

# 餐厨垃圾水解酸化性能的研究

谭文英, 许勇 (东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要** 采用批式进料方式, 研究了不同进料负荷和不同接种量时餐厨垃圾水解酸化的效果, 探索了酸化阶段发酵液中的 pH、VFA 含量和产物中主要成分的变化规律。结果发现, 不同有机负荷进料时水解酸化过程在前 4 d 基本完成, 反应后期有机负荷不同, 发酵类型也有所不同。40 g(TS)/L 负荷进料时水解酸化效果比较好, 水解酸化产物中主要成分为乙醇和乙酸, 乙醇和 VFA 含量高。餐厨垃圾在接种率为 30% 时, 反应能够获得目标酸化产物乙醇和乙酸, 比不接种和接种率为 50% 时效果明显要好。

**关键词** 餐厨垃圾; 两相; 水解酸化; 性能

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)33-11832-04

## Research on Hydrolysis and Acidification Performance of Food Waste

TAN Wen-ying, XU Yong (School of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract** By means of batch type feeding, the effects of hydrolysis and acidification of food waste in different load and different inoculation amount were studied. The changing rule of pH value, volatile fatty acids (VFA) content and the main component of the products in the acidification phase was explored. Hydrolysis acidification process basically completed in the first 4 days though different organic load. In the late of response, the different organic load the fermentation type is also different. When the load of feed is 40 g(TS)/L, the hydrolytic acidification effect is better, main products are ethanol and acetic acid, and ethanol and VFA concentration is high. The reaction can get target acidification products—ethanol and acetic acid when the vaccination rate was 30%. And the effect is better than no vaccinated and the vaccination rate is 50%.

**Key words** Food waste; Two-phase; Hydrolysis and acidification; Performance

随着我国城市化进程加快和居民生活水平的提高, 餐厨垃圾的产量逐年增加<sup>[1]</sup>。餐厨垃圾已是国内城市有机垃圾的主要组成部分<sup>[2]</sup>, 已经成为环境污染的重要方面<sup>[3-4]</sup>。餐厨垃圾处理应以资源化为导向<sup>[5]</sup>。厌氧发酵技术既可以解决餐厨垃圾处理问题又可产生可再生能源——沼气, 已成为未来的发展方向<sup>[6]</sup>。

两相厌氧发酵的水解酸化阶段是微生物将复杂的有机物质如淀粉、蛋白质、脂肪等经过一系列的反应过程分解成简单的水溶性脂肪酸和醇类, 然后再在酸化菌的作用下, 将其转化为乙酸的过程, 同时微生物会利用分解的这些物质供自身繁殖并释放能量<sup>[7]</sup>。随着研究者们对有机物质厌氧发酵技术研究的不断深入, 发现由于餐厨垃圾中含有高浓度有机颗粒物, 水解酸化阶段是整个厌氧发酵过程中的限速步骤<sup>[8]</sup>。很多研究也表明, 温度和 pH 是影响餐厨垃圾水解与酸化过程的主要因素<sup>[9]</sup>。由于在餐厨垃圾的两相厌氧发酵过程中, 酸化阶段是其非常重要的限速步骤, 为了有效地对餐厨垃圾进行水解酸化, 需要对其反应过程中的各项物性参数进行研究。为此, 笔者通过对消化液 pH、VFA 含量、产物主要成分等的分析, 研究了不同温度、进料负荷、接种量等多种因素对餐厨垃圾水解酸化的影响。

## 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 餐厨垃圾受不同季节、不同地域人们的饮食习惯和生活水平的影响, 成分十分复杂。该试验的餐厨垃圾原料取自东北林业大学食堂, 早、中、晚在食堂一、二、三楼和美食城随机选择取样, 人工分拣出骨头、竹签、塑料等杂物后, 用小型食物粉碎机将其粉碎至粒径约 2~5 mm, 搅拌均匀, 取出部分作分析成分用, 剩下大部分置于 -4 °C 冰箱中

