

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.02.009

湿热预处理对餐厨垃圾高温干式厌氧消化的影响

王攀¹, 郭新愿², 卢擎宇¹, 任连海¹, 李冰心¹, 种宇轩¹, 黄燕冰¹

(1. 北京工商大学 食品学院, 北京 100048; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要:为探索湿热预处理对餐厨垃圾高温干式厌氧消化的影响,在含固率为20%、发酵温度55℃的条件下进行厌氧发酵试验。采用L9(3³)正交试验设计,研究湿热预处理的加水率、温度、时间对餐厨垃圾干式厌氧消化产沼气的的影响。结果表明:湿热处理后餐厨垃圾的理化性质有明显变化,日产气量、累积产气量以及TS和VS的去除率明显升高。当湿热预处理条件为加水率50%、温度120℃、时间80 min时,SCOD值最高,为101 050 mg/L,比未处理时提高了5.6倍。同样,该条件下日产气量出现的两个产气峰值最高,累积产气量也最高,为269.10 ml/gVS,与未处理相比累积产气量提高49.4%。各因素对餐厨垃圾厌氧发酵产气量影响的主次关系为:温度>时间>加水率,处理温度和处理时间对产气量有显著性影响,加水率对产气量影响较弱。

关键词:湿热预处理;餐厨垃圾;厌氧消化;正交试验

中图分类号:X799.3

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)02-064-07

Effect of hydrothermal pretreatment on thermophilic anaerobic digestion of food waste

WANG Pan¹, GUO Xinyuan², LU Qingyu¹, REN Lianhai¹, LI Bingxin¹,
CHONG Yuxuan¹, HUANG Yanbing¹

(1. School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, P. R. China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: Anaerobic fermentation tests were carried out with 20% solid content at the temperature of 55℃ to investigate the effect of hydrothermal pretreatment on thermophilic anaerobic digestion of food waste. Orthogonal test L9 (3³) was employed to determine the effects of water addition ratio, temperature and time. The results show that the physical and the chemical properties of food waste change significantly after hydrothermal treatment. The daily biogas production, the cumulative biogas production and the removal rates of TS and VS of food waste increase significantly after pretreatment. When the water addition ratio is 50%, temperature is 120℃ and pretreatment time is 80 min, we get 101 050 mg/L SCOD,

收稿日期:2015-11-23

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8144041);国家自然科学基金资助项目(51578008);“十二五”国家科技支撑计划(2014BAC27B01-03,2012BAC25B01)。

Supported by Natural Science Foundation of Beijing(8144041), National Natural Science Foundation of China(51578008), Projects in the National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period(2014BAC27B01-03,2012BAC25B01)。

作者简介:王攀(1983-),女,北京工商大学副教授,博士,主要从事固体废弃物资源化利用技术的研究,
(E-mail) wangpan024@163.com。

任连海(联系人), (Tel) 010-68984448, (E-mail) renlh@th. btbu. edu. cn。

which is 5.6 times of that of the untreated group. The peak values of daily and cumulative biogas production also reach the maximum under these pretreatment conditions. The maximum cumulative biogas production is 269.10 mL/g VS, which increases by 49.4% than that of the untreated group. The influences of the three factors on thermophilic anaerobic fermentation of food waste are temperature > time > water addition ratio. The effects of temperature and time of hydrothermal pretreatment on food waste fermentation are evident, while the effect of water addition ratio is less evident.

Keywords: hydrothermal pretreatment; food waste; anaerobic digestion; orthogonal test

