

NaOH 处理对互花米草高温干式厌氧发酵的影响

陈广银^{1,2}, 郑正^{3*}, 常志州¹, 叶小梅¹, 罗艳²

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 南京 210014; 2. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 3. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 为了解 NaOH 处理对互花米草厌氧发酵的影响, 在高温 ($55^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) 和互花米草初始干物质含量为 20% 条件下, 考察了 NaOH 处理对互花米草厌氧发酵产气特性、物质结构和组成以及发酵后互花米草水浸提液理化特性的影响. 结果表明, 互花米草经 5% NaOH 处理后, 产气受到明显的抑制, 累积产气量仅为 CK 的 76.68%; 碱处理配合水洗可有效避免这种抑制, 累积产气量较对照提高了 11.78%; 实验过程中, CK 和碱 + 水洗的甲烷含量稳定, 碱处理的波动较大, 但碱处理对提高甲烷含量有一定的促进作用, 甲烷平均含量提高了 5.30%; 经 51 d 的厌氧处理后, 互花米草中半纤维素和纤维素含量下降, 木质素的含量增加, 碱处理纤维素的结晶度增加, 不利于纤维素的分解, 这与 FTIR 的结果一致; 碱处理破坏了互花米草的物质结构, 有利于有机物的溶出, 但带入的高浓度 Na^+ 是影响互花米草厌氧发酵的主要因素. 因此, NaOH 处理不适合作为互花米草这类盐生植物厌氧生物利用的预处理方式.

关键词: 碱处理; 互花米草; 高温干式发酵; 沼气; 抑制作用

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)07-2158-06

Effect of NaOH-treatment on Dry-thermophilic Anaerobic Digestion of *Spartina alterniflora*

CHEN Guang-yin^{1,2}, ZHENG Zheng³, CHANG Zhi-zhou¹, YE Xiao-mei¹, LUO Yan²

(1. Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: In order to improve the biotransformation rate of lignocellulosic materials, sodium hydroxide (NaOH) was widely used to pretreat lignocellulosic materials. Effect of NaOH-treatment on dry-thermophilic anaerobic digestion of *Spartina alterniflora* was studied by batch model under the temperature of $55^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, at the initial total solid loading (TSL) of 20%. The results indicated that biogas production was inhibited by NaOH-treatment and improved by NaOH-treatment with water washed. The cumulative biogas yield of control (CK), NaOH-treated and NaOH-treated with water washed (NaOH + water) were 268.35 mL/g, 205.76 mL/g and 299.97 mL/g, respectively. The methane content of CK and NaOH + water treatments kept stable while fluctuation of NaOH-treated treatment during anaerobic digestion process was observed. Compared with CK and NaOH + water treatments, methane content of NaOH-treated treatment was improved by 5.30%. The content of hemi-cellulose and cellulose of *S. alterniflora* decreased while content of lignin of *S. alterniflora* increased after 51-day anaerobic digestion. The crystallinity of cellulose of *S. alterniflora* increased after NaOH-treatment which was consistent to the result of FTIR. The lignocellulosic structure was destroyed and the biodegradability of *S. alterniflora* was increased by NaOH pretreatment. However, the amount of Na^+ was taken into the anaerobic system, besides the high Na^+ content in the plant itself which inhibited the anaerobic microorganisms. Therefore, NaOH-treatment is considered to be unsuitable for the anaerobic digestion of *S. alterniflora*.

