

吴婷, 王新明. 2012. 食品垃圾好氧降解过程中挥发性有机物 (VOCs) 排放特征[J]. 环境科学学报, 32(10): 2575-2583

Wu T, Wang X M. 2012. Release of volatile organic compounds from food wastes during the aerobic decomposition[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(10): 2575-2583

食品垃圾好氧降解过程中挥发性有机物 (VOCs) 排放特征

吴婷^{1,2}, 王新明^{1,*}

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, 广州 510640

2. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241003

收稿日期: 2012-01-05

修回日期: 2012-03-08

录用日期: 2012-03-22

摘要: 采用实验室模拟方法, 研究了混合食品垃圾 (FW) 及以橙子、生菜、土豆和西红柿为代表的 4 种植物性易降解有机垃圾组分好氧降解过程中排放出来的 117 种挥发性有机物 (VOCs) 的排放量和组成特征. 结果表明, 混合食品垃圾好氧降解过程中 VOCs 总排放量为 951.80 mg·kg⁻¹, 主要为有机硫、含氧化合物和萜烯, 分别占 VOCs 总排放量的 43.1%、53.3% 和 2.1%. 橙子、生菜、土豆和西红柿 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中 VOCs 的总排放量分别为 12736.72、118.67、57.40 和 228.08 mg·kg⁻¹, 主要成分均为含氧化合物和萜烯; 含氧化合物分别占橙子、生菜、土豆和西红柿 4 种植物性易降解有机垃圾 VOCs 总排放量的 13.5%、80.9%、85.9% 和 79.5%, 萜烯分别占 4 种植物性易降解有机垃圾 VOCs 总排放量的 86.5%、16.6%、8.2% 和 15.6%.

关键词: 食品垃圾 (FW); 植物性易降解有机垃圾; 挥发性有机物 (VOCs); 排放量; 组成特征; 含氧挥发性有机物 (OVOCs); 萜烯

文章编号: 0253-2468(2012)10-2575-09

中图分类号: X511

文献标识码: A

Release of volatile organic compounds from food wastes during the aerobic decomposition

WU Ting^{1,2}, WANG Xinming^{1,*}

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640

2. College of Environmental Science & Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003

Received 5 January 2012;

received in revised form 8 March 2012;

accepted 22 March 2012

Abstract: The production and composition of 117 volatile organic compounds (VOCs) were studied during the aerobic decomposition of food wastes (FW) and four biodegradable organic plant wastes, including orange, lettuce, potato and tomato wastes, under controlled aerobic conditions in laboratory. Total yields of VOCs from FW during the treatment process reached 951.80 mg·kg⁻¹, among which organic sulfurs, oxygenated chemicals and terpenes dominated and shared 43.1%, 53.3% and 2.1% of total VOCs released, respectively. Total production of VOCs from orange, lettuce, potato and tomato wastes during the incubation were 12736.72 mg·kg⁻¹, 118.67 mg·kg⁻¹, 57.40 mg·kg⁻¹ and 228.08 mg·kg⁻¹, respectively, with the dominance of oxygenated chemicals and terpenes. Oxygenated chemicals shared 13.5%, 80.9%, 85.9% and 79.5% of total VOCs released from orange, lettuce, potato and tomato wastes, while terpenes accounted for 86.5%, 16.6%, 8.2% and 15.6% of total VOCs emitted from the four biodegradable organic plant wastes, respectively.

Keywords: food wastes (FW); biodegradable organic plant wastes; volatile organic compounds (VOCs); production; composition; oxygenated volatile organic compounds (OVOCs); terpenes

1 引言 (Introduction)

食品垃圾 (FW) 是指居民日常生活及食品加

工、餐饮服务、单位供餐等活动中产生的食物残余和废料. 据统计, 全世界约有 50% 的食品在被消费前就有部分损失, 成为了垃圾 (Lundqvist *et al.*,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41025012, U0833003, 41103067); 安徽高校省级自然科学研究重点资助项目 (No. KJ2010A141)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41025012, U0833003, 41103067) and the Foundation of Anhui Educational Committee (No. KJ2010A141)

作者简介: 吴婷 (1981—), 女, E-mail: wuting19@mail.ahnu.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: wangxm@gig.ac.cn

Biography: WU Ting (1981—), female, E-mail: wuting19@mail.ahnu.edu.cn; * **Corresponding author**, E-mail: wangxm@gig.ac.cn

2008);在欧美发达国家,FW产量占生活垃圾总量的12.5%~27%(Parfitt *et al.*, 2010);在发展中国家FW占生活垃圾的比例更高,如我国每天产生食品垃圾65000 t,占生活垃圾总量的43%~76%(He *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2008). FW主要成分为菜叶、果皮、剩饭剩菜、鱼、肉、蛋、奶等,其中,果皮菜叶等植物性有机成分约占FW总量的20%~70%(Parfitt *et al.*, 2010). FW具有含水率高(85%~90%)和可溶性有机质含量高(占干重的95%以上)的特点(Tsai *et al.*, 2007),是微生物生长的有利场所.因此,不但其自身含有大量的挥发性有机物(VOCs),而且在收集、储运和处理过程中能够迅速被微生物降解,产生大量VOCs释放至大气中,主要包括有机硫、醇、酮、酯、萜烯、苯系物等(Kim *et al.*, 2009; Komilis *et al.*, 2004; Rappert *et al.*, 2005).