随着中国国民经济的持续增长、餐饮业日益繁荣,城市餐厨垃圾的产量越来越大。餐厨垃圾呈固液混合态,主要的化学成分有淀粉、纤维素、蛋白质、脂类和无机盐等,并含有少量氮、磷、钾、钙、钠、镁、铁等微量元素,同时,由于其富含碳水化合物并且易于降解,是一种很好的厌氧发酵基质^[1-2]。但是由于其中除含有易降解物质外,也含有大量的难降解高分子有机物质,这些物质在厌氧消化过程中经历水解以及发酵的周期很长,降低了厌氧发酵的处理效率。目前国内外研究者公认厌氧发酵的液化水解阶段速度较为缓慢,是有机物厌氧消化的限速阶段^[3],因此,为缩短限速阶段反应时间,提高厌氧消化效率,各种各样预处理措施越来越受到关注。国内外在提高餐厨垃圾厌氧发酵产气率的预处理方面做了许多探索,采用的方法包括热处理、超声波、酸碱、气爆、冷冻、机械粉碎以及以上方法的联合处理等各种预处理方式,将复杂有机物转化成易生化降解的小分子有机物,显著提高了产气量和有机物的降解率以及缩短了消化时间^[4-6]。Marin等^[7]发现,通过微波处理可提高餐厨垃圾SCOD(溶解性化学需氧量),提高蛋白质、糖类等液相中的溶解性。Ma等^[8]研究了不同预处理方式对餐厨垃圾产气能力的影响,结果表明,气爆与冻融可有效提高餐厨垃圾的生物可降解性,增强餐厨垃圾厌氧发酵产气性能。湿热法是在含水环境中对餐厨垃圾进行加热,湿热预处理可以显著改变餐厨垃圾中物质组成与特性,碳水化合物与粗脂肪含量在水相中的溶解性增高,使其更易被微生物利用,有利于厌氧消化^[9-10]。

传统的厌氧消化法一般采用中温(35℃)发酵,高温(55℃)发酵因受限于热源而没有得到广泛应用,但高温发酵具有有机物降解彻底、产气迅速、沼渣中有害病菌含量低等特点^[11],近年来逐渐成为餐厨垃圾厌氧消化领域研究的热点。国外学者研究了城市有机固体废弃物在中温和高温条件下的干式厌氧发酵特性,结果表明,在高温条件下甲烷气体在发酵启动后2~3 d即可产生,中温条件下要在第10 d才有甲烷产生,而且高温条件下的甲烷产量比低温条件下提高107%^[12]。另外,课题组前期研究表明,经过湿热处理可提高餐厨垃圾中的油脂回收率^[13-14],而且该项技术已经在国内餐厨垃圾处理厂得到成功应用。因此,研究湿热预处理对餐厨垃圾厌氧发酵的影响,将对餐厨垃圾的整体资源化工工艺提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

餐厨垃圾取自北京工商大学东区食堂一层。采样时,先将桶内的餐厨垃圾搅拌均匀,再取10 kg左右的餐厨垃圾。采样后,首先通过人工分选,剔除餐厨垃圾中的少量杂质,如纸巾、塑料包装、一次性筷子、大块骨头、鱼刺等;然后用粉碎机将餐厨垃圾搅碎至浆状,颗粒粒径小于5 mm;最后将混匀的餐厨垃圾放入烧杯密封,置于冰箱4℃保存待用。接种物取自北京市某污水处理厂厌氧消化污泥。餐厨垃圾理化性质:TS(总固体)为24.31%,VS(挥发性固定)为94.08%,TN(总氮)为2.13%,SCOD为17 890 mg/L,pH为6.63。

1.2 实验装置

实验装置由500 mL广口消化瓶、500 mL集气瓶和集水瓶(量筒)组成。将消化瓶置于(55±1)℃的恒温水浴锅中,保持高温厌氧发酵的条件。消化过程产生的气体经导气管进入集气瓶,同时,集气瓶内一定体积的3%NaOH溶液被压入到集水瓶,每天读取量筒内碱液体积数。气体经过盛有3%NaOH溶液的集气瓶后,其中的CO₂、H₂S等酸性气体、NH₃和水蒸气均被吸收,排入量筒的液体体积可以视为发酵产生的氢气/甲烷体积^[15]。

主要实验仪器包括:SHY-2型水浴恒温振荡器(江苏金坛市金城国胜实验仪器厂),COD快速测定仪(联华科技),FOSS kjeltec 2100型凯氏定氮仪(上海纤检仪器有限公司),PHS-25型PH计(上海雷磁),SX2-B-

