

氯化钠对餐厨垃圾厌氧发酵产沼气影响

陶冶平, 赵明星, 阮文权*

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 通过在餐厨垃圾发酵过程中添加不同质量浓度的氯化钠, 分析厌氧消化过程中产气量、中间代谢产物、酶活等指标, 考察氯化钠对厌氧消化产沼气的影响。结果表明, 添加低质量浓度氯化钠对产沼气量影响不大, 而添加高质量浓度氯化钠则对产气有较大的抑制作用, 添加 2 g/L 氯化钠对餐厨垃圾厌氧发酵产沼气没有影响, 添加 5 g/L 氯化钠产气量比对照提高 7.5%, 添加 10、20、30 g/L 产气量分别比对照减少 17%、24%、51%。对不同氯化钠质量浓度下产气的情况进行了动力学拟合, 结果表明: 添加 5 g/L 氯化钠时, 产甲烷过程与 Cheynoweth 方程的相关系数 R^2 为 0.991, 甲烷产量 B_0 为 399 mL/g, 反应速率常数 k 为 0.114 d^{-1} 。高浓度氯化钠影响厌氧代谢过程使得丙酸和总有机酸累积。添加 20、30 g/L 氯化钠下脱氢酶活性受到严重抑制, 添加氯化钠浓度 10、20、30 g/L 氢酶失活 15%、55%、60%。

关键词: 氯化钠; 餐厨垃圾; 厌氧发酵; 沼气; 脱氢酶

中图分类号: TQ 920.1 文献标志码: A 文章编号: 1673—1689(2013)06—0596—07

Effect of Sodium Chloride on Biogas Generation of Kitchen Waste by Anaerobic Fermentation

TAO Zhi-ping, ZHAO Ming-xing, RUAN Wen-quan*

(School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The effect of NaCl on the fermentation process of kitchen wastes was indicated by adding different concentration of NaCl, gas production yield, intermediate metabolite, enzyme activity were analyzed during the biogas process. The results show that adding low concentration of NaCl had little influence on gas production, but adding high concentration of NaCl had obviously inhibition on the anaerobic fermentation. Biogas production of kitchen waste by anaerobic fermentation remained unchanged in adding concentration of 2 g/L NaCl, while it promoted 7.5% gas production by adding 5 g/L NaCl. Gas production was reduced by 17%, 24%, 51% by the adding NaCl concentration was 10, 20, 30 g/L, which compared to the control. The data of fitting parameters by adding NaCl concentration 5 g/L indicated that the correlation coefficient R^2 of the methanogenic process with Cheynoweth equation was 0.991, the methane production B_0 was 399 mL/g VS and the reaction rate of constant k was 0.114 d^{-1} . High NaCl concentration lead to the accumulation of total acid and

收稿日期: 2012-10-11

基金项目: 国家科技支撑项目(2012BAC18B01-2); 国家自然科学基金项目(21276114); 国家自然科学基金项目(21207050); 江苏省科技支撑项目(BE2012615); 无锡市科技支撑项目(CSE01002)。

* 通信作者: 阮文权(1966—), 男, 上海人, 工学博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事资源与环境方面的研究。E-mail: wqruan@jiangnan.edu.cn

propionic acid concentration. The experiment found that adding concentration of 20、30 g/L NaCl was severely restrained dehydrogenase enzyme activity. When adding NaCl concentration was 10、20、30 g/L, dehydrogenase activity lose 15%、55%、60%, respectively.

