

餐厨废弃物资源化利用的微生物技术研究进展

许杰龙^{1,2} 张国霞² 许玫英² 吴泳标² 吴晓玉¹ 孙国萍^{2*}

(1. 江西农业大学生命科学与工程学院 江西 南昌 330000)

(2. 广东省微生物研究所 广东省菌种保藏与应用重点实验室 广东 广州 510070)

摘要: 简单介绍餐厨废弃物的特征和危害, 综述微生物技术处理餐厨废弃物资源化的途径, 如发酵提取生物降解塑料技术、厌氧发酵处理技术、微生物堆肥技术、微生物农药技术、微生物产电技术, 介绍利用复合微生物菌剂降解餐厨废弃物的研究进展, 分析这一新技术的发展趋势。

关键词: 餐厨废弃物, 资源化技术, 微生物菌剂

Research progress on reuse of food waste with microbial technology

XU Jie-Long^{1,2} ZHANG Guo-Xia² XU Mei-Ying² WU Yong-Biao²
WU Xiao-Yu¹ SUN Guo-Ping^{2*}

(1. College of Bioscience and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330000, China)

(2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou, Guangdong 510070, China)

Abstract: In this paper, the characteristics and harm of food waste were briefly introduced. New resource recycling technologies of food waste with microbial technology were reviewed, including bio-decomposable plastic production, biological anaerobic fermentation, microbial composting, biopesticide production, bioelectricity generation. In addition, the research progress on microbial degradation of food waste was introduced and the prospect of this new technology was discussed.

Keywords: Food waste, Resource technology, Micoorganism agent

随着我国经济的发展和城市化进程的加快, 人口聚集于城镇的趋势必将加快, 城市生活垃圾的排放量愈来愈大, 其中餐厨废弃物所占比例日渐上升,

占到了城市生活垃圾的 37%–62%。由于餐厨废弃物中含有大量的糖、淀粉、蛋白质, 且盐分和油脂含量也很高, 如果不加处理, 餐厨废弃物极易变质、腐

基金项目: 广东省科技攻关项目(No. 2007A032400003, 2008B030302043); 国家 863 科技项目(No. 2006106Z3063); 广东省基金团队项目(No. 9351007002000001); 国家水体污染控制与治理重大科技专项(No. 2008ZX07011-007)

* 通讯作者: Tel: 86-20-87684471; Fax: 86-20-87684587; ✉ guopingsun@163.com 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>
收稿日期: 2010-10-09; 接受日期: 2010-12-16

烂、发酵、滋生有害微生物及蚊蝇,产生大量毒素及散发恶臭气体,污染水体和大气,会严重影响城市面貌,危及居民身体健康,破坏环境质量。但餐厨废弃物具有丰富营养元素、高有机物及无机盐含量,若能有效处理是具有一定价值的资源。我国是人口众多、人均资源缺乏的发展中国家,但是垃圾资源化工作进展却十分缓慢。如何实现垃圾资源化和缩减垃圾处理量,是我国正面临的迫切问题。

1 餐厨废弃物

1.1 餐厨废弃物的特征

餐厨废弃物是城市垃圾的主要来源,在有的城市餐厨废弃物所占的比例高达 50%以上,餐厨废弃物则是专指宾馆饭店等餐饮业单位和企事业单位食堂以及家庭在食物加工和用餐过程中产生的食物下料和剩余食物。餐厨垃圾的共同特点是:含水率高(一般高达 60%–80%)、有机质比例高(占干物质的 95%以上)、含盐量高、有害物质含量少、氮磷钾等营养元素丰富和易腐烂。餐厨废弃物的主要化学成分是淀粉、蛋白质、脂类、纤维素。我国 13 亿人口饮食消费量巨大,餐厨废弃物按每人每天大约 0.1 kg 计算,一年至少在 5 000 万 t 以上,这相当于 233.33 万公顷玉米的能量产出和 200 万公顷大豆的蛋白质产出。与其它垃圾相比,餐厨废弃具有很大的回收利用价值,利用餐厨废弃物进行厌氧消化不仅能获得洁净的沼气能源,其厌氧消化的残渣还可以用作肥料^[1],所以说餐厨废弃物是一种放错地方的资源,应该将其资源化利用。