10 型箱式电阻炉(天津市中环实验电炉有限公司)。湿热处理在不锈钢密闭反应釜内进行,采用 W-O 系列恒温油浴加热装置。

1.3 实验设计

为探索餐厨垃圾高温干式厌氧发酵产气特性,在含固 20%、接种率 25%、发酵温度 55 ℃的条件下进行。考察加水率(即加水量与餐厨垃圾重量百分比)、预处理时间、预处理温度对餐厨垃圾厌氧发酵的产气规律和特性,采用 L9(3³)正交表进行三因素三水平正交实验,寻求厌氧发酵的最佳工艺组合。实验因素水平设置见表 1 所示。实验过程同时设置空白组,即未处理组。每组实验重复 3 次。

1.4 检测方法

TS 采用 105 ℃干燥法;VS 采用马弗炉 600 ℃灼烧样品 2 h 后测定;TN 采用凯氏定氮法;SCOD 采用联华科技公司 5B-1 型 COD 快速分析仪(重铬酸钾法)测定;pH 采用精密 pH 计测定;沼气体积由排水量得出。

2 结果与分析

2.1 湿热处理对餐厨垃圾理化性质的影响

湿热处理后餐厨垃圾的理化性质见表 2 所示。湿热处理后产物 SCOD 与未处理相比都有所升高。这是由于在加热过程中,部分有机物的溶解度、液化程度增大,另外,一些大分子微溶性淀粉、蛋白质、脂肪等可能水解为小分子溶解性还原糖、氨基酸、脂肪等^[16]。其中预处理条件为加水率为 50%、加热温度 120 ℃、加热时间 80 min 时,SCOD 值最高,为 101 050 mg/L,是未处理时的 5.6 倍。任连海等^[14]研究表明,湿热处理会破坏垃圾的内部组织结构,使固体大颗粒裂解,增大水分和热量传递比表面积,颗粒内部水分得到释放,加速水分扩散,大幅度提高脱出液的有机质含量。在此基础上提高温度和延长处理时间 SCOD 值均有所下降,原因可能是餐厨垃圾中的还原糖和氨基酸之间发生了 Maillard 反应生成许多大分子的类黑精等不溶于水的产物^[17-20]。研究表明^[21],适度加热有助于蛋白质水解,提高蛋白质消化率,但其不会对蛋白质的高级结构产生强烈影响。从表中可看出经湿热水解处理对餐厨垃圾中的 TN 含量有一定影响,C/N 比也有所变化。研究表明,餐厨垃圾厌氧发酵的适宜 C/N 比在 20/1~30/1^[22],所以经过湿热处理后 C/N 基本仍在较适合的范围

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

水平	(A)加水率/ %	(B)处理温度/ ℃	(C)处理时间/ min
1	50	100	60
2	30	120	80
3	10	140	100

表 2 湿热处理后餐厨垃圾理化性质

Table 2 Physicochemical properties of food waste after hydrothermal treatment

序号	实验条件			TN/%	C/N	SCOD/(mg · L ⁻¹)
	加水率	温度/℃	时间/min			
0	未处理	未处理	未处理	2.13	20.76	17 890
1	50	100	60	1.86	24.08	19 230
2	50	120	80	2.30	19.52	101 050
3	50	140	100	1.69	26.35	77 720
4	30	100	80	1.93	23.10	36 970
5	30	120	100	1.74	25.36	61 640
6	30	140	60	2.23	19.94	32 840
7	10	100	100	1.89	23.47	32 830
8	10	120	60	2.40	18.51	42 530
9	10	140	80	1.82	24.92	18 220

