

南方城市餐饮业垃圾特性调查及处理对策分析

徐栋, 沈东升*, 冯华军, 汪美贞, 邓友华

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310018)

摘要:针对目前南方餐饮业垃圾产生量大、污染严重、缺乏合理处理处置技术的现状, 选择杭州作为南方城市的典型代表, 研究了三类餐饮业垃圾(中餐饭馆、中餐食堂和西餐餐饮点)四季的成分变化特征, 探讨了各特性指标对处理处置技术的影响, 并根据指标特性对餐饮业垃圾的各种处理处置方法进行了评价. 结果表明, 南方城市餐饮业垃圾含水率可达 60% 以上, VS/TS 均超 87%, pH 为 4.64~6.98, 呈酸性或弱酸性; 有机成分高, 脂肪、蛋白质和碳水化合物含量分别为 16.98%~38.92%、6.58%~11.65% 和 46.27%~68.28%, 可生物降解性好; 盐分含量为 0.69%~2.44%, 总 P 含量为 0.13%~0.30%, 可成为生物限制的瓶颈. 根据垃圾特性, 认为单独收集-两相厌氧发酵处理为南方城市餐饮业垃圾较佳的处理处置方式.

关键词:餐饮业垃圾; 特性指标; 单独收集; 两相厌氧发酵法

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)07-2164-05

Investigation and Countermeasures Analysis of Catering Waste in Southern City in China

XU Dong, SHEN Dong-sheng, FENG Hua-jun, WANG Mei-zhen, DENG You-hua

(College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To find out a suitable way for catering food waste treatment, the waste characteristics from Chinese restaurant, Chinese canteen and western-style canteen in 4 seasons have been investigated. The results showed the average moisture content of the food waste was more than 60%, with more than 87% of VS/TS and the pH range of 4.64-6.98. The contents of organic components were high, the contents of fat and protein and carbohydrate were 16.98%-38.92%, 6.58%-11.65% and 46.27%-68.28%, respectively. It implied the food waste could be easily bio-degraded. The salt content was 0.69%-2.44%, with total P content of 0.13%-0.30%. It suggested high content of salt could limit the efficiency of bio-degradation. Based on all above characteristics, separated collection and two-phase anaerobic digestion were considered to be a suitable ways for catering food waste treatment.

Key words: catering waste; characteristic indicators; separated collection; two-phase anaerobic digestion

在我国, 城市生活垃圾人均年排放量可达到 600 kg, 且以每年 8%~10% 的速度增长. 在这些垃圾构成中, 餐厨垃圾的比例占 37%~62%^[1]. 餐厨垃圾来源较为广泛, 但大体可分为餐饮业垃圾和居民厨房垃圾两类. 目前由于收集成本高、分类困难等原因, 居民厨房垃圾多混入普通生活垃圾进行处理处置, 因此关于餐厨垃圾的处理处置技术研究多针对餐饮业垃圾展开. 国内外处理餐饮业垃圾的方法主要有: 焚烧法、填埋法、好氧堆肥法、厌氧发酵法、蚯蚓堆肥法、生物制氢法、发酵制酒精法以及生物柴油制取法等^[2-6], 后 4 种处理方法代表了未来餐厨垃圾处理的发展方向, 但整体技术还处于起步阶段, 短期内尚达不到工艺化、生产化的程度, 故目前处理餐厨垃圾主要为前 4 种常规垃圾处理法.

