

焚烧源挥发性重金属的排放对周边土壤 和植被污染的研究进展

孔丝纺¹, 刘阳生^{1,2}, 曾辉^{1,3}, 解庆龙¹, 吕晓蕾¹

1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;

3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

摘要:城市生活垃圾是一种成分复杂的混合废物, 其中含有数量相当可观的重金属, 采用焚烧法处理城市生活垃圾时, 会有大量重金属因为高温而挥发进入烟气, 一部分富集于焚烧飞灰中, 而有少部分重金属因其挥发性较大而排放于大气中, 最终随大气及雨水沉降而进入土壤和植被中, 从而会对焚烧厂周边生态环境造成严重的危害。为了了解焚烧源挥发性重金属(汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)和砷(As))的排放对焚烧厂周边土壤和植被生态环境的污染状况, 对近年来国内外学者在相关方面的研究状况进行了详细的文献综述, 结果发现: 国内学者对于焚烧源挥发性重金属的研究多限于焚烧中挥发性Hg对焚烧厂周边土壤的污染的调查研究, 而对于焚烧源Cd、Pb、As对周边土壤和植被污染的调查研究相对较少; 而国外学者已有的关于垃圾焚烧源重金属(Hg、Cd、Pb、As)对土壤和植被的污染研究只停留在重金属在土壤中的总的浓度和存在形态的研究, 而对于挥发性重金属在焚烧源周边土壤和植被中的迁移转化规律方面的研究很缺乏, 对于重金属污染物在土壤和植被中的蓄积及迁移转化规律研究较少。文章指出今后的研究应加强对挥发性重金属在焚烧厂周边土壤中的污染特征及其在土壤层以及植被中的蓄积总量和迁移转化机理的研究, 这对于焚烧源挥发性重金属的污染防治以及对已被挥发性重金属污染的土壤和植被的生态修复具有重要的意义。

关键词:城市生活垃圾; 焚烧源; 挥发性重金属; 土壤; 植被

中图分类号: X820.3; X503

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 04-0985-06

随着经济的发展、城市规模的扩大以及人民生活水平的提高, 城市生活垃圾以每年8%~10%的速度增加, 全国2/3的城市出现垃圾包围城市的严重局面, 预计到2010年, 中国城市生活垃圾年产量将达到2.9亿t^[1-5], 因此合理、高效地处理城市生活垃圾将是我国面临的一个重大的环境问题。焚烧法处理城市生活垃圾由于具有无害化彻底、减容化显著、可资源化利用程度高等优点, 已经成为很多国家处理城市固体垃圾的主要方式之一^[6-18]。

城市生活垃圾是一种成份复杂的混合废物, 其中含有数量可观的重金属, 如铬的含量一般为100~450 g·t⁻¹, 镍为50~200 g·t⁻¹, 铜为450~2 500 g·t⁻¹, 锌为900~3 500 g·t⁻¹, 铅为750~2 500 g·t⁻¹, 镉为10~40 g·t⁻¹, 汞为2~7 g·t⁻¹^[19-21], 由于我国的垃圾分选制度并不完善, 生活垃圾中混入了部分建筑垃圾、工业垃圾及污泥等重金属含量相对较高的废物, 导致城市生活垃圾中重金属含量较其他国家有更高的水平。当采用焚烧的方法处理城市生活垃圾时, 大量的重金属因为高温而挥发到烟气中, 并最终富集于飞灰中, 能够被除尘系统捕集而除去, 但是仍有少量挥发性重金属(汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb))

和类金属砷(As)等)由于挥发性较大, 而随尾气散布到大气环境中, 最终随着大气和雨水沉降进入到土壤和植被中, 从而对焚烧厂周边生态环境产生潜在的危害^[22]。

目前, 垃圾焚烧飞灰中有毒有机污染物如二噁英等已经引起了人们的高度重视和广泛研究^[23-31], 而对挥发性重金属(汞、镉、铅、砷等)对周边土壤和植被生态环境污染的关注却较少。因此, 在国内外垃圾焚烧需求巨量增加的现实情况下, 加强对焚烧源挥发性重金属对垃圾焚烧厂周边土壤和植被的污染状况研究, 对于防治重金属污染物的排放以及重金属污染的土壤和植被的生态修复具有重要的现实意义。

1 挥发性重金属的危害及垃圾焚烧中重金属的来源

重金属是指相对密度大于4或5的金属, 包括Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、Hg、Ni、Co等45种元素。As虽不属于重金属, 但因其行为与来源以及危害都与重金属相似, 故通常列入重金属类进行讨论。大部分重金属对人体有毒害作用, 其中毒害作用最大的有5种: 汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)和砷