冷冻保存。接种污泥取自哈尔滨市污水处理厂。试验所用的餐厨垃圾和接种污泥的物理化学组成见表 1 和表 2。

表 1 餐厨垃圾的物化性质

项目	含量	项目	含量
含水率//%	76.37	总碳含量(干基)//%	52.68
总固体含量(TS)//%	23.63	总氮含量(干基)//%	2.45
可挥发性固体含量(VS)//%	21.97	C/N	21.50
可挥发性固体比例(VS/TS)//%	92.97	油脂//%	23.86
灰分//%	1.66	Na <sup>+</sup> 含量//%	1.25
粗蛋白//%	16.62		

由表 1 可以看出, 餐厨垃圾的总固体(TS)含量为 23.63%, 可挥发性固体(VS)含量为 21.97%, 挥发性固体与总固体的比值将近 93%, 说明餐厨垃圾中有机组分含量高, 且 C/N 值为 21.50, 在厌氧发酵所要求的 20~30 范围内, 适合厌氧发酵处理。

表 2 接种污泥的物化性质

项目	含量	项目	含量
总固体(TS)	30.6	悬浮固体(MLSS/TS)	20.2
挥发性固体(VS/TS)	50.9	挥发性悬浮固体(MLSS/TS)	14.1

**1.2 试验装置** 试验的厌氧发酵反应系统由 1 L 的发酵瓶、集气瓶、量筒通过橡胶塞、玻璃管、乳胶软管等连接组成(图 1)。系统置于电热恒温水浴锅中, 反应过程中定时摇晃发酵瓶以起到搅拌的作用。试验采用批式发酵方法, 发酵瓶的有效工作体积为 800 ml, 集气瓶中装满饱和食盐水。为了确保每个正在运行的厌氧发酵瓶中保持厌氧环境, 试验中每组参数均设多个平行, 每次只对相同参数的一个发酵瓶进行取样分析。试验时按照设计的参数配成相应的反应体系后, 用去离子水定容至 800 ml, 混匀, 塞紧瓶塞, 连接集气装置, 置于电热恒温水浴锅中, 启动厌氧发酵试验。

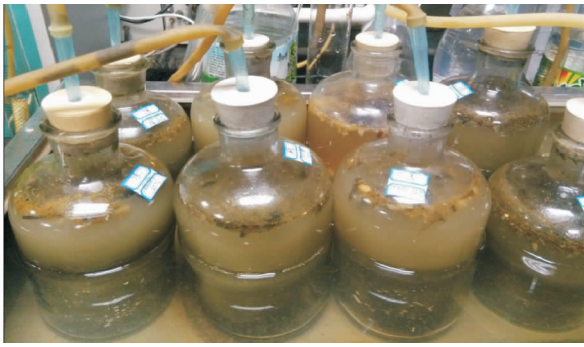


图1 试验装置实物示意

**1.3 试验方法** 进料的有机负荷(OLR)是影响餐厨垃圾水解酸化重要参数之一,进料有机负荷过高,反应过程中易出现有机酸或氨氮的抑制;进料有机负荷过低,不能充分发挥反应设备厌氧发酵的效率,增加运行成本。试验设置了 20 g(TS)/L、30 g(TS)/L、40 g(TS)/L、50 g(TS)/L 4 种不同的进料有机负荷量,来研究不同有机负荷对水解酸化效果的影响,试验参数如表 3 所示。

表3 不同有机负荷对水解酸化效果的影响参数

参数	有机负荷//g(TS)/L			
	20	30	40	50
初始 pH	7	7	7	7
有效容积//ml	800	800	800	800
试验温度//℃	35	35	35	35
接种率//%	30	30	30	30

接种率对厌氧发酵过程的启动阶段有着重要意义,不同的原料和不同的厌氧发酵阶段,应根据实际情况采用不同的接种率。接种率过高,则容易引起有机酸的积累,产生酸化现象,导致系统缓冲能力差;接种率过低,则原料的厌氧发酵处理量就低,反应时间就长,微生物的厌氧消化效率低。为了找到单位质量原料的接种量与酸化效果的关系。试验选择了接种率 0、30% 和 50% 3 种情况来进行试验,试验的运行参数如表 4 所示。其中,

$$\text{接种率}(\%) = \frac{\text{污泥干重(TS)}}{\text{污泥干重(TS)} + \text{餐厨垃圾干重(TS)}}$$

表4 不同接种率对水解酸化效果的影响参数

参数	接种率(%)		
	0	30	50
初始 pH	7	7	7
有效容积//ml	800	800	800
有机负荷//g(TS)/L	60	60	60
试验温度//℃	35	35	35