注:表中 TS、VS 的百分含量以湿基计,TN 的百分含量以干基计。

2.2 湿热预处理对沼气日产量影响分析

未处理和经过湿热预处理的餐厨垃圾厌氧发酵日产气量变化见图 1 所示。从图中可看出未处理组和经过湿热预处理的 9 组均在启动后的第一天出现产气高峰,但经过湿热处理的餐厨垃圾产气量明显高于未处理组。其中预处理 2 产气量最大,峰值 43.15 mL/(g · VS)。所有试验组在第 15 d 左右出现第二次产气高峰,经过湿热处理的餐厨垃圾产气量仍然明显高于未处理组,其中预处理 2 产气量仍最大,峰值达到 52.74 mL/(g · VS)。王宇卓等^[23]的研究表明,餐厨垃圾经过湿热处理后粗纤维、粗脂肪含量下降,高温加热加快了油脂的水解,游离态的油脂水解成可溶态油脂,同时适度加热有利于蛋白质的水解和吸收,提高消化率。依据任南琪等^[24]的研究,油脂的产气潜力高于其他有机质。因此,湿热预处理后餐厨垃圾的产气量都有所升高。结合王宇卓和任南琪的研究,餐厨垃圾经过湿热处理后会提高可消化性,可更好地被微生物利用,进而提高产气率。

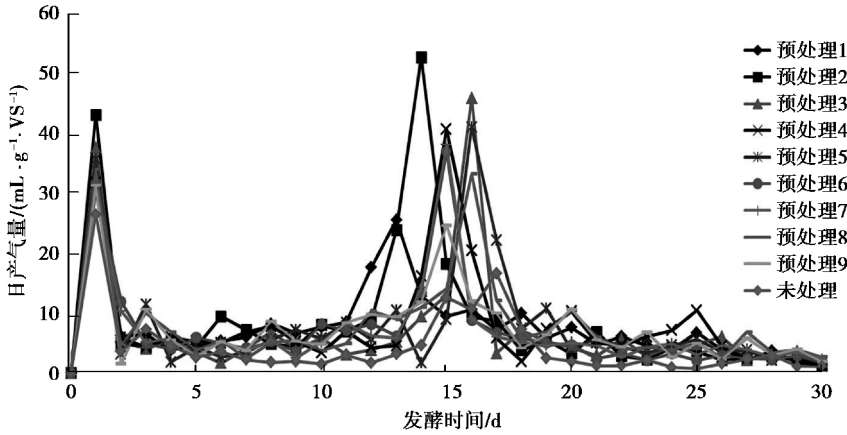


图 1 正交实验日产气量变化情况

Fig. 1 Daily biogas yields of orthogonal experiment

2.3 湿热预处理对累积沼气产量影响分析

正交实验的累积产气量见图 2 所示。由图 2 可知,未经预处理的餐厨垃圾厌氧发酵累积产气量较低,为 136.26 mL/(g · VS)。不同预处理条件下,第 2 组的累积产气量最大,产气量为 269.10 mL/(g · VS),比未处理组提高了 49.4%。经过湿热预处理的餐厨垃圾累积产气量明显高于未处理组。预处理后,有机质的水解率有所提高,而水解产物浓度升高提高了餐厨垃圾的产气潜力,这一点与餐厨垃圾湿热处理后的 SCOD 含量变化一致,SCOD 含量高时相应餐厨垃圾的产气量也较高。

