

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017080102

林斌斌, 李晓东, 王天娇, 等. 生活垃圾焚烧炉中二噁英、氯苯排放特性及关联[J]. 环境化学, 2018, 37(3): 428-436.

LIN Binbin, LI Xiaodong, WANG Tianjiao, et al. Emission characteristics and correlation between PCDD/Fs and chlorobenzenes in the municipal solid waste incinerators[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 428-436.

生活垃圾焚烧炉中二噁英、氯苯排放特性及关联*

林斌斌 李晓东** 王天娇 陈彤 林晓青 陆胜勇

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州, 310027)

摘 要 为探究二噁英(PCDD/Fs)合适的指示物, 本文研究了国内两座生活垃圾焚烧电厂的两台循环流化床炉 A、B 的 PCDD/Fs 及氯苯(CBzs)排放特性. 同时利用统计分析软件(SPSS)分析了 PCDD/Fs 浓度、TEQ 浓度、CBz 浓度之间的相关性. 结果显示, 在 17 种有毒 PCDD/Fs 中, 2,3,4,7,8-P5CDF 是最主要的二噁英同系物, 在焚烧炉 A、B 中分别占毒性当量(TEQ)的 28.97%—49.42% 和 45.56%—56.23%. 氯苯的排放以二氯苯(DCBzs)、三氯苯(TrCBzs)为主, 其浓度是 PCDD/Fs 的几千倍. 当用 CBz 作 PCDD/Fs 和 TEQ 的指示物进行一元线性回归分析时, 发现部分指示物有很高的相关系数, R^2 最高可达 0.8642.

关键词 生活垃圾焚烧炉, 流化床, 二噁英, 氯苯, 指示物, 烟气采样, 关联性.

Emission characteristics and correlation between PCDD/Fs and chlorobenzenes in the municipal solid waste incinerators

LIN Binbin LI Xiaodong** WANG Tianjiao CHEN Tong LIN Xiaoqing LU Shengyong

(Zhejiang University State Key Laboratory of Clean Energyutilization, Hangzhou, 310027, China)

Abstract: This paper investigated the emission characteristics of PCDD/Fs and chlorobenzenes (CBzs) from two fluidized bed incinerators (A and B) to find the appropriate indicators of PCDD/Fs. The correlations between PCDD/Fs concentrations, toxic equivalent (TEQ) values and CBzs were analyzed by a Statistical Package for the Social Science (SPSS). The results showed that 2,3,4,7,8-P5CDF was the most important one of the 17 toxic congeners in the flue gas. It accounted for 28.97%—49.42% and 45.56%—56.23% of the TEQ in the incinerators A and B. Dichlorobenzenes (DCBzs) and trichlorobenzenes (TrCBzs) were the major congeners for the CBzs emission, the concentrations of which were several thousand times that of PCDD/Fs. Linear regression analysis was performed using CBz as an indicator of PCDD/Fs and TEQ. It was found that some of the indicators had a high coefficient of determination (R^2), up to 0.8642.

Keywords: municipal solid waste incinerator, fluidized bed furnaces, PCDD/Fs, CBzs, indicator, stack sampling, correlation.

随着中国城市化进程的加快, 生活垃圾产量日益增加, 如何正确处置生活垃圾已经成为政府关注的重要环境问题之一, 垃圾焚烧将成为主要的生活垃圾处理方式. 我国自主研发的生活垃圾循环流化床焚烧炉技术以其适应性广、投资运营成本低廉等优势, 广泛运用于我国中小城市垃圾焚烧电厂^[1]. 本文的

2017 年 8 月 1 日收稿 (Received: August 1, 2017).

* 国家自然科学基金 (1476138) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (1476138).

** 通讯联系人, Tel: 0571-87951294, E-mail: lixd@zju.edu.cn

Corresponding author, Tel: 0571-87951294, E-mail: lixd@zju.edu.cn

研究对象二噁英(PCDD/Fs)和氯苯类化合物(CBzs)中的五氯苯(PCBz)、六氯苯(HCBz)目前已被列入《斯德哥尔摩公约》名录,属于持久性有机污染物.对比二噁英排放浓度,氯苯的浓度比二噁英浓度高3至4个数量级^[2].在实际垃圾焚烧排放中,大量国外的研究发现,多种氯苯类物质与二噁英毒性当量(TEQ)之间存在良好的相关性,相关系数最高可达0.8以上^[3-4].Kaune等^[5]研究发现五氯苯、六氯苯与二噁英TEQ的强关联性,相关系数 R^2 分别为0.84和0.91;Kato等^[6]统计了大量固废焚烧设备的排放数据,包括四氯苯、五氯苯、六氯苯及二噁英TEQ数据,这些数据包含众多焚烧炉,浓度范围覆盖广,发现TEQ与四氯苯、五氯苯、六氯苯有着很强的关联性,其关联模型的相关系数 R^2 分别为0.82、0.85、0.81.