食品垃圾降解过程中排放的VOCs中很大部分化合物(如烷基苯、柠檬烯、部分含氧化合物、有机硫等)的嗅阈值极低(Devos *et al.*, 1990),是重要的恶臭污染物,容易导致恶臭污染,不但影响环境卫生,还会危害人体健康,特别是对从事垃圾收集处理工作的人员和垃圾处理场所附近的居民(Matthiasen *et al.*, 1995; Wilkins *et al.*, 1996; 邹世春等, 2000).近年来,人们对垃圾恶臭污染的投诉占有环境污染投诉的比例相当大,控制恶臭气体排放已成为垃圾处理过程的重要环节(沈培明等, 2005).此外,VOCs还对云层特性、大气臭氧垂直分布、大气辐射平衡及温室效应等方面均有重要影响(Molina *et al.*, 1974; Atkinson, 2000).因此,无论从局地浓度水平还是全球生物与地球化学循环的角度考虑,这些气体均受到了广泛关注.但目前国内外有关食品垃圾降解过程中VOCs排放的研究不多,仅有的研究主要集中在混合食品垃圾(Defoer *et al.*, 2002; Komilis *et al.*, 2004; Staley *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2010)和鱼、蛋等组分(Kim *et al.*, 2009)方面,而有关食品垃圾中主要组分植物性易降解有机垃圾降解过程中VOCs的排放研究尚未见报道.

由于有机组分在有氧条件下能迅速分解矿化,因此,有机组分含量高的垃圾常采用好氧降解方式(如好氧堆肥等)进行处理(Defoer *et al.*, 2002; Komilis *et al.*, 2004; Mao *et al.*, 2006).事实上,食品垃圾在处理前的收集和转运过程中已暴露在空

气中发生好氧降解.此外,我国90%以上的食品垃圾都是混入普通生活垃圾一起处理,而我国生活垃圾的处理率还不高,2010年全国城市生活垃圾处理率为77.9%(中华人民共和国国家统计局, 2011),很大部分仍露天堆放发生好氧降解.即使处理了,80%都是填埋,而垃圾在填埋前期的降解主要依靠消耗残留在垃圾中的氧气发生好氧降解(Statheropoulos *et al.*, 2005).因此,本研究收集典型混合食品垃圾(FW),以及橙子、生菜、土豆、西红柿4种植物性易降解有机垃圾进行好氧降解模拟试验,估算各类垃圾VOCs的排放量,并分析其组成特征,以期为FW和生活垃圾的处理及垃圾恶臭污染的防治提供基础数据.

2 材料和方法(Materials and methods)

2.1 实验设计

2.1.1 材料与样品 实验所用混合FW采自广州市3个典型生活小区垃圾收集箱,主要组分为果皮、菜叶、肉片、过期食物,其中的食物包装材料被剔除.由于小区垃圾箱每天定点清理1次,因此,收集的FW都是当天的,相对较新鲜.实验用橙子、生菜、西红柿和土豆均为购于果蔬市场的新鲜果蔬.为了加速各类垃圾的腐烂,用干净的不锈钢刀把各类垃圾切成0.5 cm×1.0 cm的小块(Sponza *et al.*, 2005).取部分脐橙小块置于烘箱中,60℃烘干,测其干重.混合FW、橙子、生菜、西红柿和土豆的含水率分别为74%、81%、93%、79%和97%.

2.1.2 实验装置 本研究所使用的室内模拟实验装置详见文献(Wang *et al.*, 2008).此装置是圆柱形的玻璃容器,总体积为11 L(直径20 cm,高35 cm),每个装置包括3个系统,其中,进气系统和出气系统用于采集样品及好氧降解过程中供氧,滤液回流系统用于垃圾滤液回流和重新利用以加速反应.每个装置内安装有两个小风扇,用来充分混匀箱内气体;并将一个温度感应探头插入到反应垃圾一半的深度,用于采样时同步检测垃圾内部温度.装置底部垫有一薄层玻璃纤维和5 cm厚的干净砾石,用于及时排出垃圾滤液.装置内表面均贴有特氟龙薄膜,所有连接管均为特氟龙管,以避免吸附垃圾降解释放出来的VOCs影响实验结果.

2.1.3 实验和采样方法 所有的模拟实验都在(25.0±0.5)℃的室温下进行,每组实验均设有3个平行样.实验开始时,每个反应装置里加入约2 kg

切碎的垃圾,并加入 50 mL 完全腐烂的 FW 滤液以引入微生物诱发垃圾降解. 垃圾好氧降解期间,用碱或酸调节 pH 至 6.8 ~ 7.8 以防止垃圾滤液 pH 值过高或过低,并不定期加入纯净水来保证足够的滤液,使用蠕动泵不断回流滤液以加快垃圾降解的速率(Wang *et al.*, 2008). 不采样时,好氧降解装置用 Tomas 抽气泵以 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通入空气以保证有足够的氧气(出气口气体中 O_2 的体积分数 > 10%)供垃圾进行好氧降解(Binner *et al.*, 2003). 采样时,以 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速向培养箱内通入润湿后去除了 VOCs 的干空气 2 h, 以保证装置内原有的空气全部被替换且进出培养箱内的气体达到动态平衡;然后用 Tedlar 气体采样袋(美国 SKC)于气体出口采集气体 2 L,用于分析. 混合 FW、橙子垃圾及西红柿、生菜、土豆 3 种蔬菜垃圾好氧降解周期分别为 41、60 及 43 d. 混合 FW 分别于第 0、2、4、5、6、7、9、11、13、17、21、25、29、34 和 41 d 采样;橙子垃圾分别于第 0、1、2、3、4、5、6、8、10、12、14、16、19、22、26、30、35、40、45、52 和 60 d 采样;西红柿、生菜和土豆 3 种蔬菜垃圾分别于第 0、1、3、4、5、6、7、9、12、15、17、20、23、28、33 和 43 d 采样.

2.2 VOCs 分析

VOCs 分析由 ENTECH7100 预浓缩系统(美国 Entech 公司)和 Agilent 6890/5973N 色谱质谱联用(GC-MS, 美国 Agilent 公司)系统组合完成. 由预浓缩仪自动抽取标准状态下气体样品 250 mL, 经三级冷阱除 H_2O 、 CO_2 和富集后(Yi *et al.*, 2007), 进入 GC-MS 进行分离鉴定. 色谱柱为 HP-1 (长 60 m, 内径 0.32 mm, 膜厚 $1.0 \mu\text{m}$), 载气为高纯氮气, 流速为 $1.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 色谱初始炉温为 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$, 保留 2 min; 然后以 $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$, 保留 5 min; 最后以 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 $250 \text{ }^\circ\text{C}$, 保留 10 min. MS 电离方式为电子轰击(EI), 电离电压 2000V; 采用全扫模式(SCAN)检测, 扫描质量数范围为 29 ~ 350 amu.

