

# 不同生长期互花米草的理化特性及厌氧发酵特性

陈广银<sup>1,2</sup>, 郑正<sup>3\*</sup>, 常志州<sup>1</sup>, 罗艳<sup>2</sup>

(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:** 为了解不同生长阶段互花米草的理化特性及厌氧发酵性能, 找出互花米草的最佳收获期, 进行了不同生长阶段互花米草的中温厌氧消化试验。结果表明, 随着生长期的延长, 互花米草中易分解有机物含量下降, 木质纤维素含量增加, 木质纤维结构发育逐渐成熟, 坚韧度增加, 纤维素的结晶度提高, C/N 增加, 互花米草的可生物降解性能降低, 但由于金属阳离子含量降低, 对厌氧微生物产生抑制的风险降低。互花米草直接厌氧发酵的厌氧生物转化率较低, 最高的为 5 月份采收的互花米草, 为 42.55%, 最低的为 11 月份采收的互花米草, 仅为 18.76%。从互花米草生物量以及产气稳定性等角度综合考虑, 选择 8 月份作为互花米草的最佳采收时期。

**关键词:** 沼气, 厌氧消化, 农业废弃物, 互花米草, 不同生长期, 理化特性

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.049

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0260-06

陈广银, 郑正, 常志州, 等. 不同生长期互花米草的理化特性及厌氧发酵特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 260-265.

Chen Guangyin, Zheng Zheng, Chang Zhizhou, et al. Characteristics of anaerobic digestion and physico-chemical properties of *Spartina alterniflora* at different growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 260-265. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是分布在沿海滩涂的耐盐耐淹的木质纤维类植物, 具有生长快, 产量大等特点, 在中国沿海省份广泛分布。目前, 互花米草在中国海岸带的分布面积达 34 451 hm<sup>2</sup>, 每年互花米草的干物质产量达 6.89×10<sup>5</sup>~1.03×10<sup>6</sup> t, 是一个丰富的生物资源库<sup>[1]</sup>。通过厌氧发酵方式将其转化为清洁的能源, 这对中国生物质能源产业的发展具有重要意义。目前, 中国学者在这方面已作了一些工作<sup>[2-6]</sup>, 国外尚未见有这方面的报道。

作为一种木质纤维类植物, 不同生长阶段的互花米草的理化特性、生物量以及物质组成和结构相差很大, 进行厌氧发酵产沼气的特性也会有很大差别, 选择合适的互花米草采收期对于保证互花米草工程化应用中原料的稳定供应以及产气量的最大化具有重要意义。互花米草一般在 3 月份发芽, 10 月份开始枯萎。本文选择了互花米草 3 个典型的生长阶段, 分别于 5 月份、8 月份和 11 月份, 即互花米草的成长期、成年期和成熟期, 研究

了不同生长阶段互花米草的理化特性、物质组成以及厌氧发酵产沼气的特性, 以期能为农业秸秆厌氧发酵制沼气工程化应用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用互花米草分别为 2009 年 5 月、8 月和 11 月采自江苏省大丰市川东滩涂, 分别以 M5、M8 和 M11 表示。取样时, 仅收获地上部分, 经晾干切碎 (长度为 2.0 cm 左右) 后待用。接种物采用前次互花米草厌氧消化后的发酵液<sup>[2]</sup>, pH 值为 7.41, 干物质 (TS) 为 4.90%, 挥发性固体 (VS) 为 52.85%。文中的物质含量值均为占干物质的百分比。

### 1.2 试验方法

试验采用批式厌氧发酵方式, 每个处理 2 个平行, 取平均值用于分析。厌氧反应器容积为 1.0 L, 试验用容积为 0.8 L 左右。各处理的总质量均为 800 g, 物料配比均为: 互花米草 (以干物质计) 48 g, 污泥 400 g, 用蒸馏水将厌氧反应器内干物质浓度 (质量分数) 调节至 6.0%。试验在生化培养箱内进行, 温度为 (35±1) °C。每天早晚摇动反应器, 使反应器内的物料混匀, 以消除积液分层导致的原料结壳。试验过程中取样测定有关指标。