虽然国外对氯苯和二噁英的关联已经做了很多研究,不过国内的研究并不多,而且国外统计的数据大多是三氯代以上的四氯苯、五氯苯和六氯苯的数据,二氯苯、三氯苯的数据很少,这与二氯苯、三氯苯沸点低,不易采集、预处理过程损失较大有关.而在现有的技术下,二氯苯、三氯苯等分子量相对较小的氯苯更容易被在线测量^[7],只要建立它们与二噁英的关联模型,就可以通过在线监测二噁英指示物氯苯的浓度实现间接测量二噁英的数值.该方法与传统二噁英采样离线分析的方法相比,节约了成本、大大缩短了获得二噁英数据的周期.所以从长远看,建立氯苯与二噁英的关联模型意义重大.本文采用Tenax-Ta吸附氯苯,有机溶液洗脱的方法测量氯苯类化合物,可以更加有效地测量烟气中二氯苯、三氯苯等低沸点有机物的浓度,具有预处理过程损失少,测量精度高的特点.

本文立足国内两座生活垃圾电厂的两台循环流化床焚烧炉的实际排放情况,对烟气中的二噁英和氯苯含量进行检测,研究了两者的排放特性和相关性,建立了氯苯和PCDD/Fs及其TEQ的关联模型,研究成果对指导垃圾焚烧、处理生活垃圾、降低污染排放、建立PCDD/Fs的间接在线检测关联模型等具有重要的意义.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 试验工况

本文的研究对象为国内两台循环流化床垃圾焚烧炉,记为A、B,试验中分别在A、B两焚烧炉的布袋除尘器之后采取样品,每个焚烧炉采5个样品,记录采样过程中的运行参数如下:

A:生活垃圾实际处理量为 $400\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,燃煤量为 $3.1\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$,布袋除尘器前活性炭喷入量 $20\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$,流化床的温度为 $790\text{—}900\text{ }^\circ\text{C}$,烟气中平均含氧量为12.38%,烟气净化装置为SNCR+半干法脱硫系统+活性炭喷射+布袋,为保证工况相对稳定,在24 h内稳定工况下连续采取5个样品,每个样品采样时间为120—180 min.

B:生活垃圾实际处理量为 $400\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,燃煤量为 $2.9\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$,布袋除尘器前活性炭喷入量 $18\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$,流化床的温度为 $750\text{—}900\text{ }^\circ\text{C}$,烟气中平均含氧量为12.8%,烟气净化装置为SNCR+半干法脱硫系统+活性炭喷射+布袋,为保证工况相对稳定,在24 h内稳定工况下连续采取5个样品,每个样品采样时间为120—180 min.

1.2 采样方法

二噁英采样采用韩国KNJ Engineering公司的M5型烟气采样仪,根据US EPA23标准采样方法,每个采样点持续120—180 min,采样体积为 2 m^3 左右.氯苯采样方法参考国标HJ644—2013方法,采用Tenax-TA管富集采样,采样流量为 $500\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,确保氯苯与二噁英采样时间处于同步.

1.3 烟气分析

二噁英的检测,根据EPA23方法进行预处理,利用高分辨气相色谱/高分辨质谱(HRGC/HRMS)检测,型号为JMS800D,升温程序:150 $^\circ\text{C}$ 保持1 min,以 $25\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升至190 $^\circ\text{C}$ 后,以 $3\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升至280 $^\circ\text{C}$,保温20 min,具体参见文献^[8].二噁英毒性当量换算采用I-TEQ单位.

氯苯采用气相色谱仪测定,分析仪器:GC-ECD(GC 6890N,安捷伦,美国),色谱柱为DB-5($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$).进样口温度240 $^\circ\text{C}$,检测器温度260 $^\circ\text{C}$,柱初始温度为90 $^\circ\text{C}$ 并保持1.0 min,然后以 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速率升温至140 $^\circ\text{C}$,再以 $20\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至200 $^\circ\text{C}$ 并保持1.0 min.传统对氯苯的分析方法采用吸附剂吸收,离线通过索提、悬蒸、过硅胶柱、悬蒸浓缩方法分析氯苯,此过程中氯苯会有一定损失,尤其是对沸点较低的低氯代氯苯,回收率难以保证,本文氯苯采用外标法定量分析,方法详见文献

[9].Tenax-TA 管空白试验测试,除一氯苯之外的其他氯苯类化合物回收率都在 90%以上,符合定量要求,一氯苯回收率太低,本文不予分析。

本文污染物的烟气体积均以 O_2 (干气)体积分数为 11%作为换算基准。

2 结果和讨论(Results and discussion)

2.1 烟气中二噁英排放特性

本文所分析的二噁英样品分为两部分,分别为滤膜内吸附的颗粒相二噁英和 XAD II 树脂里吸附的气相二噁英,经过试验分析,布袋除尘器之后烟气中的二噁英主要存在于气相中,比例占到 99%以上.下文的二噁英浓度及其毒性当量结果均为两部分的总和.焚烧炉 A 和 B 烟气中的 17 种有毒 PCDD/Fs 同系物浓度和 TEQ 浓度见图 1.从图 1 中可以看出,烟气中的二噁英成分主要是多氯代二苯并呋喃(PCDFs),其含量一般是多氯代二苯并对二噁英(PCDDs)的几倍到 10 倍.焚烧炉 A 的 PCDD/Fs 排放浓度范围为 $0.5956\text{--}2.2167\text{ ng}\cdot\text{Nm}^{-3}$,毒性当量浓度范围为 $0.0543\text{--}0.1074\text{ ngI-TEQ}\cdot\text{Nm}^{-3}$,符合我国当前生活垃圾电厂的二噁英排放标准($0.1\text{ ngI-TEQ}\cdot\text{Nm}^{-3}$);焚烧炉 B 的 PCDD/Fs 排放浓度范围为 $40.6013\text{--}114.0333\text{ ng}\cdot\text{Nm}^{-3}$,毒性当量浓度范围为 $6.3557\text{--}22.5132\text{ ngI-TEQ}\cdot\text{Nm}^{-3}$.研究证明^[10-11]循环流化床炉有能力通过烟气控制净化系统,将二噁英排放控制在低排放的范围内,布袋除尘加活性炭喷射^[12]也能有效降低烟气中的二噁英含量.焚烧炉 B 排放浓度较高可能与该厂设备老化,净化系统维护不当,活性炭质量不佳有关。