合理可行的餐厨垃圾处理处置技术要根据其特性进行选择, 组分不清而盲目选择不仅会导致处理装置运行失败, 甚至会造成严重的二次污染. Kwon 等^[7]采用常规好氧堆肥, 忽略了油脂和盐分对微生物

降解有机物的影响, 不仅导致堆肥的有机物转化率大大低于城市生活垃圾的转化率, 且排放大量的臭气; Ghanem 等^[8]采用厌氧发酵处理餐厨垃圾, 由于挥发性脂肪酸的累积导致了发酵系统的彻底崩溃; Timothy 等^[9]采用高温压榨技术对餐厨垃圾进行饲料化处理, 但病原性试验结果表明大量病原性微生物残留限制了其饲料化应用. 作为影响处理处置成败关键的餐厨垃圾特性受季节变化、居民消费水平、生活习惯等诸多因素的影响, 而目前有关餐厨垃圾特性的系统研究尚少. 因此, 本研究以杭州为例, 对餐饮业垃圾进行了四季特性调查, 以期在众多南方城市餐饮业垃圾的处理处置技术选择提供基础数据, 并根据垃圾特性进行了各处理处置对策的可

收稿日期: 2010-08-21; 修订日期: 2010-12-13

基金项目: 浙江省重大科技专项 (2009C13002); 浙江省研究生创新科研项目 (YK2008065); 浙江省高等学校创新团队支持计划项目 (T200912); 浙江工商大学校级科研项目 (X11-06)

作者简介: 徐栋 (1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固废污染控制与资源化, E-mail: xudong5588@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shends@zju.edu.cn

行性分析, 以期为经济有效处理餐饮业垃圾提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

参照《中华人民共和国城镇建设行业标准》(CJ/T 3039-95), 分别于 2009 年 4 月(春)、7 月(夏)、10 月(秋)及 2010 年 1 月(冬)的 15~17 号对杭州市 9 个采样点连续取样 3 d, 每个采样点每次采取约 1 kg 左右的餐厨垃圾作为试验样本(大样本), 4℃ 冷藏待测。9 个采样点具体为: ① 中餐饭馆取样点: 杭州市教工路某 3 家餐饮饭馆; ② 中餐集体食堂取样点: 浙江大学、浙江工商大学、浙江工业大学某 3 个大学食堂; ③ 西餐餐饮取样点: 杭州市肯德基、麦当劳、德克士某 3 家餐饮分店。

1.2 分析方法

样品预处理: 手工去除骨头、塑料袋、饮料瓶盖、蛋壳、筷子等杂物后, 用多功能食物搅拌破碎机进行破碎, 混匀 10 min 达到均质化后备用。

检测方法为: ① 含水率: 直接干燥法(GB 6435-86); ② 总固体物含量(total solids, TS): 真空干燥箱中 105℃ 下烘 24 h^[10]; ③ 挥发性固体(volatile solids, VS): 马弗炉中 600℃ 下烘 2 h^[10]; ④ pH 值: 玻璃电极法^[10]; ⑤ 脂肪含量: 索式提取法(GB/T 6433-2006); ⑥ 蛋白质含量: H₂SO₄-H₂O₂-靛酚蓝比色法^[11](测得氮含量乘以 6.25 计算得到); ⑦ 碳水化合物含量: 由蛋白质、粗脂肪、TS 和 VS 计算所得^[12]; ⑧ 总磷: 钼酸铵分光光度法(GB 11893-89); ⑨ 盐分: 直接滴定法(SC/T 3011-2001)。每个样品每个指标设 3 个重复。

1.3 数据分析方法

数据分析采用 SPSS 10.0 软件进行, 采用 ANOVA 方差分析及 DUNCAN 多重比较进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 餐饮业垃圾特性分析

2.1.1 含水率

三类餐饮业垃圾不同季节的含水率见图 1。可以看出, 中餐餐饮业垃圾四季含水率均超过 68%, 且在夏季达到最高(中餐饭馆为 76.75%, 集体食堂为 71.14%); 西餐餐饮业垃圾四季含水率变化不大, 为 64.53%~66.77%。中餐餐饮业垃圾含水率显著高于西餐餐饮业垃圾($p < 0.01$), 且三类餐