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830747); 深圳市科技局“双百计划”项目

作者简介: 孔丝纺 (1981年生), 女, 博士, 研究方向为固体废物处理与处置。E-mail: mengsiksif@163.com

收稿日期: 2010-01-11

(As), 俗称“五毒”^[32-34]。重金属的危害在于它不能被微生物分解, 且易在生物体内富集形成其它毒性更强的化合物, 并通过大气、饮水、食物等渠道为人体所摄取, 对人体的健康产生负面效应^[35]。

研究表明, 重金属对人体健康的危害是多方面、多层次的。重金属容易造成生殖障碍, 影响胚胎正常发育, 威胁儿童和成人身体健康。在中国乃至世界范围内, 由于重金属污染引起的疾病和环境公害事件是相当普遍的。如20世纪50—60年代发生在日本的水俣病, 就是因为烧碱制造工业排放的废水中含有汞, 在经生物作用变成氯化甲基汞后造成的^[36]; 又如痛痛病, 是由镉冶炼厂和镉电镀工业所排放的镉所致^[37]; 汽车尾气排放的铅经大气扩散等过程进入环境中, 造成目前地表铅的浓度已有显著提高, 致使近代人体内铅的吸收量比原始人增加了约100倍, 损害了人体健康, 其中有丧失视力、失眠、肾功能衰竭、癌症瘫痪和抽搐; 还有泰国西南部砷污染造成的“黑脚病”和瑞典镉、铅、砷造成女工的自然流产率和胎儿畸形比率明显提高等。2008年, 我国相继发生了贵州独山县、湖南辰溪县、广西河池、云南阳宗海、河南大沙河等多起砷污染事件, 2009年8月以来, 又发生了陕西凤翔儿童血铅超标、湖南浏阳镉污染及山东临沂砷污染事件, 可见, 重金属污染造成的危害是相当严重的^[38]。

城市生活垃圾中重金属污染既来源于垃圾体中金属制品或镀金属制品中金属离子溶出的直接贡献, 如电池、废灯管、废旧电器及表面镀金属的各种生活资料, 也来源于含重金属成分的各类原材料在使用与废弃过程中的重金属离子的释放, 如含重金属的纸张、油漆、油墨及染料等, 甚至包括由源自生物链富集食物。现阶段通常认为垃圾焚烧过程中产生的重金属主要来自于电池、电器、温度计、颜料、塑料、报纸、杂志、半导体、橡胶、镀金材料、彩色胶卷、纺织品、杂草等^[39,40]。尽管人们针对垃圾焚烧过程中产生的飞灰烟气的重金属采取了相关的控制措施, 但仍然有较多的挥发性重金属(Gd、Hg、Pb、As等)在焚烧过程中由于沸点较低或与氯化物发生反应形成沸点较低的化合物, 并以气溶胶的形式挥发到空气中, 随着大气沉降对周边的土壤环境产生污染和危害, 进而对植被产生潜在的危害。

2 垃圾焚烧厂挥发性重金属的排放对周围土壤和植被的污染现状

2.1 国内研究现状

近年来, 随着垃圾焚烧技术在城市生活垃圾处理中的不断推广, 由垃圾焚烧引起的二次污染问题(二噁英、重金属污染等)也逐渐引起人们的关注。

目前国内学者对于焚烧源挥发性重金属对周边环境的影响规律研究进行了一些研究, 取得了一定的进展。

汤庆合^[41]等人从大气、植被、土壤等方面对上海市浦东生活垃圾焚烧厂周边环境汞影响做出了初步调查, 结果显示: 垃圾焚烧厂周边环境的土壤中汞的背景值偏高, 平均为 $125.9 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; 运行1年后和2年后的平均值分别为 $139.9 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $137.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中处于下风口的偏西面受影响较大; 当地种植的大部分蔬菜叶子的汞含量超过国家卫生标准(GB2762294), 2003年的大豆和高粱果实中汞含量分别是2002年的2.3和2.7倍。垃圾焚烧厂上风口、厂区内和下风口处大气汞浓度分别为 $5.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $5.0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $10.6 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。调查结果证明了垃圾焚烧电厂附近土壤受到了不同程度的汞污染, 但局限于考察范围较小(距离污染源<350 m), 同时样点数目较少, 未能提供汞浓度分布的特征或分析其分布规律, 对其他类似的垃圾焚烧厂附近环境汞污染参考价值相对较小。

