

餐厨垃圾在能源生产中的应用与发展

徐 鹏, 穆献中*

(北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124)

摘要:总结了利用餐厨垃圾生产甲烷、氢气、燃料酒精、生物柴油、生物炭等的研究进展,讨论了各类技术的影响机制及面临的问题,并对今后的研究方向进行了展望。

关键词:餐厨垃圾;甲烷;氢气;燃料酒精;生物炭;生物柴油

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)05-0012-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.05.004

Application and development of kitchen waste in energy production

XU Peng, MU Xian-zhong*

(Institute of Recycling Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The technologies for producing methane, hydrogen, alcohol fuel, biodiesel and biochar from kitchen waste are summarized. The mechanism and problems of these technologies are discussed. The research directions of kitchen waste in energy production in the future are also prospected.

Key words: kitchen waste; methane; hydrogen; fuel ethanol; biochar; biodiesel

餐厨垃圾是餐饮垃圾和厨余垃圾的总称。餐饮垃圾包括饭馆、宾馆、单位食堂等的饮食剩余物以及后厨的肉食、油脂、果蔬、面点等加工过程废弃物;厨余垃圾是指家庭日常生活中丢弃的果蔬及食物下脚料、剩菜剩饭、果皮等易腐有机垃圾。根据联合国粮食及农业组织(FAO)的统计,全球每年约有13亿t餐厨垃圾在食品供应链中产生,并且随着经济和人口的不断增加,这个数字也在不断增加。以亚洲国家为例,2005年亚洲国家产生的餐厨垃圾约为2.78亿t,这个数值将会在2025年达到4.16亿t^[1]。

目前,大多数餐厨垃圾通常是与生活垃圾混合在一起进行填埋或者焚烧处理。填埋处理是一种简单高效的垃圾处理方式,但由于餐厨垃圾含水量较高,通常会因为渗滤液导致处理成本增加,产生的沼气排放,也造成了资源浪费,并会引起全球变暖。而焚烧处理虽然可以有效地减小污染物体积,但是餐厨垃圾含有的大量水分降低了混合废物的热值,同时易产生二噁英等有毒有害气体,并且造成餐厨垃圾中大量营养元素的浪费^[2]。

餐厨垃圾含有大量有机物、油脂、营养元素,具

有很大的再利用价值。以餐厨垃圾为原料,经过不同的技术可以得到不同的清洁能源,这样既减少了环境污染,又减轻了能源压力。本文中主要对现阶段利用餐厨垃圾生产甲烷、氢气、燃料酒精、生物柴油、生物炭的研究进展进行了总结,着重讨论这些技术的相关影响机制及面临的相关问题,并对今后关注的焦点进行了总结和展望。

1 餐厨垃圾的组成

餐厨垃圾的主要来源是动植物产品、粮食、动植物油及厨余垃圾等,是一类高有机质、高含水率的资源性废物。其中的主要化学成分有碳水化合物(淀粉、纤维素和半纤维素)、木质素、蛋白质、脂类等。许多学者对餐厨垃圾的成分进行了研究(表1)。

表1 餐厨垃圾各组分的质量分数

文献	%						
	含水率	总固体率	总糖	淀粉	纤维素	脂类	蛋白质
Uncu ^[3]	61.3	38.7	69.0	—	—	6.6	4.4
Cekmecelioglu ^[4]	64.4	35.6	—	—	—	8.8	4.5
Vavouraki ^[5]	81.5	18.5	55.0	24.0	16.9	14.0	16.9
Lei ^[6]	81.9	14.3	48.3	42.3	—	—	17.8

注:总糖为100g干物质折算成糖的重量。

收稿日期:2015-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(71273021);北京工业大学第13届研究生科技基金(ykj-2014-11118);15级学科建设-交叉学科-资源、环境及循环经济(033000541215003)

作者简介:徐鹏(1991-),男,硕士生;穆献中(1966-),男,博士,研究员,研究方向为新能源和可再生能源,通讯联系人,010-67396251, muxianzhong@bjut.edu.cn。

由表1可以看出,餐厨垃圾的组成成分受不同地区饮食结构、生活习惯等各种因素的影响,表现出时空差异性。但普遍表现出含水率高、有机质含量高、油脂含量高资源性特征,总糖或者碳水化合物占总固体含量的50%以上,从而使餐厨垃圾资源能源化具有可行性。