有标样的 VOCs 成分对照标样的保留时间和特征离子进行定性, 没标样的 VOCs 成分对照标准谱图库(Database: Wiley Library)进行定性分析, 采用外标法进行定量分析(Wang *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2010). 本研究中涉及的 117 种 VOCs 包括 17 种醇、8 种醛、13 种酮、3 种呋喃、5 种醚、23 种酯、15 种有机硫、15 种萜烯、2 种烷烃、5 种烯烃、9 种苯系物和 2 种卤代物(表 1). 其中, 甲基—2-烯丙基

二硫醚和甲基丙基硫醚购于伟伯化工有限公司(广州), 甲基—1-烯丙基硫醚(Z)和甲基—1-烯丙基硫醚(E)没有商品标样. 除这 4 种 VOCs 外, 其他 VOCs 标样均购于美国 Sigma-Aldrich 公司. 所有标样先用高纯 N_2 稀释获得浓度约为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的初始混合标样, 再采用动态稀释法利用高纯 N_2 逐级稀释初始混合标样得到浓度分别为 0 (高纯 N_2)、10、100、500 和 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的系列混合标样, 然后进行仪器分析. 除甲醇和乙醇外, 所有的标样在 0 ~ $1000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内线性良好($R^2 > 0.99$); 当进样量为 250 mL 时, 方法检测限为 $0.05 \sim 0.63 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 平行分析浓度为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混合标样 10 次, 相对标准偏差(RSD)均小于 7%; 当加标浓度为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 加标样品回收率为 88% ~ 110%. 甲醇和乙醇由于极性较强, 易溶于水, 在预浓缩过程中容易与水一块被去除, 回收率均低于 50%, 但平行分析湿度与样品相当且浓度为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混合标样 10 次, 甲醇和乙醇的 RSD 分别为 7% 和 4%; 甲基—1-烯丙基硫醚(Z)和甲基—1-烯丙基硫醚(E)没有标样, 用二甲基硫醚进行半定量. 因此, 这 4 种 VOCs 的定量可能不准确.

2.3 VOCs 排放量估算

根据公式 $E = \sum F_i \times t$ 估算 VOCs 排放量, 其中, E 为 VOCs 的排放量 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), F_i 为垃圾好氧降解第 i 天 VOCs 的排放速率 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), 其测定方法详见文献(Wang *et al.*, 2008), t 为每天排放时间(24 h). E 和 F_i 均以干重计算, 为 3 组平行实验的平均值.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 温度变化

堆肥过程中温度可作为微生物活动的指标(Haug, 1993). 图 1 给出了混合 FW 和 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中的温度变化. 由图 1 可知, 混合 FW 和 3 种蔬菜垃圾的温度均在降解的前 10 d 迅速升高, 并在第 4 ~ 9 d 达到最高 ($30 \sim 36 \text{ }^\circ\text{C}$); 而橙子垃圾的温度在降解过程中出现了两次峰值, 分别在第 3 ~ 4 d ($34 \text{ }^\circ\text{C}$) 和第 15 ~ 20 d ($29 \text{ }^\circ\text{C}$). 据 Ryckeboer 等(2003)报道, 好氧堆肥过程根据温度变化可分为 3 个阶段: 前期中温阶段 ($40 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$)、中期高温阶段 ($50 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$) 和后期降温腐熟阶段. 由于本研究所采用的模拟装置体积小且没有保温层, 不断鼓入空气供氧也可带走部分热量, 因此, 所有垃圾在降

解过程中最高温度均未超过 40 °C,这个温度比较适合中温阶段嗜温微生物生长及分解垃圾。

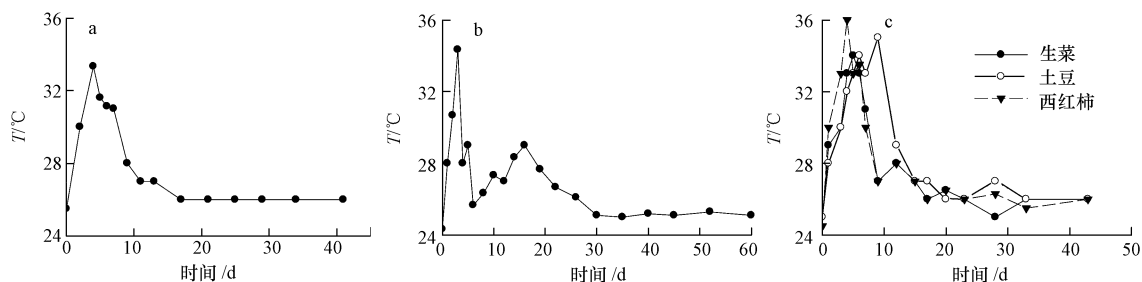


图 1 混合 FW 和四种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中温度变化(a. FW, b. 橙子垃圾, c. 蔬菜垃圾)

Fig. 1 Incubation temperature during the experiment period of FW and four biodegradable organic plant wastes(a. FW, b. orange wastes, c. vegetable wastes)

3.2 VOCs 定性分析

由表 1 可知,混合 FW 好氧降解过程中释放出

来的 VOCs 共检测到 93 种,包括 8 种醇、3 种醛、8 种酮、3 种呋喃、2 种醚、21 种酯、15 种有机硫、13 种

表 1 FW 和四种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中排放的 VOCs 成分

Table 1 VOCs released from FW and four biodegradable organic plant wastes during the aerobic decomposition