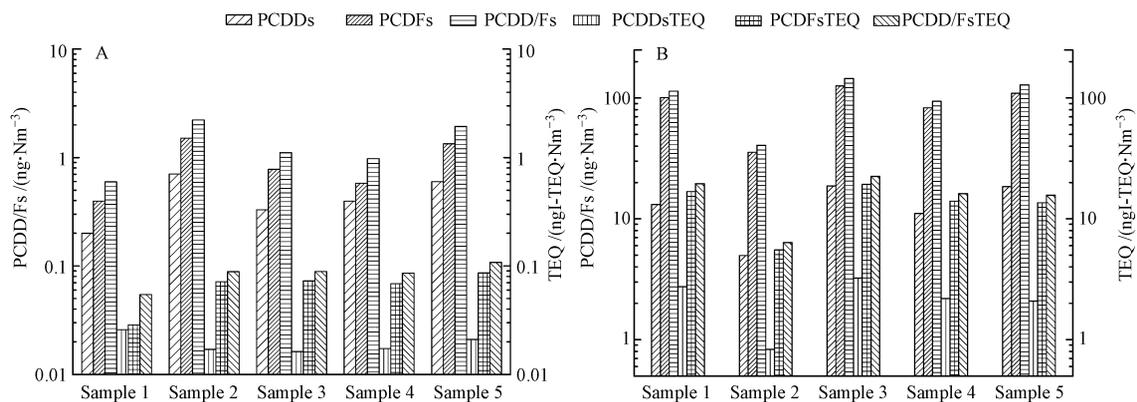


图 1 焚烧炉 A 和 B 的二噁英和毒性当量浓度

Fig.1 Concentrations and TEQ of PCDD/Fs from A and B

图 2 分析了二噁英中 17 种有毒同系物的分布特性.从图 2 可以发现 2,3,4,7,8-P5CDF 是最主要的二噁英同系物,在焚烧炉 A、B 中分别占了毒性当量的 28.97%—49.42%和 45.56%—56.23%,同时 2,3,7,8-T4CDD、2,3,4,6,7,8-H6CDF、1,2,3,7,8-P5CDD 等同系物也在毒性当量中占了很高的比例.研究发现除了 A 中的二噁英同系物 2,3,7,8-T4CDD 之外,其他同系物在各个样品中的占比变化不是很大,A、B 两炉在烟气二噁英同系物构成方面十分相近.Gao 等^[13]研究结果显示影响二噁英同系物分布的主要因素为焚烧炉结构、垃圾成分、净化系统结构,由于本文采样点均取自循环流化床炉,两厂净化系统相似,焚烧垃圾类型都是生活垃圾,与该结论相符。

2.2 烟气中氯苯排放特性

郭颖等^[14]研究表明氯苯最优的形成温度是 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度是影响焚烧过程中氯苯生成的重要因素.表 1 记录了焚烧炉 A、B 共 10 个样品中的氯苯含量,由于 Wang 等^[15]研究表明氯苯主要存在于烟气气相当中,在颗粒物中含量可以忽略,所以本文只分析烟气气体中的氯苯含量,研究发现氯苯在烟气中的浓度是二噁英的几千倍.氯苯作为二噁英重要的前驱物,相对于氯酚,它的浓度比氯酚高数十倍.Nganai 等^[16]研究发现,氯苯和氯酚作为二噁英重要的前驱物,氯苯更容易生成 PCDF,氯酚更容易生成 PCDD.正因为烟气中氯苯含量高于氯酚,而氯苯又更倾向生成 PCDF,所以在检测中发现烟气中二噁英含量以

PCDF 为主。A、B 两焚烧炉除了三氯苯在 A 炉特别高(1,2,4-三氯苯尤其高),明显高于 B 炉中的含量之外,其他的氯苯类物质浓度相近。将氯苯根据氯原子数量分类,绘制成氯苯浓度柱状图,如图 3 所示,氯苯类化合物浓度基本随着氯原子的增加,浓度逐渐减少,二氯苯(DCBz)和三氯苯(TrCBz)占到了氯苯类化合物的大部分,该数量级的氯苯浓度为工程上实现在线检测提供可能。

