

严 骁, 贾 燕, 王美欢, 等. 农村垃圾小型焚烧炉烟气污染物排放特征及影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 820–824.

YAN Xiao, JIA Yan, WANG Mei-huan, et al. Emission characteristics and the environmental influence of pollutants in flue gas from small waste incinerators [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 820–824.

农村垃圾小型焚烧炉烟气污染物 排放特征及影响因素研究

严 骁, 贾 燕, 王美欢, 许榕发, 郑 晶, 任明忠 *

(环境保护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)

摘 要:为研究小型农村垃圾焚烧炉烟气中污染物的排放情况, 选取了 7 个日处理规模在 5~12 t 之间的垃圾焚烧炉, 对烟气中二噁英、重金属及洗涤废水中重金属开展监测分析, 同时研究不同热处理方式和烟气处理工艺组合对烟气中污染物排放的影响。结果表明: 7 个小型垃圾焚烧炉烟气中二噁英和重金属浓度差别较大, 二噁英浓度范围为 0.038~24.87 ng TEQ·m⁻³, Pb 和 Hg 的浓度范围分别为 0.013~0.576 mg·m⁻³ 和 0.314~579 μg·m⁻³, Cd 浓度仅 3 个样品高于检出限, 总 Cr 浓度均低于检出限。对照《生活垃圾污染物控制标准》(GB 18485—2014)规定的限值, 仅 1 个样品二噁英排放达标, 所有样品的总 Cr 和 Pb、6 个样品的 Cd 和 4 个样品的 Hg 排放达标。4 个洗涤废水样品中仅 Hg 有检出, 范围为 0.54~0.79 μg·m⁻³。研究表明: 不同焚烧工艺和烟气处理工艺的小型农村垃圾焚烧炉烟气中污染物浓度存在较大差异, 对比不同的焚烧工艺发现, 热解气化比简易焚烧的烟气二噁英低; 对于不同的烟气处理工艺, 碱液水洗对烟气 Hg 去除效果较好, 活性炭吸附+布袋除尘的组合工艺对烟气中二噁英及多种重金属污染物均有较好去除效果。

关键词:农村垃圾; 小型焚烧设施; 烟气污染物; 二噁英; 重金属

中图分类号: X502 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)04-0820-05 doi:10.11654/jaes.2017-1170

Emission characteristics and the environmental influence of pollutants in flue gas from small waste incinerators

YAN Xiao, JIA Yan, WANG Mei-huan, XU Rong-fa, ZHENG Jing, REN Ming-zhong*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Seven incinerators, with a daily processing capacity of 5~12 tons, were selected to study the pollutants in flue gas emitted from typical small waste incinerators in rural areas. Dioxins and heavy metals in the flue gas, as well as heavy metals in the washing wastewater, were analyzed. The effects of the incineration processes and gas treatments on the contaminants in flue gas were also investigated. The levels of dioxins and heavy metals in flue gas samples differed significantly in the seven incinerators. The toxic equivalent concentrations range for dioxin was 0.038~24.87 ng TEQ·m⁻³. The concentration ranges for Pb and Hg were 0.013~0.576 mg·m⁻³ and 0.314~579 μg·m⁻³, respectively. However, the Cd concentrations in four samples and all the Cr concentrations were lower than the detection limit. Compared with the pollution control standard for the municipal solid waste incineration (GB 18485—2014), only one flue gas sample had a toxic equivalent concentration of dioxins under the standard limit, while the Cr and Pb concentrations in all seven samples, Cd in six samples, and Hg in four samples were under the standard limit. In the four washing wastewater samples, only Hg was detected, with a concentration range of 0.54~0.79 μg·m⁻³. A comparison of the different incineration processes showed that thermal decomposition produced lower dioxins concentrations in the flue gas than simple incineration. Alkali washing was more effective at Hg removal than other gas treatments. Active carbon combined with a bag-type dust collector had favorable effects on dioxins and heavy metal removal.