业垃圾不同季节的含水率均超过 60%。

据报道, 城市生活垃圾可焚烧性的界限值为含水量 $\leq 50\%$ ^[13], 含水率过高则不利于燃烧; 《城市生活垃圾卫生填埋规范》(CJJ 17-2004) 规定垃圾进场含水率应小于 20%~30%, 含水率过高亦会大幅度增加填埋处理的渗滤液, 因此含水率超过 60% 的餐饮业垃圾不适合采用焚烧法和填埋法这 2 种常用的垃圾处理方法进行处理。Lissens 等^[14] 报道, 当含水率范围为 50%~70% 时, 垃圾适合于堆肥化处理 and 厌氧发酵处理。因此, 仅从含水率考虑, 餐饮业垃圾适合进行堆肥化处理或厌氧发酵处理。

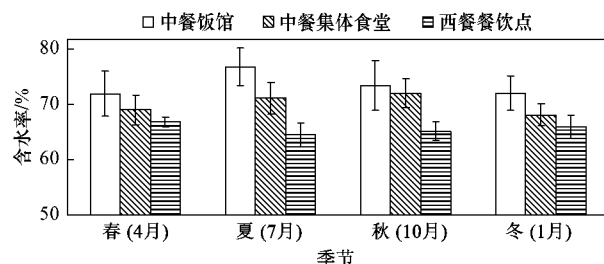


图 1 三类餐饮业垃圾不同季节含水率变化

Fig. 1 Moisture content changes in different seasons of three types of catering food waste

2.1.2 TS 和 VS 含量

由表 1 可知, 西餐餐饮业垃圾的 TS 以夏季最高, 达 31.04%, 春秋两季较低, 仅为 28.84% 和 30.03%; 而中餐餐饮业垃圾 TS 则夏季较低(中餐饭馆为 22.93%, 集体食堂为 23.31%), 其它 3 季变化不大($p > 0.05$)。西餐餐饮业垃圾的 TS 显著高于中餐餐饮业垃圾的 TS($p < 0.01$)。由表 1 还可知, 中餐饭馆和集体食堂垃圾 VS/TS 差异不显著($p > 0.05$), 均为 90% 左右; 西餐餐饮业垃圾的 VS/TS 比中餐餐饮业垃圾高出 3.29%~9.18%, 四季均超过了 96%。

VS/TS 间接表示了物料降解的难易程度, 比值越高越易降解, 反之亦然。因此, 三类餐饮业垃圾的高 VS/TS 比值表明了南方餐饮业垃圾均较宜降解, 可能适合填埋、堆肥和厌氧发酵等生物处理。但进行填埋处理时, 厌氧分解产生的甲烷可加剧温室效应, 据报道甲烷温室效应的增温潜能相当于相同质量的二氧化碳的 21 倍^[15], 因此一些国家已禁止餐厨垃圾进入填埋场, 如韩国于 2005 年开始所有填埋场不再接收餐厨垃圾。因此仅从 VS/TS 角度而言, 堆肥和厌氧发酵 2 类生物处理技术较适合于餐饮业垃圾处理处置。

表 1 三类餐饮业垃圾不同季节 TS 和 VS 变化

Table 1 TS and VS changes in different seasons of three types of catering food waste

季节	取样点	特性指标/%		
		TS	VS	VS/TS
春(4月)	中餐饭馆	26.33 ± 4.58	24.51 ± 4.85	93.09
	中餐集体食堂	25.95 ± 1.99	24.23 ± 2.25	93.37
	西餐餐饮点	28.84 ± 3.15	27.91 ± 3.26	96.78
夏(7月)	中餐饭馆	22.93 ± 3.77	20.11 ± 4.37	87.66
	中餐集体食堂	23.31 ± 1.26	20.95 ± 1.71	89.91
	西餐餐饮点	31.04 ± 1.94	30.06 ± 1.95	96.84
秋(10月)	中餐饭馆	25.33 ± 0.93	23.87 ± 1.23	94.12
	中餐集体食堂	26.61 ± 1.34	24.80 ± 1.72	93.21
	西餐餐饮点	30.48 ± 0.59	29.41 ± 0.76	96.49
冬(1月)	中餐饭馆	26.45 ± 2.38	24.99 ± 2.70	94.48
	中餐集体食堂	26.35 ± 1.86	24.81 ± 2.12	94.16
	西餐餐饮点	30.03 ± 3.67	29.41 ± 3.94	98.64