Keywords: sodium chloride, kitchen waste, anaerobic fermentation, methane, dehydrogenase enzyme

无机盐在微生物的生长过程中起着促进酶反应、维持膜平衡和调节渗透压的重要作用。但盐浓度过高会对微生物的生长产生抑制作用。主要原因在于^[1]:盐浓度过高时高渗透压会使微生物细胞脱水引起细胞原生质分离,高盐情况下因盐析作用使脱氢酶活性降低。有研究认为,盐对微生物的作用主要是Na⁺毒性,反应体系中Cl⁻含量基本保持不变^[2]。Na⁺胁迫对细胞的毒害作用通常被认为是由于Na⁺会争夺Mg²⁺的蛋白质结合电位而导致相应的蛋白质失活,同时由于细胞具有吸Na⁺排K⁺的性能,可能进一步加剧这种毒害作用^[3]。同时还有研究认为,Na⁺有助于合成三磷酸腺苷或者促进NADH的氧化,有利于微生物的代谢^[4]。盐对废水处理系统的影响根据废水的性质和工艺情况的不同而有所差异。有研究者用CASS法处理含盐废水发现,Cl⁻超过8100 mg/L时,COD去除率仍保持在80%以上,Cl⁻质量浓度在6300 mg/L的系统可以稳定运行^[5]。

相对于填埋、焚烧、堆肥和饲料化等处理方式,采用厌氧消化技术处置餐厨垃圾不仅处理成本较低,环境友好,而且可以实现餐厨垃圾的资源化,产生清洁能源沼气^[6]。厌氧发酵的应用很广泛,因此影响因素也很多^[7]。餐厨垃圾来自于人们的日常生活,其中盐含量会随着各地生活习惯的不同而有所差异。餐厨垃圾中盐含量对厌氧发酵产沼气效率有较

大影响,王敦^[8]研究单级厌氧消化处置餐厨垃圾时,发现pH为8时Na⁺毒性最高。彭绪亚^[9]研究高盐餐厨垃圾湿式单级厌氧消化时,发现对于Na⁺毒性而言,底物为混合酸时50% IC质量浓度为4000 mg/L,而单独以乙酸为底物时IC质量浓度可达10000 mg/L。Kim^[10]研究盐对厌氧产氢的影响时,发现高盐分可以改变微生物代谢途径,促进乳酸产生而抑制丁酸产生。

目前研究盐分对餐厨垃圾厌氧消化的影响,主要集中在确定厌氧发酵适宜的盐浓度及盐分对产气量的影响,但对产气变化的具体原因分析较少。作者通过对餐厨垃圾发酵过程有机酸含量和酶活变化研究,从代谢过程及酶学角度分析氯化钠对餐厨厌氧发酵产气变化的影响,以确定氯化钠对餐厨垃圾厌氧发酵影响的机理。分析了不同氯化钠浓度下餐厨垃圾厌氧发酵过程,探讨氯化钠浓度对产沼气、酶活、代谢产物等的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

餐厨垃圾:取自苏州市江苏洁净环境科技有限公司;厌氧产甲烷菌种:取自该公司厌氧发酵罐。餐厨垃圾和产甲烷菌种的主要性质见表1。

表1 餐厨垃圾和产甲烷菌种主要性质

Tab. 1 Characterization of the kitchen wastes and methane-producing bacteria

材料	TS/%	VS/%	碳水化合物(VS)/%	蛋白质(VS)/%	脂肪(VS)/%	盐分/%
餐厨垃圾	26.53	25.19	48.17	25.12	12	1.0
产甲烷菌种	5.80	3.35	-	-	-	-

1.2 实验方法

采用序批式发酵法,在600 mL血清瓶中加入餐厨垃圾和产甲烷菌种(TS比1:1),分别向各组分中添加NaCl质量浓度为2、5、10、20、30 g/L,以不添加的为对照。血清瓶中充10 min氮气维持厌氧状态

后进行厌氧发酵。

实验装置采用产甲烷潜力自动分析仪见图1,血清瓶至于35℃的分析仪中进行发酵,气体体积由计量软件统计。



图1 产甲烷潜力自动分析仪

Fig. 1 Automatic methane potential test system

1.3 分析方法

SCOD:重铬酸钾法^[11];TS、VS:质量法^[12];碳水化合物:苯酚-硫酸法^[13];蛋白质:凯氏定氮法^[14];脂肪:索氏提取法^[15]。

1.3.1 盐分测定 Metrohm 883 全自动离子色谱仪测定 Cl⁻浓度^[16]。色谱柱: Metrohm A Supp 5-150 阴离子交换柱 (250 mm×4 mm), Metrosep A Supp 4/5 保护柱;淋洗液: 3.2 mmol/L Na₂CO₃ 加入 1.0 mmol/L NaHCO₃; 流速: 0.7 mL/min; 再生液: 100 mmol/L H₂SO₄; 进样体积: 20 μL。