化合物	检出	化合物	检出	化合物	检出	化合物	检出
醇类		2-戊酮	1, 2	丁酸甲酯	1, 2	水芹烯	1, 2
甲醇*	1~5	3-戊酮	1, 2	丁酸乙酯	1, 2	Δ-3-萜烯	1, 2
乙醇	1~5	3-甲基-2-戊酮*	1	3-甲基丁酸甲酯	1	α-松油烯	2
1-丙醇	2	4-甲基-2-戊酮#	3~5	异丁酸甲酯	1	γ-松油烯	1, 2
2-丙醇	3~5	环己酮	3~5	异丁酸乙酯	1	异松烯	1, 2
2-甲基-1-丙醇#	1, 2	2-己酮	3~5	异戊酸甲酯	1	罗勒烯	2
1-丁醇	2	2-庚酮	1, 2	异戊酸乙酯	1	柠檬烯	1~5
2-丁醇	1	2,3-丁二酮	1, 2	己酸甲酯	2	松油醇	1
叔丁醇	3~5	呋喃类		己酸乙酯	1	烷烃	
2-甲基-1-丁醇	1, 2	呋喃	1	有机硫		正戊烷	1
3-甲基-1-丁醇	1, 2	2-甲基呋喃	1	羰基硫*	1, 3~5	正壬烷	1
2-戊醇	2	四氢呋喃	1	二硫化碳*Δ#	1~5	烯烃	
2-甲基-1-戊醇	1	醚类		二甲基硫醚Δ#	1~5	丙烯	1
1-己醇	2	乙醚	1	二甲基二硫醚Δ#	1~5	2-甲基-1-丙烯	1
2-甲基-3-丁烯-2-醇	2	甲基叔丁基醚*	1	二甲基三硫醚	1, 3~5	2-甲基-1-丁烯	1
1-戊烯-3-醇	2	甲撑二甲醚	2	硫杂丙烷	1	2-甲基-1-戊烯	1
2-戊烯-1-醇	1	乙叉二乙基醚	2	甲基-2-丙烯基硫醚	1	4-甲基-1-己烯	1
3-己烯-1-醇	2	环氧乙烷	2	甲基-1-烯丙基二硫醚	1	苯系物	
醛类		酯类		甲基-1-烯丙基硫醚(Z)	1	苯*	1
乙醛*#	1~5	甲酸甲酯	1, 2	甲基-1-烯丙基硫醚(E)	1	甲苯*#	1
丙醛*#	3~5	甲酸乙酯	2	甲基丙基硫醚	1	苯乙烯*Δ#	1
2-甲基-丙醛#	1, 2	乙酸甲酯	1~5	甲基丙基二硫醚	1	乙苯*	1
丁醛#	3~5	乙酸乙酯#	1~5	3-甲基噻吩	1	间/对-二甲苯*#	1
2-甲基-丁醛#	2	乙酸丙酯	1, 2	二烯丙基二硫醚	1	邻-二甲苯*#	1
3-甲基-丁醛	1	乙酸丁酯	1~5	二丙基二硫醚	1	间-异丙基甲苯	1
戊醛#	2	乙酸-2-甲基丙酯	1, 2	萜烯		萘*	1
己醛	2~5	乙酸-2-甲基丁酯	1, 2	异戊二烯	1~5	1-甲基萘	1
酮类		乙酸-3-甲基丁酯	1, 2	α-侧柏烯	1, 2	卤代物	
丙酮	1~5	乙酸戊酯	1	α-蒎烯	1~5	氯仿*	1
2-丁酮*	1~5	乙酸己酯	1	β-蒎烯	1~5	1,4-二氯苯*	1
3-甲基-2-丁酮	1	乙酸-3-己烯酯	1	β-月桂烯	1, 2		
3-羟基-2-丁酮	2	丙酸甲酯	1, 2	蒎烯	1, 2		
环戊酮	3~5	丙酸乙酯	1, 2	桉烯	1, 2		

注: 1, 2, 3, 4, 5 分别代表混合 FW、橙子、生菜、土豆和西红柿; * 为 EPA 优先控制污染物(共 17 种); Δ 为国标(GB 14554—1993)规定的恶臭污染物(共 4 种); # 为日本环保署规定的恶臭污染物(共 16 种)。

萜烯、3 种烷烃、6 种烯烃、9 种苯系物和 2 种卤代烃。结果与文献报道的混合 FW 好氧堆肥(Defoer *et al.*, 2002; Mao *et al.*, 2006)和厌氧消化(Staley *et al.*, 2006)条件下排放出来的 VOCs 成分基本一致,只是有机硫化物种数更多。橙子垃圾降解过程中释放出来的 VOCs 共检测到 57 种,包括 12 种醇、5 种醛、7 种酮、3 种醚、14 种酯、3 种有机硫、12 种萜烯和 1 种烯烃;生菜、土豆和西红柿垃圾降解过程中释放出来的 VOCs 共检测到 26 种,包括 4 种醇、4 种醛、6 种酮、3 种酯、5 种有机硫、3 种萜烯和 1 种烯烃。结果表明,4 种植物性易降解有机垃圾主要对醇、醛、酮、酯等含氧化合物、有机硫化物和萜烯化合物有贡献。同样,Defoer 等(2002)发现,混合果蔬和园林植物性易降解有机垃圾好氧堆肥过程中排放的 VOCs 成分主要为醇、醛、酮、酯等含氧化合物、有机硫化物和萜烯化合物。检测到的 VOCs 主要来源于垃圾本身成分的挥发和降解过程中微生物转化底物产生的二次产物(Wang *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2010)。此外,在检测出的 117 种 VOCs 中,包括 17 种 USEPA 优先控制污染物、4 种中国环保部规定控制的恶臭污染物和 16 种日本环