1.2 餐厨废弃物的危害

由于餐厨废弃物中养分丰富,含水率高,极易腐败发酸发臭,如果不及时适当处理不仅会造成大气污染和水污染,严重影响城市的面貌和居民的生活环境,而且容易滋生病菌,造成疾病的传播。此外,餐厨废弃物中的油脂含量还很高(可达总量的 20%–30%),容易被不法分子利用制作成“地沟油”,危害无穷^[2–3]。因此,餐厨废弃物的无害化、资源化处理关系着社会的和谐和人民的健康安全。

2 餐厨废弃物资源化利用新技术

2.1 发酵提取生物降解塑料技术

利用餐厨废弃物进行微生物发酵,通过提取发酵液中的乳酸,进一步合成聚乳酸,为合成可生物降解塑料提供重要的原料。制成的可降解塑料有望成为通用塑料的替代品,不仅可以解决白色污染问题,更重要的是实现餐厨废弃物的减量化和资源化,必将成为一个研究发展的新热点。我国学者王旭明等从厌氧发酵的餐厨废弃物中分离出 260 株乳酸细菌(LAB),经过试验研究在餐厨废弃物中接种乳酸细菌能够明显提高乳酸的产生量^[4]。Zhao 等利用酯化和水解的方法从餐厨废弃物发酵后的培养液中回收乳酸^[5]。赵文军等以餐厨废弃物发酵液中提取的乳酸丁酯单体为原料,以复配的 SnCl_2 和 TSA 为催化剂,合成高分子量的聚乳酸^[6],为餐厨废弃物的高资源化利用率和降低可降解塑料的生产成本开辟了一条新的途径。

2.2 生物厌氧发酵途径

生物厌氧发酵技术不仅能使餐厨废弃物减量化,减少环境污染,而且能够使垃圾能源化利用,已经成为国内外学者的研究热点。生物厌氧发酵处理是一个复杂的过程,大致可分为 3 个阶段:水解发酵阶段(第一阶段);产酸脱氢阶段(第二阶段);产甲烷阶段(第三阶段)。在厌氧堆肥过程中,如控制厌氧发酵条件,可以得到 2 种重要的产物:氢气和甲烷^[7]。Song 等报道了利用两相厌氧处理工艺发酵含有蛋白质的餐厨废弃物得到了氢气和甲烷。研究表明接种活化后的底泥和酿酒酵母可以提高氢气的产量,将产氢后的残渣接种产甲烷菌群后可以继续产甲烷,通过两相的厌氧发酵反应,使含有蛋白质的餐厨废弃物的能量转化率从只有 10.85%–11.75%提高到 55.58%–61.96%^[8]。Li 等将填埋多年的垃圾接种到餐厨废弃物中,在没有调节垃圾的 pH 值前,由于餐厨废弃物严重的酸性,只能检测到低于 0.4%的氢气,将餐厨垃圾的 pH 从 4.43 调高到 5.81,同时加大接种量(50%),实验结果发现生物产气量可以超过 26.6%,说明 pH 值对生物产氢影

响很大^[9]。Kim 等以食物垃圾作为原料,利用光合细菌进行产氢研究,通过连续实验发现,这些垃圾的发酵液有利于一种光合细菌的生长,以食物垃圾为底物产氢具有很大的潜力^[10]。Kapdan 等阐述了以各种垃圾包括餐饮废物为底物进行生物制氢的过程、条件以及所涉及的微生物种类,为以后的研究奠定了坚实的基础^[11]。

2.3 微生物堆肥处理技术

国内外运用较多的堆肥技术是厨余垃圾的高温机械堆肥法,其核心的生物处理阶段是采用高温好氧无污染生物处理法(EATAD),该工艺采用高温嗜热微生物进行发酵,温度高,发酵速度快,对厨余垃圾等有机垃圾具有较好的处理效果。该技术的重点是供氧方式和速率。Ke 等研究了利用耐热型的能分解脂肪的放线菌 A31 来降解餐厨废弃物,接种放线菌 A31 可以减少粗脂肪含量、缩短腐熟时间,降低 TOC、C/N、CO₂ 的排放量以及酶活性(脱氢酶、多酚氧化酶、脲酶),并提高 pH 值、总氮、发芽率。说明放线菌 A31 可以有效促进堆肥腐熟^[12]。Yu 等研究了餐厨废弃物堆肥过程中丁酸、乳酸、醋酸、丙酸等有机酸对细菌生长活性的影响,结果表明餐厨废弃物有机物的分解导致了有机酸的含量不断积累,当有机酸含量积累到一定浓度会抑制微生物菌群的活性、降低降解率,为以后优化堆肥条件提供了不少借鉴^[13-14]。