Key words: NaOH-treatment; *Spartina alterniflora*; dry-thermophilic anaerobic digestion; biogas; inhibition

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是禾本科米草属的多年生草本植物, 具有很强的耐盐耐淹能力, 适宜生长在高潮带下部至中潮带上部的潮间带. 2003 年, 互花米草被国家环保总局列入外来入侵生物名单. 据调查, 目前互花米草在我国海岸带的分布面积已达 $34\,451\text{ hm}^2$, 分布范围北起辽宁, 南达广西, 覆盖了除海南岛、台湾岛之外的全部沿海省份, 以江苏海岸带分布最广, 达 $18\,711\text{ hm}^2$ ^[1]. 互花米草植株高

大, 生长速度快, 据估计, 我国每年互花米草的产量达 $6.89 \times 10^5 \sim 1.03 \times 10^6\text{ t}$, 通过一定的技术途径将其转化为清洁能源加以利用, 为中国生物质能的发

收稿日期: 2010-08-16; 修订日期: 2010-09-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07101-004); 农业部行业计划项目 (200903011-01)

作者简介: 陈广银 (1981 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为生物质能, E-mail: chengy522@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: zzhenghj@fudan.edu.cn

展提供一个丰富的资源库^[2~4]。

互花米草是一种木质纤维原料,将其直接厌氧发酵产沼气,存在厌氧发酵周期长、厌氧生物转化率低等问题^[5,6],在进行厌氧发酵前需经过预处理达到缩短发酵周期,提高厌氧生物转化率的目的。目前的预处理方式主要包括碱处理、酸处理、爆破、湿式氧化和生物降解等,其中,碱处理是目前使用最多且已在秸秆厌氧发酵中规模化应用的预处理方式。研究表明,碱处理可大幅提高原料的厌氧产气性能:吴江等^[7]用 NaOH 溶液浸泡 72 h 后的稻草进行厌氧消化,累积产气量提高了 38% ~ 119%。He 等^[8]用 6% 的 NaOH 溶液对稻草固相处理后厌氧发酵,累积产气量提高了 27.3% ~ 64.5%。陈广银等^[9]用 5% 的 NaOH 溶液在常温下对稻草固相处理 48 h 后进行中温湿式批式发酵,累积产气量较对照提高了 28.13%。由于互花米草是一种盐沼植物,与一般的农业秸秆不同,其体内所含钾、钠、钙和镁等离子的含量较高,将互花米草经 NaOH 溶液固相处理后厌氧发酵的效果如何鲜有这方面的报道。

本研究以互花米草为原料,探讨了碱处理作为互花米草厌氧发酵产沼气预处理方式的可行性,考察了厌氧发酵过程中产气特性、厌氧发酵前后互花米草理化特性和物质结构的变化以及厌氧发酵后互花米草水浸提液理化特性的变化,以期碱处理在互花米草厌氧制沼气工程化应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

互花米草为 2009 年 8 月取自江苏省大丰市川东闸海滩,经自然风干后剪切成 1 ~ 2 cm 的小段,置于干燥阴凉处待用。互花米草的 TS (total solid) 为 87.93%, VS (volatile solid) 为 92.27%, C/N 为 30.30。实验用污泥为中温发酵后的发酵液在 55℃ 下驯化培养 15 d 的发酵液, pH 为 7.60, TS 为 5.75%, VS 为 65.00%。

1.2 实验方法

取干物质质量为 120 g 的互花米草 4 份,分别加入 5% 的 NaOH 溶液 120 g,混合均匀后置于 1 L 广口瓶内,盖上瓶盖于室温下培养,不定期摇动广口瓶使瓶内互花米草与碱液混匀。48 h 后停止培养,将瓶内互花米草混匀后用于厌氧发酵实验。以碱处理后的互花米草为原料进行厌氧发酵实验,标记为碱处理,以互花米草直接进行厌氧发酵的标记为 CK。为弄清碱处理带入的高浓度 Na⁺ 对互花米草厌

氧产气的影响,将碱处理后的互花米草用蒸馏水清洗至洗出液的 pH 为中性, 60℃ 烘干后用于厌氧发酵实验,记为碱 + 水洗。本实验中,未经任何处理的互花米草标记为 BS,互花米草经碱处理后标记为 BA,互花米草经厌氧发酵后标记为 AS,碱处理后的互花米草经厌氧发酵后标记为 AA。