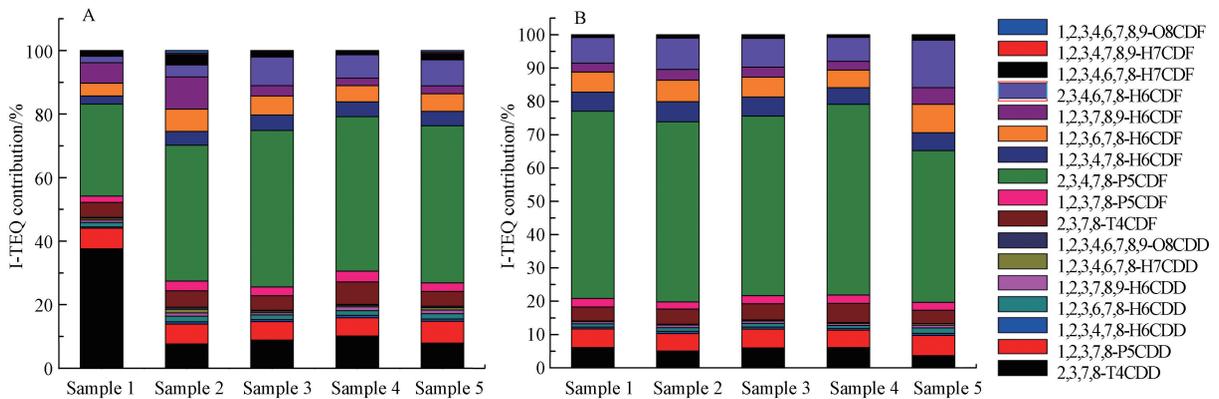


图 2 焚烧炉 A 和 B 中的 17 种有毒二噁英同系物的分布

Fig.2 I-TEQ contributions of 17 PCDD/Fs from MSWIs A and B

表 1 生活垃圾焚烧炉 A 和 B 各个样品中各种氯苯的浓度(ND 表示未达到检测限)

Table 1 The concentrations of CBzs from stack gas of the CFB A and B (ND means not detected)

		1,3-CBz	1,4-CBz	1,2-CBz	1,3,5-CBz	1,2,4-CBz	1,2,3-CBz
MSWIA/($\mu\text{g}\cdot\text{Nm}^{-3}$)	sample1	2.9115	0.9559	2.1875	7.8507	28.9776	1.2240
	sample2	2.4162	1.6257	2.9088	13.0483	45.7165	1.8251
	sample3	2.4664	2.0550	3.1847	12.0245	41.3415	1.7438
	sample4	2.1292	0.0249	1.4712	9.8497	35.1891	1.4575
	sample5	2.3514	0.8437	2.8161	13.2000	46.7360	1.9536
MSWIB/($\mu\text{g}\cdot\text{Nm}^{-3}$)	sample1	4.9078	3.4621	2.0131	0.5904	2.1640	0.6770
	sample2	0.6731	1.3530	0.4660	0.1956	0.6925	0.1868
	sample3	2.8920	9.0609	0.6739	1.2392	2.5731	0.2138
	sample4	1.7681	2.4734	1.1511	0.3019	0.8855	0.4517
	sample5	0.4592	4.6361	0.9478	1.3054	2.2835	0.2175
MSWIA/($\mu\text{g}\cdot\text{Nm}^{-3}$)		1,2,4,5-CBz	1,2,3,5-CBz	1,2,3,4-CBz	1,2,3,4,5-CBz	1,2,3,4,5,6-CBz	
	sample1	0.0798	0.0241	0.0183	0.0066	0.0495	
	sample2	0.0935	0.0250	0.0376	0.0135	0.1919	
	sample3	0.0977	0.0315	0.0259	0.0130	0.2438	
	sample4	0.0861	0.0243	0.0164	ND	0.1145	
sample5	0.1228	0.0355	0.0254	0.0028	0.1224		
MSWIB/($\mu\text{g}\cdot\text{Nm}^{-3}$)	sample1	0.2639	0.1207	0.2212	0.1205	0.0320	
	sample2	0.0190	0.0310	0.0049	0.0024	0.0136	
	sample3	0.0111	0.0245	0.2289	0.1795	0.1389	
	sample4	0.3183	0.1543	0.2443	0.1414	0.0366	
	sample5	0.0212	0.0518	0.0238	0.0076	0.0288	

2.3 相关性分析

氯苯类物质作为二噁英类生成的典型前驱物之一,是二噁英生成的一个重要来源。国内外研究者利用管式炉、STDS 系统等多种实验台,对氯苯类物质低温异相催化合成二噁英机理进行了大量的实验研

究.早在 1996 年, Ghorishi 等^[17]在模拟石英喷动床式燃烧反应器里, 比较了 1,2-二氯苯与 2,4-二氯酚生成 PCDD/Fs 的情况, 发现了 1,2-二氯苯可以生成以四氯代和六氯代为主的 PCDD/Fs. 并且, 不同氯代氯苯生成的 PCDD/Fs 同系物分布也不同, 三氯苯倾向于生成四、五、六氯代的 PCDF^[18]. 这些研究说明氯苯和二噁英在数量上应该存在着某种关系.