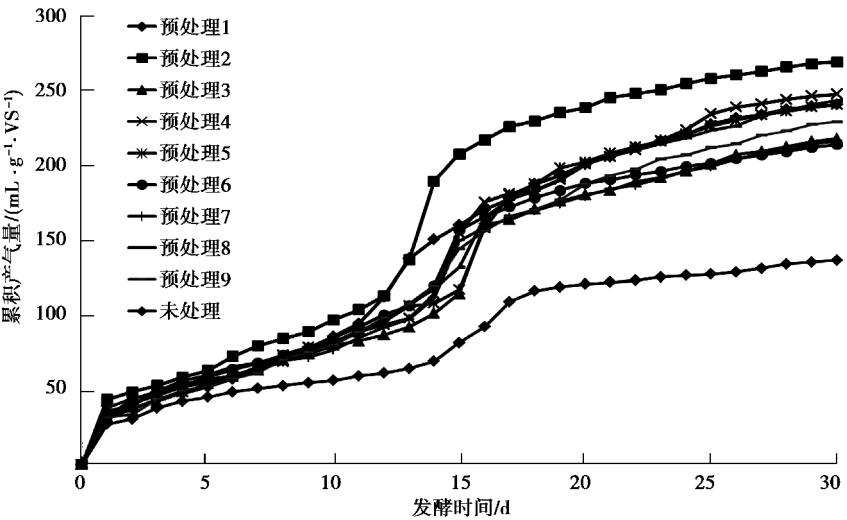


图 2 正交实验累积产气量变化情况

Fig. 2 Cumulative biogas yields of orthogonal experiment

2.4 高温干式厌氧发酵前后 TS、VS 的变化

厌氧发酵前后 TS、VS 的变化情况如图 3 所示。9 组正交实验的 TS 去除率依次为 56.48%、59.2%、57.88%、55.28%、58.56%、55.16%、52.96%、58.72% 和 57.96%，VS 去除率依次为 59.27%、61.99%、61.10%、58.29%、62.37%、58.31%、56.11%、62.14% 和 60.06%。未处理的 TS、VS 去除率分别为 45.40% 和 47.36%。可见经过湿热预处理后 TS 和 VS 去除率都有明显升高。

2.5 正交实验结果分析

采用 $L_9(3^3)$ 正交设计, 对不同湿热水解条件下处理的餐厨垃圾进行厌氧发酵试验, 见表 3 所示。表中 K_i ($i=1, 2, 3$) 为某个因素在第 i 个水平下所有产气量之和。 k_i ($i=1, 2, 3$) 表示对其水平取均值, R 为极差, R 越大说明该因素对产气量的影响越明显。

由表 3 中的 k_i 可以看出, 累积产气量与加水率成正比, 随加水率的增大而增大。当处理温度为 100~120 °C 时, 累积产气量随温度的升高而增大, 当处理温度为 120~140 °C 时, 累积产气量随温度的升高而减小, 处理时间的影响趋势与处理温度相同。因素 A 的最优水平为 1, 因素 B 的最优水平为 2, 因素 C 的最优水平为 2。湿热处理对餐厨垃圾高温干式厌氧发酵的最佳工艺条件为 $A_1B_2C_2$, 即加水率为 50%、处理温度为 120 °C、处理时间为 80 min。从极差数据分析可看出, 预处理温度的极差最大, 其次是处理时间和加水率, 根据极差大小可直观判断出各因素对累积产气量影响的主次顺序为处理温度 > 处理时间 > 加水率。

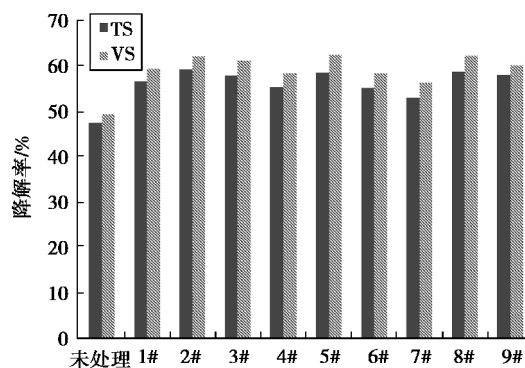


图 3 发酵前后 TS 和 VS 变化情况

Fig. 3 The removal rates of TS and VS before and after the anaerobic digestion

表 3 正交实验结果

Table 3 The results of orthogonal experiment

实验号	(A)加水率/%	(B)处理温度/°C	(C)处理时间/min	累积产气量/mL
1	50	100	60	240.26
2	50	120	80	269.10
3	50	140	100	217.82
4	30	100	80	247.26
5	30	120	100	240.23
6	30	140	60	213.86
7	10	100	100	216.41
8	10	120	60	242.94
9	10	140	80	228.97
K_1	727.18	703.93	697.06	
K_2	701.34	752.27	745.33	
K_3	688.32	660.65	674.46	
k_1	242.39	234.64	232.35	
k_2	233.78	250.76	248.44	
k_3	229.44	220.22	224.82	
R	12.95	30.54	23.62	