保署规定控制的恶臭污染物(表 1)。

3.3 混合 FW 好氧降解过程中 VOCs 的排放量与组成特征

由表 2 和图 2 可知,混合 FW 好氧降解过程中 VOCs 总排放量为 $951.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($704.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以湿重计)。其中,有机硫排放量最大 ($409.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),占 VOCs 总排放量的 43.1%;其次是酯 ($380.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),占 VOCs 总排放量的 40.0%;酮、醇和醛分别占 VOCs 总排放量的 7.3%、4.0% 和 1.9%;这 4 种含氧化合物与呋喃和醚共占 VOCs 总排放量的 53.2%;萜烯占 VOCs 总排放量的 2.1%;烷烃、烯烃、苯系物和卤代烃占 VOCs 总排放量的百分比均小于 1%。此外,混合 FW 好氧降解过程中二甲基二硫醚、乙酸乙酯、二甲基硫醚和乙醛 4 种恶臭污染物的排放量分别为 309.44、261.73、55.29 和 $17.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 VOCs 总排放量的 32.5%、27.5%、5.8% 和 1.8%。这 4 种恶臭污染物与其他 5 种被检测到的恶臭污染物(苯、甲苯、二甲苯、二硫化碳、2-甲基—丙醛和 2-甲基—1-丙醇)共占 VOCs 总排放量的 68.4%。

表 2 混合 FW 和 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中各类 VOCs 的排放量

Table 2 Production of VOCs released from mixed FW and four biodegradable organic plant wastes during the aerobic decomposition

材料	VOCs 排放量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)												TVOCs
	醇	醛	酮	呋喃	醚	酯	有机硫	萜烯	烷烃	烯烃	苯系物	卤代烃	
FW	37.80	18.08	70.21	0.17	0.21	380.67	409.91	19.68	1.71	5.86	6.11	1.39	951.80
橙子	917.17	44.01	129.67	-	2.03	620.92	4.80	11017.77	-	0.35	-	-	12736.72
生菜	42.08	7.04	35.28	-	-	11.62	2.29	19.70	-	0.66	-	-	118.67
土豆	19.09	3.46	20.43	-	-	6.33	3.11	4.69	-	0.29	-	-	57.40
西红柿	80.94	19.5	57.53	-	-	23.31	9.78	35.62	-	1.4	-	-	228.08

注:“-”表示未检测到。

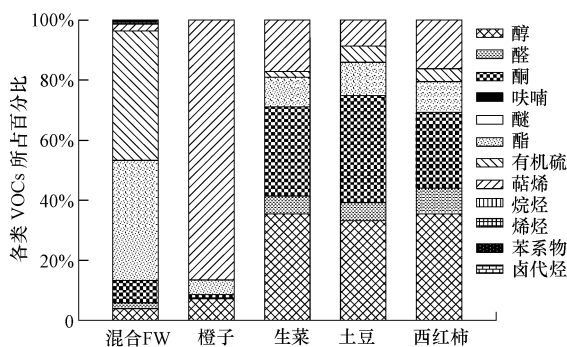


图 2 混合 FW 和 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中排放 VOCs 所占比例

Fig. 2 Percentage contribution of individual VOC species released from mixed FW and four biodegradable organic plant wastes during the aerobic decomposition

结果表明,FW 好氧降解过程中排放出的 VOCs 主要为有机硫和酯、酮、醇、醛等含氧化合物及萜烯化合物。同样,Smet 等(1999)研究发现,好氧堆肥过程中排放出的 VOCs 中有机硫、含氧化合物和萜烯化合物分别占 VOCs 总排放量的 35.0%、31.1% 和 9.2%。将本研究 FW 好氧降解过程中 VOCs 总排放量结果与文献报道值相比,发现与好氧降解由 70% 园林垃圾、20% 厨余和 10% 废纸组成的生物易降解垃圾 ($590 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以湿重计,下文简称为生物易降解垃圾)(Smet *et al.*, 1999)及城市居民生活垃圾 ($1024.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)(Staley *et al.*, 2006)的结果相近,明显高于庭院垃圾 ($489.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)(Staley *et al.*, 2006)。将本研究观测到的 FW 好氧

降解过程中主要 VOCs (有机硫、含氧化合物和萜烯) 排放量结果与文献报道的各类垃圾结果相比, 发现有机硫排放量明显高于好氧降解生物易降解垃圾 ($8.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以湿重计) (Smet *et al.*, 1999) 及庭院垃圾和城市居民生活垃圾 (未检测到) (Staley *et al.*, 2006); 含氧化合物排放量与好氧降解生物易降解垃圾 ($498.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以湿重计) (Smet *et al.*, 1999)、庭院垃圾 ($412.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和城市居民生活垃圾 ($599.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Staley *et al.*, 2006) 的结果相当; 萜烯排放量明显低于好氧降解生物易降解垃圾 ($82.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以湿重计) (Smet *et al.*, 1999)、庭院垃圾 ($121.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和城市居民生活垃圾 ($170.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Staley *et al.*, 2006) 的结果。值得注意的是, 本研究观测到的 FW 好氧降解过程中恶臭污染物所占比例明显高于好氧降解生物易降解垃圾 (9.1%) (Smet *et al.*, 1999)、庭院垃圾 (17.3%) 和城市居民生活垃圾 (14.4%) (Staley *et al.*, 2006) 的结果。考虑到 FW 经常混入生活垃圾一块处理且在生活垃圾中占有相当大比例, 因此, FW 对生活垃圾 VOCs 特别是有机硫和含氧化合物排放及其导致的恶臭污染具有重要贡献。此外, 由于好氧生物降解速率要比厌氧生物降解速率快得多, 因此, 好氧生物降解过程中 VOCs 排放量应该比厌氧生物降解过程中 VOCs 排放量小。但本研究中 FW 好氧降解过程中 VOCs 总排放量却明显高于文献 (Staley *et al.*, 2006) 报道的 FW 厌氧降解过程中 VOCs 总排放量 ($221.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。导致这种结果的原因可能有: ①实验选用 FW 组成成分存在差异; ②好氧降解过程中不断通入空气会使残留在 FW 中原有的 VOCs 挥发得更快, 而且这种作用排放的 VOCs 量远大于微生物活动产生的 VOCs 量。事实上, Staley 等 (2006) 也发现城市居民生活垃圾和庭院垃圾在好氧条件下, 非甲烷有机物 (NMOCs) 排放量比厌氧条件下 NMOCs 排放量均大一个数量级。