为了全面认识垃圾焚烧厂周围植物汞的污染特征及环境分布情况, 赵宏伟^[42]等人以深圳市清水河垃圾焚烧厂为例, 在系统分析焚烧厂周围不同植物和土壤污染程度的同时, 详细探讨了汞污染的空间分布特征, 以期解析垃圾焚烧过程的汞排放与厂区周围植物汞污染之间的关联关系。研究结果表明, 该垃圾焚烧厂周围的优势植物均受到一定程度的汞污染, 叶总汞浓度为 $0.0309 \sim 0.2467 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.0948 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 所选择的6种优势植物叶总汞的浓度: 台湾相思>豺皮樟>马占相思>大叶相思>木荷>梅叶冬青; 茎总汞浓度为 $0.0074 \sim 0.1196 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.0417 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同种植物茎叶总汞浓度呈显著正相关, 而植物茎叶的总汞浓度与土壤总汞浓度并无显著相关性; 在该垃圾焚烧厂主导风向的下风向, 距污染源的距離和地形差异共同对烟气扩散浓度产生影响, 而植物茎叶总汞浓度变化则与烟气扩散浓度的空间分异格局基本吻合。上述结果充分证明, 本研究区垃圾焚烧厂大气污染物的排放对周边植被造成了不同程度的汞污染, 且该研究区内烟气—叶的交互作用在植物与环境的汞交换中占据主导地位。

罗勇^[43]等人针对电子废物焚烧迹地环境介质中重金属的含量水平、分布特征和迁移等污染过程进行了研究和相关的风险评价, 主要调查了龙塘镇电子废物焚烧迹地中Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Ni等6种重金属的含量、分布和迁移及其对植物根、茎、叶组织中Pb、Zn、Cu、Cd含量的影响, 结果发现: 1) 焚烧迹地土壤中Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Ni的平

均含量分别为1 714.5、1 016.7、4 850.6、10.3、63.3、100.3 mg·kg⁻¹, 局部区域样点检出的Cu、Pb、Cd含量分别是对照土壤的1 268、179和101倍; 2) 电子废物焚烧活动造成的重金属污染能够随空气动力及重力沉降而形成垂直以及水平迁移, 会影响到约2 km外的远方迁移区, 其中Pb和Cd的迁移能力远大于其它重金属。3) 电子废物焚烧迹地内生长的植物也受到了重金属的污染, 其中Cu、Cd的污染程度较严重; 桉树对Cu、铁芒箕对Pb、类芦对Cd、Zn、Cu有相对较强的富集能力。

余晓华^[44]等人以广东省清远市龙塘镇电子废物焚烧区为调查对象, 分别设置了主要受电子废物焚烧造成的重金属近距离沉降影响的污染区(U)和距离焚烧活动核心区约1 km的水平迁移污染区(L), 并在焚烧活动核心区非主风向一侧山丘的反向坡地设置了对照区(CK), 探讨了不同区域土壤中重金属污染状况, 调查结果显示: 位于电子废物焚烧区附近的近距离污染物沉降区受电子废物焚烧活动影响显著, 重金属污染比较严重; 水平迁移区(距焚烧区1 km)也在一定程度上受到了电子废物焚烧活动的影响, 其中Cu、Pb和Cd含量显著高于对照区。

从目前国内的研究现状可以看出, 垃圾焚烧中挥发性重金属的排放, 对焚烧厂周边土壤及植被生态环境造成了一定的影响, 焚烧源附近的土壤中的重金属含量普遍高于相应地方的土壤背景值, 而且相应植物中重金属含量也有一定程度的提高。可见, 垃圾焚烧会对焚烧厂周边环境造成一定程度的污染和危害, 在实际的工业应用中, 应加强垃圾焚烧厂重金属污染的控制, 使得重金属的排放量尽可能地降低, 从而减少其对环境的危害。

目前国内学者虽然对于焚烧源挥发性重金属(Hg、Cd、Pb和As)开展了一些研究工作, 但目前的工作仅限于挥发性Hg对焚烧厂周边土壤的污染调查以及电子废物焚烧迹地的挥发性Pb、Cd的污染状况初步研究之外, 而对于砷的研究还未有报道, 需要进一步加强。

2.1 国外研究现状

对于焚烧源挥发性重金属污染的调查研究方面, 国外学者也进行了不同重金属在垃圾焚烧厂周边土壤及植被中的污染影响的相关研究, 取得了一定的进展。

2002年2月, 巴塞尔行动网络(Basel Action Network, BAN)和硅谷防止有毒物质委员会(Silicon Valley Toxics Coalition, SVTC)领导的调查委员会组成了一个调查小组前往中国, 对广东省贵屿镇电子废物回收污染状况进行了现场调查, 并取样和分析