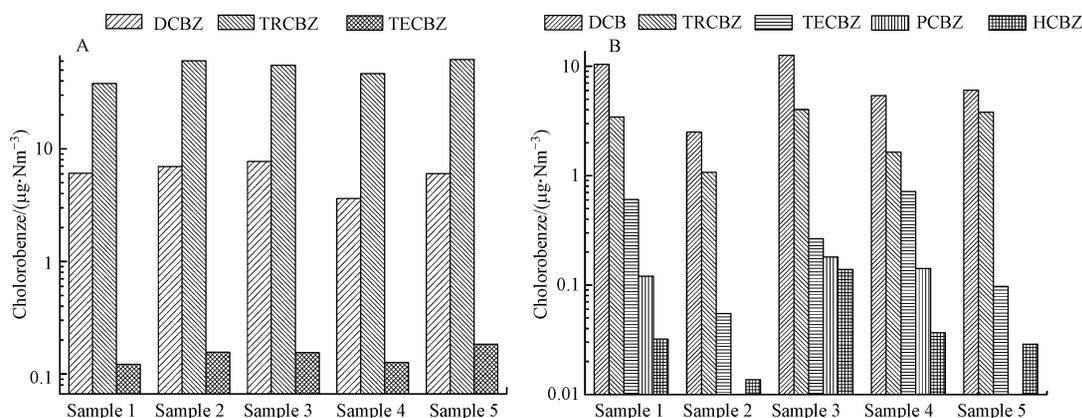


图 3 焚烧炉 A 和 B 中的氯苯类化合物分布

Fig.3 Emission of CBzs in A and B

利用统计分析软件 SPSS 对本文的研究数据进行了泊松相关系数分析和线性回归分析, 相关性分析结果见表 2 和表 3. 从表中可以看出, PCDD/Fs 浓度和 TEQ 存在相关性, 某些氯苯类化合物之间也有很强的相关性, 笔者推测相关性强意味着影响这两种氯苯类化合物产生的因素比较相似. 除了氯苯类化合物之间的相关性比较强, 研究发现氯苯和 PCDD/Fs 浓度或 TEQ 之间也存在很强的相关性. 图 4 是焚烧炉 A、B 选取的相关性较高的指示物与 PCDD/Fs 浓度和 TEQ 做一元线性拟合结果, 表中的拟合系数 R^2 越接近于 1, 说明线性拟合程度越好, 线性关联性越强. 研究发现三氯苯的同分异构体与 PCDD/Fs 浓度和 TEQ 的线性拟合程度比较高. B 炉的二氯苯浓度与 TEQ 也有较好的拟合结果. A、B 两炉的氯苯类化合物总浓度与 PCDD/Fs 浓度和 TEQ 之间都有着较好的拟合结果, 说明氯苯类化合物浓度确实与二噁英化合物浓度之间存在着线性关联性, 由于本文采取的烟气样品不够多, 数据量不够大, 使得拟合系数 R^2 不够大, 需要通过进一步的试验、数据积累来研究两者的关联性.

对于氯苯的在线测量技术, 郭颖^[19]等研究了利用飞行时间质谱仪对烟气样品中的三氯苯进行在线测量, 仪器检测信号强度与三氯苯浓度之间具有良好的线性关系. 通过该项技术, 未来可以在垃圾焚烧炉上运用飞行时间质谱仪技术在线检测氯苯类化合物的浓度, 通过关联模型快速转化为 PCDD/Fs 及 TEQ 的浓度, 可以指导生活垃圾焚烧炉运行和二噁英抑制剂和活性炭的合理、经济使用.

3 结论 (Conclusion)

(1) 本文研究了国内两台生活垃圾循环流化床焚烧炉常规运行工况下二噁英的排放特性, 由于 B 炉运行年份较久, 净化系统缺乏维护, 其二噁英排放浓度比较不稳定, 比 A 高许多. 这就表明电厂需要定期对净化设备进行检查维护来防止二噁英排放超标.

(2) 分析了 A、B 两炉的氯苯排放特性, 其浓度比二噁英浓度高几千至几万倍. 除了三氯苯之外, 两炉其他氯苯类化合物浓度范围相近, 氯苯类化合物浓度随着氯原子的增加而减少.

(3) 发现了 CBz 与 PCDD/Fs 浓度和 TEQ 浓度之间存在较强的线性相关性, 通过一元线性回归, 给出了几个指示物的关联模型, 线性拟合系数 R^2 最高可达 0.899. 当然关联模型的建立需要投入大量的研究, 得到更多的样本, 进行完善, 为在线检测二噁英技术的发展提供支持.

表 2 生活垃圾焚烧炉 A 中 CBz 浓度、PCDD/Fs 浓度、I-TEQ 之间的相关性
Table 2 The correlation between the concentration of CBzs, PCDD/Fs, I-TEQ in CFB A