3.4 四种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中 VOCs 的排放量与组成特征

由表 2 和图 2 可知, 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中 VOCs 总排放量大小顺序依次为: 橙子 > 西红柿 > 生菜 > 土豆。3 种蔬菜垃圾 VOCs 总排放量和各类 VOCs 的排放量相当, 并且 VOCs 组成相似。但橙子垃圾 VOCs 总排放量明显高于 3 种蔬菜垃圾 VOCs 总排放量 2~3 个数量级, 特别是萜烯排放量明显高于 3 种蔬菜垃圾 3~4 个

数量级, 含氧化合物排放量也高于 3 种蔬菜垃圾 1~2 个数量级; 而且橙子垃圾 VOCs 的组成与 3 种蔬菜垃圾有明显区别。橙子垃圾好氧降解过程中 VOCs 总排放量为 $12736.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中, 萜烯排放量最大 ($11017.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 占 VOCs 总排放量的 86.5%; 其次为醇、酯和酮, 分别占 VOCs 总排放量的 7.2%、4.9% 和 1.0%, 这 3 类含氧化合物与醛、醚共占 VOCs 总排放量的 13.5%; 有机硫排放量占 VOCs 总排放量的 0.1%。生菜垃圾好氧降解过程中 VOCs 总排放量为 $118.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中醇排放量最大 ($42.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 占 VOCs 总排放量的 35.5%, 酮、酯和醚分别占 VOCs 总排放量的 29.7%、9.8% 和 5.9%, 这 4 类含氧化合物共占 VOCs 总排放量的 80.9%; 萜烯、有机硫和烯烃分别占 VOCs 总排放量的 16.6%、1.9% 和 0.6%。土豆垃圾好氧降解过程中总 VOCs 的排放量为 $57.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中酮排放量最大 ($20.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 占 VOCs 总排放量的 35.6%, 醇、酯和醛分别占 VOCs 总排放量的 33.3%、11.0% 和 6.0%, 这 4 类含氧化合物共占 VOCs 总排放量的 85.9%; 萜烯、有机硫和烯烃分别占 VOCs 总排放量的 8.2%、5.4% 和 0.5%。西红柿垃圾好氧降解过程中总 VOCs 的排放量为 $228.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中醇排放量最大 ($80.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 占 VOCs 总排放量的 35.5%, 酮、酯和醛分别占 VOCs 总排放量的 25.2%、10.2% 和 8.6%, 这 4 类含氧化合物共占 VOCs 总排放量的 79.5%; 萜烯、有机硫和烯烃分别占 VOCs 总排放量的 15.6%、4.3% 和 0.6%。此外, 橙子垃圾好氧降解过程中乙酸乙酯和乙醛两种恶臭污染物的排放量分别为 $348.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $43.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别占 VOCs 总排放量的 2.7% 和 0.3%。这两种恶臭污染物与其他 7 种被检测到的恶臭污染物 (2-甲基-1-丙醇、2-甲基-丙醛、2-甲基-丁醛、戊醛、二甲基硫醚、二硫化碳和二甲基硫二醚) 共占 VOCs 总排放量的 3.1%。生菜垃圾好氧降解过程中丙醛、乙酸乙酯、丁醛和 4-甲基-2-戊酮 4 种恶臭污染物的排放量分别为 4.83 、 3.23 、 1.85 和 $1.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别占 VOCs 总排放量的 3.9%、2.6%、1.5% 和 1.4%。这 4 种恶臭污染物与其他 4 种被检测到的恶臭污染物 (乙醛、二硫化碳、二甲基硫醚和二甲基二硫醚) 共占 VOCs 总排放量的 10.6%。土豆垃圾好氧降解过程中乙酸乙酯、丙醛和二甲基二硫醚 3 种恶臭污染物的排放量分别为 3.77 、 2.29 和 $1.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分

别占 VOCs 总排放量的 6.6%、4.0% 和 3.4%。这 3 种恶臭污染物与其他 5 种被检测到的恶臭污染物(乙醛、丁醛、4-甲基-2-戊酮、二硫化碳和二甲基硫醚)共占 VOCs 总排放量的 17.7%。西红柿垃圾好氧降解过程中丙醛、乙酸乙酯和丁醛 3 种恶臭污染物的排放量分别为 10.60、6.70 和 5.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别占 VOCs 总排放量的 4.6%、2.9% 和 2.3%。这 3 种恶臭污染物与其他 5 种被检测到的恶臭污染物(乙醛、4-甲基-2-戊酮、二硫化碳、二甲基硫醚和二甲基二硫醚)共占 VOCs 总排放量的 16.3%。