采用 1 000 mL 广口瓶模拟厌氧反应器,将实验原料放入瓶中,加入接种物 300 g (接种比为 1:6.95),用蒸馏水将反应器内 TS (total solid) 浓度调整到 20%,混匀,用橡胶塞密封。实验开始时,向反应器内充入氮气 2 min 以驱赶反应器内的空气,密封后放入 55.0℃ ± 2.0℃ 的恒温水浴锅中培养,每组 2 个平行,取平均值进行分析。实验进行了 51 d,将发酵后的互花米草取出,取少量用蒸馏水清洗至洗出液清澈为止, 60℃ 下烘 3 d,粉碎过 100 目筛后用于 TS、VS、有机质、三素、元素分析、X-射线衍射光谱 (X-ray diffraction, XRD) 和傅里叶红外光谱 (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 分析。取发酵后的沼渣 5 g,按固水比 1:5 添加蒸馏水,于室温下 200 r/min 振荡 30 min,将浸提液转移至 50 mL 离心管内于室温下 4 000 r/min 离心 20 min 后,过滤,滤液用于测定 pH、COD、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP、K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺。

以排水 (饱和 NaCl 溶液) 集气法收集气体,每日测定产气量;采用 GC-2014 气相色谱仪分析产气中甲烷含量 (TCD 检测器);消化液的 pH 值用精密 pH 计测定 (METER 6219);互花米草中纤维素、半纤维素和木质素的含量采用范氏法 (Van Soest) 测定^[10],所用仪器为意大利 Velp Scientifica 公司生产的 FIWE-3 型纤维素分析仪;K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 离子的测定采用 ICP-AES 测定 (J-A1100, 美国 Jarrell-Ash 公司);发酵后互花米草水浸提液 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN 和 TP 的测定采用标准方法^[11];分别取发酵前后的互花米草风干样粉碎过 100 目筛后测定 FTIR (Nexus 870, 美国 NICOLET 公司) 和 XRD (XTRA, 瑞士 ARL 公司),纤维素结晶度的变化见文献[12]。

2 结果与分析

2.1 对产气特性的影响

实验共进行了 51 d,实验过程中各处理日产气量和累积产气量的变化见图 1。可以看出,3 个处理实验过程中日产气量的变化曲线相差较大:CK 在实验初期日产气量较高,随着实验的进行缓慢降低,到

第 5 d 时达最低,为 6.21 mL/g,之后缓慢回升,到第 8 d 达到最大,为 8.47 mL/g,之后保持在 6~8 mL/g 之间,29 d 后产气逐渐下降;碱处理在厌氧发酵前期,日产气量迅速下降,第 8 d 时达最低,为 0.55 mL/g,之后缓慢增加,到第 21 d 时仅为 3.16 mL/g,之后产气迅速增加并于第 31 d 达到最大值,为 12.23 mL/g,之后不断下降;碱+水洗的日产气量在实验前期迅速增加,并于第 5 d 达到最大值,为 21.28 mL/g,之后迅速下降.到实验结束时,CK、碱处理和碱+水洗的日产气量分别为 1.40、1.20 和 1.47 mL/g,各处理间相差不大.从日产气量的结果来看,在厌氧发酵前期碱处理对互花米草发酵产生了明显的抑制,结合碱+水洗的结果来看,这个抑制作用归因于碱处理带入的高浓度 Na^+ 的抑制(Na^+ 的含量为 7 737.5 mg/L,接近 Na^+ 的强抑制浓度 8 000 mg/L 的水平)^[13].CK 中 Na^+ 的浓度尚未达到抑制水平(3 268.75mg/L),因此,未对产气产生明显影响.根据 CK 和碱处理发酵液中 Na^+ 的含量推算,以 1%、2%、3% 和 4% NaOH 处理厌氧发酵后发酵液中 Na^+ 的浓度分别为 4 162.50、5 056.25、5 950.00 和 6 843.75 mg/L,1% 和 2% 的已达到 Na^+ 的中等抑制水平,3% 和 4% 的已超过并接近 Na^+ 的强抑制水平.如果以更低浓度的 NaOH 溶液处理互花米草, Na^+ 抑制产气的风险虽然降低,但促进产气的效果也大幅降低.