Keywords: rural waste; small waste incinerator; flue gas pollutant; dioxin; heavy metal

收稿日期: 2017-08-28 录用日期: 2017-12-21

作者简介: 严 骁(1986—), 女, 河南洛阳人, 博士, 助理研究员, 从事环境污染物相关研究。E-mail: yanxiao@scies.org

* 通信作者: 任明忠 E-mail: renmingzhong@scies.org

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2014B020216006)

Project supported: Provincial Science and Technology Project of Guangdong Province(2014B020216006)

随着社会经济的快速发展,农村人民的生活水平也日益提高,农村生活垃圾产量逐年增加。尚晓博等^[1]研究调查,2011 年我国农村生活垃圾年产生量超过 3 亿 t,且仍以 8%~10%的速度快速增长^[2]。随着新农村建设工作开展,“户收集、村集中、镇转运、县(市)集中处理”的城乡一体化的运作模式在全国多地试点,但由于运输成本较高,仅在沿海少数经济发达县市成功应用^[3]。尽管《生活垃圾焚烧处理工程技术规范》(CJJ 90—2009)中规定焚烧规模不能小于 150 t·d⁻¹,但由于焚烧处理减量化,适用范围广,垃圾小规模焚烧处理在我国多地农村广泛存在^[4]。2015 年《关于全面推进农村垃圾治理的指导意见》指出,“我国将逐步取缔二次污染严重的简易填埋设施以及小型焚烧炉等。边远村庄垃圾尽量就地减量、处理,不具备处理条件的应妥善储存、定期外运处理”,表明小规模的垃圾处理处置设施在经济落后或偏远农村仍然具有一定的适用性。然而,小型垃圾焚烧炉由于工艺、设备以及管理的不完善,垃圾处置产生的二次污染引起了社会广泛的关注^[5]。Zhang 等^[6]调查采样发现,我国小型垃圾焚烧炉的 PCDD/Fs(二噁英类污染物)的排放浓度远高于大型市政垃圾焚烧设施。目前,针对小型农村垃圾焚烧炉烟气中污染物特别是二噁英类污染物的研究报道还很稀少,刘劲松等^[7]对一个小型农村生活垃圾焚烧炉燃烧阶段废气中二噁英的监测结果高达 69.2 ng TEQ·m⁻³,而桂莉^[8]的研究发现某小型垃圾热解气化炉烟气中的二噁英仅为 0.197 ng TEQ·m⁻³,仅有的两个研究均仅采集了 1 个烟气样品,且研究结果差异较大,不能呈现出我国小型农村垃圾焚烧炉的烟气污染物排放现状。

简易焚烧和热解等农村垃圾焚烧炉近年来在我国各地的许多农村地区广泛出现,为偏远地区农村

垃圾的妥善处理提供了新的方式,在一定程度上缓解了我国农村垃圾散乱的现象,但目前针对小型农村垃圾焚烧炉的工艺特征、污染物排放等均没有规范,造成各类小型农村垃圾焚烧炉技术参差不齐,而对于这些设施烟气中污染物的排放情况,尚未有专门针对性研究。本研究通过对 7 座典型的农村简易焚烧和热解炉烟气、废水中的污染物排放监测分析,以获得具有代表性的农村垃圾焚烧炉烟气污染物排放的监测数据,同时对比不同热处理方式和烟气净化设施对污染物排放的影响,为农村地区因地制宜选择垃圾处理施工工艺,减少垃圾处理二次污染提供基础数据和合理建议。

1 材料和方法

1.1 调查点位和样品采集

本研究于 2014 年在我国西南地区选取了 7 座小型农村垃圾焚烧炉开展了采样监测,并通过现场调研和问卷调查相结合的方式,对主要技术参数和工艺特征进行了统计,焚烧炉的基本情况如表 1 所示。7 座垃圾焚烧炉焚烧工艺主要为简易焚烧和热解两种热处理类型,烟气净化工艺包括湿法洗涤、活性炭吸附和布袋除尘,除 6 号和 7 号焚烧炉未采用烟气净化设备外,其他焚烧炉均采用一种或综合多种烟气净化工艺设备。