以上结果表明, 橙子、生菜、土豆和西红柿 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中释放的 VOCs 主要是醇、醛、酮、酯等含氧化合物和萜烯化合物, 还有少量的有机硫和烯炔。同样, Wilkins (1997) 研究发现, 生物易降解有机垃圾(主要成分为果皮、菜叶等厨余)降解排出的 VOCs 成分主要为醇、脂肪酸、酯、酮和萜烯类化合物。Staley 等 (2006) 研究发现, 橘类水果果皮含量高的混合 FW 较橘类水果果皮含量低的混合 FW 降解过程中 VOCs 排放量高 2 个数量级。考虑到果皮菜叶等植物性有机成分约占 FW 总量的 20% ~ 70% (Parfitt *et al.*, 2010), 因此, 植物性易降解有机成分对 FW 降解过程排放出来醇、醛、酮、酯等含氧化合物和萜烯化合物具有重要贡献, 对有机硫和烯炔具有一定贡献。事实上, 蔬菜、水果、树叶等植物性易降解有机垃圾本身成分的挥发和微生物降解都可产生醇、醛、酮、酯等含氧化合物、萜烯化合物、异戊二烯、有机硫等生物源 VOCs (何晶晶等, 2010; Defoer *et al.*, 2002; Statheropoulos *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2008; Zou *et al.*, 2003)。FW 中有机硫还有其他重要来源, 如动物肉、蛋和奶中的氨基酸和缩氨酸微生物降解产物 (Kim *et al.*, 2009)、食品热加工产物 (Mottram *et al.*, 2002)。但烷烃、苯系物和卤代物在 4 种植物性易降解有机垃圾中均未检测到, 只在 FW 中检测到, 表明这些化合物与 FW 中植物性易降解有机垃圾成分没有关系, 可能是 FW 中其他成分降解过程中释放出来的。据报道 (Allen *et al.*, 1997; He *et al.*, 2010; Komilis *et al.*, 2004; Statheropoulos *et al.*, 2005; Zou *et al.*, 2003), 苯系物可能主要来源于食品烹饪产物、一些工业试剂和产品, 包括染色剂、杀虫剂、清洁剂等或木质素降解产物; 卤代物可能主要来源于塑料泡沫、干洗剂、增泡剂、油漆和冰箱制冷剂, 为非生物源 VOCs

(Allen *et al.*, 1997)。此外, 橙子垃圾总 VOCs 和各类 VOCs 的排放量均明显高于生菜、土豆和西红柿 3 种蔬菜垃圾, 且橙子垃圾 VOCs 组成明显区别于 3 种蔬菜垃圾。这可能主要因为橙子具有浓郁的芳香味, 本身就含有大量的 VOCs, 果皮的精油可释放大量的单萜烯 (Lota *et al.*, 2002; Umamo *et al.*, 2002), 果肉和果汁可释放大量的醇、醛、酮、酯等含氧化合物 (Umamo *et al.*, 2002; Dharmawan *et al.*, 2007)。

4 结论 (Conclusions)

1) 混合 FW 好氧降解过程中释放出的 VOCs 共检测到 93 种, 包括 8 种醇、3 种醛、8 种酮、3 种呋喃、2 种醚、21 种酯、15 种有机硫、13 种萜烯、3 种烷烃、6 种烯炔、9 种苯系物和 2 种卤代烃。橙子垃圾降解过程中释放出的 VOCs 共检测到 57 种, 包括 12 种醇、5 种醛、7 种酮、3 种醚、14 种酯、3 种有机硫、12 种萜烯和 1 种烯炔; 生菜、土豆和西红柿垃圾降解过程中释放出来的 VOCs 共检测了 26 种, 包括 4 种醇、4 种醛、6 种酮、3 种酯、5 种有机硫、3 种萜烯和 1 种烯炔。

2) 混合 FW 好氧降解过程中 VOCs 总排放量为 951.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。橙子、生菜、土豆和西红柿 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中 VOCs 总排放量分别为 12736.72、118.67、57.40 和 228.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3) 混合 FW 好氧降解过程中排放出来的 VOCs 主要为有机硫和酯、酮、醇、醛等含氧化合物及萜烯, 分别占 VOCs 总排放量的 43.1%、53.3% 和 2.1%, 还有少量的烷烃、烯炔、苯系物和卤代烃 (均 <1%)。橙子垃圾好氧降解过程中排放出来的 VOCs 主要为萜烯, 占 VOCs 总排放量的 86.5%; 其次为醇、醛、酮、酯等含氧化合物, 共占 VOCs 总排放量的 13.5%。生菜、土豆和西红柿 3 种蔬菜垃圾好氧降解过程中排放出来的 VOCs 组成相似, 主要为醇、醛、酮、酯等含氧化合物, 分别占 3 种蔬菜垃圾 VOCs 总排放量的 80.9%、85.9% 和 79.5%; 其次为萜烯, 分别占 3 种蔬菜垃圾 VOCs 总排放量的 16.6%、8.2% 和 15.6%。此外, 橙子、生菜、土豆和西红柿 4 种植物性易降解有机垃圾好氧降解过程中排放出来的 VOCs 还有少量有机硫 (均 <6%) 和烯炔 (均 <1%)。

4) 混合 FW 好氧降解过程中排放出来的恶臭污染物占 VOCs 总排放量的 68.4%, 主要为二甲基二

硫醚、乙酸乙酯、二甲基硫醚和乙醛。橙子垃圾好氧降解过程中排放出来的恶臭污染物占 VOCs 总排放量的 3.1%，主要为乙酸乙酯和乙醛。生菜垃圾好氧降解过程中排放出来的恶臭污染物占 VOCs 总排放量的 10.6%，主要为丙醛、乙酸乙酯、丁醛和 4-甲基-2-戊酮。土豆垃圾好氧降解过程中排放出来的恶臭污染物占 VOCs 总排放量的 17.7%，主要为乙酸乙酯、丙醛和二甲基二硫醚。西红柿垃圾好氧降解过程中排放出来的恶臭污染物占 VOCs 总排放量的 16.3%，主要为丙醛、乙酸乙酯和丁醛。

责任作者简介: 王新明(1969—), 男, 中国科学院广州地球化学研究所研究员, 博士生导师。主要从事挥发性有机物相关的大气环境、大气化学和健康影响等方面研究。E-mail: wangxm@gig.ac.cn.