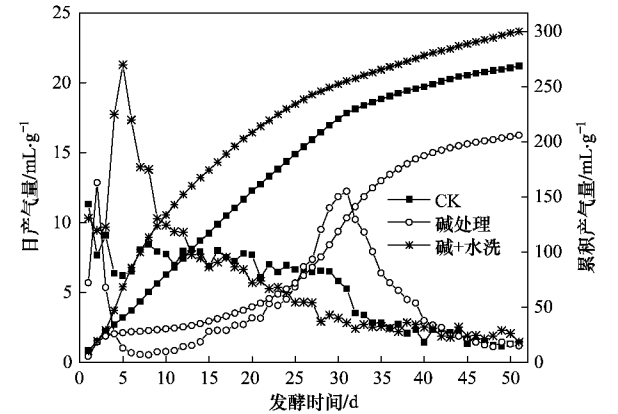


图 1 厌氧发酵过程中日产气量和累积产气量的变化
Fig. 1 Daily and cumulative biogas yields during anaerobic digestion

实验结束时,CK、碱处理和碱+水洗的累积产气量分别为 268.35、205.76 和 299.97 mL/g,碱处理的累积产气量仅为 CK 的 76.68%,而碱+水洗的累积产气量较 CK 提高了 11.78%,较碱处理则大幅提高了 45.79%.可以看出,碱处理带入的高浓度

Na^+ 明显抑制了互花米草厌氧产气,NaOH 处理并不适合作为互花米草高温干式厌氧发酵的预处理方式,碱处理配合水洗虽可提高产气 11.78%,但水洗液的处理问题,加之水洗后互花米草产气的促进效果并不明显,从经济成本上来看并不具有实用价值.

厌氧发酵过程中,各处理甲烷含量的变化见图 2.可以看出:CK 和碱+水洗的甲烷含量的变化趋势相似,均为先降低后增加,最后保持相对稳定,在实验后期再次缓慢增加;碱处理的甲烷含量在实验前期迅速降低,到第 3 d 时达最低,仅为 37%,之后迅速增加,并于第 18 d 达到最大值,为 82.8%,之后缓慢降低,在实验后期再次缓慢增加.可以看出,CK 和碱+水洗的甲烷含量稳定,碱处理的甲烷含量波动较大,表明碱处理带入的高浓度 Na^+ 对甲烷含量的影响较大,不利于甲烷含量的稳定,碱处理后水洗可以避免 Na^+ 对产气的抑制,提高甲烷含量的稳定性.

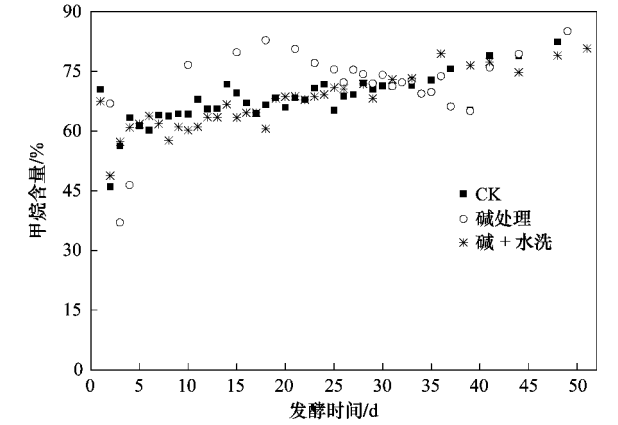


图 2 高温干式厌氧发酵所产沼气中甲烷含量的变化
Fig. 2 Changes of methane contents of biogas during dry thermophilic anaerobic digestion

实验结束时,CK、碱处理和碱+水洗的累积甲烷产量分别为 181.83、146.81 和 200.44 mL·g⁻¹,碱处理的累积甲烷产量仅为 CK 的 80.74%,而碱+水洗的累积产气量较 CK 提高了 10.23%,较碱处理提高了 36.53%;CK、碱处理和碱+水洗产气中平均甲烷含量分别为 67.76%、71.35% 和 66.82% (见表 1),碱处理对提高互花米草厌氧产气的品质有一定的促进作用,这与 Lin 等^[14] 用不同浓度 NaOH 溶液处理污泥厌氧发酵的结果一致.