1.3.2 有机酸测定 液相色谱仪 (Agilent1100, 美国), 柱子为 ZORBAX SB-Aq 柱, 柱长 150 mm×4.66 mm, 5 μm; 流动相: 10% 乙腈、乙腈、0.26 mol/L NaH₂PO₄, 调 pH 至 4; 流速: 1 mL/min; 进样量: 20 μL; 柱温: 30 °C; 检测器: 紫外检测器 (210 nm)。

1.3.3 脱氢酶活性测定 采用 2-3-5-triphenyltetrazolium chloride (TTC) 为底物经脱氢酶催化还原反应后生成红色产物 TTCH₂-trifenyformazane (TF), TF 颜色的深浅反映脱氢酶活性的高低^[17]。

1.3.4 模型分析 利用 Cheynoweth 等人^[18]提出的生物质厌氧消化过程产沼气动力学方程 $B=B_0(1-e^{-kt})$ 进行数据分析。其中: B 为沼气产量; B_0 为沼气最终产量; k 为反应速率常数。模型采用 origin 进行数据拟合。

2 结果与讨论

2.1 氯化钠添加量对产沼气量的影响

添加不同氯化钠的各反应组产气情况见图 2。由图 2 可知, 产沼气过程主要发生在第 4~17 天, 从第 17 天后沼气量变化不大。各组产气速率都呈先增加后稳定的趋势。通过与对照组比较发现, 当加入 2 g/L 氯化钠时对产气量影响不大, 最终产气量

为 330 mL/g(VS), 与对照组差别不大; 当添加氯化钠浓度为 5 g/L 时, 反应组沼气产量最大, 为 355 mL/g(VS), 比对照组提高 7.5%。但添加氯化钠质量浓度再提高时, 产气量反而呈现下降趋势。当添加氯化钠质量浓度大于 10 g/L 时, 对产气影响较大, 添加 10、20、30 g/L 时气体产量为 293、263、167 mL/g(VS), 比对照组分别减少了 17%、24%、51%。

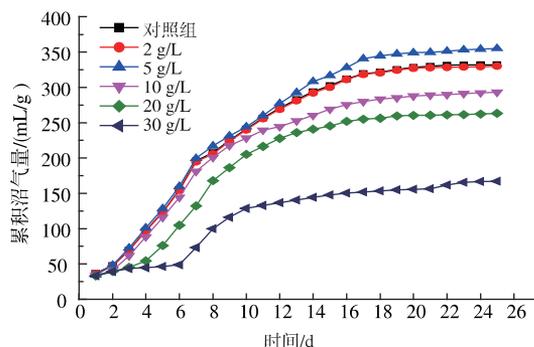


图2 添加不同质量浓度氯化钠餐厨垃圾产沼气情况

Fig. 2 Biogas production from food waste under adding different concentration of sodium chloride

Rinzema^[19]认为, 当 Na⁺低于 5 g/L 时对厌氧发酵影响较小, 当 Na⁺为 5 g/L 时抑制 10% 产甲烷活性, 当 Na⁺为 10 g/L 时抑制 50% 产甲烷活性。本研究结果也表明: 低质量浓度的氯化钠对餐厨垃圾厌氧发酵影响较小, 而高质量浓度氯化钠抑制沼气的产量。作者同时研究了高氯化钠质量浓度下餐厨垃圾厌氧发酵产沼气的情况, 为高盐情况下餐厨垃圾厌氧发酵提供了一定的理论基础。氯化钠对餐厨垃圾厌氧发酵产沼气具有“低促高抑”效应, 一定的氯化钠质量浓度可以促进微生物的活性, 然而高质量浓度的氯化钠对微生物带来明显抑制效应。