	1,3-DCBz	1,4-DCBz	1,2-DCBz	SUM-DCBz	1,3,5-TrCBz	1,2,4-TrCBz	1,2,3-TrCBz	SUM-TrCBz	1,2,4,5-TeCBz	1,2,3,4-TeCBz	SUM-TeCBz	PCBz	HCBz	SUM-CBz	PCDD/Fs	I-TEQ
1,3-DCBz	1	0.338	0.193	0.444	-0.517	-0.511	-0.500	-0.512	-0.361	-0.201	-0.081	0.394	-0.373	-0.414	-0.409	-0.763
1,4-DCBz	0.338	1	0.904*	0.976**	0.444	0.400	0.404	0.410	0.125	0.269	0.675	0.961**	0.732	0.523	0.276	0.052
1,2-DCBz	0.193	0.904*	1	0.943*	0.694	0.671	0.693	0.678	0.526	0.601	0.733	0.807	0.683	0.767	0.530	0.374
SUM-DCBz	0.444	0.976**	0.943*	1	0.440	0.408	0.422	0.416	0.232	0.368	0.656	0.923*	0.608	0.531	0.301	0.052
1,3,5-TrCBz	-0.517	0.444	0.694	0.440	1	0.997**	0.991**	0.998**	0.778	0.638	0.767	0.900*	0.701	0.993**	0.894*	0.884*
1,2,4-TrCBz	-0.511	0.400	0.671	0.408	0.997**	1	0.992**	1.000**	0.800	0.639	0.763	0.914*	0.644	0.990**	0.918*	0.889*
1,2,3-TrCBz	-0.500	0.404	0.693	0.422	0.991**	0.992**	1	0.993**	0.854	0.728	0.699	0.947*	0.644	0.986**	0.869	0.911*
SUM-TrCBz	-0.512	0.410	0.678	0.416	0.998**	1.000**	0.993**	1	0.797	0.642	0.763	0.913*	0.658	0.991**	0.912*	0.889*
1,2,4,5-TeCBz	-0.361	0.125	0.526	0.232	0.778	0.800	0.854	0.797	1	0.925*	0.315	0.956*	-0.060	0.775	0.645	0.858
1,2,3,5-TeCBz	-0.201	0.269	0.601	0.368	0.638	0.639	0.728	0.642	0.925*	1	0.148	0.866	0.024	0.651	0.373	0.724
1,2,3,4-TeCBz	-0.081	0.675	0.733	0.656	0.767	0.763	0.699	0.763	0.315	0.148	1	0.571	0.744	0.804	0.845	0.396
SUM-TeCBz	-0.307	0.363	0.716	0.448	0.900*	0.914*	0.947*	0.913*	0.956*	0.866	0.571	1	0.213	0.450	0.784	0.848
PCBz	0.394	0.961**	0.807	0.923*	0.356	0.318	0.289	0.326	-0.060	0.024	0.744	1	0.654	0.436	0.295	-0.093
HCBz	-0.373	0.732	0.683	0.608	0.701	0.644	0.644	0.658	0.261	0.331	0.627	0.654	1	0.701	0.425	0.510
SUM-CBz	-0.414	0.523	0.767	0.531	0.993**	0.990**	0.986**	0.991**	0.775	0.651	0.804	0.436	0.701	1	0.892*	0.836
PCDD/Fs	-0.409	0.276	0.530	0.301	0.894*	0.918*	0.869	0.912*	0.645	0.373	0.845	0.295	0.425	0.892*	1	0.727
I-TEQ	-0.763	0.052	0.374	0.052	0.884*	0.889*	0.911*	0.889*	0.858	0.724	0.396	-0.093	0.510	0.836	0.727	1

注: * P<0.05; ** P<0.01.

表3 生活垃圾焚烧炉 B 中 CBz 浓度、PCDD/Fs 浓度、I-TEQ 之间的相关性
Table 3 The correlation between the concentration of CBzs, PCDD/Fs, I-TEQ in CFB B

	1,3-DCBz	1,4-DCBz	1,2-DCBz	SUM-DCBz	1,3,5-TrCBz	1,2,4-TrCBz	1,2,3-TrCBz	SUM-TrCBz	1,2,4,5-TeCBz	1,2,3,4-TeCBz	SUM-TeCBz	PCBz	HCBz	SUM-CBz	PCDD/Fs	I-TEQ
1,3-DCBz	1															
1,4-DCBz	0.262	1														
1,2-DCBz	0.772	-0.154	1													
SUM-DCBz	0.754	0.827	0.381	1												
1,3,5-TrCBz	-0.007	0.434	0.792	0.401	0.504	0.385	0.741	0.625	0.678	0.301	0.718	0.389	0.659			
1,2,4-TrCBz	0.823	0.818	-0.266	0.802	-0.407	-0.437	0.370	-0.143	0.559	0.937*	0.835	0.834	0.774			
1,2,3-TrCBz	-0.093	0.273	0.956*	0.290	0.742	0.716	0.511	0.717	0.314	-0.239	0.403	0.289	0.456			
SUM-TrCBz	0.585	0.834	0.301	0.810	0.038	-0.042	0.679	0.282	0.760	0.786	0.993**	0.828	0.930*			
1,2,4,5-TeCBz	-0.007	0.823	-0.093	0.585	1	0.892*	-0.335	0.907*	-0.519	-0.465	-0.021	0.580	0.656	0.855	0.611	
1,2,3,5-TeCBz	0.434	0.818	0.273	0.834	0.892*	1	0.051	0.995**	-0.279	-0.284	0.238	0.324	0.598	0.884*	0.908*	0.794
1,2,3,4-TeCBz	0.792	-0.266	0.956*	0.301	-0.335	0.051	1	0.061	0.869	0.818	0.617	0.412	-0.249	0.294	0.112	0.369
SUM-TeCBz	0.401	0.802	0.290	0.810	0.907*	0.995**	0.061	1	-0.243	-0.233	0.242	0.317	0.570	0.868	0.932*	0.805
1,2,4,5-TeCBz	0.504	-0.407	0.742	0.038	-0.519	-0.279	0.869	-0.243	1	0.985**	0.659	0.447	-0.300	0.025	-0.041	0.227
1,2,3,5-TeCBz	0.385	-0.437	0.716	-0.042	-0.465	-0.284	0.818	-0.233	0.985**	1	0.582	0.359	-0.368	-0.036	-0.019	0.197
1,2,3,4-TeCBz	0.741	0.370	0.511	0.679	-0.021	0.238	0.617	0.242	0.659	0.582	1	0.845	0.515	0.640	0.476	0.765
SUM-TeCBz	0.625	-0.143	0.717	0.282	-0.361	-0.101	0.844	-0.071	0.959**	0.923*	0.845	1	0.680	-0.017	0.166	0.458
PCBz	0.678	0.559	0.314	0.760	0.112	0.324	0.412	0.317	0.447	0.359	0.965**	0.680	1	0.715	0.540	0.799
HCBz	0.301	0.937*	-0.239	0.786	0.580	0.598	-0.249	0.570	-0.300	-0.368	0.515	-0.017	0.715	1	0.756	0.709
SUM-CBz	0.718	0.835	0.403	0.993**	0.656	0.884*	0.294	0.868	0.025	-0.036	0.640	0.261	0.713	0.756	1	0.882*
PCDD/Fs	0.389	0.834	0.289	0.828	0.855	0.908*	0.112	0.932*	-0.041	-0.019	0.476	0.166	0.540	0.663	0.882*	1
I-TEQ	0.659	0.774	0.456	0.930*	0.611	0.794	0.369	0.805	0.227	0.197	0.765	0.458	0.799	0.948*	0.923*	1