2.2 互花米草固相理化特性的变化
2.2.1 发酵前后互花米草理化特性的变化
厌氧发酵前后,互花米草理化特性的变化见表 2.可以看出,经厌氧发酵后,互花米草的 TS 质量大

表 1 互花米草高温干式厌氧发酵的产气数据¹⁾

Table 1 Gas data of <i>S. alterniflora</i> during dry thermophilic anaerobic digestion			
项目	CK	碱处理	碱 + 水洗
沼气产量/mL·g ⁻¹	268.35	205.76	299.97
甲烷产量/mL·g ⁻¹	181.83	146.81	200.44
甲烷含量/%	67.76	71.35	66.82
促进效果(以甲烷计)/%	/	-9.26	10.23

1) 沼气和甲烷产量以 TS 计

幅降低,CK 和碱处理分别从发酵前的 120 g 降为 70.50 g 和 73.73 g,分别降低了 41.25% 和 38.56%,表明将互花米草厌氧发酵产沼气具有很好的减量化效果.碱处理由于产气受到了抑制,互花米

草的减量化效果不如 CK.由于表 1 的数据来自发酵后的固体残渣经水洗后的烘干样,互花米草中所含的可溶性有机物和无机物大多被洗出.此外,发酵过程中互花米草中的无机盐类也随着发酵液溶出,这是造成发酵后互花米草中有机质、VS 和 C 含量增加的原因.由于木质素的分解是需要分子氧的^[15],其在厌氧发酵过程中几乎不被分解,随着有机物被厌氧微生物分解利用,木质素被相对浓缩.因此,发酵后木质素的相对含量增加.在半纤维素、纤维素和木质素中,半纤维的分解最容易,纤维素其次,木质素最差,因此,碱处理发酵后半纤维素含量降低,纤维素含量略有增加,木质素含量大幅增加.

表 2 厌氧发酵前后互花米草的理化特性

Table 2 Physico-chemical properties of <i>S. alterniflora</i> obtained before and after anaerobic digestion									
处 理	TS 质量/g	VS/%	有机质/%	C/%	N/%	H/%	木质素/%	纤维素/%	半纤维素/%
BS	120	88.37	79.77	43.94	1.50	5.89	5.64	29.65	34.25
AS	70.50	94.28	85.72	45.50	1.30	6.25	20.68	25.59	30.16
AA	73.73	96.36	88.98	46.41	1.35	6.26	18.68	32.10	24.16

2.2.2 XRD 的变化

经 51 d 的高温厌氧消化处理后,互花米草的 XRD 曲线见图 3.可以看出,无论是 NaOH 还是厌氧微生物对互花米草纤维素结晶区的破坏作用均有限,纤维素的骨架结构均未受到破坏,只是纤维素的结晶程度发生了变化.经厌氧发酵后,CK 的结晶度指数 C_rI 从发酵前的 0.655 8 降低为 0.624 6,碱处理从发酵前的 0.640 0 增加为 0.666 7,表明在厌氧发酵过程中纤维素的结晶区受到一定的破坏,碱处理使互花米草纤维素结晶区部分发生了重结晶,不利于厌氧微生物利用,微生物分解无定形区较分解结晶

区容易,因此碱处理发酵后纤维素的结晶度指数 C_rI 增加.