1) 以排水 (饱和 NaCl 溶液) 集气法收集气体, 每日测定产气量; 2) 采用 GC-2014 气相色谱仪分析产气的中甲烷含量 (TCD 检测器); 3) 消化液的 pH 值用精密 pH 计测定 (METER 6219); 4) 将消化液在 4 °C 下 12 000 r/min 离心 20 min 后, 取上清液过 0.45 μm 滤膜后

收稿日期: 2010-08-07 修订日期: 2011-02-23

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 (200903011-01)

作者简介: 陈广银 (1981-), 男, 江苏大丰人, 博士, 主要从事生物质能的研究。南京市钟灵街 50 号 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014, 南京。Email: chengy522@gmail.com

\*通信作者: 郑正, 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生活污水处理和有机固体废弃物资源化研究。上海 复旦大学环境科学与工程系, 200433。Email: zzhenghj@fudan.edu.cn

用于测定乙酸、丙酸和丁酸 (GC-2014, 日本岛津); 5) 干物质的测定采用 105℃ 烘 24 h, 差重法测定; 6) 挥发性固体的测定采用 550℃ 灼烧 4 h, 差重法测定; 7) 分别取发酵前后的互花米草用蒸馏水清洗干净后冰冻干燥, 粉碎, 过 100 目筛后用于测定元素分析 (CHN-O-Rapid 元素分析仪)、红外光谱图 (Nexus 870, 美国 NICOLET 公司) 和 X 射线衍射谱图 (XTRA, 瑞士 ARL 公司); 8) 将互花米草粉碎样用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后测定 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> (ICP-AES); 9) 采用范氏法 (Van Soest) 测定纤维素、半纤维素和木质素 (FIWE, Velp Scientifica) [7]。10) 结晶度的变化: 纤维素的结晶度是指纤维素构成的结晶区占纤维素整体的百分率, 它反映纤维素聚集时形成结晶的程度, 其计算公式如下

$$C_r I = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}}$$

式中,  $C_r I$  为相对结晶度;  $I_{002}$  为  $2\theta=22^\circ$  附近 (002) 晶面衍射强度;  $I_{am}$  为无定形区衍射强度, 对于天然纤维素, 为  $2\theta$  接近  $18^\circ$  时的衍射强度 [8]。

## 2 结果与分析

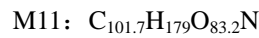
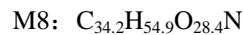
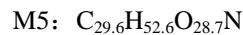
### 2.1 不同生长期互花米草的理化特性

不同生长期互花米草元素分析的结果见表 1。可以看出, 随着生长期的延长, 互花米草中 C 的质量分数增加, N 的质量分数降低, 这是因为 5 月份和 8 月份收获的互花米草仍处于生长阶段, 互花米草中含有大量粗蛋白类含氮有机物 [1], 而 11 月份收获的互花米草已经枯萎, 其中的部分氮素通过植物自身的新陈代谢作用转移到果实中, 部分被自然界中的微生物分解为氨气进入大气, 原料的可生物降解性降低。

根据表 1 结果, 采用生物体经验分子式建立方法和

沼气产量的理论计算方法建立互花米草的经验分子式并推算其产气率 [9-10], 结果如下:

互花米草的经验分子式分别为:



M5、M8 和 M11 的理论沼气产率分别为: 764.75 mL/g、832.97 mL/g 和 834.28 mL/g。

表 1 不同生长期互花米草的元素分析结果

Table 1 Data of elements content of *S. alterniflora* in different growth periods

处理	C	H	N	O	%
M5	40.30	5.97	1.59	52.14	
M8	43.94	5.89	1.50	48.67	
M11	44.46	6.52	0.51	48.51	