极差分析比较简单, 结果也比较直观, 但是极差分析精确度较差, 忽略了试验中由于外界条件的改变与误差所引起的数据波动判断因素作用时, 也缺乏一个定量的标准, 因此, 用方差分析的方法, 通过 Excel 和 SPSS 软件对数据进一步处理^[25]。方差分析结果见表 4 所示。由方差分析结果可知, 各因素对餐厨垃圾厌氧

发酵产气量影响的主次关系为:处理温度、处理时间和加水率,这与表 3 中直观分析结果一致。处理温度和处理时间的 F 值大于 $F_{0.05}(2,2)$,所以,处理温度和处理时间对产气量有显著性影响,加水率对产气量显著性较弱。

表 4 方差分析表
Table 4 The results of variance analysis

方差来源	离差平方和	自由度	均方和	F
因子 A	260.86	2	130.43	13.12
因子 B	1 400.34	2	700.17	70.41
因子 C	873.78	2	436.89	43.94
误差	19.89	2	9.95	
总和	2 554.86	8		

注: $F_{0.05}(2,2)=19.0,F_{0.10}(2,2)=9.0$ 。

3 结 论

- 1)湿热处理后产物 SCOD 与未处理相比都有所升高。其中,预处理条件为加水率 50%、加热温度 120 ℃、加热时间 80 min 时,SCOD 值最高,为 101 050 mg/L,是未处理时的 5.6 倍。
- 2)湿热预处理后,餐厨垃圾的日产气量、累积产气量以及 TS 和 VS 的去除率明显升高。其中加水率为 50%、加热温度 120 ℃、加热时间 80 min 时,日产气量出现的两个峰值最高,累积产气量也最高,为 269.10 mL/(g·VS),与未处理相比累积产气量提高 49.4%。
- 3)正交试验结果分析表明各因素对餐厨垃圾厌氧发酵产气量影响的主次关系为:处理温度>处理时间>加水率,处理温度和处理时间对产气量有显著性影响, F 值大于 $F_{0.05}(2,2)$,加水率对产气量显著性较弱。

参考文献:

[1] 王佳明,蒋建国,宫常修,等. 超声波预处理对餐厨垃圾产 VFAs 的影响[J]. 中国环境科学,2014,34(5):1207-1211.
WANG Jiaming, JIANG Jianguo, GONG Changxiu, et al. Effects of ultrasonic pre-treatment on the production of VFAs from food waste[J]. China Environmental Science,2014,34(5):1207-1211. (in Chinese)

[2] 马磊,王德汉,王梦男,等. 矿物材料预处理对餐厨垃圾高温厌氧消化过程的影响[J]. 环境科学学报,2008,28(11):2277-2283.
MA Lei, WANG Dehan, WANG Mengnan, et al. Effect of mineral pretreatment on thermophilic anaerobic digestion of food waste[J]. Acta Science Circumstantiae,2008,28(11):2277-2283. (in Chinese)

[3] Elliott A, Mahmood T. Pretreatment technologies for advancing anaerobic digestion of pulp and paper biotreatment residues[J]. Water Research,2007,41(19):4273-4286.

[4] 冯磊,李润东. 低强度超声波预处理对厨余垃圾厌氧消化的影响[J]. 环境工程学报,2012,6(9):3280-3286.
FENG Lei, LI Rundong. Efficiency of anaerobic digestion of kitchen waste by low intensity ultrasound pretreatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2012,6(9):3280-3286. (in Chinese)

[5] Liu X, Wang W, Gao X, et al. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste[J]. Waste Management,2012,32(2):249-255.

[6] Kim S, Choi K, Kim J, et al. Biological hydrogen production by anaerobic digestion of food waste and sewage sludge treated using various pretreatment technologies[J]. Biodegradation,2013,24:753-764.

[7] Marin J, Kennedy K J, Eskicioglu C. Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste[J]. Waste Management,2010,30:1772-1779.

[8] Ma J X, Duong T H, Smits M. Enhanced biomethanation of kitchen waste by different pre-treatments[J]. Bioresource Technology,2011:592-599.