## 2 结果与分析

### 2.1 进料有机负荷的影响

**2.1.1 pH 的变化。**从不同有机负荷下 pH 的变化情况可以看出(图 2),不同有机负荷进料下,反应的 pH 在第 1 天都迅速下降到 4.5~4.6 左右。这是因为粉碎的餐厨垃圾中小的颗粒迅速水解酸化产生了大量有机酸,导致 pH 迅速降低。前几天不同有机负荷下反应瓶中酸化液的 pH 变化不大,第 4 天后开始有些波动。说明 4 个不同有机负荷组的反应在前

4 d 水解酸化基本完成,其中 20 g(TS)/L 进料的 pH 上升得比较明显,30 g(TS)/L 进料的次之,说明负荷越低,水解酸化更容易完成。此后产氨细菌和甲烷菌逐渐开始活跃,开始消耗酸化产物,导致发酵液中 pH 缓慢升高。随着水解酸化速度逐渐减慢,pH 的上升,也使得发酵环境更适宜甲烷菌生长。在反应的第 8 天 4 个不同有机负荷反应的 pH 都基本达到 5.15 左右。另外水解酸化阶段酸化产物的富集,会减弱水解酸化菌的反应效率,致使水解酸化菌对有机物的分解活动受到抑制,这也可能是导致 pH 上升的原因。