不同生长期互花米草理化特性的结果见表 2。可以看出, 随着生长期的延长, 互花米草中挥发性固体、C/N、半纤维素和木质素含量均不断增加, 纤维素含量降低。挥发性固体含量的增加, 表明互花米草中的无机盐含量下降, 这与试验所测的几种金属阳离子含量的变化一致, 互花米草的产沼气潜力增加。一般认为, 厌氧微生物适宜的 C/N 为 20:1~30:1, 5 月份和 8 月份采收的互花米草的 C/N 分别为 28.73 和 30.30, 基本满足厌氧微生物的需求, 11 月份采收的互花米草的 C/N 高达 93.12, 远大于厌氧微生物的最适要求。木质素是木质纤维原料厌氧生物降解的一大障碍, 由于木质素的分解是需要分子氧的 [11], 在厌氧发酵过程中几乎不被分解, 因此, 木质素含量的增加影响了互花米草的厌氧生物降解性, 成为互花米草厌氧生物利用的主要障碍。

表 2 不同生长期互花米草的理化特性

Table 2 Physico-chemical properties of *S. alterniflora* at different growth periods

处理	挥发性固体/%	C/N	纤维素/%	半纤维素/%	木质素/%	Na <sup>+</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	Mg <sup>2+</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )
M5	84.45	28.73	32.96	26.56	5.60	47 593.20	16 812.99	7 521.62	5 819.87
M8	92.27	30.30	29.65	34.25	5.84	14 349.09	9 034.69	3 098.38	3 485.23
M11	94.41	93.12	30.71	34.34	6.23	16 064.34	6 715.70	3 374.58	2 985.98

由于互花米草是一种盐生植物, 因此, 在研究互花米草厌氧生物转化利用时必须考虑其所含碱金属 (K、Na) 和碱土金属 (Ca、Mg) 的含量。从表 2 的结果来看, 互花米草中几种金属离子的含量均相当高, Na<sup>+</sup> 的含量最高, 其次是 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的含量相当。随着生长期的延长, 互花米草中 4 种金属离子的含量均大幅降低, 这对厌氧生物利用是有益的。当互花米草达到成熟期后, 体内的金属离子含量也达到一个相对稳定的阶段。M5、M8 和 M11 中 Na<sup>+</sup> 质量分数分别为 47 593.20、14 349.09 和 16 064.34 mg/kg, 远高于其他 3 种金属离子。一定含量的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的存在对厌氧微生物的生存和繁殖是有利的, 但过高含量的金属离子会对厌氧微生物产生抑制, 严重的甚至导致试验失败 [12]。

为了分析这些阳离子对厌氧发酵过程可能造成的影响, 下面作一些理论分析。假定厌氧发酵过程中互花米草中的这些金属元素全部以离子形态进入厌氧发酵液中, 根据厌氧批式发酵通常采用的干物质质量分数为 6%~10% 计, 可以推算出发酵液中 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的质量浓度范围, M5、M8 和 M11 中 K<sup>+</sup> 的质量浓度范围分别为 1 008.78~1 681.30、542.08~903.47 和 402.94~671.57 mg/L; Na<sup>+</sup> 的质量浓度范围分别为 2 855.59~4 759.32、860.95~1 434.91 和 963.86~1 606.43 mg/L; Ca<sup>2+</sup> 的质量浓度范围分别为 451.30~752.16、185.90~309.84 和 202.47~337.46 mg/L; Mg<sup>2+</sup> 的质量浓度范围分别为 349.19~581.99、209.11~348.52 和 179.16~298.60 mg/L。可以看出, 除 M5 的 Na<sup>+</sup> 质量浓度存在抑制产气的可能外,

其它离子的质量浓度超出起促进作用范围的幅度不多，尚未进入中等抑制质量浓度范围<sup>[10]</sup>。在以 M5 为原料进行厌氧发酵时，当系统干物质质量分数超过 8% 时，系统中 Na<sup>+</sup> 的浓度已达到了中等抑制质量浓度范围，对产甲烷不利。虽然 5 月份采收的互花米草中易分解有机物含量较高，但是较高的 Na<sup>+</sup> 含量不利于厌氧生物利用。

