02—2011.02  | 26.4~636<br>(I-TEQ)  | [19]                 |
| 西班牙塔拉戈纳<br>Tarragona, Spain       | 焚烧厂周边<br>Around a municipal solid waste incinerator  | 2014 (夏季) (Summer)   | 6.10~16.8 (M : 10.1)<br>(WHO-TEQ)  | [7]                  |
| 阿尔及利亚北部地区<br>Northern Algeria     | 工业<br>Industry                                       | 2009.09—2009.11  | 210~350<br>(I-TEQ)   | [20]                 |

[注] WHO-TEQ和I-TEQ分别是由世界卫生组织和北大西洋公约组织提出的二噁英毒性当量计算方法。

[Note] WHO-TEQ and I-TEQ are toxic equivalent quantity concentrations proposed by World Health Organization and North Atlantic Treaty Organization, respectively.

### 3 讨论

利用被动采样, 本研究中2017年上海某生活垃圾焚烧炉周边大气中PCDD/Fs的质量浓度与中科院生态中心于2014年利用被动采样研究垃圾焚烧厂周边大气中PCDD/Fs的质量浓度一致(夏季: 0.472~1.22 pg/m<sup>3</sup>, 均值为0.816 pg/m<sup>3</sup>; 冬季: 0.561~3.91 pg/m<sup>3</sup>, 均值为1.46 pg/m<sup>3</sup>)<sup>[15]</sup>; 略高于上海背景地区大气中(被动采样)PCDD/Fs的浓度水平(夏季: 0.0779~2.81 pg/m<sup>3</sup>, 均值为0.629 pg/m<sup>3</sup>; 冬季: 0.198~1.89 pg/m<sup>3</sup>, 均值为0.909 pg/m<sup>3</sup>)<sup>[4]</sup>。在12个月的观察期内, 采样点A大气中PCDD/Fs最高浓度出现在12月, 采样点B出现在6月。目前中国还没有环境大气中二噁英的国家标准值, 参照日本环境空气质量标准限值(0.6 pg TEQ/m<sup>3</sup>), 本研究环境大气中PCDD/Fs的TEQ浓度都小于这一限值, 明显高于西班牙焚烧炉周边区域<sup>[7]</sup>与中国北京城市背景区域<sup>[16]</sup>; 与天津、韩国首尔城市地区大气中PCDD/Fs的TEQ浓度相当<sup>[17-18]</sup>; 略低于韩国京畿道工业地区<sup>[19]</sup>、阿尔及利亚北部工业地区大气中PCDD/Fs的TEQ浓度<sup>[20]</sup>。

比较两个采样点位不同季节大气中PCDD/Fs的TEQ浓度发现, 采样点A夏季大气中PCDD/Fs的平均浓度明显低于冬季, 这一季节趋势与大多数研究结果一致<sup>[16]</sup>; 而采样点B则反之, 夏季大气中PCDD/Fs的TEQ浓度明显高于冬季, 这一季节趋势与少部分研究结果一致<sup>[18]</sup>。由于被动采样速率易受风速、温度和颗粒物等环境因素的影响。在大气颗粒物污染水平高的城市环境中, 这种差异可能会更加显著。由于二噁英属于半挥发性的持久性有机污染物, 所以其气-固相的分配受气候影响很大。在夏季, 大气温度较高, 相对于冬季气相上二噁英的比例会更高; 而在冬季, 大气温度较低, 大气中大部分二噁英存在于颗粒态上。被动采样得到的主要是气相上的二噁英浓度。这一特征加上冬季大气容易出现逆温层, 导致边界层厚度变小, 污染物容易累积, 可能导致被动采样的环境大气数据的季节特征存在一定差异。

采样点位之间PCDD/Fs含量, 除少数月份外差异并不显著。在城市区域, 由于建筑物、交通干线的阻隔, 使得主导风向对采样点PCDD/Fs含量影响比较小。6、7月采样点B样品中PCDD/Fs含量明显高于采样点A, 可能由于采样点B土壤中PCDD/Fs含量为5.86 pg WHO-TEQ/g, 明显高于采样点A土壤中PCDD/Fs含量(1.58 pg WHO-TEQ/g), 上海地区6、7月平均最

高气温为33.4°C和39.6°C<sup>[21]</sup>, 高温环境可能使得土壤中PCDD/Fs挥发进入环境大气。

上海地区生活垃圾焚烧炉周边人群PCDD/Fs呼吸暴露水平与中国其他地区有很好的一致性: 北京城市区域成人PCDD/Fs呼吸暴露量范围为1.8~38.4 fg WHO-TEQ/(kg·d), 儿童为3.2~68.0 fg WHO-TEQ/(kg·d)<sup>[16]</sup>; 深圳城市区域成人PCDD/Fs呼吸暴露量范围为2.0~97.0 fg WHO-TEQ/(kg·d), 儿童为2.0~147 fg WHO-TEQ/(kg·d)<sup>[22]</sup>; 广州成人的日均暴露剂量在5.27~35.5 fg I-TEQ/(kg·d)之间<sup>[23]</sup>; 沈阳城市区域成人PCDD/Fs呼吸暴露量范围为1.0~86.0 fg WHO-TEQ/(kg·d), 儿童为3.0~197 fg WHO-TEQ/(kg·d)<sup>[24]</sup>。根据《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)附件“生物质发电项目环境影响评价文件审查的技术要点”提出的要求<sup>[25]</sup>, 二噁英健康风险评估标准参照人体可耐受摄入量4 pg TEQ/(kg·d), 通过呼吸进入人体的允许摄入量按每日可耐受摄入量的10%执行。上海地区某生活垃圾焚烧炉周边成人PCDD/Fs呼吸暴露量占标率为0.23%~0.98%; 儿童PCDD/Fs呼吸暴露量占标率为0.46%~1.97%, 远低于允许摄入量。