[9] Hanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment[J].

- Water Science and Technology, 2001, 44(10): 129-135.
- [10] 任连海, 聂永丰, 刘建国, 等. 餐厨垃圾湿热处理的影响因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(9): 1552-1554.
REN Lianhai, NIE Yongfeng, LIU Jianguo, et al. Influence factors of restaurant waste hydrothermal treatment[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(9): 1552-1554. (in Chinese)
- [11] 马磊, 王德汉, 谢锡龙, 等. 餐厨垃圾的高温厌氧消化处理研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(8): 1509-1512.
MA Lei, WANG Dehan, XIE Xilong, et al. Study on treatment of food waste by thermophilic anaerobic digestion[J]. Chinese Journal Of Environmental Engineering, 2009, 3(8): 1509-1512. (in Chinese)
- [12] Fernández-Rodríguez J, Pérez M, Romero L I. Comparison of mesophilic and thermophilic dry anaerobic digestion of OFMSW: Kinetic analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 232: 59-64.
- [13] 宁娜, 任连海, 王攀, 等. 湿热-离心法分离餐厨废油脂[J]. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1430-1434.
NING Na, REN Lianhai, WANG Pan, et al. Hydrothermal process-centrifugation for separation of waste grease from restaurant garbage[J]. Research of Environment Sciences, 2011, 24(12): 1430-1434. (in Chinese)
- [14] 任连海, 聂永丰, 刘建国, 等. 湿热处理参数对餐厨垃圾脱水和脱油性能的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1906-1911.
REN Lianhai, NIE Yongfeng, LIU Jianguo, et al. Impact of hydrothermal process on the dewaterability and degrease performance of restaurant garbage[J]. Chinese Journal Of Environmental Science, 2006, 27(9): 1906-1911. (in Chinese)
- [15] 林云琴, 武书彬, 梁嘉晋. 预处理对造纸污泥和餐厨垃圾混合发酵的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 71-75.
LIN Yunqin, WU Shubin, LIANG Jiajin. Effect of pretreatment on mixed fermentation of paper mill sludge and food waste[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 71-75. (in Chinese)
- [16] Shanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 129-135.
- [17] Cuetos M J, Gómez X, Otero M, et al. Anaerobic digestion and co-digestion of slaughterhouse waste (SHW): influence of heat and pressure pre-treatment in biogas yield[J]. Waste Management, 2010(30): 1780-1789.
- [18] Pinnekamp J. Effect of thermal pretreatment of sewage sludge on anaerobic digestion[J]. Water Science and Technology, 1989, 21: 97-108.
- [19] Tampio E, Ervasti S, Paavola T, et al. Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste[J]. Waste Management, 2014, 34: 370-377.
- [20] Bougrier C, Delgenès J P, Carrère H. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 139: 236-244.
- [21] Efigênia M, Pova B, Moraes T. Effect of heat treatment on the nutritional quality of milk proteins[J]. International Dairy Journal, 1997, 7(8/9): 609-612.
- [22] Pang Y Z, Liu Y P, Li X J, et al. Improving biodegradability and biogas production of corn stover through sodium hydroxide solid state pretreatment[J]. Energy and Fuels, 2008, 22(4): 2761-2766.
- [23] 王宇卓, 任连海, 聂永丰. 采用正交试验优化湿热法处理厨余垃圾的工艺条件[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(10): 53-57.
WANG Yuzhuo, REN Lianhai, NIE Yongfeng. Study on optimizing operation parameters of wet heating treatment for kitchen waste with orthogonal experiments[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(10): 53-57. (in Chinese)
- [24] 任南琪, 王爱英. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
REN Nanqi, WANG Aiyang. Principle and application of anaerobic biotechnology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [25] 郝拉娣, 张娴, 刘琳. 科技论文中正交试验结果分析方法的使用[J]. 编辑学报, 2007, 19(5): 340-341.
HAO Ladi, ZHANG Xian, LIU Lin. Analysis method of results in orthogonal design in scientific papers[J]. Acta Editologica, 2007, 9(5): 340-341. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)