## 2.2 不同生长阶段互花米草厌氧发酵比较研究

### 2.2.1 不同生长期互花米草的厌氧产气特性

厌氧发酵过程中日产气量和累积产气量的变化见图 1。从日产气量的结果来看，不同生长期互花米草厌氧发酵日产气量的变化趋势相似，在发酵前期均迅速增加，均在试验第 3 天达到最大值，M5、M8 和 M11 分别为 40.67、21.52 和 26.65 mL/g，之后迅速下降。11 月份采集的互花米草由于已进入枯萎期，所含的易分解有机物含量最低，而木质素已发育完全，因此，厌氧发酵时维持高日产气量的时间短，产气下降快，产气周期短；5 月份采收的互花米草中易分解有机物的含量最高，纤维素、半纤维素这类可分解有机物含量相对不高，因此，厌氧发酵时日产气量最高，维持高日产气量的时间最长，但产气持续期较短；8 月份的产气情况处在 M5 和 M11 之间。试验结束时，M5、M8 和 M11 的干物质累积产气量分别为 274.81、207.92 和 147.75 mL/g。根据本文 2.1 部分求得的不同生长期互花米草的理论产气量，计算得 M5、M8 和 M11 的厌氧生物转化率分别为 42.55%、27.05% 和 18.76%，互花米草的生物转化率随着生长期的延长逐渐降低。

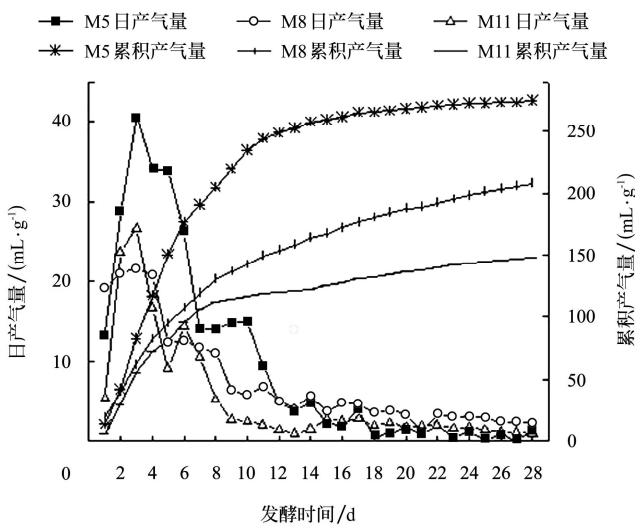


图 1 发酵过程中日产气量和累积产气量的变化

Fig.1 Changes of daily and cumulative biogas yields during anaerobic digestion of *S. Alterniflora*

图 2 是厌氧发酵过程所产沼气中甲烷含量的变化情况。与一般批次厌氧发酵过程相似，各处理的甲烷含量在发酵前期均迅速下降，M5、M8 和 M11 分别在试验第 3、2 和 2 天达到最低值，分别为 49.50%、54.80% 和 54.40%，之后迅速回升并很快达到稳定。试验结束时，M5、M8 和 M11 所产沼气中平均甲烷含量分别为 65.65%、72.29% 和 70.51%。