综上所述, 上海某生活焚烧炉周边大气样品(被动采样)中PCDD/Fs的含量略高于上海城市背景区域大气样品(被动采样)中PCDD/Fs的含量。研究区域大气中PCDD/Fs可能主要来源于垃圾焚烧源和交通污染源的影响。该焚烧厂周边成人和儿童的PCDD/Fs呼吸暴露量均低于人体每日可耐受摄入量的10%。

### 参考文献

- [1] VILAVERTE L, NADAL M, SCHUHMACHER M, et al. Long-term monitoring of dioxins and furans near a municipal solid waste incinerator: human health risks [J]. Waste Manag Res, 2012, 30 (9): 908-916.
- [2] LI H, FENG J, SHENG G, et al. The PCDD/F and PBDD/F pollution in the ambient atmosphere of Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2008, 70 (4): 576-583.
- [3] 应媛媛. 上海市典型区域大气和土壤样品中二噁英初探 [D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- [4] TIAN Y, NIE Z, TIAN S, et al. Passive air sampling for determining the levels of ambient PCDD/Fs and their seasonal and spatial variations and inhalation risk in Shanghai, China [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2015, 22 (17): 13243-

- 13250.
- [5] MARI M, SCHUHMACHER M, FELIUBADALÓ J, et al. Air concentrations of PCDD/Fs, PCBs and PCNs using active and passive air samplers [J]. *Chemosphere*, 2008, 70 (9) : 1637-1643.
- [6] VILAVERT L, NADAL M, SCHUHMACHER M, et al. Seasonal surveillance of airborne PCDD/Fs, PCBs and PCNs using passive samplers to assess human health risks [J]. *Sci Total Environ*, 2014, 466-467 : 733-740.
- [7] VILAVERT L, NADAL M, SCHUHMACHER M, et al. Two decades of environmental surveillance in the vicinity of a waste incinerator : human health risks associated with metals and PCDD/Fs [J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2015, 69 (2) : 241-253.
- [8] Tetra- through octa-chlorinated dioxins and furans by isotope dilution HRGC/HRMS : EPA Method 161 [S]. Washington DC : U.S. EPA Office of Water Engineering and Analysis Division, 1994.
- [9] 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 [S]. 北京 : 中国环境科学出版社, 2009.
- [10] Determination of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and polychlorinated dibenzofurans from municipal waste combustors : EPA Method 23 [S]. Washington DC : Air Emission Measurement Center (EMC), 2017.
- [11] U.S. EPA. 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.
- [12] NOUWEN J, CORNELIS C, DE FRÉ R. Health risk assessment of dioxin emissions from municipal waste incinerators : the Neerlandquarter (Wilrijk, Belgium) [J]. *Chemosphere*, 2001, 43 (4/5/6/7) : 909-923.
- [13] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) 概要 [M]. 北京 : 中国环境出版社, 2014 : 15, 55.
- [14] 段小丽. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷) 概要 [M]. 北京 : 中国环境出版社, 2016 : 31, 170.
- [15] GAO L, ZHANG Q, LIU L, et al. Spatial and seasonal distributions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans and polychlorinated biphenyls around a municipal solid waste incinerator, determined using polyurethane foam passive air samplers [J]. *Chemosphere*, 2014, 114 : 317-326.
- [16] HAO Y, LI Y, WANG T, et al. Distribution, seasonal variation and inhalation risks of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans, polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of Beijing, China [J]. *Environ Geochem Health*, 2018, 40 (5) : 1907-1918.
- [17] DING L, LI Y M, WANG P, et al. Spatial concentration, congener profiles and inhalation risk assessment of PCDD/Fs and PCBs in the atmosphere of Tianjin, China [J]. *Chin Sci Bull*, 2013, 58 (9) : 971-978.
- [18] YOONKI M, JONGWON H, MEEHYE L. Determination of toxic congeners of 17 PCDDs/PCDFs and 12 dl-PCBs using polyurethane foam passive air samplers in ten cities around Seoul [J]. *Sci Total Environ*, 2014, 491-492 : 17-27.
- [19] HEO J, LEE G. Field-measured uptake rates of PCDDs/Fs and dl-PCBs using PUF-disk passive air samplers in Gyeonggi-do, South Korea [J]. *Sci Total Environ*, 2014, 491-492 : 42-50.
- [20] MOUSSAOUI Y, TUDURI L, KERCHICH Y, et al. Atmospheric concentrations of PCDD/Fs, dl-PCBs and some pesticides in northern Algeria using passive air sampling [J]. *Chemosphere*, 2012, 88 (3) : 270-277.
- [21] 上海市浦东新区统计局, 国家统计局浦东调查队. 上海浦东新区统计年鉴—2018 [M]. 北京 : 中国统计出版社, 2018 : 11.
- [22] 彭金铃, 张建清, 陆少游, 等. 深圳市大气细颗粒物中二噁英污染水平及人群暴露风险分析 [J]. *卫生研究*, 2015, 44 (4) : 570-575.
- [23] 刘丽君, 韩静磊, 付建平, 等. 广州城区大气 PM<sub>10</sub> 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*, 2016, 33 (5) : 415-420.
- [24] 张丽华, 王恩德. 沈阳市环境空气不同功能区二噁英含量与暴露风险分析 [J]. *环境污染与防治*, 2013, 35 (2) : 82-84.
- [25] 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 [A].

(英文编辑 : 汪源 ; 编辑 : 汪源 ; 校对 : 王晓宇)