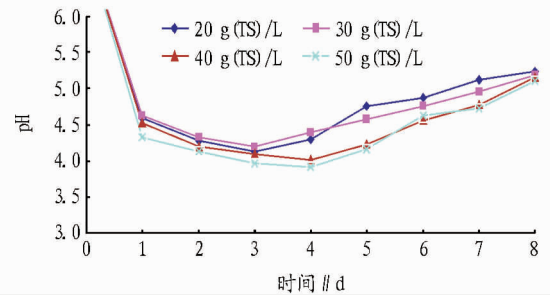


图2 不同有机负荷时 pH 的变化

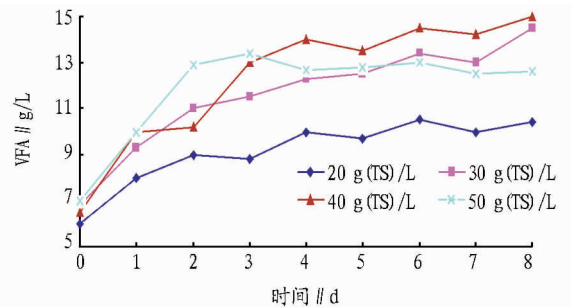


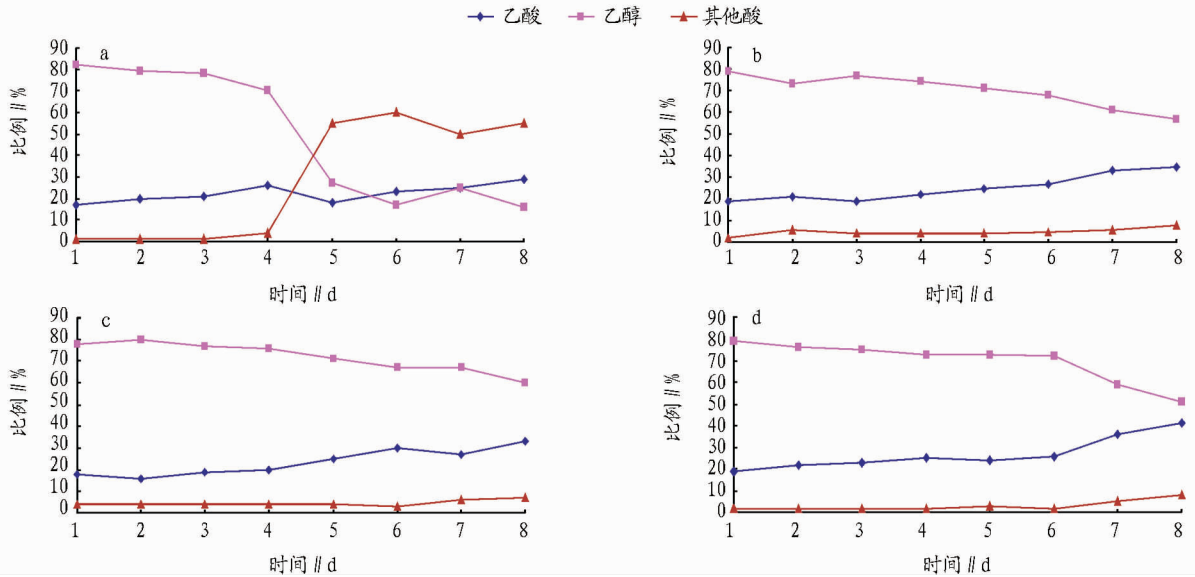
图3 不同有机负荷下的 VFA 含量的变化

**2.1.2 VFA 含量的变化。**VFA 是考察有机物质水解酸化效果的最重要的参数之一,其酸化产物中 VFA 总量大小可反映出水解的程度和有机物的酸转化率。不同有机负荷进料下酸化产物中 VFA 含量的变化情况如图 3 所示。从整个反应过程来看,4 个不同有机负荷下 VFA 总量均在反应初期急剧上升,然后趋于稳定。这也是因为反应初期,易被水解酸化菌降解的有机物含量比较多,有机物迅速地转化为 VFA,随着反应的进行,易降解有机物含量减少,VFA 的增加速度就变缓。负荷为 20 g(TS)/L 时,因进料负荷低,VFA 含量变化不明显,基本维持在 10 g/L 左右;进料负荷为 30 g(TS)/L 和 40 g(TS)/L 时,为中等负荷,VFA 含量呈波动上升趋势,最后上升至 14 g/L 左右。而进料为 50 g(TS)/L 的高负荷时前 4 d VFA 含量最高,之后 VFA 总量出现缓慢下降趋势,这很可能是有机负荷高,水解酸化产生的 VFA 含量也高,反应后期对水解酸化菌的活性产生了抑制作用。

**2.1.3 产物中主要成分的变化。**试验中不同有机负荷进料下产物中不同物质所占比例变化情况如图 4 所示。由图 4 可以看出,35℃ 的反应温度下,不同有机负荷进料时,反应初期乙醇和乙酸的含量都要比其他酸含量高。随着有机负荷的增加,乙醇在主要产物中所占比例呈下降的趋势,而乙酸

的比例呈上升趋势。说明随着负荷的增加,乙醇型发酵逐渐变缓而乙酸型发酵逐渐增强。前4 d不同进料负荷的反应在整个过程中均按规律变化且比较稳定;在反应4 d后,20 g(TS)/L负荷的体系中乙醇所占比例迅速下降,但乙酸所占比例上升得不是很明显,而其他酸的含量则迅速上升,经检测VFA中其他酸的成分主要是丁酸,说明该体系后期由乙醇型发酵转向了丁酸型发酵,这与酸化过程中酸化液的pH变化有一定的关系;50 g(TS)/L反应体系中的乙醇比例从第

6天开始快速下降,同时乙酸所占比例则相应提高,说明反应后期部分乙醇快速转化成了乙酸。因此,可以看出,35℃反应温度下,低有机负荷容易由乙醇乙酸型发酵转化成丁酸型发酵,中等有机负荷的发酵中乙醇逐渐转化为乙酸,高有机负荷条件下能加速乙醇转化为乙酸。另外,不同有机负荷下,在反应6 d后,发酵液VFA中的其他酸的含量有上升的趋势,说明酸化时间过长会导致发酵类型的变化,由于pH的升高等复杂因素而使发酵类型逐渐转向丁酸型发酵。