2 餐厨垃圾产甲烷

甲烷是一种理想的气体燃料,无色无味,与适量空气混合后即可燃烧,可以用于供热和发电等,是一种具有较高经济价值的清洁燃料。利用餐厨垃圾制沼气指的是利用厌氧发酵技术将餐厨垃圾进行降解,并将其中的有机质转化为沼气。厌氧发酵技术是近几年来新兴的餐厨垃圾处理方法,该技术降解效率高,且具有封闭性,不会对周围环境造成污染。另外厌氧发酵后的沼渣可以作为有机农肥的原料,不会产生二次污染,符合现代社会绿色环保的理念。

但厌氧发酵反应是一个复杂的过程^[7],其中,pH是影响系统的主要参数之一。在餐厨垃圾进行厌氧消化时,厌氧消化过程中会积累大量的挥发性脂肪酸(VFAs),导致pH迅速降低,从而抑制产甲烷菌的活性,影响系统的稳定性,因此有学者设计了双相发酵工艺,将餐厨垃圾水解、酸化过程与产甲烷过程分开,避免酸化过程对产甲烷菌的抑制。Kim等^[8]采用“序批式反应器(SBR)+上流式厌氧污泥床反应器(UASBr)”的双相工艺,将有机废弃物高效地转化为甲烷。SBR中产酸菌将有机废弃物降解成有机酸,酸化产物经过稀释进入UASBr,在产甲烷菌的作用下转化为甲烷,甲烷的产率可达296 mL/g。在UASBr中,产甲烷菌被固定在底部,产甲烷菌可将通过的酸化产物迅速降解。UASBr起到了减少产甲烷菌的流失和快速降解有机质的作用。整个发酵工艺中,约44%的有机质可以转化为甲烷。

碳氮比(C/N)也是影响厌氧发酵的一个重要参数^[9]。C/N在15~20比较有利于产甲烷菌的生长,C/N过高或者过低都会导致沼气产率下降,餐厨垃圾的随地域性和时空性会影响C/N,从而对厌氧发酵产生不可控的影响以及酸抑制。Zhang等^[10]研究了餐厨垃圾和牲畜粪便的厌氧消化过程,确定沼气产量的关键参数。实验结果表明,当牛粪和餐厨垃圾的比例为2:1时,甲烷产量提高了

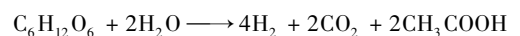
41.1%,达到388 mL/g。添加牛粪能提高沼气系统的C/N和生物降解能力,从而提高系统缓冲能力和有机负荷能力,故沼气产量得到提升。

微生物的生长和酶的活性都需要在一定温度下才能有效进行,因此温度是影响厌氧发酵效率的重要因素之一。He等^[11]研究了温度对餐厨垃圾两相厌氧消化产甲烷的影响。研究表明,水解率和温度呈正比。通过9 d的反应,温度为70℃,累积产氢量达4 860 mL,相比于35℃和55℃时累积产气量提高了129.79%和37.87%,同时,不同温度下VFAs的成分有很大不同,在55℃和70℃会生产更多的乙酸、异丁酸和丁酸,有助于沼气的形成。

餐厨垃圾生产甲烷技术日益成熟,是未来处理餐厨垃圾的主要方向,但仍然受到工艺流程长、处理能力不稳定等因素的制约,如微生物对酸碱度要求高,而餐厨垃圾中的盐分含量过高会导致过度碱化^[12],使消化过程pH偏高,抑制菌体生长,不利于持续餐厨垃圾的降解。因此如何提高工艺的稳定性是今后研究的主要方向之一。

3 餐厨垃圾制氢气

氢气在燃烧的过程中不产生CO₂,清洁无污染,被认为是最有潜力的能源。餐厨垃圾中含有丰富的碳水化合物,相比传统的电解水制氢具有工艺简单、经济成本低等特点,是制氢的理想原料。目前,关于餐厨垃圾制氢的研究主要集中在暗发酵产氢,其底物转化效率高、产氢效率高,受到广泛关注。当葡萄糖作为暗发酵的过程时,反应方程式如下:



国内外很多学者对暗发酵制氢的研究主要集中在底物预处理、接种物、反应温度、pH及有机负荷率等因素对餐厨垃圾产氢的影响。Kim等^[13]研究了温度(35~60℃)在特定接种物下对暗发酵制氢的影响,结果表明,最低和最高氢气产率分别产生在35、50℃,50℃时氢气产量达到137 mL/g。通过对底物有机酸成分的分析,VFAs的主要成分丁酸在50℃时产量更高,由此推断出产氢菌群在此温度下活性更高,确定了温度对菌群的影响。Elbeshbishy等^[14]研究了超声破碎法预处理对餐厨垃圾厌氧生物产氢的影响,得到了最佳的反应条件,经过30 min的超声破碎氢气的产量提高至141 mL/g,相比未经处理的餐厨垃圾产氢量提高了77%,氢气产生速率

提高了 127%, 微生物停滞期减少了 50%。餐厨垃圾中的碳水化合物和蛋白质通过超声进入了液相, 不但增加了氢气的最终产量, 同时加快了产氢速率。Angeriz-Campoy 等^[15]研究了混合城市固体垃圾对餐厨垃圾暗发酵产氢的影响, 城市固体垃圾的碱度有效地中和了餐厨垃圾的酸度并稳定碳氮比。在生活垃圾和餐厨垃圾比例为 8:2 时, 固体滞留时间为 1.9 d, 氢气产生量由 0.64 L/L 提高到了 2.51 L/L。Ramos 等^[16]研究了初始 pH 和 TS 对餐厨垃圾产氢的影响。间歇反应器以中温条件, pH 为 5.5、总固体含量为 90 g/L 时, 得到最大产氢率为 2.90 mol/d。同时发现, 浓度相比 pH 对餐厨垃圾对产氢的影响更为显著。

两步发酵工艺是生产氢气的一种新的方法, 相比单独使用 1 种方法有效地提高了氢气的产量。Patel 等^[17]研究了光发酵和暗发酵两步发酵工艺处理餐厨垃圾, 研究显示, 单独使用光发酵和暗发酵氢气产量为 3.5 mol/L 和 3.8 mol/L。两步发酵工艺氢气产量为 7.6 mol/L, 由于暗发酵后的发酵液含有大量的有机酸可以用于光发酵, 消除了有机酸对暗发酵制氢的抑制, 光发酵中的光合细菌利用有机酸代谢产生氢气, 同时降低了废水中的 COD 形成了一个高效的产氢体系。

4 餐厨垃圾制酒精

燃料酒精是一种可再生能源, 不仅是优秀的燃料, 同时也可以作为燃油的增氧剂, 使汽油增加内氧, 充分燃烧, 达到节能环保的目的。传统的酒精生产方式是以玉米、小麦等农作物为原材料通过发酵蒸馏制成^[18]。近几年, 随着农作物价格的不断走高以及燃料酒精需求的不断扩大, 餐厨垃圾等含有丰富淀粉、纤维素、蛋白质等元素的废弃生物质走进了人们的视野, 这些原料价格低廉、营养元素丰富, 无疑具有巨大的吸引力。

Matsakas 等^[19]研究了液化糖化步骤对餐厨垃圾产乙醇的影响, 液化糖化步骤可以有效地降低底物的黏度, 从而更好地混合发酵微生物, 结果显示, 乙醇的最终产量提高了 40.81%, 发酵速率提高了 4.46 倍, 最终乙醇产量为 107.57 g/L。

张强^[20]研究了酿酒酵母对餐厨垃圾同步糖化发酵生产燃料酒精的工艺。试验表明, 糖化酶和蛋白酶对酒精发酵影响显著, 纤维素酶影响较小, 糖化酶最适添加量为 100 U/g, 蛋白酶最适添加量为

150 U/g, 纤维素酶为 100 U/g, 自然 pH(5.3) 发酵, 最佳的发酵周期是 120 h, 最终酒精质量浓度达到 54.6 g/L。

Cekmecelioglu 等^[21]研究了不同预处理方法(酸处理、水热处理)对餐厨垃圾酶水解产乙醇的影响, 实验使用干面包酵母和酿酒酵母, 在 30℃、pH 为 4.5 条件下反应 48 h。结果显示, 水热处理 6 h 效果最好, 其次为酸处理, 相比未进行预处理的样品乙醇产量分别提高 23.3、17.2 g/L。