2.4 利用餐厨废弃物生产生物农药

利用餐厨废弃物制生物农药,将其广泛用于绿色有机农业,是餐厨废弃物高端利用的新途径。Poopathi 等将家禽羽毛等餐厨废弃物回收利用,用这些垃圾当作培养基培养苏云金芽孢杆菌,通过微生物的生物合成产生蚊子毒素,将该毒素进行生化特性研究,发现其杀虫效果跟用传统方法的微生物发酵产生的蚊子毒素差不多。该研究意义重大,取得了一举两得的功效,不仅可以回收利用环境中的生物有机垃圾,而且可以用于生产生物杀虫剂^[15]。北京固废产业技术联盟成员单位研发了苏云金芽孢杆菌(Bt)生物农药新工艺,所采用固态发酵法比国内 Bt 生产企业采用液体深层发酵技术更为绿色环

保。根据实验数据,4 t 餐厨废弃物可获得 1 t 干燥粉,制备 800 kg Bt 生物农药;处理 6 t 餐厨废弃物,就可生产 1 t Bt 生物农药。所以利用餐厨废弃物发展生物农药产业,有着广阔的市场发展前景。Cayuela 等也着手将垃圾变成宝的实验研究,他们将橄榄油厂的废液和有机垃圾堆肥后的废物作为生产生物农药的原料,以期能研制出高效杀死杂草、真菌和线虫的生物农药,研究结果表明将以上两者作为原料生产生物农药具有很好的研究前景^[16]。

2.5 利用餐厨废弃物产电技术

餐厨废弃物中含有大量的碳源和氮源,这些资源是微生物生长的必要因子,如果利用这些资源作为培养基发酵微生物产生一些有用的资源,也是将餐厨废弃物资源化的一部分。近些年在全球能源日渐减少的背景下,微生物燃料电池的研究成为一大热点,如果能够将垃圾资源化利用更是人们所希望的,所以有学者提出了将餐厨废弃物用来进行微生物产电实验的观点^[17]。Quezada 等将发酵后的苹果汁残渣、酿酒残渣、乳酸发酵残渣作为培养基,从环境中取部分底泥和堆肥接种到以上 3 种培养基中,在微生物燃料电池中进行反应。研究表明酿酒残渣并不适合于微生物产电,苹果汁残渣和乳酸发酵残渣则可以被微生物利用来产电。将底泥或者堆肥的渗滤液单独接种到苹果籽残渣和乳酸发酵残渣中也可以进行微生物产电。不过底泥微生物能更好地利用乳酸发酵残渣进行产电(电流密度是 232 mA/m²)。堆肥渗滤液中的微生物在苹果汁残渣(209 mA/m²)中的产电能力比在乳酸残渣(114 mA/m²)中的产电能力强,但是在乳酸残渣中的产电能力更加稳定^[18]。Mohan 等将废弃的蔬菜叶子粉碎后榨成汁,用纱布过滤残渣,得到的滤液作为培养基放入单室的微生物燃料电池中,从厌氧环境中采集一些泥样接种到燃料电池中作为阳极的生物催化剂。研究表明在微生物反应过程中伴随着产电的发生,同时有效地去除了 COD(62.86%)、碳水化合物(79.84%)和浊度(55.12%)等^[19]。