注:a、b、c、d的有机负荷分别为20、30、40、50 g(TS)/L。

图4 不同有机负荷下产物中主要物质所占比例的变化

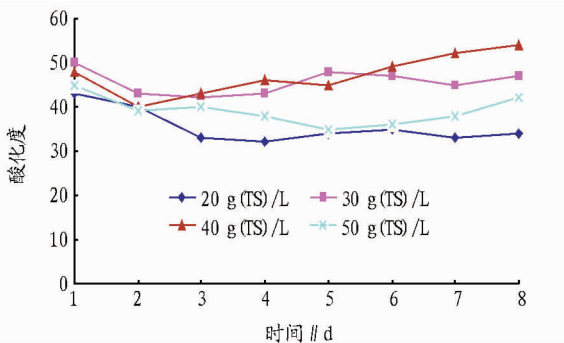


图5 不同进料负荷下溶液中酸化度变化情况

有机物厌氧发酵过程中水解酸化是一个连续过程,在相同的反应条件下,进料有机负荷量大,同一反应体积下其酸化产物VFA和乙醇等的含量肯定大,试验由于进料有机负荷不同,单单看发酵液中的VFA和乙醇的含量并不能反映出餐厨垃圾水解酸化的效果,水解酸化的性能就难以评价,可根据发酵液中主要成分的含量与酸化液中SCOD的浓度比值(定义为酸化度)的大小,作为餐厨垃圾水解酸化效果的评价指标。图5为不同进料负荷时发酵液中酸化度的变化情况。

由图5可知,在反应过程中,不同进料负荷的溶液中酸化度的变化情况不同,在反应的第1天酸化度都比较高,说明在第1天不同进料负荷的酸化程度比较高,之后开始降低,说明反应第2天水解程度大于酸化程度。随着反应的进

行,40 g(TS)/L的进料负荷其酸化度的值一直在增长,30 g(TS)/L的进料负荷也在波动增长,说明这两个进料负荷下的水解酸化效果比较好。其次是50 g(TS)/L的进料负荷,而20 g(TS)/L的进料负荷酸化效果最差。从整体发酵液中酸化度的大小上看,4种不同的进料负荷条件下的酸化效果比较稳定,保持在30%~55%之间。

## 2.2 接种量的影响

### 2.2.1 pH的变化。

图6显示了不同接种量对水解酸化过程的影响,从图6中可以看出,水解发酵初期3组酸化液的pH均迅速下降,其中不接种污泥的pH下降到了4以下,之后基本没有什么变化,在发酵后期才略微上升;在接种量接种率为50%的条件下,系统的pH比较高,维持在5.5~6.0之间,难以迅速下降,其pH不符合适宜乙醇型发酵的酸化pH条件;在接种量为30%的条件下,系统的pH稳定在4~5之间,反应后期pH逐渐上升。不接种和接种量为50%时均不适合酸化。因为不接种时,本来水解酸化菌数量就极少,而且活性又受到低pH影响,水解酸化效率就比较低;接种量为50%时,接种量大,单位质量的原料能够接触到的微生物量就多,尽管微生物的量多会提高单位质量的有机物的水解酸化产量,但同时也提高了水解后的产物被合成利用的量,虽然加强了系统的缓冲能力,但pH短时间内难以下降到目标区域,最终导致发酵类型发生变化,不利于获得目标酸化产物乙醇和乙酸。在接种率为30%的条件下的pH比较适合

合酸化,反应能够获得目标酸化产物乙醇和乙酸。

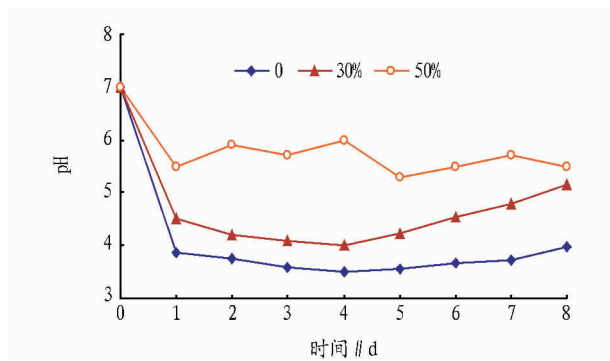


图6 不同接种量时 pH 的变化

**2.2.2 VFA 含量的变化。**图7显示了不同接种量时发酵液中VFA含量的变化情况,通过观察VFA含量发现,在不接种时,发酵液中VFA含量最低,仅为7.5 g/L,并且十分稳定;接种量为30%时VFA呈现逐步增长的趋势,但是其数值比接种量为50%时的低;接种量为50%时的VFA含量最高,并且随着反应进行,呈现逐步增长的趋势,这可能是由于pH较高时,虽然不利于酸化菌酸化反应的进行,但接种率高时因系统初始时提供的接种物量大,大量的接种物中含有大量的厌氧消化细菌,从而导致总体的代谢水平要高于接种量为30%时。尽管如此,其接种污泥的利用率也要远低于接种量为30%时。