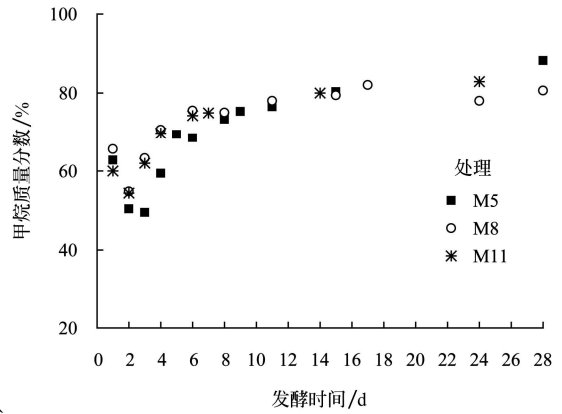


图 2 厌氧发酵所产沼气中甲烷含量的变化

Fig.2 Changes of methane contents of biogas during anaerobic digestion

### 2.2.2 pH 值的变化

批次试验所产沼气中平均甲烷含量受 pH 值变化的影响明显，试验前期水解酸化越明显，pH 值变化越大，所产沼气中甲烷的平均含量越低。因此，在比较不同原料厌氧发酵所产沼气的品质时，比较甲烷含量达到稳定期时的甲烷含量更有实际意义。图 3 是不同生长期互花米草厌氧消化过程中 pH 值的变化曲线。由图 3 可知，各处理在发酵前 2 d，pH 值均下降，M5 的降低幅度最大。试验第 2 天时，M5、M8 和 M11 的 pH 值分别为 7.09、7.38 和 7.47。之后，各处理的 pH 值缓慢回升，并最终保持在一个相对稳定的水平。试验结束时，各处理的 pH 值分别为 7.58、7.36 和 7.40，处理间相差不大。由于本试验的有机负荷较低，且接种物的浓度较高，因此，在整个厌氧消化过程中，各处理 pH 值的变化比较稳定，未出现大起大落的现象。

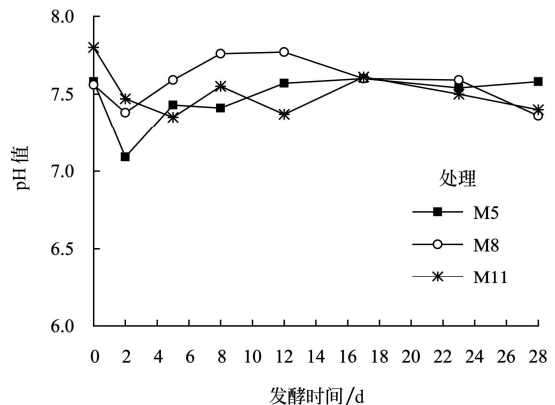


图 3 发酵过程中 pH 值的变化

Fig.3 Changes of pH values during anaerobic digestion of *S. alterniflora*

### 2.2.3 挥发性脂肪酸 (VFAs) 的变化

厌氧发酵过程中有机酸的变化见图 4。从图 4 可以看出，不同生长期互花米草厌氧发酵过程中有机酸的变化趋势相似，在各种有机酸中，乙酸占其中的绝大多数，其次是丙酸，再次是正丁酸，异丁酸的含量最低。从有机酸的含量可以发现，M5 中乙酸和总有机酸的含量最

高，且保持高有机酸含量的时间较长，其次是 M8，M11 最低，这与互花米草中所含易分解有机物的含量一致。

从几种有机酸的分解速度来看，乙酸的分解速度最快，丙酸和丁酸的分解速度较慢，有机酸中丙酸和丁酸所占比例越高产气越缓慢。在 3 个处理中，丙酸和丁酸的含量相当，乙酸含量以 M5 最高，M11 最低，这是造成 M11 产气最慢的重要原因。有机酸来自于有机物的水解酸化，原料中易分解有机物含量越高水解酸化的速率越高，这主要取决于发酵原料的特性。