Hong 等^[22]研究了氮元素对餐厨垃圾同步糖化与淀粉酶复合产乙醇影响, 通过补充氮元素, 经过 48 h 的发酵, 100 g/dm³ 餐厨垃圾可以生成 36 g/dm³ 乙醇, 没有补充氮元素样品仅有 25 g/dm³ 乙醇产生, 说明适当补充营养元素可以有效地提高乙醇的产量。

5 餐厨垃圾制生物炭

近些年来, 生物炭在燃烧、土壤修复、调节色调、碳复合材料和环境修复等新功能化和高功能化领域有了广泛的应用。利用废弃生物质进行炭化的主要方法有裂解和水热技术, 两者均能降低废弃生物质中的氢氧含量, 将废弃生物质转化为含碳元素的一类难溶的、稳定的、高度芳香化的、富含碳素的生物炭^[23]。其中水热炭化技术主要针对含水率较高的原料, 同时对原料质量要求较低, 且处理设备简单、操作方便, 被视为餐厨垃圾处理的有效技术手段。

金桃等^[24]研究了不同因素对水热炭化方法处理餐厨垃圾的影响, 并对得到的水热炭化固体产物生物煤的特性参数进行测定, 得出生物煤的热值及灰分均达到 GB/T 17608—2006 精煤的一级标准。研究显示, 通过正交试验, 得到影响因素的主次顺序为温度 > pH > 反应时间, 最佳工艺条件为 180℃, pH 为 4, 反应时间为 3 h, 得到生物煤热值为 30.18 MJ/kg, 转化率为 54.08%。对餐厨垃圾及优化条件下得到的生物煤进行元素分析, 得出经过水热炭化后, 碳的质量分数从 49.00% 提高到 65.93%, 而氧元素的质量分数降低了 17.98%。同时, 水热炭化改变了餐厨垃圾的极性 & 芳香性。

Li 等^[25]展开了反应时间对餐厨垃圾水热炭化制备生物炭的影响, 在最佳工艺下水热处理 96 h, 餐厨垃圾转化达到最高, 比例达 95%, 生物炭含碳质

量分数为 78.6%,生物炭燃烧能量为 26.9 kJ/g。

Kaushik 等^[26]以糖酶、蛋白酶、脂肪酶对餐厨垃圾预处理,进行了生物炭的制备,有效地提高了生物炭的产量,在酶比例为 1:2:1 时,生物炭碳含碳质量分数达到 65.4%,热值为 26.8 MJ/kg。

6 餐厨垃圾制生物柴油

生物柴油是一种优秀的可再生清洁能源,燃烧后气体对环境污染小,是用于替代石化柴油的理想燃料。生物柴油是拥有极高含氧量和复杂有机成分的混合物,这些混合物主要是一些分子质量大的有机物,几乎包括所有种类的含氧有机物,如酯、醚、醛、酮、酚、有机酸、醇等。通过与传统柴油混合使用,有效地缓解了一些发达国家的用油紧张^[27]。

目前,废弃餐厨油脂制备生物柴油的主要制备方法有高温裂解法、超临界甲醇法、生物酶法、酯交换法,具体见表 2。

表 2 餐厨废油制备生物柴油工艺

处理方法	处理流程	优点	缺点
高温裂解法	在温度极高的气流加热下,由高能量引起油脂的化学键断裂,产生小分子有机物的方法	操作简单、无污染、对原料要求低、所得生物柴油与普通柴油接近	反应程度控制难度大、设备要求高、成本高、产物复杂
超临界甲醇法	无需催化剂,使甲醇处于超临界状态,使其和油脂进行反应的方法	产率高、反应过程简单	反应条件苛刻、成本高、操作难
生物酶法	以生物酶为催化剂,使油脂和低碳醇进行酯化反应	在常温常压即可进行反应、油脂质量要求较低	催化剂脂肪酶易中毒、寿命短、成本高
酯交换法	废弃油脂与甲醇(乙醇)等低碳醇在酸性或碱性催化剂的条件下进行反应,制得相应的脂肪酸甲酯(乙酯)	技术成熟、成本低、转化率高、催化剂种类多	工艺复杂、对原料有一定要求