**2.2.3 产物中主要成分的变化。**图8显示了不同接种量时发酵液中主要产物的变化情况,从每种组分在不同接种量下的变化看,不接种时和接种量为50%时,发酵液中的乙醇含量下降地十分明显,而接种量为30%时的乙醇含量下降则比

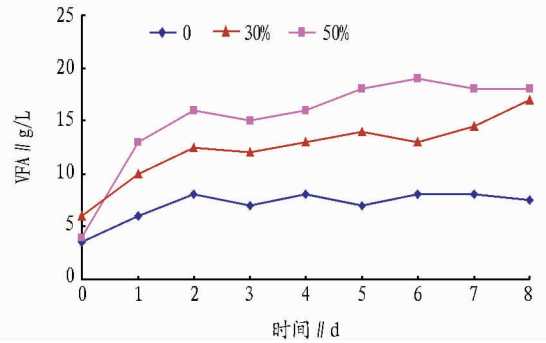
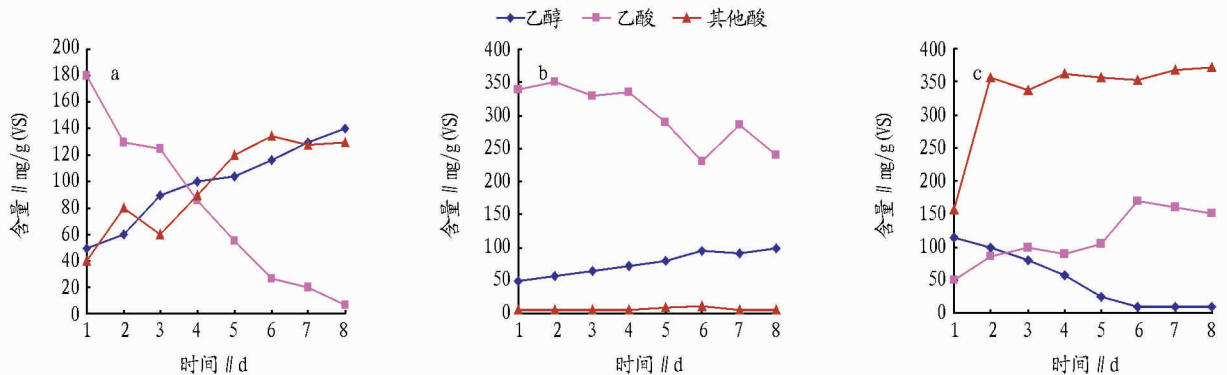


图7 不同接种量时 VFA 含量的变化

较平缓,且整体含量远高于不接种时和接种量为50%时;3种条件下,乙酸的含量均逐渐上升;不接种时,丁酸等其他酸含量逐渐上升。接种量为50%时,丁酸等其他酸含量明显最大,且一直保持在非常高的水平,而接种量为30%时丁酸等其他酸的含量非常低。从易被甲烷菌消化利用的乙醇、乙酸总含量上看,接种量为30%时的乙醇和乙酸总含量优势十分显著;从乙醇和乙酸占酸化产物的比例看,接种量为50%时乙醇和乙酸占产物的总量最低,仅为产物总量的30%,占比例最大的其他酸主要为丁酸,这也进一步证明了,当pH较高时,厌氧发酵容易进入丁酸型发酵。

从组分转化来看,3种反应后期乙醇含量均有所减少。不接种时,乙醇含量降低,而乙酸和其他酸含量升高,说明乙醇转化成了乙酸和丁酸等其他酸;当接种量为50%时和接种量为30%时,其他酸含量变化不明显,乙醇含量降低而乙酸含量升高,说明乙醇转化成了乙酸。