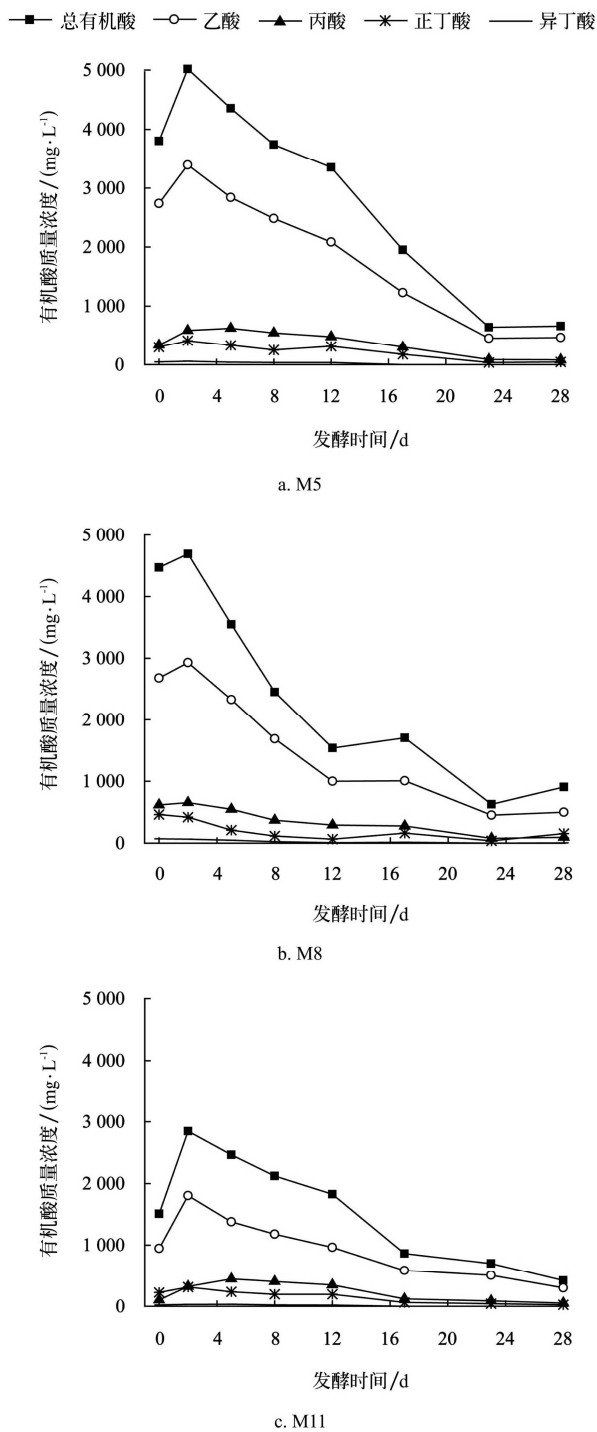


图 4 厌氧发酵过程中有机酸的变化

Fig.4 Changes of organic acids during anaerobic digestion of *S. alterniflora*

### 2.2.4 木质素、纤维素和半纤维素的变化

互花米草中除含有少量易分解的有机物（如淀粉、粗蛋白等）外，主要成分为纤维素、半纤维素和木质素，三者之和占互花米草有机物总量的 65% 以上，且随着互花米草生长期的延长呈增加的趋势。表 3 是不同生长期互花米草厌氧发酵前后纤维素、半纤维素和木质素的变化。从表 3 中可以看出，未经厌氧消化的互花米草，随着生长期的延长，互花米草中的纤维素、半纤维素和木质素含量均呈增加的趋势。经 28 d 的厌氧消化处理后，各处理中纤维素和木质素含量均增加，半纤维素含量均降低，且降低幅度随着互花米草生长期的延长下降，这与产气的结果一致。由于木质素的分解是需要分子氧的<sup>[11]</sup>，其在厌氧发酵过程中几乎不被分解，因此，厌氧发酵后原料中的木质素的相对含量增加，木质素的增加幅度可以间接反映原料中其他有机物被分解利用的程度。半纤维含量的降低表明厌氧消化过程中半纤维素被大量分解。在厌氧消化过程中，纤维素的分解速度较慢，且纤维素中含有难被厌氧微生物分解的结晶区部分，因此，经厌氧发酵后，纤维素相对含量有少许增加，M5 的增加幅度最小，结合木质素的数据可以看出，M5 在发酵过程中有机物被厌氧微生物分解利用的程度最大，M8 次之，M11 最低，这与产气的结果一致。

表 3 互花米草厌氧发酵前后纤维素、半纤维素和木质素质量分数的变化

Table 3 Changes of cellulose, hemicellulose and lignin of *S. alterniflora* obtained before and after anaerobic digestion %

处理	纤维素		半纤维素		木质素	
	发酵前	发酵后	发酵前	发酵后	发酵前	发酵后
M5	32.96	34.87	26.56	12.41	5.60	26.93
M8	29.65	35.39	34.25	24.17	5.64	18.84
M11	30.71	34.33	34.34	33.54	6.23	14.00