目前,在国内还没有关于利用餐厨废弃物进行微生物产电的报道,所以作者准备尝试利用餐厨废

弃物作为培养基,以底泥作为接种物,在自制的微生物燃料电池中进行反应,期待能将餐厨废弃物所含的营养源作为能源转化为电能,为我国餐厨废弃物的资源化利用提供新的思路。

3 复合微生物菌剂消化餐厨废弃物的研究现状

复合微生物菌剂是将2种或2种以上的微生物以适当的比例共同培养,不同微生物发挥不同作用,相互合作、协同而取得最佳的应用效果的一种微生物菌剂。复合微生物菌剂由于其适应环境能力强,效果较为稳定,成为近年来国内外开发的一个重要方向。EM (Effective microorganisms)的中文为“有效微生物群”,是由多种微生物有益菌复合而成的微生态制剂。该菌群组成复杂,结构稳定,功能广泛,其应用于堆肥已取得成功^[20]。目前,已广泛应用于环保、食品、卫生、农业等不同领域。Heo等将EM菌剂用于有机垃圾的堆肥实验,实验结果表明添加EM菌剂与没有添加EM菌剂相比较,加入EM菌剂具有促进堆肥效率、缩短腐熟时间的效果^[21]。

虽然国外复合微生物菌剂的效果已经很明显,而且也比较稳定,但是引进国外的菌剂肯定会增加餐厨废弃物处理的成本,也不符合我国提倡的自主创新精神。因此,国内的一些研究学者也开始着手高效微生物菌剂的研发,并且取得了一定的成绩。

朱晓慧等用选择性培养基从特定的土壤中分离出8株能产生蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶和纤维素酶等酶系的有效微生物,这些微生物菌剂可以将餐厨有机物分解成小分子,剩余的固体残渣可以当做有机肥料再利用^[22]。戚薇等从堆肥土壤中筛选得到16株产蛋白酶、纤维素酶、淀粉酶、脂肪酶活力较高的菌株。通过摇瓶筛选试验,确定了由14株菌组成的高效降解泔脚垃圾的微生物制剂,并在1.5 kg泔脚处理机上进行降解试验。结果表明,投入100 g菌粉能在24 h内将1.5–2.0 kg泔脚垃圾基本降解,降解率达95%以上,连续运转1个月,其分解能力基

本没有下降^[23]。孙宏民等从实验室保藏菌种和厨余垃圾中筛选到10株产蛋白酶、纤维素酶、淀粉酶和脂肪酶活性较高的菌株,对厨余废弃物进行了降解实验,最终确定了4株能高效降解厨余废弃物的微生物,并制成菌剂。将该菌剂在5 kg小型固体废弃物处理机上进行降解实验,结果表明:当一次性投入2% (质量分数)菌剂时能在24 h内将每天投入的3.5 kg厨余废弃物基本降解,连续运行10 d,其处理能力基本保持稳定^[2]。Tsai等利用复合微生物菌剂将餐厨废弃物转化成多功能生物肥料,实验结果表明向餐厨废弃物中接种嗜热和分解油脂的微生物菌群能够提高餐厨废弃物的降解,提高总氮和紫花苜蓿种子的发芽率,缩短腐熟时间^[24]。Chan等从堆肥里和生物肥料中分离出有细菌、放线菌、真菌等能够耐高温的溶磷微生物群落,经过功能验证能够高效地分解淀粉、纤维素、蛋白质和脂肪,将这些微生物制成菌剂能够缩短腐熟时间,提高总氮和发芽率^[25]。

作者在研制高效降解餐厨废弃物的微生物菌剂过程中,以菌种库保存的菌株和商品菌剂为菌源,从中分离、筛选和驯化得到几十株高降解功能菌株,通过正交试验构建了淀粉、脂肪、蛋白和纤维素高效降解菌株的复合系,配合载体的选择优化,采用合适的发酵技术制成高功能菌剂,将其应用于餐厨废弃物好氧降解工艺中,同时对好氧降解工艺条件进行优化,达到提高降解效率的目的,以期为餐厨废弃物的大规模处理及其处理设备的开发提供必要的工艺参数和相应的理论依据。作者开发研制的微生物菌剂在餐厨废弃物机上消化量1 kg/d,对蔬菜类、水果类、肉类的消除率为70%–90%,最高达98%,并且成功运行3个月以上。菌剂保存1年后的消除率仍可达80%。H₂S、氨氮、硫醇和气味等安全性指标都低于国家规定的环境大气中有害气体的排放标准。本文作者研究开发的高效降解餐厨废弃物的复合微生物菌剂解决了微生物法处理餐厨废弃物的核心问题——高效菌种的选择及其载体的优化。餐厨废弃物分解后经深加工可以作为肥料及饲料,对环境和动物无危害,而且效果显著。