一些研究者报道了有关生物质产沼气的动力学研究^[20], 认为在厌氧消化过程中, 生物质产沼气过程遵循一级反应。将产气数据进行 Cheynoweth 方程拟合, 得到动力学方程各参数, 见表 2, 各个反应体系的数据与拟合模型的相关系数 (R^2) 都大于 0.96。由此可见, 模型与试验的相关性比较高, 能够很好地反映厌氧发酵过程中甲烷的产生过程。由表 2 可以看出, 随着氯化钠质量浓度的增加, 每克 VS 餐厨垃圾的产沼气潜力 B_0 先上升后下降, B_0 值在 5 g/L 氯化钠时达到最大值 399, 在 30 g/L 氯化钠时仅为 192 mL, 而反应速率常数 k 值范围为 0.090~0.133 d⁻¹。不同氯化钠质量浓度下, B_0 先上升后下降, 从另

一方面说明了氯化钠质量浓度对餐厨垃圾产沼气有较大的影响,呈现“低促高抑”的现象。

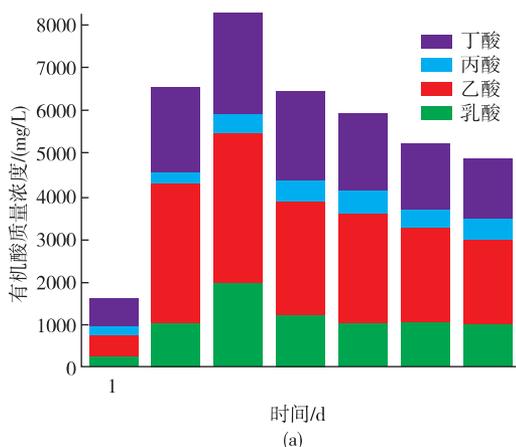
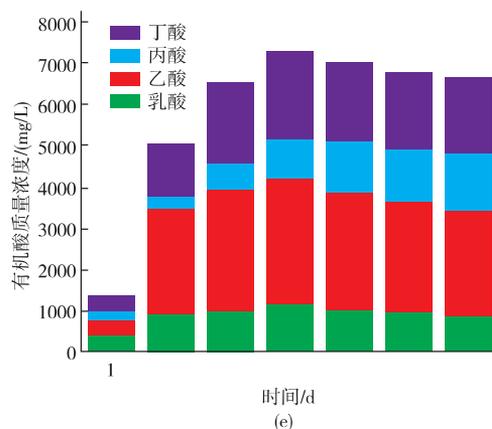
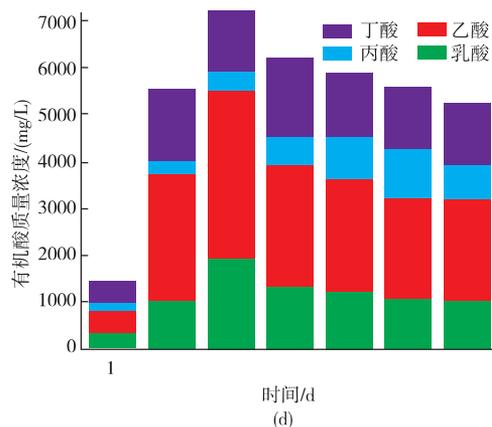
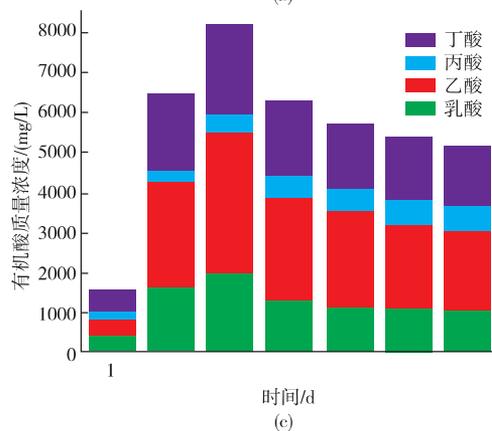
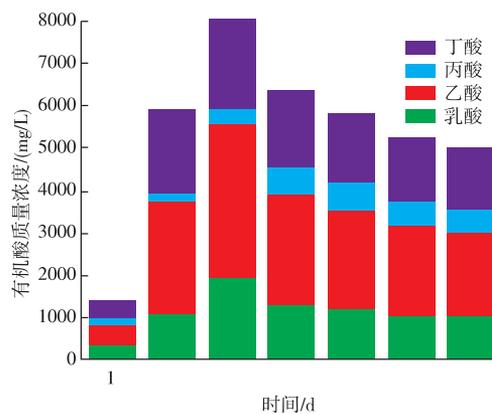
表 2 餐厨垃圾厌氧发酵一级反应速率常数 (Cheynoweth 方程)