### 2.2.5 X 射线衍射谱图 (XRD) 分析

不同生长期互花米草厌氧发酵前后的 X 射线衍射曲线均在衍射强度  $2\theta=22^\circ$  附近有一极大峰值，这是 002 晶面的衍射强度峰，衍射峰越尖锐，晶体结晶程度越高<sup>[13]</sup>。未经厌氧发酵处理的互花米草在该处的衍射强度随着互花米草生长期的延长而增加，表明互花米草的生长期越长，纤维素的结晶程度越高，越难被分解，这与产气的结果一致。

不同生长期互花米草厌氧发酵前后的结晶度指数  $CrI$  见表 4。经 28 d 的厌氧消化处理后，各处理的结晶度指数  $CrI$  均发生了较大变化，呈降低的趋势，且互花米草

表 4 不同生长期互花米草  $CrI$  厌氧发酵前后的变化  
Table 4 Changes of  $CrI$  of *S. alterniflora* before and after anaerobic digestion

原料	$CrI$	
	发酵前	发酵后
M5	0.6115	0.5447
M8	0.6558	0.6222
M11	0.6208	0.6307

生长期越短  $C/I$  的降低幅度越大, 生长期越长  $C/I$  的降低幅度越小。当以 M11 为发酵原料时, 经厌氧发酵处理后,  $C/I$  较发酵前还稍有增加。 $C/I$  的变化表明, 互花米草纤维素的生物降解程度随着生长期的延长而降低, 这和产气的结果一致。

### 3 讨论与结论

1) 不同生长阶段的互花米草的理化特性存在很大差别。不同生长阶段互花米草的理化特性的差别可归纳为以下几点: 一是随着互花米草生长期的延长, 互花米草中易分解的淀粉、脂肪、蛋白质等含量下降, 木质纤维素含量增加, 木质纤维素中又以半纤维素和木质素含量的增加为主, 纤维素有少许降低,  $C/N$  增加; 二是随着互花米草生长期的延长, 互花米草中的木质纤维结构发育逐渐成熟, 坚韧度增加, 纤维素的结晶度提高; 三是随着互花米草生长期的延长, 其生理代谢功能逐渐衰退, 随着一些细胞的死亡, 体内的很多部位只剩下木质纤维的骨架结构, 互花米草中金属阳离子含量随着生长期的延长降低。

2) 不同生长阶段的互花米草具有不同的厌氧发酵特性, 以 5 月份采收的互花米草的厌氧消化性能最好。不同生长阶段互花米草厌氧发酵特性的差别主要体现在以下 4 个方面: 一是不同生长阶段的互花米草厌氧产气的生物转化率均偏低, 随着生长期的延长, 互花米草的厌氧生物转化率降低, M5、M8 和 M11 的厌氧生物转化率分别为 42.55%、27.05% 和 18.76%, 但沼气中甲烷的平均含量增加; 二是随着生长期的延长, 互花米草中易分解的有机物含量减低, 可分解的有机物含量增加, 水解酸化速率降低, 有机酸含量下降, pH 值的变化幅度减小, 且维持高日产气量的时间短, 厌氧发酵周期缩短; 三是由于互花米草中木质素对纤维素的包裹作用, 加上木质素在厌氧发酵过程中几乎不被分解, 导致木质素在厌氧发酵后被相对浓缩, 半纤维素在厌氧发酵后大幅降低, 且随着生长期的延长降低幅度减小, 表明厌氧微生物对半纤维素的利用程度最高; 四是随着生长期的延长, 互花米草中的木质纤维结构逐渐发育完全, 纤维素的结晶区发育日渐成熟, 被厌氧微生物破坏的难度增加, 造成厌氧发酵后纤维素的相对含量增加, 这是造成互花米草厌氧生物转化率低的重要原因。