4 展望

由于全球的资源不断耗竭,很多国家提出了许多可持续发展战略。因此,国内外很多学者不断研究将餐厨废弃物资源化的其他新技术,如Rosales等用餐厨废弃物发酵进行产漆酶的研究^[26],Wijngaard等利用加工后的餐厨废弃物作为辅助材料生产多酚抗氧化剂^[27]。此外,用餐厨废弃物作为原料通过微生物发酵产生乙醇也成为一个新的研究热点^[28]。餐厨废弃物资源化技术的多样化,说明了将餐厨废弃物变废为宝具有广泛的发展前景。但是本文前面部分介绍的几种技术方法都必须先把餐厨废弃物集中收集运送到一个固定地方,然后才能够再进一步处理使之资源化。这样不仅增加了餐厨废弃物的收集难度,而且大大提高了运输成本。所以有些国家已经开始实施餐厨废弃物原位减量,开发出一种自动化设备与微生物处理技术相结合的途径,即将高效微生物菌剂添加到自动化的有机垃圾消解机中进行餐厨废弃物减量化。这种方法可以减少运输成本、消除臭味、避免蚊蝇滋生以及减少收集运输过程中的环境污染问题。所以这种方法也是餐厨废弃物无害化、减量化的一种发展趋势。该技术的核心部分就是微生物菌种的选育和设备运转参数的优化。国内外研究学者已经进行了大量的菌种筛选工作,并取得了一定的成果,但是复合微生物菌剂各菌株间的协同作用机制还需要进一步研究。同时湿度、通风、温度等条件与餐厨废弃物降解过程中是否会发臭密切相关,对于该技术的推广起着决定性作用,因此这些好氧工艺条件的研究需要更加深入。此外,要深入研究餐厨废弃物中高浓度盐份对生物降解产物的影响规律。盐分含量对餐厨废弃物降解产物品有着重要的影响,特别是将这种高盐份的降解产物制成有机肥会抑制植物的生长,长期使用还会导致土壤盐碱化^[29]。最后,利用微生物技术处理餐厨废弃物的核心技术是对菌种的选择与控制,其对人体和社会的安全性不容忽视,因此必须对微生物菌剂进行安全性评估。安全性是指菌剂中的微生物应该是对人体、群体、环境无影响、无毒性,并且遗传稳定性较好。我们可以通过检测菌剂中的微生物

是否会对人畜产生的致病性、产毒性、致敏性以及利用微生物毒性试验、藻类毒性试验、致突变试验等生态毒性测试,评估其对人畜健康及生态环境安全可能产生的有害影响及潜在风险。只有通过了安全性评估,才能保证微生物菌剂的安全应用。

参考文献

- [1] Lee DH, Behera SK, Kim JW, et al. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study[J]. Waste Management, 2009, 29(2): 876-882.
- [2] 孙宏民, 南亚. 高效处理厨余废弃物微生物菌剂的研究[J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2007, 25(1): 85-87.
- [3] Fehr M, Calcado MDR, Romao DC. The basis of a policy for minimizing and recycling food waste[J]. Environmental Science and Policy, 2002, 5(3): 247-253.
- [4] 王旭明, 汪群慧, 马洪志, 等. 厨房垃圾中高效乳酸细菌的分离筛选及其发酵性能的研究[J]. 高技术通讯, 2003, 23(11): 50-53.
- [5] Zhao WJ, Sun XH, Wang QH, et al. Lactic acid recovery from fermentation broth of kitchen garbage by esterification and hydrolysis method[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(1): 21-25.
- [6] 赵文军, 孙晓红, 汪群慧, 等. 从餐厨垃圾所得乳酸丁酯经熔融固相聚合成聚乳酸的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(3): 335-342.
- [7] 陈迪明. 利用产氢残渣生产甲烷试验研究[J]. 环境工程, 2009, 27(S1): 403-405.
- [8] Song WL, Cheng J, Zhou JH, et al. Cogeneration of hydrogen and methane from protein-mixed food waste by two-phase anaerobic process[J]. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 3141-3146.
- [9] Li M, Zhao YC, Guo Q, et al. Bio-hydrogen production from food waste and sewage sludge in the presence of aged refuse excavated from refuse landfill[J]. Renewable Energy, 2008, 33(12): 2573-2579.
- [10] Kin SH, Han SK, Shin HS. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(15): 1607-1616.
- [11] Kapdan IK, Kargi F. Bio-hydrogen production from waste materials[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 38(5): 569-582.