Tab. 2 Reaction rate constant of food waste anaerobic fermentation (Cheynoweth Equation)

质量浓度	$B=B_0(1-e^{-kt})$			
	B	B_0	K	R^2
对照	332	367	0.114	0.989
2 g/L	329	365	0.105	0.988
5 g/L	355	399	0.114	0.991
10 g/L	293	312	0.133	0.986
20 g/L	263	295	0.115	0.970
30 g/L	167	192	0.090	0.969

2.2 餐厨垃圾厌氧发酵过程中代谢产物变化

图 3 为添加不同氯化钠质量浓度下餐厨垃圾代谢产物的变化情况。由图 3 可知,各个反应组中的代谢产物质量浓度随反应时间都呈现先上升后下降的趋势。低氯化钠质量浓度组(添加氯化钠质量浓度 10 g/L 及以下)有机酸质量浓度在反应的第 9 天达到最大,而高氯化钠质量浓度组(添加氯化钠 20、30 g/L),有机酸总量在第 13 天才到达最大。低氯化钠质量浓度组在第 9 天总有机酸质量浓度达到最大,为 8 264、8 319、8 273、7 864 mg/L,而高氯化钠质量浓度组(20、30 g/L)有机酸量只有 7 143、7 107 mg/L,比对照组分别减少了 14%和 16%。反应最终各组总有机酸质量浓度分别为 4 851、5 007、5 129、5 264、6 584、6 896 mg/L,低氯化钠各组有机酸分别比最大值降低了 41.3%、39.8%、38%、33.1%,而高氯化钠组有机酸仅降低了 8.6%和 3.8%。



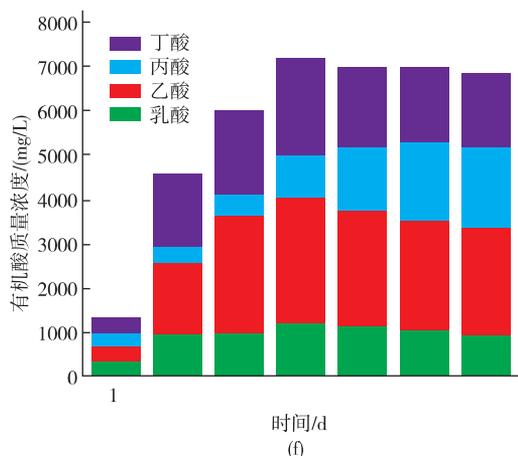


图3 添加不同质量浓度氯化钠时反应各组代谢产物的变化
Fig. 3 Metabolites changes in anaerobic process under adding different concentration of sodium chloride

到反应最后,各体系中有机酸质量浓度也有所不同。低氯化钠质量浓度组4种有机酸质量浓度为:乙酸>丁酸>乳酸>丙酸,而高氯化钠质量浓度组有机酸质量浓度为:乙酸>丁酸>丙酸>乳酸。高氯化钠体系中丙酸代谢被促进,乳酸代谢受影响。在4种有机酸中,乳酸和丙酸质量浓度相对较少,但在氯化钠质量浓度为20、30 g/L两组时,丙酸呈现累积的趋势,最终体系中丙酸占总有机酸含量达到25%。