3) 从工程应用的角度, 选择 8 月份作为互花米草的最佳采收期。选择 8 月份作为互花米草的最佳采收期主要出于以下几方面考虑: 1) 8 月份采收的互花米草已基本发育成熟, 生物量是 5 月份的 2 倍以上, 可以保证互花米草沼气工程原料的稳定供应; 2) 8 月份采收的互花米草中木质纤维发育尚未成熟, 被微生物破坏的难度适中, 加之易分解有机物的含量较高, 可以保证较高的产气量; 3) 8 月份采收的互花米草中金属阳离子含量适中, 较 5 月份采收的互花米草大幅降低, 与 11 月份采收的互花米草相差不大, 将其厌氧发酵时出现金属阳离子抑制的可能性大为降低; 4) 8 月份的气温较高, 离冬季尚有 2~3 个月的时间, 8 月份收获后, 残留的互花米草茎秆

尚有足够的时间长出第二茬, 保证了互花米草原料的稳定供应。

### [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] 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 a[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8): 861-866. Chen Guangyin, Zheng Zheng, Zou Xingxing, et al. Study on anaerobic digestion of *Spartina alterniflora*[J]. China Environmental Science, 2009, 29(8): 861-866. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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. Chen Guangyin, Zheng Zheng, Zou Xingxing, et al. Study on anaerobic co-digestion of cow feces and *Spartina alterniflora* [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 179-183. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邹星星, 郑正, 杨世关, 等. 汽爆预处理对互花米草厌氧发酵产气特性影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1117-1120. Zou Xingxing, Zheng Zheng, Yang Shiguan, et al. Effect of steam explosion pretreatment on biogas production characteristics of anaerobic fermentation of *Spartina alterniflora*[J]. China Environmental Science, 2009, 29(10): 1117-1120. (in Chinese with English abstract)
- [5] Yang Shiguan, Li Jihong, Zheng Zheng, et al. Characterization of *Spartina alterniflora* as feedstock for anaerobic digestion[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 33(4): 597-602.
- [6] Yang Shiguan, Li Jihong, Zheng Zheng, et al. Lignocellulosic structural changes of *Spartina alterniflora* after anaerobic mono- and co-digestion[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2009, 63, 569-575.
- [7] 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.
- [8] Segal L, Creely J J, Martin E, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. Textile Research Journal, 1959, 29: 786-794.
- [9] 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.
- [10] Symons G E, Bushwell A M. The methane fermentation of carbohydrate. Journal of the American Chemical Society[J]. 1933, 55: 2028-2039.
- [11] Komilis D P, Ham R K. The effect of lignin and sugars on the anaerobic decomposition of solid waste[J]. Waste Management, 2003, 23: 419-423.
- [12] Soto M, Mendéz R, Lema J M. Methanogenic and nonmethanogenic activity tests: theoretical basis and experimental setup[J]. Water Resource, 1993, 27: 1361-1376.
- [13] 刘粤惠, 刘平安. X 射线衍射分析原理与应用[M]. 北京:

化学工业出版社, 2003: 127—132.

[14] Zhao H, Kwak J H, Zhang Z C, et al. Studying cellulose fiber

structure by SEM, XRD, NMR and acid hydrolysis[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 68: 235—241.

## Characteristics of anaerobic digestion and physico-chemical properties of *Spartina alterniflora* at different growth stages

Chen Guangyin<sup>1,2</sup>, Zheng Zheng<sup>3\*</sup>, Chang Zhizhou<sup>1</sup>, Luo Yan<sup>2</sup>

(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 Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** To assess the physico-chemical properties and the anaerobic biodegradability of *S. alterniflora* harvested at different growth stages, a wet mesophilic anaerobic experiment was performed. With the extension of growth period, the content of easily biodegradable organic matter decreased while lignocellulose content and C/N ratio increased, moreover, lignocellulosic structure became mature and the crystallinity of cellulose decreased which made the biodegradability of *S. alterniflora* decreased with the growth stage. However, the metal cations content decreased with the growth stage, it meant that the possibility of inhibitory to anaerobic digestion was decreased. The biotransformation rate was rather low when *S. alterniflora* was directly digested. The highest value of 42.55% was obtained when *S. alterniflora* was collected at May and the lowest value of 18.76% by August. Taking the biomass and the biogas stability into consideration, August is the optimum stage for harvest.

**Key words:** biogas, anaerobic digestion, agricultural wastes, *Spartina alterniflora*, different growth stages, physico-chemical property