酯交换法由于转化率高、效果好、成本低等优点受到了广泛的关注。目前,国内外学者主要将酯交换法研究的重点放在寻找更好、更高效的催化剂,并对相应的制备工艺进行了探索。

Feng 等^[28]研究了不同阳离子交换树脂(NKC-

9,001 × 7, D61) 作为非均相催化剂催化废弃餐厨废油制备生物柴油,结果显示, NKC-9 的催化活性最好,当催化剂用量为质量分数 2%,温度为 337 K,反应时间为 4 h,醇油摩尔比为 3:1 时的最佳工艺条件下,生物柴油产率可达 90%。

Bala 等^[29]研究了酸性离子交换树脂 Amberlite IR 120H 和 Amberjet 1200H,以它们为催化剂,在催化剂质量分数分别为 0.8% 和 1%,醇油摩尔比为 6:1,反应时间为 25 min,转化率分别为 96% 和 95%。

Ren 等^[30]使用阴离子交换树脂 D261 作为填充物,利用固定床反应器催化制备生物柴油,当温度为 323.15 K,反应时间为 56 min,醇油摩尔比为 9:1,生物柴油产率达到 95.2%。

不可否认,酯交换技术处理餐厨垃圾生产生物柴油将成为未来重要的发展方向。但目前餐厨垃圾作为生物柴油的原料还有着层层阻力,首先是废弃餐厨油脂杂质较多,成分十分复杂,需要探索出更加快捷和有效的预处理工艺去除多余成分。另外,如何提高催化剂的催化效率和重复利用次数,降低它们的制备成本也是未来值得研究的问题。

7 结论与展望

餐厨垃圾的处理已经成为了当今社会面临的主要挑战,作为一种典型的可再生资源,利用餐厨垃圾生产各种再生能源,不仅可以保护环境,更可以缓解能源危机,实现社会、经济和环境的共赢。目前餐厨垃圾能源化处理工艺各有优劣,工业应用仍面临着巨大的挑战。

(1) 餐厨垃圾回收及资源化利用难以形成体系,缺乏有效的组织和管理,回收的餐厨垃圾往往质量参差不齐,而处理工艺往往对进料有一定的要求。因此加快餐厨垃圾分类回收制度建立,减少餐厨垃圾中的杂质含量是餐厨垃圾能源化的前提和保证。

(2) 餐厨垃圾的能源化技术大多离不开微生物作用,而餐厨垃圾中的盐分和油脂会抑制微生物的生长,延长处理周期,若对餐厨垃圾进行预处理又将增加处理成本。因此应深入研究餐厨垃圾中盐分和油脂对微生物的影响,同时提出相应的解决方法。