样品采集包括垃圾处理过程中的焚烧烟气和烟气洗涤废水,其中烟气样品主要采集位置为烟气排口,洗涤废水采自循环冷却水池。废气采样系统连接好后应进行气密性检查,确保整体系统不漏气。废水采样前,检查和确认废水采样器和样品瓶的材质能否满足待测废水的特性要求,做到不吸附、不溶出和与待测污染物发生化学反应。每批水样选择部分项目

表 1 7 座垃圾焚烧炉基本情况
Table 1 The information of seven incinerator monitoring in this study

焚烧炉编号	日处理量/t·d ⁻¹	焚烧工艺/工况	烟气净化工艺
1	5	简易焚烧,炉膛中温 870 ℃,烟气停留时间>2 s,垃圾在炉内驻留时间 2~3 h·t ⁻¹	焚烧+水洗+矿化床净化污水
2	12	热解,炉膛中温 870 ℃,烟气停留时间>2 s,垃圾在炉内驻留时间 2~3 h·t ⁻¹	热解+水洗+活性炭吸附
3	6~8	简易焚烧,炉膛中温 1200 ℃,烟气停留时间>2 s,垃圾在炉内驻留时间 2~3 h·t ⁻¹	焚烧+石灰水沐
4	10	热解气化,间隙式进料 0.5 t·h ⁻¹ ,热解室温度 900~1200 ℃,二燃室温度>850 ℃,垃圾在炉内驻留时间 1 h·t ⁻¹	热解气化+二燃室+冷却装置+干法脱硫+活性炭吸附+布袋除尘
5	5	简易焚烧,间隙式进料 0.5 t·h ⁻¹ ,焚烧炉温度 800~900 ℃	焚烧+湍流式除尘脱硫系统(碱液水洗)+等离子体+烟气反应罐
6	5	热解气化,间隙式进料 20~30 min·次 ⁻¹ ,热解室温度 750 ℃,二燃室温度 900~1100 ℃,垃圾在炉内驻留时间 2~3 h·t ⁻¹	热解气化+二燃室
7	10	同编号 6	热解气化+二燃室

加采现场空白样,并加入保存剂进行固定,把样品置于低温下保存并将样品迅速送交实验室。其中,烟气中二噁英样品按照标准《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)采集,烟气中重金属烟气样品遵循《固定污染源排气中颗粒物和气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)采集。

1.2 检测方法

本研究主要目标污染物为烟气中 Pb、Hg、Cd 和 Cr 等重金属以及二噁英,在测定其含量的同时,对一些烟气洗涤废水中的 Pb、Hg、Cd 和 Cr 含量进行了采样分析。主要仪器分析方法及检出限见表 2。

2 结果与讨论

2.1 烟气处理措施对二噁英排放影响

7 座垃圾焚烧炉的烟气二噁英排放浓度见表 3。对于 7 座垃圾焚烧设施,除采用了“热解气化+二燃室+冷却装置+干法脱硫+活性炭吸附+布袋除尘”工艺的 4 号焚烧炉外,其他监测点烟气二噁英毒性当量排放浓度均不同程度地超出《生活垃圾焚烧污染物控制标准》(GB 18485—2014)(图 1),其中 1 号设施二噁英浓度高达 $24.87 \text{ ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3}$,是 GB 18485—2014 规定的烟气二噁英排放限值($0.1 \text{ ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3}$)的约 250 倍。

4 号、6 号和 7 号焚烧炉采用了“热解气化+二燃室”技术,其中采用“冷却装置+干法脱硫+活性炭吸附+布袋除尘”烟气净化工艺的 4 号焚烧炉烟气二噁英毒性当量低至 $0.038 \text{ ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3}$,低于 GB 18485—2014 中的限值,而未添加烟气净化装置的 6 号和 7 号焚烧炉烟气二噁英毒性当量均值则分别为 $3.145 \text{ ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $4.32 \text{ ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3}$,分别是 GB 18485—