2.2.3 FTIR 的变化

厌氧发酵前后互花米草红外光谱的变化见图 4(a).可以看出,厌氧发酵后 AS 和 AA 在 2 920 cm^{-1} 和 2 852 cm^{-1} 处的吸收峰强度均增强,表明 AS 和 AA 中的纤维素和半纤维素在厌氧发酵过程中受到了破坏,从而使 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 增加.

互花米草 FTIR 光谱指纹区(1 800 ~ 600 cm^{-1})的变化见图 4(b).可以看出,厌氧发酵后互花米草在 1 735 和 1 254 cm^{-1} 处的吸收峰明显降低,在 1 651 和 1 464 cm^{-1} 处的吸收峰明显增加,根据文献可知,1 735 cm^{-1} 是半纤维素中未键合的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动,1 651 cm^{-1} 是 $\text{O}-\text{H}$ 和共轭 $\text{C}-\text{O}$ 的振动吸收峰,1 464 cm^{-1} 是木质素和碳水化合物中 $\text{C}-\text{H}$ 的弯曲振动,1 254 cm^{-1} 是木质素中紫丁香基芳香环和 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动^[16~18],表明厌氧发酵后互花米草中半纤维素含量明显降低,木质素被相对浓缩,这与常规分析的结果一致.下文通过 1 512 cm^{-1} 处木质素所对应的特征峰和纤维素、半纤维素所对应的特征峰的峰强度比值来分析木质素和纤维素、半纤维素相对含量的变化,结果见表 3.

从表 3 可以看出,AS 的 I_{1512}/I_{1735} 、 I_{1512}/I_{1375} 、 I_{1512}/I_{1162} 和 I_{1512}/I_{895} 比值较 BS 均大幅提高,进一步表明厌氧发酵过程中主要是纤维素和半纤维素发生

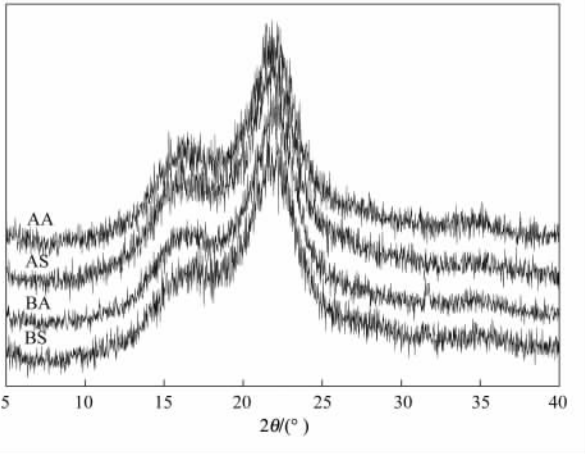


图 3 发酵前后互花米草的 X 射线衍射谱图变化

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of *S. alterniflora* obtained before and after anaerobic digestion