2.1.3 pH 值

由图 2 可知,三类餐饮业垃圾 pH 随季节变化不大,中餐饭馆为 4.64 ~ 4.98,集体食堂为 6.66 ~ 6.98,西餐餐饮点为 5.81 ~ 6.01。三类餐厨垃圾 pH 均小于 7,呈酸性或弱酸性,且三类餐厨垃圾 pH 差异极显著($p < 0.01$),这可能是由于餐厨垃圾的不同组成成分所致,集体食堂剩余米饭、米面和蔬菜较多(测得米饭、面条和菠菜的 pH 分别为 6.84、6.76 和 7.09),pH 相对较高;中餐饭馆剩余鱼肉类、调味料类较多(测得鲫鱼、猪肉和辣椒的 pH 分别为 4.51、5.28 和 3.97)和西餐餐饮点剩余肉类、酱类和面包较多(测得鸡肉、番茄酱和面包的 pH 分别为 6.04、3.73 和 5.86),pH 则相对较低。

一般认为,初始 pH 在 7.5 ~ 8.5 时,其降解周

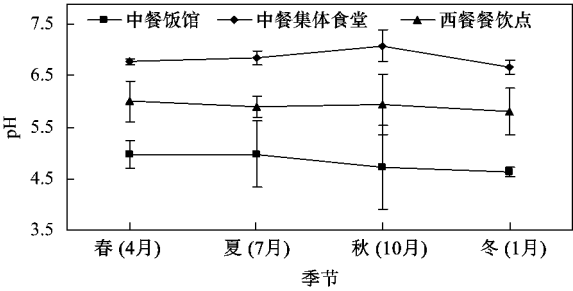


图 2 三类餐饮业垃圾不同季节的 pH 值变化

Fig. 2 pH value changes in different seasons of three types of catering food waste

期较短且降解效率较高,可获得理想的堆肥速率^[16],而杭州市餐饮业垃圾均呈酸性,且在收集、储存、运输过程中会进一步自然酸化,pH 呈下降趋势,这必将影响餐饮业垃圾进行填埋和堆肥化处理的效率。此外,pH 呈酸性也会使厌氧发酵中的产甲烷菌受抑制,虽然 Ghosh 等^[17]在 20 世纪 70 年代提出的两相厌氧消化法可以较好地缓解酸化作用对产甲烷菌的抑制作用,但该法也存在投资增大、运转维护复杂等问题。

2.1.4 脂肪、蛋白质和碳水化合物含量

脂肪、蛋白质和碳水化合物作为食物中的三大有机组分,在餐饮业垃圾中含量很高,具体含量见表 2。脂肪含量依次为:西餐餐饮点(30.28% ~ 38.92%) > 中餐饭馆(24.56% ~ 30.47%) > 集体食堂(16.98% ~ 23.29%),其中中餐餐饮业垃圾脂肪含量最高点出现在春秋两季,这与我国居民的饮食习惯有关;蛋白质含量也呈相似规律,中餐饭馆与西餐餐饮点的垃圾较为接近(分别为 10.21% ~

表 2 三类餐饮业垃圾不同季节的成分特性变化/%

Table 2 Component characteristics changes in different seasons of three types of catering food waste/%