2014 中限值的约 30 倍和 40 倍,表明“活性炭吸附+布袋除尘”组合的烟气净化工艺对烟气中的二噁英具有较好的去除效果。

Choi 等^[9]调查了韩国 50 个处理能力在 $40 \sim 195 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 的小型焚烧炉,大部分焚烧炉仅使用旋风除尘器作为烟气净化系统,部分使用旋风除尘+湿法洗涤/布袋等,但均未使用活性炭喷射吸附,其中焚烧炉烟气二噁英的排放浓度高达 $609.27 \text{ ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3}$,该研究的结论与本研究对于未采用活性炭喷射的焚烧炉的

表 3 焚烧炉烟气二噁英排放浓度

Table 3 The concentration of dioxin in flue gas

焚烧炉编号	二噁英类含量(当量)/ $\text{ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3}$	PCDFs/PCDDs
1	24.87	4.49
2	4.885	2.265
3	17.45	1.195
4	0.038	1.825
5	1.15	1.33
6	3.145	2.01
7	4.32	1.475

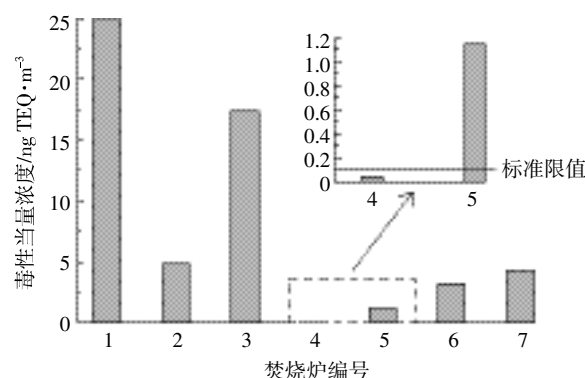


图 1 焚烧炉烟气二噁英毒性当量排放浓度

Figure 1 The toxic equivalent concentration of dioxin in flue gas

表 2 烟气中污染物指标分析方法

Table 2 The methods of pollutants analyzed in flue gas

检测项目	检测指标	检测方法	检出限
烟气	Cd	火焰原子吸收分光光度法	$3 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
	总 Cr	原子吸收分光光度法	$0.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	Pb	火焰原子吸收分光光度法	$0.013 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
	Hg	原子荧光分光光度法	$3 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	二噁英	同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法	—
废水	Cd	电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)	$0.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
	总 Cr	电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)	$0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
	Pb	电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)	$0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
	Hg	电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)	$0.01 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

监测结果较一致。对于同样采用“简易焚烧”处理工艺的 1 号和 5 号焚烧炉,使用水洗作为唯一烟气净化工艺的 1 号焚烧炉二噁英排放浓度最高,达到 24.87 ng TEQ·m⁻³,是 5 号焚烧炉的 21.6 倍。采用“石灰水沐”的 3 号焚烧炉,二噁英排放浓度也达到 17.45 ng TEQ·m⁻³。研究结果表明,无论是水洗还是石灰水沐,仅使用湿法洗涤工艺对烟气中二噁英的去除效果并不理想。

2.2 不同焚烧工艺对烟气二噁英含量的影响

对于同样采用“湿法洗涤”烟气净化工艺的 1、2 号和 3 号焚烧炉,采用“简易焚烧”工艺的 1 号和 3 号焚烧炉分别较采用“热解”工艺的 2 号焚烧炉烟气二噁英排放浓度高 410%和 257%。对于未设置额外的烟气净化装置,采用“热解气化+二燃室”的 6 号和 7 号焚烧炉,烟气二噁英含量分别为 3.145、4.32 ng TEQ·m⁻³,低于采用“简易焚烧”工艺的 5 号焚烧炉未净化烟气的二噁英含量(6.89 ng TEQ·Nm⁻³)。此外,研究发现,原始垃圾中 PCDDs 一般比 PCDFs 含量高,PCDFs 主要来自于焚烧后的合成^[10]。从表 3 可知,各监测位点烟气中 PCDFs/PCDDs 比值均大于 1,表明烟气中的二噁英类污染物可能主要来源于垃圾焚烧和烟气降温过程中合成的 PCDFs,因此,采用热解技术较一般焚烧更能有效抑制二噁英的生成。