了沿贵屿镇的河流——连江河的环境样品(包括水、沉积物、土壤)。在这条河流的两岸, 堆积成小山或被酸处理过然后焚烧的电路板随处可见。所采集的沉积物和土壤样品中, 18种被检测的重金属元素都属于高度污染, 尤其是Cu、Zn、Cr和Pb等重金属。其中一个沉积物样品的Pb浓度超过荷兰统一质量标准的2.2倍, 被认为极度危险。

Llobet^[45]等人在1994和1997年分别测定了西班牙塔拉戈纳省加泰罗尼亚垃圾焚烧厂附近的土壤和植物样本中一些重金属元素的含量。且在1997年8月, 根据欧盟立法中对于烟囱中的污染物排放的规定对该垃圾焚烧厂进行了改造。1999年6月Llobet等人又再次在同一采样点采集土壤和植物样品, 并采用ICP-MS或原子吸收石墨炉等对重金属砷(As), 镉(Cd), 铬(铬), 铅(Pb), 锰(Mn), 汞(Hg), 镍(Ni)和钒(V)进行测定。结果与1994和1997年研究相比: 发现在1997到1999年期间, 唯一的重大变化是土壤中相对应的镉和铅浓度分别下降了21.0%和53.5%。植被中, 只有锰含量显着减少, 而砷, 汞, 镍的浓度明显增加。据此分析, 可以表明, 该研究区域的其它重金属污染源对该垃圾焚烧厂的环境改善措施产生了很大的负面影响。

Collett^[46]等人调查了苏格兰Baldovie公司的城市废弃物焚化炉的空气排放物中重金属的环境影响。采样的范围是焚烧厂及其周边区域, 总面积为7 km×9 km且以边长为1 km的正方形划分成网格模式。表层土壤样品采自每1 km²的中心土壤, 并进行镉和铅含量分析。土壤中铅含量的空间扩散显示Baldovie公司焚化炉的标记变化的下风向的值与该区域铅的背景含量的比较, 却维持在英国未受污染的原始土壤中典型的铅含量范围之内。比较当地土壤铅含量和预知下风向长期地表水平的铅在空气中的扩散结果表明来自Baldovie公司焚化炉中空气排放物中的铅会直接影响附近5 km内土壤的长期铅含量。对于镉, 重金属的空间扩散显示的既不是标记区域也不是焚化炉采样范围的外延污染区域, 结果都维持在英国未受污染的原始土壤中典型的镉含量范围之内。调查结论是Baldovie公司焚化炉的空气排放物中的铅显著影响焚化炉邻近区域土壤中铅的本地扩散。

Meneses^[47]等人为了研究一个旧的垃圾焚烧厂周边土壤和植被中金属As, Be, Cd, Cr, Mn, Hg, Ni, Pb, Sn, Ti, V和Zn的浓度随时间的变化, 他们分别在1996年和1997年的10月, 在相同的采样点采集了24个土壤和24个植物样品进行金属浓度的测定。结果发现: 在这两年采集的土壤样品中, 除了

Be 和 Ni 浓度水平有所增加之外, 其他的几种金属元素浓度没有明显的变化。而在这两年采集的植物样品中, 仅仅只有 Cr 和 V 浓度有较大地降低, Hg 的浓度有明显的升高之外, 其他几种元素的浓度都维持在 1996 年报导的浓度值范围之内。

Luciano^[48]等人以意大利一个中型的垃圾焚烧厂(垃圾处理能力为 100 000 t·a⁻¹)为研究对象, 对该焚烧厂周边土壤和植被中重金属(Cd、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Zn)的浓度进行了测定, 并将焚烧厂周围不同采样点土壤和植被中的重金属浓度与焚烧厂排放烟气中的重金属浓度进行对比, 将可疑污染源与环境传输介质一起观测, 并使用统计方法以探测可能存在的因果关系。结果发现: 土壤和植被中重金属的浓度与采样年份和距焚化炉的距离有明显的相关性; 相同的年份内排放通量也有类似规律。这项研究可为分析其他可疑的污染来源提供依据。