注:a、b、c的接种量分别为0、30%、50%。

图8 不同接种量时 VFA 组分的变化

### 3 结论

(1)不同有机负荷水解酸化阶段反应初期pH迅速降低,乙醇和乙酸的含量都要比其他酸含量高。此后pH缓慢上升,随着时间增加,产物中各物质之间开始转换。35℃反应温度下,低有机负荷容易由乙醇乙酸型发酵转化成丁酸型发酵,中等有机负荷的发酵中乙醇逐渐转化为乙酸,高有机负荷条件下能加速乙醇转化为乙酸。酸化时间过长会导致发酵类型的变化。

(2)不接种污泥的发酵液pH在4以下,发酵液中VFA含量最低;在接种量为30%时,系统的pH在4~5之间变化,

乙醇含量降低,而VFA含量增加。在接种量为50%时,系统的平均pH在6以上,比较高,VFA含量也最高,其中丁酸等其他酸为主要成分。在接种量为30%的条件下的pH比较适合酸化,反应能够获得目标酸化产物乙醇和乙酸。

### 参考文献

- [1] 李笑寒,陈子惟,刘咏妍,等.基于情景分析的城市餐厨垃圾处理方案研究[J].中国环境管理,2013,5(2):17-20.
- [2] 吴阳春.餐厨垃圾废水中厌氧消化试验研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [3] 王星,王德汉,张玉帅.国内外餐厨垃圾的生物处理及资源化技术进展[J].环境卫生工程,2005(2):27-28.

(下转第11838页)

50 mg/L 以下,第一周期至第六周期水力停留 3 d 去除率分别为:37.10%、72.83%、56.82%、57.30%、62.00%、53.81%,最高去除率为 72.83%。而第一周期的去除率较低,为 37.10%,可能由于学校周末学生用水量增加,相关的有机污染物含量也同时增加,从而导致第一周期的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  进水浓度升高,增加了自身间种式植物人工湿地的去除污染物的负荷,导致去除效果不理想。而第二周期至第六周期去除率稳定到 50% 以上,主要是因为经过第一周期高负荷的工作后驯化了间种式人工湿地的去污能力,使间种式植物人工湿地的去污能力得到了提高。

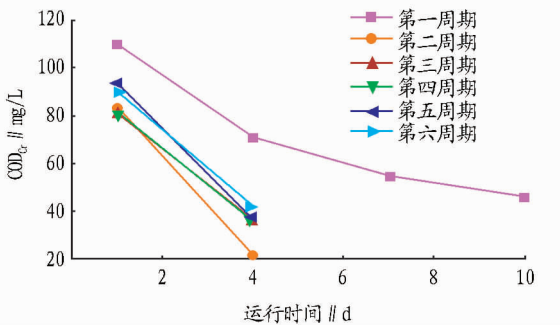


图4 组合植物对不同浓度  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除效果

**2.5 模拟人工湿地装置中水体总磷 (TP) 的变化** 生活污水中的无机磷在植物的吸收以及同化作用下变成植物的 ATP、DNA 和 RNA 等有机成分,即在第一周期到第二周期间种植物人工湿地对 TP 的去除效果经过水力停留 3 d 后去除率上升,这可能是由于植物地上部分对磷的吸收达饱和状态<sup>[15]</sup>。由图 5 可知,6 个周期试验中,对总磷的去除效果总的来说较好,在 3~6 d 试验期间能控制在 0.1 mg/L 及以下,水力停留 3 d 去除率分别为:67.21%、67.90%、91.81%、-28.48%、70.07%、48.30%,最高能达到 91.81%。TP 在第四周期出现去除效果明显异常和氨氮在第四周期去除效果出现异常相一致,同样也是由于植物枯枝败叶溶解于水体中,磷溶解进入水体速率大于植物对磷的吸收,而导致水体中磷含量的上升。这也说明清理间种式植物人工湿地的枯枝败叶有利于提高人工湿地去除氮磷能力。