注: * P<0.05; ** P<0.01.

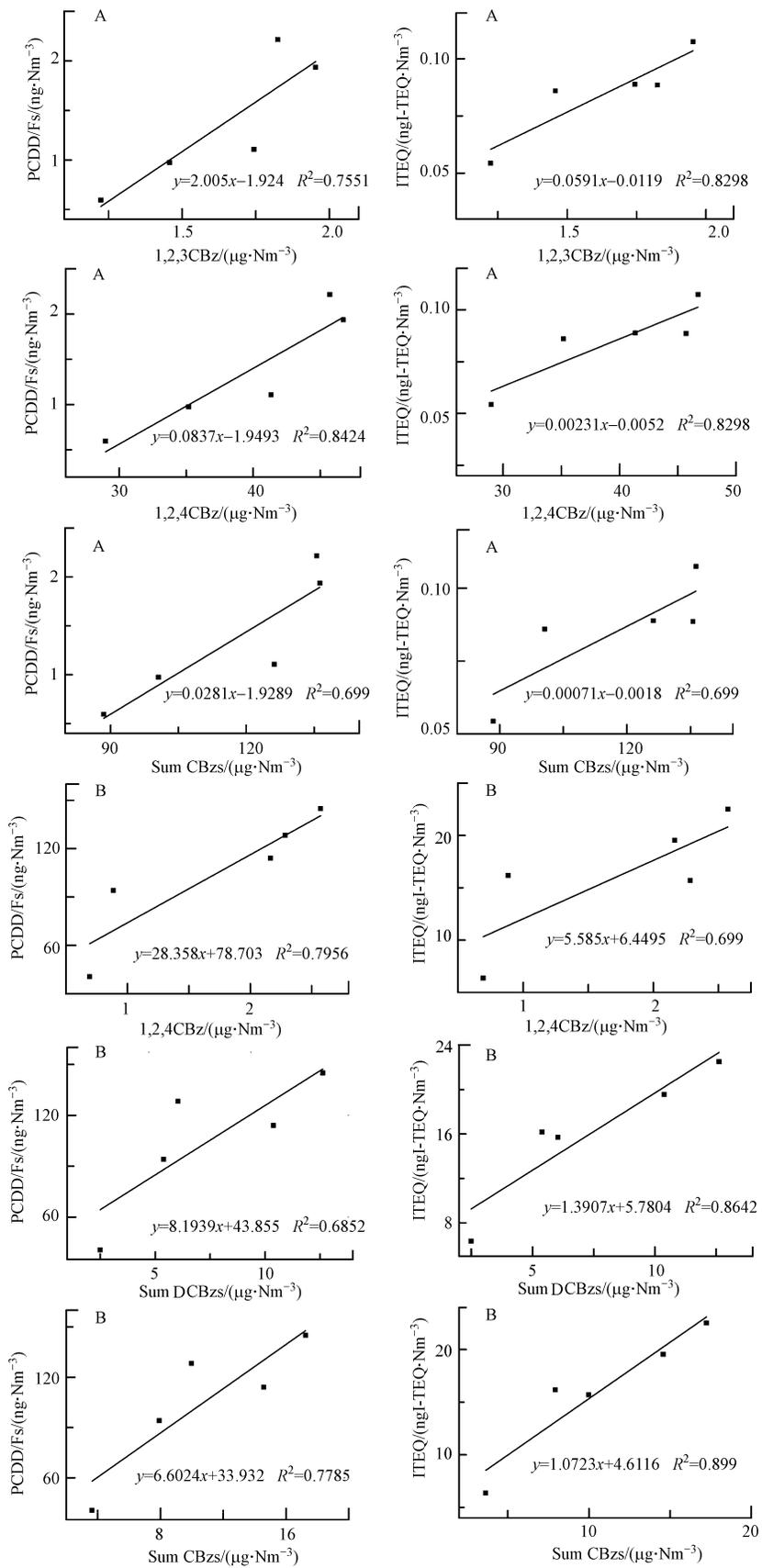


图 4 焚烧炉 A 和 B 中指示物与二噁英浓度及毒性当量的关联

Fig.4 Correlation model between indicator and PCDD/Fs, I-TEQ in A and B

参考文献 (References)