Morselli^[49]等人报道了一个典型的意大利垃圾焚烧厂附近的环境监测系统的数据结果。通过数学扩散模型, 得出了最大污染物沉降的区域范围; 根据这些模拟, 建立了精确的监测网络。选择重金属作为环境指示物, 实验结果发现: 焚烧厂排放的烟气中重金属的含量在不同采样年份的变化范围很大, 尤其 2000 年烟气中铅和镉/铬的浓度较高。相应地, 2000 年土壤样品中的铅、镉浓度也比之前的年份高。远离焚烧厂的土壤中重金属含量较低。且距污染源的距离也明显的影响一年生或者多年生植物样品中重金属的浓度, 但是植物样品没有表现出显著的重金属富集。

Rimmer^[50]等人对位于泰恩河上游的纽卡斯尔市的 Byker 焚烧厂周边土壤中的重金属污染状况进行了研究。他们在离焚烧厂 2.25 km 的地点进行土壤样品的采集, 共采集了 163 个样品进行 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、和 Zn 浓度的测定, 结果发现: 这些地方的重金属浓度普遍高于背景值, 这种情况在其它城市地区具有典型性。对于 As、Cd、Cu、Hg、Pb、和 Zn 等, 相应的污染热点地区也已被确认, 他们分布在整个取样区域, 而且他们的浓度并没有受到焚烧厂周边风向或者距离的影响有所变化。

从国外学者研究结果来看, 垃圾焚烧厂周边土壤和植被中的重金属污染有所加重, 这些地区土壤和植被中的重金属含量普遍高于背景值。可见, 垃圾焚烧挥发性重金属的排放还是会对周边生态环境造成一定的影响。

3 研究展望

综上所述, 虽然垃圾焚烧技术是目前处理城市生活垃圾最有效、最量化的方法, 但是由于垃圾

焚烧引起的二次污染问题尤其是挥发性重金属的污染问题依然是人们需要高度关注的环境问题。尤其是近年来, 随着城市生活垃圾产生量的不断增加, 而垃圾填埋场的面积越来越有限、垃圾焚烧巨量需求的前提下, 开展挥发性重金属对焚烧厂周边生态环境的污染的研究显得越来越有必要。

目前, 尽管国内外对于焚烧源挥发性重金属的污染进行了一些研究, 但国内已开展的研究仅限于挥发性Hg对焚烧厂周边土壤的污染调查以及电子废物焚烧迹地的挥发性Pb、Cd的污染状况初步研究之外, 而对于砷的研究还未有报道, 且关于焚烧源重金属对植被的污染的研究数据尤其匮乏, 还需要开展大量的研究工作。国外学者虽然开展了焚烧厂周边土壤和植被中多种挥发性重金属(Hg、Cd、Pb和As)污染的调查研究, 但是这些研究也只停留在重金属在土壤中的总浓度的研究基础上, 而对于挥发性重金属在焚烧源周边土壤和植被中的迁移转化规律方面的研究很缺乏, 对于重金属污染物在土壤和植被中的蓄积及迁移转化规律研究非常少, 对于焚烧厂挥发性重金属的控制没有起到直观的指导作用。

因此在今后的焚烧源挥发性重金属污染研究方面, 我国学者应在以下几个方向进行加强。

(1) 要进一步开展焚烧源多种挥发性重金属的污染调查, 尤其是As、Pb和Cd的污染调查, 结合焚烧厂现有的重金属污染控制技术, 探求今后焚烧厂重金属污染控制的重点;

(2) 开展焚烧源挥发性重金属在土壤和植被中的存在形态的研究, 探讨各种形态重金属在土壤和植被中的富集规律, 为焚烧厂周边土壤和植被的修复提供基础数据;

(3) 加强挥发性重金属在焚烧厂周边土壤中的污染特征及其在土壤层以及植被中的蓄积总量和迁移转化机理的研究, 为防治焚烧厂挥发性重金属的排放和对已污染的土壤及植被进行修复打下良好的理论基础。

参考文献:

- [1] 陈奉明, 聂永有. 循环经济条件下城市生活垃圾的一个治理模型[J]. 特区经济, 2010, (2): 303-304.
CHEN Fengming, NIE Yongyou. Urban life rubbish's governance mode under recycling economy condition[J]. Special Zone Economy, 2010, (2): 303-304.
- [2] 温俊明, 吴俊锋. 中国城市生活垃圾特性及焚烧处理现状[J]. 上海电气技术, 2009, 2(1): 43-48.
WEN Junming, WU Junfeng. The characteristics of the MSW in China and its incineration treatment status[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2009, 2(1): 43-48.
- [3] 王海霞, 姚瑞珍, 康西, 等. 城市生活垃圾处理的形势与前景[J]. 黄石理工学院学报, 2009, 25(6): 30-35.
WANG Haixia, YAO Ruizhen, KANG Xi, et al. Situation and prospect