2.3 烟气和烟气洗涤液中重金属污染情况

从图 2 可见,7 座焚烧炉烟气中总 Cr 和 Pb 的排放浓度均低于 GB 18485—2014 限值(Cr+Pb ≤ 1.0 mg·m⁻³),除 1 号焚烧炉 Cd 排放浓度达 0.113 mg·m⁻³超过 GB 18485—2014 排放限值外,其他焚烧炉烟气中 Cd 浓度均远低于排放限值。结合表 4 中各焚烧炉烟气洗涤液重金属含量可见,1 号焚烧炉烟气洗涤液中 Cd、Pb 含量均远低于检测下限,排除在洗涤过程中二次污染的可能性,同时也说明简单采用水洗工艺

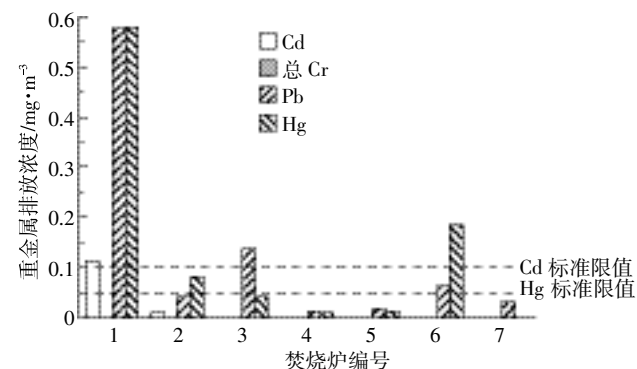


图 2 焚烧炉烟气重金属排放浓度

Figure 2 The heavy metals concentration in flue gas

表 4 焚烧炉烟气洗涤液重金属含量

Table 4 The heavy metals concentrations in washing wastewater

焚烧炉编号	Cd/mg·m ⁻³	总 Cr/μg·m ⁻³	Pb/mg·m ⁻³	Hg/μg·m ⁻³
1	0.003L	0.01L	0.05L	0.54
2	0.003L	0.01L	0.05L	0.68
3	0.003L	0.01L	0.05L	0.79
5	0.003L	0.01L	0.05L	0.61

注:L表示监测数据低于检测限(L前面的数值)。

Note:L indicate data monitored lower than the limit of detection (the data in front of L).

并不能有效去除烟气中的 Cd 和 Pb。

在 7 座焚烧炉中,1、2、6 号焚烧炉的烟气 Hg 含量超过 GB 18485—2014 的限值,其他焚烧炉烟气中 Hg 含量均能达标排放。同样,采用“碱液洗涤”且未采用“活性炭吸附+布袋除尘”工艺的 3 号焚烧炉,烟气 Hg 含量也能达到较低的 0.041 mg·m⁻³,说明“碱液洗涤”工艺对烟气中 Hg 具有较好的去除效果,其原因可能是 Hg²⁺与碱液中的 OH⁻发生反应: Hg²⁺+2OH⁻=HgO+H₂O,产生的 HgO 沉淀在洗涤液中被去除。

采用“活性炭吸附+布袋除尘”的 4 号焚烧炉烟气中各重金属含量均能控制在较低水平,且低于 GB 18485—2014 的限值,比同样采用“热解气化+二燃室”焚烧工艺的 6 号和 7 号焚烧炉相比,4 号焚烧炉烟气中 Cd 和总 Cr 均未检出,Pb 浓度也较低,提示“活性炭吸附+布袋除尘”对烟气中重金属的去除具有较好的效果。