### 3 结论

(1) 该间种式植物组合处理生活污水效果好,处理后水质透明度变好,水质清澈,水体的酸碱性趋于中性 (pH 为 7.31~7.94)。

(2) 水质指标逐渐下降,组合植物对污染物的去除效果

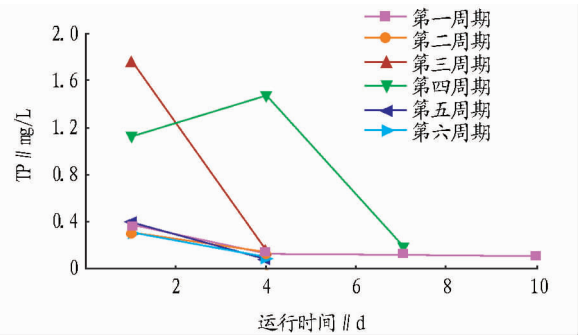


图5 组合植物对不同浓度 TP 的去除效果

大小依次为  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP,对 TP 的去除效果较低。水力停留 3 d  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP 去除率分别为:50.25%~99.40%、37.10%~72.83%、-28.48%~91.81%;最高去除率分别为 99.40%、72.83%、91.81%。

(3) 6 个周期试验中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度均达到国家地表水Ⅲ级排放标准。

### 参考文献

- [1] 代明利,欧阳威,培斌,等. 垂直流人工湿地处理官厅水库入库水研究[J]. 中国给水排水,2003,19(3):4-7.
- [2] 李建娜,胡日利,吴晓英,等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮、磷吸收富集能研究[J]. 环境污染与防治,2007,29(7):506-509.
- [3] 张洪洋,于水利,修春海,等. 水平潜流人工湿地系统处理微污染原水的研究[J]. 环境工程学报,2008,2(11):1447-1450.
- [4] 韩潇源,宋志文,李培英. 高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合[J]. 湖泊科学,2008,20(6):741-747.
- [5] 李莎莎,田昆,刘云根,等. 不同空间配置的湿地植物群落对生活污水的净化作用研究[J]. 生态环境学报,2010,19(8):1951-1955.
- [6] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志,2002,21(4):51-59.
- [7] 李云鹏,李怡庭,刘景哲,等. 松嫩平原湖泊湿地水化学特征及净化水质作用研究[J]. 东北水利水电,2001,12(19):39-43.
- [8] 梁威,吴振斌,詹发萃,等. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化[J]. 湖泊科学,2004,16(4):312-317.
- [9] 白峰青,郑丙辉,田自强. 水生植物在水污染控制中的生态效应[J]. 环境科学与技术,2004,27(4):99-100.
- [10] 金相灿,颜昌宙,许秋瑾. 太湖北岸湖滨带观测场水生植物群落特征及其影响因素分析[J]. 湖泊科学,2007,19(2):151-157.
- [11] 郭和蓉,卢小良. 水生植物净化水环境与水生植被的修复[J]. 长江大学学报:自然科学版,2005,2(5):65-68.
- [12] 宁静,鲁敏,裴翡翠,等. 人工湿地植物受污水胁迫存在的问题与解决对策[J]. 山东建筑大学学报,2011,26(2):149-152.
- [13] 张军,周琪,何蓉. 表面流人工湿地中氮磷的去除机理[J]. 生态环境,2004,13(1):98-101.
- [14] KASEVEA E. Performance of a surface flow constructed wetland in polishing pretreated wastewater-a tropical case study[J]. Water Science and Technology,1997,35(5):19-25.
- [15] 张俊萍. 藜舌(Ligularia)对畜禽废水净化能力和耐污能力研究[D]. 雅安:四川农业大学,2011.
- [7] 刘荣厚. 生物质能工程[M]. 北京:化学工业出版社,2009:22-24.
- [8] HENZE M, MLADENOVSKI C. Hydrolysis of particular substrate by activated sludge under aerobic, anoxic and anaerobic conditions[J]. Water Res,1991,25:61-64.
- [9] VEEKEN A, HAMELERS B. Effect of substrate seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of bio-waste[J]. Water Sci Technol,2000,41:255-262.

(上接第 11835 页)

- [4] 戚建强,孙红军,李红. 餐厨垃圾处理技术进展探讨[J]. 绿色科技,2012(1):127-129.
- [5] 严武英,顾卫兵,邱建兴,等. 餐厨垃圾的饲料化处理及其效益分析[J]. 粮食与饲料工业,2012(9):39-42.
- [6] 任维琰,李勇,顾广发. 餐厨垃圾厌氧发酵产甲烷综述[J]. 安徽农业科学,2012,40(6):3525-3528.