相对于低氯化钠质量浓度各组有机酸代谢,高氯化钠质量浓度组有机酸质量浓度达到最大值所需的时间滞后,且反应后期体系中有机酸出现了酸累积现象。高质量浓度的氯化钠可能抑制水解微生物的水解功能,使得在高氯化钠组有机酸质量浓度达到最大的时间较低氯化钠组延迟;高质量浓度的氯化钠可能同时对产甲烷菌有抑制,降低其转化酸的能力,发生酸累积效应;高质量浓度氯化钠有利于丙酸的生成。Kim等^[9]研究认为,突然的盐度变化会改变微生物的代谢作用,使发酵液中乳酸含量增加,丁酸含量减少。Barredo等^[21]指出当丙酸质量浓度为1 100~2 220 mg/L时,产甲烷菌的数量随丙酸浓度的上升而呈二级指数下降。他虽然发现了这种现象但并未对其进行解释。作者试图从酶学和代谢影响的角度进行分析,考察氯化钠对餐厨垃圾厌氧发酵产沼气量时,发现产气量变少的原因,可能是产生了丙酸的积累,而丙酸积累对产甲烷菌活性产生了抑制。

2.3 餐厨垃圾厌氧发酵过程中 COD 变化

在实验中 SCOD 呈现先上升后下降的趋势,见图4。由图4可知,当添加氯化钠质量浓度为2、5、10 g/L时,SCOD在第9天达到最大值,为31 963、31 448、31 632 mg/L,与对照组的31 346 mg/L相差不大,而添加氯化钠质量浓度为20、30 g/L时,SCOD在第13天达到最大值,为29 009、25 580 mg/L。反应体系最终的SCOD随添加氯化钠质量浓度的升高而不断升高。分析图3和图4可知,SCOD的变化趋势与有机酸变化趋势较一致,表明随着有机物的不断水解酸化,SCOD不断升高。高氯化钠质量浓度各组由于水解微生物受到抑制,微生物适应高盐质量浓度需要一定时间,因此到水解酸化作用时间较低氯化钠组长,SCOD达到最大值的时间较晚。

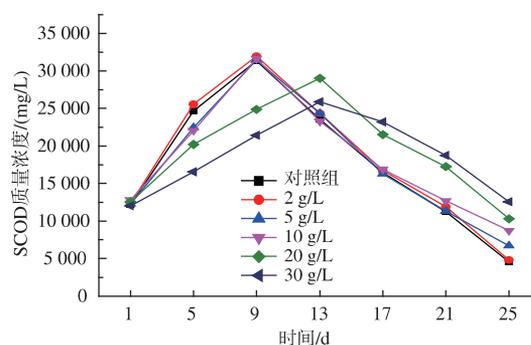


图4 添加不同氯化钠浓度各组 SCOD 变化情况
Fig. 4 SCOD changes under adding different concentration of sodium chloride

分析图4可知,添加氯化钠质量浓度较低时对餐厨垃圾厌氧发酵影响不大,添加高氯化钠质量浓度时可能水解微生物受到抑制,有机物不能水解,效率降低,同时产甲烷微生物活性也受到抑制。

2.4 氯化钠对产甲烷过程微生物脱氢酶活性的影响

脱氢酶是已知酶中种类最多的一类,生物体中绝大多数氧化还原反应都是在脱氢酶及氧化酶的催化下进行,脱氢酶作为一种胞内酶与细胞内的氧化磷酸化过程紧密相关^[22],是反映厌氧发酵体系中微生物活性的一个重要指标^[23]。对餐厨垃圾厌氧发酵体系中脱氢酶活性进行测定,结果见图5。反应体系中各组脱氢酶的活性都呈先上升后下降的趋势。由图5可知,各组脱氢酶的活性在第13天时达到最大,为6 214.8、6 312.9、6 054.6、5 018.9、3 158.9、3 016.4 μg/TS,但随后脱氢酶活性不断下降。添加

2、5 g/L 时氯化钠组脱氢酶活性基本不受影响,添加 10 g/L 组脱氢酶活性比对照降低 15%,添加氯化钠质量浓度为 20、30 g/L 两组,相对对照组脱氢酶降低 60%。