(3) 单一的餐厨垃圾能源化技术仍面临着副产物二次污染和难以满足资源完全利用等问题。目

前,如何将多种资源化方式相结合,实现多元的处理工艺和模式也是研究的热点方向。

参考文献

- [1] Melikoglu M, Lin C S K, Webb C. Analysing global food waste problem: Pinpointing the facts and estimating the energy content [J]. *Central European Journal of Engineering*, 2013, 3(2): 157 - 164.
- [2] 吴海平, 李士森. 我国餐厨垃圾回收体系的研究现状分析[J]. *价值工程*, 2014, (28): 309 - 310.
- [3] Uncu O N, Cekmecelioglu D. Cost-effective approach to ethanol production and optimization by response surface methodology [J]. *Waste Manag*, 2011, 31(4): 636 - 643.
- [4] Cekmecelioglu D, Uncu O N. Kinetic modeling of enzymatic hydrolysis of pretreated kitchen wastes for enhancing bioethanol production [J]. *Waste Management*, 2012, 33(3): 735 - 739.
- [5] Vavouraki A I, Vassiliki V, Kornaros M E. Optimization of thermochemical pretreatment and enzymatic hydrolysis of kitchen wastes [J]. *Waste Management*, 2014, 34(1): 167 - 173.
- [6] Lei Z, Jahng D. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements [J]. *Waste Management*, 2012, 32(8): 1509 - 1515.
- [7] 裴占江, 刘杰, 王粟等. pH 值调控对餐厨垃圾厌氧消化效率的影响[J]. *中国沼气*, 2015, (1): 17 - 21.
- [8] Kim D H, Cha J, Lee M K, *et al.* Prediction of bio-methane potential and two-stage anaerobic digestion of starfish [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 141(4): 184 - 190.
- [9] 蒋滔, 李平, 任桂英. 餐厨垃圾与玉米秸秆混合中温发酵产气效果模拟[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, (1): 124 - 130.
- [10] Zhang C S, Xiao G, Peng L, *et al.* The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129(2): 170 - 176.
- [11] He M, Sun Y, Zou D. Influence of temperature on hydrolysis acidification of food waste [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 16(4): 85 - 94.
- [12] 王权, 宫常修, 蒋建国. NaCl 对餐厨垃圾厌氧发酵产 VFA 浓度及组分的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, (12): 3127 - 3132.
- [13] Kim D, Wu J, Jeng K, *et al.* Natural inducement of hydrogen from food waste by temperature control [J]. *Fuel and Senergy Abstracts*, 2011, 36(17): 10666 - 10673.
- [14] Elbeshbishy E, Hafez H, Nakhla G. Viability of ultrasonication of food waste for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(3): 2960 - 2964.
- [15] Angeriz-Campoy R, Álvarez-Gallego C J, Romero-García L I. Thermophilic anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) with food waste (FW): Enhancement of biohydrogen production [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 194: 291 - 296.
- [16] Ramos C, Buitron G, Moreno-Andrade I, *et al.* Effect of the initial total solids concentration and initial pH on the bio-hydrogen production from cafeteria food waste [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(18): 13288 - 13295.
- [17] Patel S K S, Kumar P, Kalia V C. Enhancing biological hydrogen production through complementary microbial metabolisms [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(14): 10590 - 10603.
- [18] Pietrzak W, Kawa-Rygielska J. Ethanol fermentation of waste bread using granular starch hydrolyzing enzyme: Effect of raw material pretreatment [J]. *Fuel*, 2014, 134: 250 - 256.
- [19] Matsakas L, Kekos D, Loizidou M, *et al.* Utilization of household food waste for the production of ethanol at high dry material content [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2014, 7(1): 4.
- [20] 张强. 餐厨垃圾同步糖化发酵生产燃料酒精的工艺 [J]. *化工进展*, 2015, (1): 91 - 94, 126.
- [21] Cekmecelioglu D, Uncu O N. Kinetic modeling of enzymatic hydrolysis of pretreated kitchen wastes for enhancing bioethanol production [J]. *Waste Management*, 2012, 33(3): 735 - 739.
- [22] Hong Y S, Yoon H H. Ethanol production from food residues [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011, 35(7): 3271 - 3275.
- [23] 吴倩芳, 张付申. 水热炭化废弃生物质的研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2012, (7): 70 - 75.
- [24] 金桃, 颜炯, Michael, 等. 餐厨垃圾制生物煤试验初探 [J]. *可再生能源*, 2014, (4): 505 - 511.
- [25] Li L, Diederick R, Flora J R V, *et al.* Hydrothermal carbonization of food waste and associated packaging materials for energy source generation [J]. *Waste Management*, 2013, 33(11): 2478 - 2492.
- [26] Kaushik R, Parshetti G K, Liu Z, *et al.* Enzyme-assisted hydrothermal treatment of food waste for co-production of hydrochar and bio-oil [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 168: 267 - 274.
- [27] Talebian-Kiakalaieh A, Amin N A S, Mazaheri H. A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil [J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 683 - 710.
- [28] Feng Y, He B, Cao Y, *et al.* Biodiesel production using cation-exchange resin as heterogeneous catalyst [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(5): 1518 - 1521.
- [29] Bala V S S, Thiruvengadaravi K V, Kumar P S, *et al.* Removal of free fatty acids in *Pongamia pinnata* (Karanja) oil using divinylbenzene-styrene copolymer resins for biodiesel production [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2012, 37(2): 335 - 341.
- [30] Ren Y, He B, Feng Y, *et al.* Continuous biodiesel production in a fixed bed reactor packed with anion-exchange resin as heterogeneous catalyst [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 113(4): 19 - 22. ■