- [12] Ke GR, Lai CM, Liu YY, et al. Inoculation of food waste with the thermo-tolerant lipolytic actinomycete *Thermoactinomyces vulgaris* A31 and maturity evaluation of the compost[J]. *Bioresource Technol*, 2010, 101(19): 7424–7431.
- [13] Yu H, Huang GH, Zhang XD, et al. Inhibitory effects of organic acids on bacteria growth during food waste composting[J]. *Compost Sci Util*, 2010, 18(1): 55–63.
- [14] Cheung HNB, Huang GH, Yu H. Microbial-growth inhibition during composting of food waste: effects of organic acids[J]. *Bioresource Technol*, 2010, 101(15): 5925–5934.
- [15] Poopathi S, Abidha S. Use of feather-based culture media for the production of mosquitocidal bacteria[J]. *Biological Control*, 2007, 43(1): 49–55.
- [16] Cayuela ML, Millner PD, Meyer SLF, et al. Potential of olive mill waste and compost as biobased pesticides against weeds, fungi, and nematodes[J]. *Sci Total Environ*, 2008, 399(1/3): 11–18.
- [17] Oh SE, Logan BE. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies[J]. *Water Res*, 2005, 39(19): 4673–4682.
- [18] Cercado-Quezada B, Deliam ML, Bergel A. Testing various food-industry wastes for electricity production in microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technol*, 2010, 101(8): 2748–2754.
- [19] Mohan SV, Mohanakrishna G, Sarma PN. Composite vegetable waste as renewable resource for bioelectricity generation through non-catalyzed open-air cathode microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technol*, 2010, 101(3): 970–976.
- [20] Khaliq A, Abbasi MK, Hussain T. Effects of integrated use of organic and inorganic nutrient sources with effective microorganisms (EM) on seed cotton yield in Pakistan[J]. *Bioresource Technol*, 2006, 97(8): 967–972.
- [21] Heo SU, Moon SY, Yoon KS. Enhanced compost maturity by effective microorganisms[J]. *Journal of Biotechnology*, 2008, 136: 22–71.
- [22] 朱晓慧, 唐宝英, 刘佳. 有机生活垃圾微生物处理剂的研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(2): 48–51.
- [23] 戚薇, 肖琳, 王建玲, 等. 高效降解泔脚垃圾微生物制剂的研制[J]. *天津科技大学学报*, 2006, 21(2): 4–7.
- [24] Tsai SH, Liu CP, Yang SS. Microbial conversion of food wastes for biofertilizer production with thermophilic lipolytic microbes[J]. *Renew Energ*, 2007, 32(6): 904–915.
- [25] Chang CH, Yang SS. Thermo-tolerant phosphate-solubilizing microbes formulti-functional biofertilizer preparation[J]. *Bioresour Technol*, 2009, 100(4): 1648–1658.
- [26] Rosales E, Couto SR, Sanromán A. New use of food waste: application to laccase production by *Trametes hisuta*[J]. *Biotechnology Letters*, 2002, 24(9): 701–704.
- [27] Wijngaard HH, Rössle C, Brunton N. A survey of Irish fruit and vegetable waste and by-products as a source of polyphenolic antioxidants[J]. *Food Chem*, 2009, 116(1): 202–207.
- [28] Ma HZ, Wang QH, Qian DY, et al. The utilization of acid-tolerant bacteria on ethanol production from kitchen garbage[J]. *Renew Energy*, 2009, 34(6): 1466–1470.
- [29] Kuo WC, Cheng KY. Use of Respirometer in Evaluation of process and toxicity of thermophilic anaerobic digestion for treating kitchen waste[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(9): 1805–1811.