- [1] 徐海云.生活垃圾焚烧处理技术发展分析[J]. 中国环保产业, 2010(9):10-15.
XU H Y. Development analysis on treatment technology of domestic refuse incineration[J]. China Environmental Protection Industry, 2010 (9):10-15(in Chinese).
- [2] 尚凡杰.二噁英关联模型及其在线监测初步研究[D].杭州:浙江大学,2015.
SHANG F J. Study on dioxin correlation model and on-line monitoring[D].Hangzhou:Zhejiang University,2015(in Chinese).
- [3] ZHOU H, MENG A, LONG Y, et al. A review of dioxin-related substances during municipal solid waste incineration[J].Waste Manag, 2015,36:106-118.
- [4] LAVRIC E D, KONNOV A A, RUYCK J D. Surrogate compounds for dioxins in incineration. A review[J]. Waste Management, 2005, 25 (7):755-765.
- [5] KAUNE A, LENOIR D, SCHRAMM K W, et al. Chlorobenzenes and chlorophenols as indicator parameters for chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans in incineration processes: Influences of various facilities and sampling points[J]. Environmental Engineering Science, 1998, 15(1):85-95.
- [6] KATO M, URANO K. Convenient substitute indices to toxic equivalent quantity for controlling and monitoring dioxins in stack gas from waste incineration facilities[J]. Waste Management, 2001, 21(1):55-62.
- [7] 陆胜勇,李晓东,罗健松,等.在线测量模拟烟气中萘和三氯苯的试验研究[J].浙江大学学报,2007,41(8):1406-1410.
LU S Y, LI X D, LUO J S, et al. Experimental study online testing of acenaphthylene and trichlorobenzene in fluegas[J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 41(8):1406-1410(in Chinese).
- [8] YAN J H, PENG Z, LU S Y, et al. Destruction of PCDD/Fs by gliding arc discharges[J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2007,19(11):1404-1408.
- [9] 杨丽莉,母应锋,胡恩宇,等.Tenax 富集-毛细管气相色谱法同时测定环境空气中 12 种氯苯类化合物[J].安全与环境学报,2007,7(1):106-108.
YANG L L, MU Y F, HU E Y, et al. Simultaneous determination of trace 12 chlorinated benzene compounds in air by capillary gas chromatography with Tenax adsorption tube enrichment[J]. Journal of Safety & Environment, 2007, 7(1):106-108(in Chinese).
- [10] SAKURAI T, WEBER R, UENO S, et al. Relevance of coplanar PCBs for TEQ emission of fluidized bed incineration and impact of emission control devices[J]. Chemosphere, 2003, 53(6):619-625.
- [11] CANEGHEM J V, BREMS A, LIEVENS P, et al. Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2012, 38(4):551-582.
- [12] 林晓青,李晓东,陆胜勇,等.垃圾焚烧炉二噁英排放特性与减排技术展望[J].热能动力工程,2015,30(3):329-332.
LIN X Q, LI X D, LU S Y, et al. Dioxin emissions characteristics of a waste incinerator and prospects of the emissions reduction technologies[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2015, 30(3):329-332(in Chinese).
- [13] GAO H, NI Y, ZHANG H, et al. Stack gas emissions of PCDD/Fs from hospital waste incinerators in China[J]. Chemosphere,2009,77(5):634-639.
- [14] 郭颖.固废处置中持久性自由基/二噁英的排放特性及检测研究[D].杭州:浙江大学,2014.
GUO Y. Study on emission characteristics and detection of pccdd/fs and environment persistent free radicals during solid waste disposal[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2014(in Chinese).
- [15] WANG T J, CHEN T, LIN X Q, et al. Emission and distribution of PCDD/Fs, chlorobenzenes, chlorophenols, and PAHs from stack gas of a fluidized bed and a stoker waste incinerator in China[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(6):5607-5618.
- [16] NGANAI S, DELLINGER B, LOMNICKI S. PCDD/PCDFRatio in the precursor formation model over CuO surface[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(23):13864-13870.
- [17] GHORISHI S B, ALTWICKER E R. Rapid formation of polychlorinated dioxins/furans during the heterogeneous combustion of 1,2-dichlorobenzene and 2,4-dichlorophenol[J]. Chemosphere, 1996, 32(1):133-144.
- [18] BUSER H R. Formation of polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) and dibenzo-p-dioxins (PCDDs) from the pyrolysis of chlorobenzenes [J].Chemosphere, 1979. 8(6):415-424.
- [19] 郭颖,陈彤,杨杰,等.基于关联模型的二噁英在线检测研究[J].环境工程学报,2014,8(8):3524-3529.
GUO Y, CHEN T, YANG J, et al. Study on on-line detection of dioxins based on correlation model[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(8):3524-3529(in Chinese).