参考文献(References):

- Allen M R, Braithwaite A, Hills C. 1997. Trace organic compounds in landfill gas at seven U. K. waste disposal sites [J]. *Environmental Science and Technology*, 31: 1054-1061
- Atkinson R. 2000. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 2063-2101
- Binner E, Lechner P, Erdin E, *et al.* 2003. Composting of bioorganic waste originating from Vienna [OL]. 2012-01-05. <http://web.deu.edu.tr/erdin/pubs/viyanabiyojenatik.pdf>
- Defoer N, De Bo I, Van Langenhove H, *et al.* 2002. Gas chromatography-mass spectrometry as a tool for estimating odour concentrations of biofilter effluents at aerobic composting and rendering plants [J]. *Journal of Chromatography A*, 970: 259-273
- Dharmawan J, Kasapis S, Curran P, *et al.* 2007. Characterization of volatile compounds in selected citrus fruits from Asia. Part I: freshly-squeezed juice [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 22: 228-232
- Haug R T. 1993. *The Practical Handbook of Composting Engineering* [M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers
- 何晶晶, 曾阳, 唐家富, 等. 2010. 城市生活垃圾初期降解挥发性有机物释放特征 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 38(6): 854-869
- He P J, Zeng Y, Tang J F, *et al.* 2010. Emission of volatile organic compounds during initial decomposition phase of municipal solid waste [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 38(6): 854-869 (in Chinese)
- He P J, Tang J F, Zhang D Q, *et al.* 2010. Release of volatile organic compounds during bio-drying of municipal solid waste [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 22(5): 752-759
- Jenkin M E, Clemitshaw K C. 2000. Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 2499-2527
- Kim K H, Pal R, Ahn J W, *et al.* 2009. Food decay and offensive odorants: A comparative analysis among three types of food [J]. *Waste Management*, 29: 1265-1273
- Komilis D P, Ham R K, Park J K. 2004. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes [J]. *Water Research*, 38: 1707-1714
- Lota M L, de Rocca Serra D, Tomi F L, *et al.* 2002. Volatile components of peel and leaf oils of lemon and lime species [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 50: 796-805
- Lundqvist J, De Fraiture C, Molden D. 2008. Saving water; from field to fork-curbing losses and wastage in the food chain [Z]. SIWI Policy Brief. Stockholm: SIWI
- Mao I F, Tsai C J, Shen S H, *et al.* 2006. Critical compounds of odors in evaluating the performance of food waste composting plants [J]. *Science of Total Environment*, 370: 323-329
- Mathiasen L, Nielsen B H, Nielsen E M, *et al.* 1995. Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes [J]. *The Science of the Total Environment*, 168: 33-56
- Molina M J, Rowland F S. 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chloride atom-catalyzed destruction of ozone [J]. *Nature*, 249: 810-812
- Mottram D S, Nobrega I C C. 2002. Formation of sulfur aroma compounds in reaction mixtures containing cysteine and three different forms of ribose [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50: 4080-4086
- Parfit J, Barthel M, Macnaughton S. 2010. Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050 [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365: 3065-3081
- Ryckeboer J, Mergaert J, Vaes K, *et al.* 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and selfheating processes [J]. *Annals of Microbiology*, 53: 349-410
- 沈培明, 陈正夫, 张东平, 等. 2005. 恶臭的评价与分析 [M]. 北京: 化学工业出版社
- Shen P M, Chen Z F, Zhang D P, *et al.* 2005. Assessment and Analysis of Malodor [M]. Beijing: Chemical Industry Press (in Chinese)
- Smet E, Van Langenhove H, De Bo I. 1999. The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste [J]. *Atmospheric Environment*, 33: 1295-1303
- Sponza D T, A ğda ğ O N. 2005. Effects of shredding of wastes on the treatment of municipal solid wastes (MSWs) in simulated anaerobic recycled reactors [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 36: 25-33
- Staley B F, Xu F, Cowie S J, *et al.* 2006. Release of trace organic compounds during the decomposition of municipal solid waste components [J]. *Environmental Science and Technology*, 40: 5984-5991
- Statheropoulos M, Agapiou A, Pallis G. 2005. A study of volatile organic compounds evolved in urban waste disposal bins [J]. *Atmospheric Environment*, 39: 4639-4645
- Tsai S H, Liu C P, Yang S S. 2007. Microbial conversion of food wastes for biofertilizer production with thermophilic lipolytic microbes [J]. *Renewable Energy*, 32: 904-915

- Umano K, Hagi Y, Shibamoto T. 2002. Volatile chemicals identified in extracts from newly hybrid citrus, Dekopon (*Shiranuhi mandarin* Suppl. J.) [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 50: 5355-5359
- Wang X M, Wu T. 2008. Release of isoprene and monoterpenes during the aerobic decomposition of orange wastes [J]. *Environmental Science and Technology*, 42: 3265-3270
- Wilkins C K. 1997. Gaseous organic emissions from various types of household waste [J]. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 4: 87-89
- Wilkins C K, Larsen K. 1996. Volatile compounds from garden waste [J]. *Chemosphere*, 32: 2049-2055
- Wu T, Wang X M, Li D J, *et al.* 2010. Emission of volatile organic sulfur compounds (VOSCs) during aerobic decomposition of food wastes: a laboratory study [J]. *Atmospheric Environment*, 44: 5065-5071
- Yi Z G, Wang X M, Zhang D Q, *et al.* 2007. Soil uptake of carbonyl sulfide in subtropical forests with different successional stages in south China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112, D08302, doi: 10.1029/2006JD008048
- Zhang Y G, Chen Y, Meng A H, *et al.* 2008. Experiment and thermodynamic investigation on transfer of cadmium influenced by sulfur and chloride during municipal solid waste (MSW) incineration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 153: 309-319
- 中华人民共和国国家统计局. 2011. 中国统计年鉴——2011 [M]. 北京: 中国统计出版社
- National Bureau of Statistics of China. 2011. *China Statistics Yearbook—2011* [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- Zou S C, Lee S C, Chan C Y, *et al.* 2003. Characterization of ambient volatile organic compounds at a landfill site in Guangzhou, South China [J]. *Chemosphere*, 51: 1015-1022
- 邹世春, 李攻科, 张淑娟, 等. 2000. 广州大田山垃圾填埋场空气中微量挥发有机污染物组成 [J]. *环境科学学报*, 20 (6): 805-807
- Zou S C, Li G K, Zhang S J, *et al.* 2000. Composition of volatile organic compounds in Guangzhou Datianshan landfill air [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 20 (6): 805-807 (in Chinese)