

# 玉米秸秆与巢湖蓝藻混合厌氧发酵的产沼气性能

彭书传<sup>1</sup>, 侯成虎<sup>1</sup>, 王 进<sup>1</sup>, 陈天虎<sup>1</sup>, 刘晓猛<sup>2</sup>, 岳正波<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230071)

**摘要:** 为了提高蓝藻的资源化利用效率, 该研究利用玉米秸秆和蓝藻混合厌氧发酵制备沼气。结果表明, 与单一的玉米秸秆或蓝藻发酵过程相比, 玉米秸秆和蓝藻混合发酵能够有效促进沼气的生成。当玉米秸秆、蓝藻和接种污泥混合挥发性固体 (volatile solid, VS) 质量比是 2:8:1, 产气效果最佳, 挥发性固体产气量为 687.3 mL/g, 其中甲烷体积分数达到 63.3%。同时该体系液相磷酸盐含量、总碳、总有机碳也最高, 表明该系统内发生为了蓝藻的有效降解。研究结果对于农业废弃物和巢湖蓝藻的资源化利用具有一定的意义。

**关键词:** 甲烷, 秸秆, 发酵, 蓝藻

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.15.028

中图分类号: S816.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-15-0173-06

彭书传, 侯成虎, 王 进, 等. 玉米秸秆与巢湖蓝藻混合厌氧发酵的产沼气性能[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 173-178.  
Peng Shuchuan, Hou Chenghu, Wang Jin, et al. Performance of anaerobic co-digestion of corn straw and algae biomass from lake Chaohu[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 173-178. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

近年来巢湖水质富营养化严重, 每年的 8、9 月份经常爆发蓝藻<sup>[1-2]</sup>。据测定, 巢湖年平均蓝藻质量浓度为 6~8 mg/L, 总蓝藻量可达 50~70 万 t (干生物量)<sup>[3]</sup>。目前应对蓝藻爆发的有效手段仍然是组织人力打捞。由于蓝藻含有藻毒素, 氮磷含量高, 如不能有效处理, 仍有可能造成二次污染<sup>[4-5]</sup>。另一方面, 蓝藻富含多糖和蛋白, 是一种生物质资源<sup>[6]</sup>。厌氧消化是目前有机废弃物的有效处理方式之一。该处理过程条件温和, 运行成本低而且可以有效地分解藻毒素。然而, 由于蓝藻氮含量较高, 碳氮比较低, 不适宜直接用于厌氧消化过程。

为了提高厌氧发酵的转化效率, 近年来不同底物混合厌氧发酵成为研究的热点之一。混合厌氧发酵是指发酵特性存在互补性的 2 种或 2 种以上原料作为厌氧发酵基质进行的生物降解过程<sup>[7-8]</sup>。一般认为混合厌氧发酵能起到稀释有毒化合物、提高营养物的平衡、增强微生物的协同效应并进而提高有机质厌氧转化效率的作用<sup>[9-10]</sup>。王寿权等对猪粪与蓝藻混合发酵进行了产甲烷效率的试验研究, 在质量比为 2.0 时产气效果最佳<sup>[11]</sup>。胡萍等对蓝藻与污泥混合厌氧发酵产沼气进行了初步研究, 在蓝藻与厌氧颗粒污泥物料比为 6:1 时, 干物质累计产甲烷量为 50 mL/g, 分别是蓝藻与消化污泥、剩余污泥混合发酵时的 1.5 倍和 2.3 倍<sup>[12]</sup>。在中国农村秸秆沼气化工程发展

过程中, 面临的一大难题是如何提高秸秆类原料厌氧消化的转化效率。鉴于此, 本文进行了玉米秸秆和巢湖蓝藻混合厌氧发酵试验, 考察了不同秸秆和蓝藻混合比例对沼气产率及产气速率的影响, 并分析了沼液及沼渣的主要组分, 以期资源化利用蓝藻和秸秆探索一条新的技术途径。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

厌氧污泥取自马鞍山市山水啤酒厂污水厌氧反应器, 用作接种微生物菌群。巢湖蓝藻取自安徽省合肥市包河区义城镇的巢湖岸边, 蓝藻自然晾干后, 密封保存, 置于-20℃冰箱中备用。玉米秸秆取自于安徽合肥市肥东县郊区农田, 秸秆经机械破碎过 1 mm 筛。试验中所用玉米秸秆、蓝藻及污泥的主要纤维素组成及成分分析分别如表 1、2 中所示。

表 1 玉米秸秆的主要成分

Table 1 Main components of corn straw %				
中性洗涤纤维	酸性洗涤纤维	纤维素	半纤维素	木质素
(77.6±1.4)	(52.9±2.1)	(43.4±1.5)	(24.6±0.7)	(7.6±0.5)

注: 表中百分数为各成分占总固体的质量分数。

表 2 试验材料的元素构成

Table 2 Elements components of substrates			
	玉米秸秆	巢湖蓝藻	接种污泥
总固体/%	(96.6±0.4)	(49.7±1.7)	(2.9±0.1)
挥发性固体/%	(94.8±0.2)	(94.0±7.3)	(56.6±0.9)
C/%	43.42	27.45	30.15
H/%	6.01	8.59	5.34
O/%	44.89	48.70	22.82
N/%	0.46	5.50	5.02
C:N	94.4:1	5:1	6:1

注: 表中“总固体/%”为总固体占原始样品的质量分数, 其他百分数为各成分占总固体的质量分数。

收稿日期: 2012-02-24 修订日期: 2012-06-15。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2011CB411904), 国家自然科学基金 (41130206), 中央高校基本科研业务费专项资金资助, 安徽省自然科学基金 (10040606Q25)。