有研究认为,反应体系中盐度的增加,盐析作用增强,从而使脱氢酶的活性下降,微生物活性受阻,新陈代谢作用减缓^[1]。本实验中脱氢酶活性在低氯化钠组时影响较小,高盐组时受影响较大。Woolard^[24]研究 SBR 处理高盐废水时发现,高盐质量浓度会抑制脱氢酶的活性。盐对餐厨垃圾厌氧发酵的影响可能是盐分影响了微生物的脱氢酶活性,从而影响了有机物的水解以及微生物对有机物的降解,使得产气量有所减少。

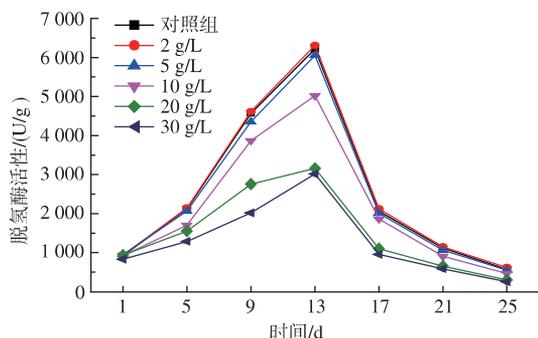


图 5 添加不同盐质量浓度各组脱氢酶活性的变化

Fig. 5 Dehydrogenase enzyme activity changes under adding different concentration of sodium chloride

3 结 语

考察了氯化钠质量浓度对餐厨垃圾厌氧发酵产沼气的影响。研究表明,低质量浓度氯化钠对餐厨垃圾厌氧发酵影响不大,高质量浓度则有抑制效应。氯化钠质量浓度对餐厨垃圾厌氧发酵过程中的代谢产物量和酶活有影响。实验结果表明:添加 2 g/L 氯化钠对产气基本没有影响;添加 5 g/L 的氯化钠促进产气量,比对照组提高 7.5%;添加 10、20、30 g/L 时,沼气量分别减少 17%、24%、51%,属于轻度抑制、中度抑制和重度抑制;低氯化钠组第 9 天有机酸浓度达到最大,氯化钠质量浓度为 20、30 g/L 时,第 13 天有机酸含量达到最大,同时出现酸积累现象,且其中丙酸含量达到 25%,丙酸积累可能是产气变少的原因之一;餐厨垃圾中 SCOD 呈现先上升后下降的趋势,反应体系最终的 SCOD 随氯化钠质量浓度的升高而升高;添加 2 g/L 的氯化钠提高脱氢酶的活性,氯化钠质量浓度超过 5 g/L 时脱氢酶活性受到较大影响,20、30 g/L 两组脱氢酶比对照降低约 60%。

参考文献:

[1] 兰天,李东伟,高先萍.高氯离子味精废母液废水厌氧处理研究[J].环境工程学报,2008,8:1074-1077.
LAN Tian,LI Dong-wei,GAO Xian-ping. Experimental study on anaerobic treatment of fermentation mother liquid of monosodium L-glutamate with high chloride concentration[J]. **Chinese Journal of Environmental Engineering**,2008,8:1074-1077.(in Chinese)

[2] 雷中方.高浓度钠盐对废水生物处理系统的失稳影响综述[J].工业水处理,2000,20(4):6-10.
LEI Zhong-fang. Summary of the effects of the high concentration of the sodium salt of the instability of the biological wastewater treatment system[J]. **Industrial Water Treatment**,2000,20(4):6-10. (in Chinese)

[3] 王继花.盐胁迫下酿酒酵母生理生化特性的研究[D].大连:大连工业大学,2008.