季节	取样点	特性指标				
		脂肪 (以干重计)	蛋白质 (以干重计)	碳水化合物 (以干重计)	盐分	总磷
春(4月)	中餐饭馆	30.47 ± 1.52	10.65 ± 0.76	51.97 ± 2.28	2.15 ± 0.08	0.24 ± 0.04
	中餐集体食堂	18.91 ± 1.41	7.77 ± 0.60	66.09 ± 2.01	2.07 ± 0.11	0.13 ± 0.03
	西餐餐饮点	31.02 ± 1.83	10.85 ± 0.47	54.91 ± 2.30	0.93 ± 0.09	0.23 ± 0.04
夏(7月)	中餐饭馆	24.56 ± 1.13	8.69 ± 0.94	54.41 ± 2.07	2.17 ± 0.05	0.25 ± 0.02
	中餐集体食堂	18.73 ± 1.01	6.58 ± 1.23	64.60 ± 2.24	1.88 ± 0.16	0.15 ± 0.01
	西餐餐饮点	38.92 ± 1.57	11.65 ± 0.66	46.27 ± 2.23	0.69 ± 0.06	0.30 ± 0.04
秋(10月)	中餐饭馆	26.53 ± 0.54	9.96 ± 0.94	57.68 ± 1.48	1.98 ± 0.29	0.26 ± 0.02
	中餐集体食堂	23.29 ± 0.40	7.06 ± 1.22	62.85 ± 1.62	1.91 ± 0.22	0.19 ± 0.02
	西餐餐饮点	32.16 ± 1.28	11.33 ± 1.29	53.00 ± 2.57	1.37 ± 0.15	0.25 ± 0.06
冬(1月)	中餐饭馆	28.57 ± 2.86	10.18 ± 2.48	55.70 ± 5.34	2.44 ± 0.51	0.20 ± 0.04
	中餐集体食堂	16.98 ± 3.74	7.90 ± 0.63	68.28 ± 4.37	2.41 ± 0.29	0.14 ± 0.01
	西餐餐饮点	30.28 ± 2.91	10.21 ± 0.40	58.19 ± 3.31	1.11 ± 0.48	0.25 ± 0.02

11.65%和8.69%~10.65%),显著高于集体食堂垃圾(6.58%~7.90%, $p<0.05$);三类餐饮业垃圾碳水化合物含量普遍较高,均高于45%,且以集体食堂最高(高于60%),这可能与集体食堂剩米饭、剩面条等谷类食物较多有关,各类餐饮业垃圾碳水化合物含量随季节变化相差不大,且都在冬季达到最高。

餐饮业垃圾三大有机组分含量高,热值大(糖类、脂肪和蛋白质热值分别为17.16、38.90和17.16 kJ/g),适合焚烧处理;可生物降解组分含量高,稳定时间短,有利于垃圾填埋场地恢复使用;全面的营养元素、合适的C/N比也决定其非常适合作为堆肥原料,但过高的油脂含量则不利于微生物的生长,在一定程度上制约了好氧堆肥工艺的处理效果。此外,油脂含量过高往往可导致挥发性脂肪酸(VFA)的累积,对单相厌氧发酵产生负面影响。厌氧消化的原液VFA浓度一般要求低于3 000 mg/L^[18],而赵杰红等^[19]研究表明,11.5%油脂含量的厨余垃圾在37℃下发酵1 d后,VFA浓度达6 000 mg/L。Wang等^[20]通过泔脚酸化液的厌氧毒性试验表明,泔脚酸化液是抑制其甲烷化进程的主要原因,而两相厌氧发酵将产酸相和产甲烷相分开则能很好地避免酸化抑制。因此,仅从三大有机成分含量考虑,南方餐饮业垃圾适合焚烧、填埋和两相厌氧发酵处理,对好氧堆肥和单相厌氧发酵会产生负面影响。

2.1.5 盐分

表2列出了三类餐饮业垃圾的盐分含量,其中中餐餐饮业垃圾盐分含量(1.88%~2.44%)显著高于西餐餐饮业垃圾(0.69%~1.37%, $p<0.01$),且在冬季达到最高,夏季相对较低。