- of municipal solid wastes disposal[J]. Journal of Huangshi Institute of Technology, 2009, 25(6): 30-35.
- [4] 曹娜, 王玲. 多元化投融资: 促进城市垃圾处理设施建设[J]. 经营与管理, 2009, (12): 23-25.
CAO Na, WANG Ling. Diversified investment and financing: the promotion of urban solid waste disposal facilities[J]. Management and Administration, 2009, (12): 23-25.
- [5] 刘沐生, 刘学英, 吕爱清, 等. 浅析城市生活垃圾分类回收[J]. 再生资源与循环经济, 2009, (1): 37-40.
LIU Musheng, LIU Xueying, LV Aiqing, et al. Classified collection of urban house refuse[J]. Renewable Resources and Recycling Economy, 2009, (1): 37-40.
- [6] YANG J K, XIAO B, BOCCACCINI A R. Preparation of low melting temperature glass-ceramics from municipal waste incineration fly ash[J]. Fuel, 2009, 88(7): 1275-1280.
- [7] ZHANG H, HE P J, SHAO L M. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration in Shanghai[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 156(1-3): 365-373.
- [8] LIN Y S, CHEN K S, LIN Y C, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans distributions in ash from different units in a municipal solid waste incinerator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1-3): 954-962.
- [9] QUINA M J, SANTOS R C, BORDADO J C, et al. Characterization of air pollution control residues produced in a municipal solid waste incinerator in Portugal[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(1-3): 853-869.
- [10] PEDERSEN A J, FRANDSEN F J, RIBER C, et al. A full-scale study on the partitioning of trace elements in municipal solid waste incineration effects of firing different waste types[J]. Energy & Fuels 2009, 23(7): 3475-3489.
- [11] FALCOZ Q, GAUTHIER D, ABANADES S, et al. Kinetic rate laws of Cd, Pb, and Zn vaporization during municipal solid waste incineration[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(6): 2184-2189.
- [12] XU M X, YAN J H, LU S Y, et al. Concentrations, profiles, and sources of atmospheric PCDD/Fs near a municipal solid waste incinerator in Eastern China[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(4): 1023-1029.
- [13] TRAINA G, MORSELLI L, ADORNO G P. Electrokinetic remediation of bottom ash from municipal solid waste incinerator[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(10): 3380-3385.
- [14] FENG S L, WANG Y M, WEI G J, et al. Leachates of municipal solid waste incineration bottom ash from Macao: Heavy metal concentrations and genotoxicity[J]. Chemosphere, 2007, 67(6): 1133-1137.
- [15] HUANG S J, CHANG C Y, MUI D T, et al. Sequential extraction for evaluating the leaching behavior of selected elements in municipal solid waste incineration fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 149(1): 180-188.
- [16] CHENG H F, HU Y N. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(11): 3816-3824.
- [17] SHI H S, KAN L L. Characteristics of municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash-cement matrices and effect of mineral admixtures on composite system[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2160-2166.
- [18] 陈海滨, 邓成, 毛毅. 城镇生活垃圾资源化处理方案的技术经济比选研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(1): 130-133.
CHEN Haibin, DENG Cheng, MAO Yi. Research on technical & economical comparison and optimization of municipal solid waste reclamation scheme[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(1): 130-133.
- [19] 王伟, 万晓. 垃圾焚烧飞灰中重金属的存在方式及形成机理[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(s): 7-9.
WANG Wei, WAN Xiao. Distribution, morphosis and formation mechanism of heavy metal in fly ash from MSW incineration system[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, 16(s): 7-9.
- [20] 卢欢亮, 王伟, 李艳虹, 等. 非金属矿物对模拟垃圾焚烧烟气中氯化镉的吸附研究[J]. 环境卫生工程, 2005, 13(3): 14-17.
LU Huanliang, WANG Wei, LI Yanhong, et al. Study on CdCl₂ adsorption by non-metallic minerals in simulated waste incineration flue gas[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2005, 13(3): 14-17.
- [21] 李建新, 严建华, 池涌, 等. 垃圾焚烧过程中重金属迁移特性及控制[J]. 电站系统工程, 2004, 20(1): 9-12.
LI Jianxin, YAN Jianhua, CHI Yong, et al. Transfer characteristic and control of heavy metals in MSW incineration[J]. Power System Engineering, 2004, 20(1): 9-12.
- [22] 万晓, 王伟, 叶瞰旻, 等. 垃圾焚烧飞灰中重金属的分布与性质[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 172-175.
WAN Xiao, WANG Wei, YE Tunmin, et al. Distribution and characters of heavy metals from municipal solid waste incinerator fly ash[J]. Environmental Science, 2005, 26(3): 172-175.
- [23] MCKAY G. Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86(3): 343-368.
- [24] LONATI G, CERNUSCHI S, GIUGLIANO M, et al. Health risk analysis of PCDD/F emissions from MSW incineration: comparison of probabilistic and deterministic approaches[J]. Chemosphere, 2007, 67(9): S334-S343.
- [25] WANG L C, HIS H C, WANG Y F, et al. Distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDD/Fs) in municipal solid waste incinerators[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1595-1602.
- [26] AURELL J, MARKLUND S. Effects of varying combustion conditions on PCDD/F emissions and formation during MSW incineration[J]. Chemosphere, 2009, 75(5): 667-673.
- [27] NI Y W, ZHANG H J, FAN S, et al. Emissions of PCDD/Fs from municipal solid waste incinerators in China[J]. Chemosphere, 2009, 75(9): 1153-1158.
- [28] XU M X, YAN J H, LU S Y, et al. Agricultural soil monitoring of PCDD/Fs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Eastern China: Temporal variations and possible sources[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166(2-3): 628-634.
- [29] WANG J B, WANG M S, WU E M Y, et al. Approaches adopted to assess environmental impacts of PCDD/F emissions from a municipal solid waste incinerator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 968-975.
- [30] 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.
- [31] YAN J H, XU M X, LU S Y, et al. PCDD/F concentrations of agricultural soil in the vicinity of fluidized bed incinerators of co-firing MSW with coal in Hangzhou, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(2/3): 522-530.
- [32] PEDERSEN A J, FRANDSEN F J, RIBER C, et al. A full-scale study on the partitioning of trace elements in municipal solid waste incineration effects of firing different waste types[J]. Energy & Fuels 2009, 23(7): 3475-3489.
- [33] FALCOZ Q, GAUTHIER D, ABANADES S, et al. Kinetic rate laws of Cd, Pb, and Zn vaporization during municipal solid waste incineration[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(6): 2184-2189.
- [34] XU M X, YAN J H, LU S Y, et al. Concentrations, profiles, and sources of atmospheric PCDD/Fs near a municipal solid waste incinerator in Eastern China[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(4): 1023-1029.
- [35] 姜利兵, 张建强. 土壤重金属污染的形态分析及生物有效性探讨[J]. 工业安全与环保, 2007, 33(2): 4-7.
JIANG Libing, ZHANG Jianqiang. Discussion on speciation analysis and bioavailability of heavy metal pollution in soil[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2007, 33(2): 4-7.
- [36] OKUSKY J R, MCGEER E G. Methylmercury poisoning of the developing nervous system in the rat: Decreased activity of glutamic acid decarboxylase in cerebral cortex and neostriatum[J]. Developmental Brain Research, 1985, 21(2): 299-306.
- [37] BONNET J L, BOHATIER J, PEPIN D. Effects of cadmium on the performance and microbiology of laboratory-scale lagoons treating