3 结论

(1)所调查的 7 座焚烧炉的烟气样品中二噁英和重金属浓度存在较大差异。仅有 1 座焚烧炉的烟气样品中二噁英浓度明显低于其他样品,符合《生活垃圾焚烧污染物控制标准》(GB 18485—2014)中的排放标准,其余 6 座焚烧炉的二噁英均高于标准限值,最高超标约 250 倍。所调查的焚烧炉的烟气样品中重金属浓度则大部分排放达标,仅 3 座焚烧炉的 Hg 浓度和 1 座焚烧炉的 Cd 浓度排放超标。

(2)不同的焚烧和烟气处理工艺对烟气中污染物浓度也存在影响,在本研究监测的 7 座焚烧炉中,采用热解-焚烧工艺的焚烧炉所产生的烟气中二噁英及重金属排放浓度均低于简易焚烧工艺;“活性炭吸附+布袋除尘”对烟气二噁英及多种重金属污染物的去除有较好的效果;碱液水洗对烟气中 Hg 有较好的去除效果;普通水洗对二噁英及重金属污染物去除均无明显效果。

参考文献:

- [1] 尚晓博, 张朝升, 荣宏伟, 等. 中国农村生活垃圾问题与解决对策[J]. 现代化农业, 2011(11): 34-46.
SHANG Xiao-bo, ZHANG Zhao-sheng, RONG Hong-wei, et al. Problems and countermeasures of rural domestic refuse in China[J]. *Modernizing Agriculture*, 2011(11): 34-46.
- [2] 普锦成, 袁进, 李晓姣, 等. 我国农村生活垃圾污染现状与治理对策[J]. 现代农业科技, 2012, 570(4): 283-285.
PU Jin-cheng, YUAN jin, LI Xiao-jiao, et al. The status and prevention countermeasures of rural domestic garbage pollution in China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012, 570(4): 283-285.
- [3] 何晶晶, 张春燕, 杨娜, 等. 我国村镇生活垃圾处理现状与技术路线探讨[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2049-2054.
HE Pin-jing, ZHANG Chun-yan, YANG Na, et al. Present situation and technical treatment route of rural domestic waste treatment in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2049-2054.
- [4] 岑超平, 陈雄波, 韩琪, 等. 对农村生活垃圾小规模焚烧的思考[J]. 环境保护, 2016, 44(21): 42-44.
CEN Chao-ping, CHEN Xiong-bo, HAN Qi, et al. Thoughts on small-scale incineration of rural domestic refuse[J]. *Environmental Protection*, 2016, 44(21): 42-44.
- [5] 张静, 仲跻胜, 邵立明, 等. 海南省琼海市农村生活垃圾产生特征及就地处理实践[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2422-2427.
ZHANG Jing, ZHONG Ji-sheng, SHAO Li-ming, et al. Characteristics of rural household solid wastes and in situ treatment: A case study in Qionghai City of Hainan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2422-2427.
- [6] Zhang G, Hai J, Cheng J. Characterization and mass balance of dioxin from a large-scale municipal solid waste incinerator in China[J]. *Waste Management*, 2012, 32(6): 1156-1162.
- [7] 刘劲松, 潘荷芳, 巩宏评, 等. 农村小型生活垃圾焚烧炉周边环境二噁英类污染物来源及分布规律研究[C]//持久性有机污染物论坛2008暨第三届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集, 2008: 209-210.
LIU Jin-song, PAN He-fang, GONG Hong-ping, et al. The source and distribution of dioxin in the environment near a rural waste incinerator [C]//Proceedings of POPs forum 2008 & 3th symposium on persistent organic pollutants, 2008: 209-210.
- [8] 桂莉. 农村生活垃圾热解污染物排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
GUI Li. The study of emission characteristics for a rural waste incinerator[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [9] Choi K, Lee S, Lee D. Emissions of PCDDs/DFs and dioxin-like PCBs from small waste incinerators in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(5): 940-948.
- [10] Wikström E, Ryan S, Touati A, et al. Importance of chlorine speciation on denovo formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(6): 1108-1113.