餐饮业垃圾的高盐分将对厌氧发酵处理技术产生负面影响,有资料显示,当厌氧消化反应器中总盐量为0.5%~1.0%时,将对厌氧发酵产生中等抑

制,当总盐量>1.5%时,将会产生强抑制作用^[21],由此可见,中餐餐饮业垃圾盐分含量大大超过了强抑制浓度,西餐餐饮业垃圾盐分含量也达到了中等抑制或强抑制水平,不适合进行厌氧发酵处理,但如果采用高效反应器或者驯化耐盐厌氧产甲烷菌株可有效缓解这种不利影响。李勇华等^[22]用高效IC厌氧反应器研究了Na⁺对颗粒污泥的影响,结果发现当Na⁺浓度<10 000 mg/L时,系统具有足够的缓冲能力。此外,高盐分也制约了堆肥法中微生物的生长,降低了将餐饮业垃圾制成有机肥料的肥料化效率,且由餐饮业垃圾制得的肥料含盐量较高,会使土壤盐化、不利作物生长。

2.1.6 总P含量

各类餐饮业垃圾中都含有充足的磷,从表2可以看出,集体食堂P含量相对较低(0.13%~0.19%),西餐餐饮点P含量(0.23%~0.30%)则略高于中餐饭馆P含量(0.20%~0.26%),且四季变化不大。

充分的磷元素保证了餐饮业垃圾堆肥后的产品质量,堆肥国家标准(CJ/T 3059-1996)明确规定堆肥产品总磷(以P₂O₅计)质量分数需大于0.3%。李荣平等^[12]对厌氧消化残渣进行肥料特性研究,发现其营养元素远远高于国家农业部有机肥料的行业标准(NYN525-2002)。但在进行填埋处置时,若处理不当高磷含量将容易造成江、河、湖泊富营养化及水体污染。

2.2 南方城市餐饮业垃圾处理对策优选

根据餐饮业垃圾的特性出发,4种常规垃圾处理技术可行性分析见表3。餐饮业垃圾的高含水率会大大降低混合垃圾的整体热值,仅为2 100 kJ/kg左右^[23],因此餐厨垃圾不适合采用焚烧法处理。此外,过高的含水率不仅会占用大量填埋库容,还会导致渗沥液增加,加重填埋场渗沥液的处理负荷,极易

表3 餐饮业垃圾不同处理技术的可行性分析

特性指标	焚烧法	填埋法	好氧堆肥法	厌氧发酵法	
				单相	两相
含水率	极不适宜	极不适宜	适宜	适宜	适宜
TS、VS	适宜	较适宜	适宜	适宜	适宜
pH	适宜	适宜	不适宜	不适宜	适宜
脂肪	适宜	适宜	较适宜	不适宜	适宜
蛋白质	适宜	适宜	适宜	适宜	适宜
碳水化合物	适宜	适宜	适宜	适宜	适宜
盐度	适宜	较适宜	不适宜	不适宜	不适宜
总P	适宜	较适宜	适宜	适宜	适宜

造成二次污染. 因此,在餐饮业垃圾的处理方式上应避免与其它生活垃圾混合处理,建议对餐饮业垃圾采取单独收集、单独处理的模式.

餐饮业垃圾好氧堆肥和厌氧发酵处理同属生物处理方法,抑制因素基本相同,但厌氧发酵中的两相厌氧技术将厌氧相分为产酸相和产甲烷相 2 个独立的处理单元,通过调控 2 个单元的运行参数,避免了 pH 剧烈下降、VFA 积累、产甲烷菌抑制等不利影响,形成产酸和产甲烷发酵微生物各自较佳的生态条件,这对于诸如餐饮业垃圾这类可生物降解有机物含量高的废物具有重要意义,故仅从特性指标分析可得,两相厌氧发酵法优于好氧堆肥和单相厌氧发酵法,但具体选用何种处理工艺还应结合经济效益、环境效益等多方面因素进行综合判定.