- domestic sewage[J]. *Chemosphere*, 1999, 38(3): 3155-3168.
- [38] 国冬梅, 张立, 周国梅. 重金属污染防治的国际经验与政策建议[J]. *环境保护*, 2010, (1): 74-76.
GUO Dongmei, ZHANG Li, ZHOU Guomei. The international experiences and policy recommendations of pollution prevention of heavy metal[J]. *Environmental Protection*, 2010, (1): 74-76.
- [39] 杨志泉, 周少奇. 垃圾焚烧飞灰中重金属污染物控制的研究进展[J]. *环境卫生工程*, 2005, 13(4): 36-42.
YANG Zhiqian, ZHOU Shaoqi. Investigation development on the control of heavy metals from MSW incineration flue gas ash[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2005, 13(4): 36-42.
- [40] 王学涛, 徐斌, 金保升, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰中重金属污染与控制[J]. *锅炉技术*, 2007, 38(1): 64-68.
WANG Xuetao, XU Bing, JIN Baosheng, et al. Pollution and control of heavy metals in fly ashes from municipal solid waste incinerator[J]. *Boiler Technology*, 2007, 38(1): 64-68.
- [41] 汤庆合, 丁振华, 江家骅, 等. 大型垃圾焚烧厂周边环境汞影响的初步调查[J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 196-199.
TANG Qinghe, DING Zhenhua, JIANG Jiahua, et al. Environmental effects of mercury around a large scale MSW incineration plant[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 196-199.
- [42] 赵宏伟, 钟秀萍, 刘阳生, 等. 深圳市清水河垃圾焚烧厂周围地区优势植物的汞污染研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(9): 2786-2791.
ZHAO Hongwei, ZHONG Xiuping, LIU Y S, et al. Mercury pollution investigation in predominant plants surrounding Shenzhen Qingshuihe municipal solid waste incineration plant[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9): 2786-2791.
- [43] 罗勇, 余晓华, 杨中艺, 等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 I. 电子废物焚烧迹地的重金属污染[J]. *生态毒理学报*, 2008, 3(1): 34-41.
LUO Yong, YU Xiaohua, YANG Zhongyi, et al. Studies on heavy metal contamination by improper handling of e-waste and its environmental risk evaluation I. Heavy metal contamination in e-waste open burning sites[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(1): 34-41.
- [44] 余晓华, 罗勇, 杨中艺, 等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 V. 电子废物焚烧迹地土壤金属污染对土壤微生物生物量和土壤呼吸的影响[J]. *生态毒理学报*, 2008, 3(5): 443-450.
YU Xiaohua, LUO Yong, YANG Zhongyi, et al. Studies on heavy metal contamination by improper handling of e-waste and its environmental risk evaluation V. Effects of heavy metal contamination on soil microbial biomass and soil respiration in an e-waste open burning site[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(5): 443-450.
- [45] LLOBET J M, SCHUHMACHER M, DOMINGO J L. Spatial distribution and temporal variation of metals in the vicinity of a municipal solid waste incinerator after a modernization of the flue gas cleaning systems of the facility[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 284(1/3): 205-214.
- [46] COLLETT R S, ODUYEMI K, LILL D E. An investigation of environmental levels of cadmium and lead in airborne matter and surface soils within the locality of a municipal waste incinerator[J]. *The Science of the Total Environment*, 1998, 209(2/3): 157-167.
- [47] MENESES M, LLOBET J M, GRANERO S, et al. Monitoring metals in the vicinity of a municipal waste incinerator: temporal variation in soils and vegetation[J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, 226(2/3): 157-164.
- [48] LLOBET J M, SCHUHMACHER M, DOMINGO J L. Spatial distribution and temporal variation of metals in the vicinity of a municipal solid waste incinerator after a modernization of the flue gas cleaning systems of the facility[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 284(1/3): 205-214.
- [49] MORSELLI L, BARTOLI M, BRUSORI B, et al. Application of an integrated environmental monitoring system to an incineration plant[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 289(1/3): 177-188.
- [50] RIMMER D L, VIZARD C G, PLESS-MULLOLI T, et al. Metal contamination of urban soils in the vicinity of a municipal waste incinerator: One source among many[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 356(1/3): 207-216.