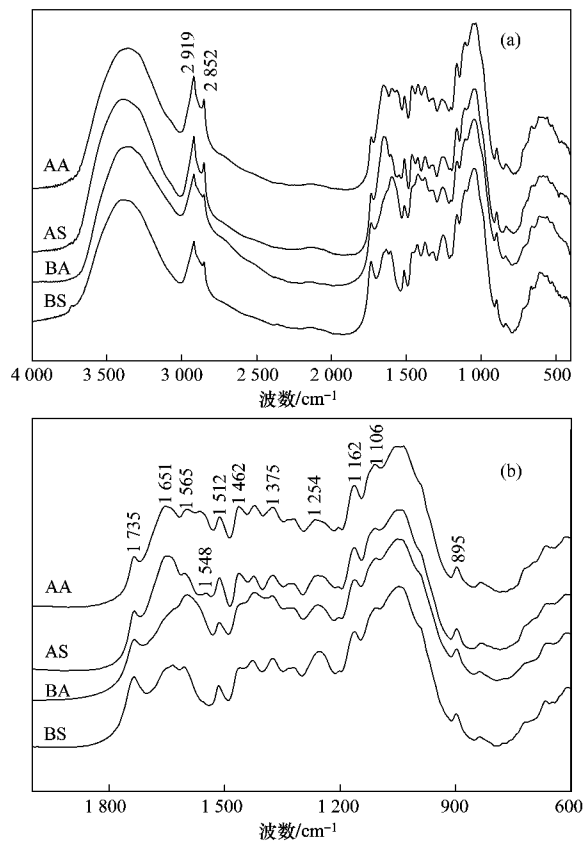


图4 厌氧发酵前后互花米草的红外光谱及其指纹区的变化
Fig.4 FT-IR spectra patterns and fingerprint region of FTIR spectra of *S. alterniflora* obtained before and after anaerobic digestion

表4 厌氧发酵后互花米草水浸提液理化特性的变化/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Physico-chemical properties of water extracts of *S. alterniflora* after anaerobic digestion/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

处理	pH	COD	TN	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
CK	8.89	8844	69.72	12.36	0	6.40	526.50	653.75	66.96	57.42
碱处理	8.93	10296	161.21	104.12	0	9.12	490.00	1547.5	73.98	58.83

碱处理水浸提液的COD、TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和TP均明显高于CK,出现这种结果有2种可能的原因:一是碱处理破坏了互花米草的木质素结构,增加了厌氧微生物进入互花米草内部的几率,促进了有机物的溶出;二是碱处理带入的高浓度 Na^+ 对厌氧微生物产生了抑制,厌氧微生物生长繁殖的速率下降,造成发酵液中N、P的含量相对较高.这里给出的是固液比1:5的水浸提液的数据,发酵液中实际的值应是表中数据的5倍.从几种金属阳离子的浓度来看,碱处理中 Na^+ 含量高达 $7\,737.50\text{ mg/L}^{-1}$,远高于 Na^+ 的中等抑制水平的上限,接近强抑制水平,而CK中 Na^+ 含量尚未达到抑制水平^[13],这可能是碱处理抑制互花米草厌氧产气的主要原因;CK和碱处理中 K^+ 含

表3 互花米草发酵前后木质素与碳水化合物特征峰强度比值¹⁾
Table 3 Ratios of the intensity of the lignin associated band with carbohydrate bands for the *S. alterniflora* obtained before and after anaerobic digestion

样品	苯环骨架振动的相对强度 I_{1512} 与碳水化合物特征峰相对强度的比值			
	I_{1512}/I_{1735}	I_{1512}/I_{1375}	I_{1512}/I_{1162}	I_{1512}/I_{895}
BS	0.61(0.59)	1.30(1.25)	0.89(0.87)	1.79(1.73)
BA	0.73(0.65)	1.84(1.83)	0.65(0.68)	0.97(1.02)
AS	1.20(1.32)	1.85(1.82)	0.99(0.95)	2.13(2.13)
AA	1.18(1.05)	1.42(1.39)	0.66(0.64)	1.28(1.23)

1) 括号外是由峰高计算出的比值,括号内是由峰面积计算出的比值

了降解,如何破坏木质素对纤维素和半纤维素的包裹作用是提高互花米草厌氧生物转化率的关键. AA除 I_{1512}/I_{1735} 较BA大幅提高外,其余均降低,可能的原因有两点:一是碱处理破坏了互花米草的木质素结构,互花米草在 $1\,512\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰强度减弱;二是由于碱处理后,互花米草纤维素的结晶区发生了重结晶,厌氧微生物对纤维素的破坏更困难,在厌氧发酵过程中分解缓慢,厌氧发酵后纤维素相对含量增加,在 $1\,162\text{ cm}^{-1}$ 和 895 cm^{-1} 处的吸收峰强度增强.以上结果表明,碱处理促进了互花米草中半纤维素的分解,但对纤维素的分解不利.