3 结论

(1)南方城市餐饮业垃圾具有以下特征:①含水率四季均超过 60% ,pH 变化为 4. 64 ~6. 98,呈酸性或弱酸性;②脂肪、蛋白质和碳水化合物三大有机物含量高,磷元素含量丰富;③与国外餐厨垃圾相比,南方城市餐饮业垃圾油分(脂肪含量)与盐分的含量较高.

(2)南方城市不同类型餐饮业垃圾四季均可采用混合收集、混合处理的模式.

(3)从指标特性出发,餐饮业垃圾宜采用区别于生活垃圾的单独收集-两相厌氧发酵处理处置技术.

参考文献:

[1] 王向会,李广魏,孟虹,等. 国内外餐厨垃圾处理状况概述[J]. 环境卫生工程, 2005, 13(2): 41-43.

[2] Nguyen P H L, Kuruparan P, Visvanathan C. Anaerobic digestion of municipal solid waste as a treatment prior to landfill[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(2): 380-387.

[3] Li J Z, Li B K, Zhu G F, *et al.* Hydrogen production from diluted molasses by anaerobic hydrogen producing bacteria in an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(15): 3274-3283.

[4] 王昊,王洪涛,陆文静. 水热处理泔脚脱油与产物消化性能变化[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1551-1555.

[5] 马鸿志,宫利娟,汪群慧,等. Plackett-Burman 实验设计优化餐厨垃圾发酵产燃料酒精的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1452-1456.

[6] He H Y, Wang T, Zhu S L. Continuous production of biodiesel

fuel from vegetable oil using supercritical methanol process[J]. Fuel, 2007, 86(3): 442-447.

[7] Kwon S H, Lee D H. Evaluation of Korean food waste composting with fed-batch operations I: using waster extractable total organic carbon contents (TOC)[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(10): 1183-1194.

[8] Ghanem I I, Gu G W, Zhu J F. Leachate production and disposal of kitchen food solid waste by dry fermentation for biogas generation[J]. Renewable Energy, 2001, 23(3-4): 673-684.

[9] Timothy R K, Paul M W. Bacterial concentration reduction of food waste amended animal feed using a single-screw dry-extrusion process[J]. Bioresource Technology, 1999, 67(3): 247-253.

[10] Taras M J. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. American Public Health Association, 1998.

[11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.

[12] 李荣平,葛亚军,王奎升,等. 餐厨垃圾特性及其厌氧消化性能研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 76-80.

[13] 周少奇,陈克复. 固体废物污染控制原理与技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

[14] Lissens G, Vandevivere P, De B L, *et al.* Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(8): 91-102.

[15] Li R P, Chen S L, Li X J, *et al.* Anaerobic co-digestion of kitchen waste with cattle manure for biogas production [J]. Energy Fuels, 2009, 23(4): 2225-2228.

[16] 柴晓利,张华,赵由才,等. 固体废物堆肥原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.

[17] Ghosh S, Pohland F G. Kinetics of substrate assimilation and product formation in anaerobic digestion [J]. Water Pollution Control Federation, 1974, 46(4): 748-759.

[18] 吴婉娥,葛红光,张克峰. 废水生物处理技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.

[19] 赵杰红,张波,蔡伟民. 温度对厨余垃圾两相厌氧消解中水解和酸化过程的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1682-1686.

[20] Wang Q, Yamabe K, Narita J, *et al.* Suppression of growth of putrefactive and food poisoning bacteria by lactic acid fermentation of kitchen waste[J]. Process Biochemistry, 2001, 37(4): 351-357.

[21] 徐文龙,卢英方, Rudolf W, 等. 城市生活垃圾管理与处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.

[22] 李勇华,周兴求,伍健东,等. Na⁺对 IC 反应器颗粒污泥影响的试验研究[J]. 中国沼气, 2008, 26(1): 15-18.

[23] 熊婷,霍文冕,窦立宝,等. 城市餐厨垃圾资源化处理必要性研究[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(2): 148-152.