Current progress in research on the pollution of volatile heavy metals from incineration plant to its ambient soil and vegetation

KONG Sifang¹, LIU Yangsheng^{1,2}, ZENG Hui^{1,3}, XIE Qinglong¹, LV Xiaolei¹

1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

3. College of Environmental and Urban Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Municipal solid waste (MSW) is a kind of mixed waste with complex compositions, which containing a plenty of heavy metals. When incineration method is adopted to dispose MSW, a large number of heavy metals would be evaporated into the smoke due to high temperature. Most of the heavy metals will be enriched into the fly ash. Meanwhile, a few of them emitted into the air and then finally deposit into the soil and vegetation, which will consequently cause serious harm to the ambient ecological environment of incineration plant. In this paper, the current studies on the pollution of soil and vegetation around incineration plants caused by the emission of volatile heavy metals (Hydrargyrum (Hg), Cadmium (Cd), Plumbum (Pb), and Arsenic (As)) were reviewed. The results showed that most researches in China were mainly confined to the soil pollution of Hg, while researches on the pollution of soil and vegetation around incineration plant caused by Cd, Pb, As were seldom conducted. Meanwhile, most researches at abroad mainly focus on the occurrences of heavy metals in the soil, while the accumulation, migration, and transformation rule of volatile heavy metals in soil and vegetation is not adequate. This study pointed out that the pollution characteristics of heavy metals in the soil around incineration plants, especially the accumulation, migration and transformation rule of heavy metals in soil and vegetation should be strengthened in future. This is significant to control the emission of volatile heavy metals and to remediate contaminated soil and vegetation around of incineration sites.

Key Words: municipal solid waste; incineration plant; volatile heavy metals; soil; vegetation