2.3 发酵后互花米草水浸提液理化特性的变化
厌氧发酵后CK和碱处理的互花米草固液比1:5的水浸提液的理化特性数据见表4.可以看出,

量均较高,已达到和接近中等抑制水平,但明显低于 Na^+ 含量,不是造成产气抑制的主要原因; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量均较低,远未达到抑制的水平.

3 结论

(1)互花米草经5%NaOH固相处理后,实验前期产气受到了明显的抑制,互花米草碱处理后配合水洗可有效避免这种抑制,提高产气速率.实验结束时,CK、碱处理和碱+水洗的累积产气量分别为268.35、205.76和299.97 mL/g,碱处理的累积产气量仅为CK的76.68%,而碱+水洗的累积产气量较CK提高了11.78%,较碱处理则大幅提高了45.79%.实验过程中,CK和碱+水洗的甲烷含量稳

定,碱处理的甲烷含量波动较大. CK、碱处理和碱 + 水洗产气中平均甲烷含量分别为 67. 76%、71. 35% 和 66. 82% .

(2)厌氧发酵后,互花米草中半纤维素和纤维素含量下降,木质素的相对含量增加,碱处理不利于纤维素的分解,XRD 和 FTIR 的结果与常规分析的结果一致.

(3)发酵后互花米草水浸提液的结果表明,碱处理破坏了互花米草的物质结构,有利于有机物的溶出,但碱处理带入的高浓度 Na^+ 是影响互花米草厌氧发酵的主要因素. 因此,NaOH 处理不适合作为互花米草这类盐生植物厌氧生物利用的预处理方式.

参考文献:

- [1] 关道明. 中国滨海湿地米草盐沼生态系统与管理[M]. 北京:海洋出版社,2009. 1-2.
- [2] 朱洪光,陈小华,唐集兴. 以互花米草为原料生产沼气的初步研究[J]. 农业工程学报,2007,23(5):201-204.
- [3] 陈广银,郑正,邹星星,等. 牛粪对互花米草混合厌氧消化过程的影响研究[J]. 环境科学,2009,30(7):2130-2135.
- [4] Yang S G, Li J H, Zheng Z, *et al.* Characterization of *Spartina alterniflora* as feedstock for anaerobic digestion[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 33(4): 597-602.
- [5] 陈广银,郑正,邹星星,等. 互花米草厌氧消化产沼气的实验研究[J]. 中国环境科学,2009,29(8):861-866.
- [6] 杨世关,李继红,郑正,等. 互花米草厌氧生物转化可行性分析与试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(5):196-199.
- [7] 吴江,徐龙君,谢金连. 碱浸泡预处理对固体有机物厌氧消化的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 252-255.
- [8] He Y F, Pang Y Z, Liu Y P, *et al.* Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production[J]. Energy & Fuels, 2008, 22: 2775-2781.
- [9] 陈广银,郑正,罗艳,等. 碱处理对秸秆厌氧消化的影响[J]. 环境科学,2010,31(9):225-231.
- [10] 杨胜. 饲料分析及饲料质量监测技术[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1983.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12] 陈广银,郑正,邹星星,等. 牛粪与互花米草混合厌氧消化产沼气的试验[J]. 农业工程学报,2009,25(3):179-183.
- [13] Rittmann B E, McCarty P L, 著,文湘华,王建龙,等译. 环境生物技术原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [14] Lin J G, Chang C N, Chang S C. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization[J]. Bioresource Technology, 1997, 62: 85-90.
- [15] Komilis D P, Ham R K. The effect of lignin and sugars to the anaerobic decomposition of solid waste[J]. Waste Management, 2003, 23:419-423.
- [16] Pandey K K, Pitman A J. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2003, 52:151-160.
- [17] Stark N M, Matuana L M. Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS[J]. Polymer Degradation and Stability, 2007, 92: 1883-1890.
- [18] Schultz T P, Glasser W G. Quantitative structural analysis of lignin by diffuse reflectance Fourier transform spectrometry[J]. Holzforschung, 1986,40:37-44.