[4] 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.
LI Yong-hua,ZHOU Xing-qiu,WU Jian-dong,et al. Effect of Na⁺ on anaerobic granular sludge in IC reactor [J]. **China Biogas**,2008,26(1):15-18. (in Chinese)

[5] 李琳琳,林冰,徐金枝. CASS 法处理含盐废水的研究[J].工业用水与废水,2003,8:33-35.
LI Lin-lin,LIN Bing,XU Jin-zhi. A study on treatment of salt-containing wastewater by CASS process [J]. **Industrial Water & Waste Water**,2003,8:33-35. (in Chinese)

[6] 李明.餐厨垃圾厌氧发酵制氢产甲烷一体化工艺及设备开发[D].上海:同济大学,2008.

[7] 王寿权,严群,阮文权.蓝藻猪粪共发酵产沼气初步研究[J].食品与生物技术学报,2008,27(5):108-112.

- WANG Shou-quan, YAN Qun, RUAN Wen-quan. Research of anaerobic digestion of blue-green algae and pig manure[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2008, 27(5):108-112. (in Chinese)
- [8] 王 敏. 油脂和盐分对餐厨垃圾单级厌氧消化影响的实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [9] 彭绪亚, 王敏. 高盐分餐厨垃圾湿式单级厌氧消化的试验研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(26):332-333.
PENG Xu-ya, WANG Tun. Experiment research of wet anaerobic digestion of high salt kitchen waste [J]. **Shanxi Architecture**, 2008, 34(26):332-333. (in Chinese)
- [10] Kim D H, Kim S H, Shin H S. Sodium inhibition of fermentative hydrogen production [J]. **International Journal of Hydrogen Engey**, 2009, 34:3295-3304.
- [11] 孙冬月, 官香元. 重铬酸钾法测定 COD 中的干扰及消除[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6):124-126.
SUN Dong-yue, GUAN Xiang-yuan. Elimination of interference on COD measurement by $K_2Cr_2O_7$ method [J]. **Environmental Science and Management**, 2009, 34(6):124-126. (in Chinese)
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:105-220.
- [13] Aquino S, Stuckey D. Soluble microbial products formation in anaerobic chemostats in the presence of toxic compounds[J]. **Water Research**, 2004, 38(2):255-266.
- [14] Miron Y, Zeeman G, Van Lier J, et al. The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems[J]. **Water Research**, 2000, 34(5):1705-1713.
- [15] 林凯, 陈裕华, 陈卫, 等. 食品中总脂肪的酸水解-自动索氏提取仪测定方法研究[J]. 现代预防医学, 2010, 37(15):2885-2886.
LIN Kai, CHEN Yu-hua, CHEN-Wei, et al. Studies on method of measuring total fat in food by acid hydrolysis-automatic soxhlet analysis instrument[J]. **Modern Preventive Medicine**, 2010, 37(15):2885-2886. (in Chinese)
- [16] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Klapwuk A, Drent J, Steenvoorden J. A modified procedure for the TTC-dehydrogenase test in activated-sludge [J]. **Water Research**, 1974, 8(2):121-125.
- [18] Chynoweth D P. Biochemical methanepotential of biomass and wastefeedstocks[J]. **Biomass and Bioenergy**, 1993, 5(1):95-111.
- [19] Rinzema A, VanLier J, Lettinga G. Sodium inhibition of acetoclastic methanogens in granular sludge from a UASB reactor[J]. **Enzyme and Microbial Technology**, 1988, 10(1):24-32.
- [20] Richards B K, Cummings R J, White T E, et al. Methods for kinetic analysis of methane fermentation in high solids biomass digesters[J]. **Biomass and Bioenergy**, 1991, 1(2):65-73.
- [21] Barber W P, Stuckey D C. The use of the anaerobic bar-fled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review [J]. **Water Research**, 1999, 33(7):1559-1578.
- [22] Garcia C, Hernandez T, Costa F. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils[J]. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 1997, 28:123-134.
- [23] Trevors J T. Dehydmgense activity in soil: A comparison between the INT and TIC assay [J]. **Soil Biology and Biochemistry**, 1984, 16:673-674.
- [24] Woolard C R, Irvine R L. Treatment of hypersaline wastewater in the sequencing batch reactor [J]. **Water Research**, 1995, 29(4):1159-1168.