作者简介: 彭书传 (1964-), 男, 安徽金寨, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为水污染控制技术。合肥 合肥工业大学资源与环境工程学院, 230009。Email: scpeng@vip.sina.com

## 1.2 试验方法及装置

以 250 mL 血清瓶作为反应器，蓝藻和玉米秸秆挥发性固体总质量为 50 g/L，接种污泥挥发性固体为 5 g/L。按照表 3 所列分别加入玉米秸秆、巢湖蓝藻、厌氧污泥以及 1 mL/L 的厌氧常量元素和微量元素溶液，pH 值调节至  $6.80 \pm 0.01$ ，加蒸馏水至总体积 150 mL。鼓氮气 1 min，然后用铝塞密封，置于  $35^\circ\text{C}$  空气浴摇床中。试验期间，每隔 2 d 测定产气量。

表 3 不同试验体系的初始特征

Table 3 Initial characterization of different slurries

试验编号	玉米秸秆:蓝藻:污泥(挥发性固体质量比)	$\text{NH}_4\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	磷酸盐/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	化学需氧量/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	总有机碳/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	总碳/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
0	0:0:1	22.5	18	7 755	353	1027
1	10:0:1	41	72	16 300	2 303	2442
2	8:2:1	53	68	18 568	5 478	5703
3	6:4:1	82	84	23 276	6 885	7 070
4	4:6:1	74	62	25 195	7 827	8 083
5	2:8:1	115	83	35 136	11 635	12 006
6	0:10:1	206	84	37 752	12 157	12 377

常量元素溶液的组成： $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  15 g/L； $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  125 g/L。

微量元素溶液的组成： $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.5 g/L； $\text{CaCl}_2$  1.0 g/L； $\text{NH}_4\text{Mo}_7\text{O}_{24}$  0.5 g/L； $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.5 g/L； $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.5 g/L； $\text{ZnCl}_2$  0.25 g/L； $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.35 g/L。

## 1.3 样品处理及分析

玉米秸秆和沼渣木质纤维素组分的测定采用范氏 (Van Soest) 洗涤纤维分析法<sup>[13]</sup>。沼液经离心 10 min (8 000 r/min) 后再使用  $0.45\ \mu\text{m}$  的滤膜过滤，滤液用于化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD)、磷酸盐、氨氮、总有机碳 (total organic carbon, TOC)、总碳 (total carbon, TC) 等的分析测试。固体残留为沼渣，使用去离子水洗涤 2 次之后用于组分测定。总固体 (total solid, TS) 和挥发性固体 (volatile solid, VS) 的测定参照标准方法<sup>[14]</sup>；COD 测定采用重铬酸钾法 (GB 11914-1989)<sup>[15]</sup>；磷酸盐和氨氮的测定分别采用钼锑抗分光光度法<sup>[15]</sup>和纳氏试剂分光光度法<sup>[15]</sup>；甲烷含量测定采用气相色谱法 (GC-2010, 上海岛津有限公司)，色谱柱为毛细管柱 RTX-1 型 ( $25\ \text{m}\times 0.25\ \text{mm}$ )，汽化温度  $250^\circ\text{C}$ ，检测器温度  $300^\circ\text{C}$ ，载气为氮气，进样量  $20\ \mu\text{L}$ 。TOC 和 TC 的测定利用德国 Jena C/N 2100 TOC 分析仪。元素分析分别利用氧、碳、氢、氮元素分析仪 (Vario EL cube) 分析测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆和蓝藻混合比例对累计产气量的影响

如图 1 所示，在玉米秸秆、巢湖蓝藻和接种污泥的混合厌氧发酵产气过程中，试验结束后各反应器总产气量大小顺序是：秸秆：蓝藻：污泥 (2:8:1) > 秸秆：蓝藻：污泥 (6:4:1)  $\geq$  秸秆：蓝藻：污泥 (4:6:1) > 秸秆：蓝藻：污泥 (8:2:1) > 秸秆：蓝藻：污泥 (0:10:1) > 秸秆：蓝藻：污泥 (10:0:1)。秸秆：蓝藻：污泥 (0:10:1) 和秸秆：蓝藻：污泥 (10:0:1) 的反应器相对其

他 4 个反应器总产气量较小，表明玉米秸秆和蓝藻在厌氧发酵过程中有相互促进作用。另一方面，由表 2 可知，玉米秸秆碳氮比是 94.4:1，蓝藻的碳氮比是 5:1，表明碳氮比过高或者过低，都影响蓝藻秸秆混合物的产气量。碳氮比对厌氧发酵的影响主要是通过通过对厌氧酸化阶段的影响来实现的。厌氧消化过程中，厌氧酸化和微生物生长是同时进行的，碳氮比高则厌氧酸化充分，但是微生物生长过程中需要大量的 ATP 就需要大量的氮元素，因此，碳氮比过高，抑制微生物生长从而影响厌氧发酵<sup>[16]</sup>。碳氮比过低，厌氧消化过程产生大量的氨氮，这些氨氮消耗了酸化过程中产生的氢离子，从而影响厌氧效果<sup>[17]</sup>。在蓝藻藻泥和废纸的混合厌氧发酵的试验中，厌氧发酵的最佳碳氮比范围是 20:1~25:1<sup>[18]</sup>。Smith 等进行了不同碳氮比影响厌氧酸化的试验研究，研究发现碳氮比在 20~40 之间时厌氧酸化效果较好<sup>[19]</sup>。本试验中，玉米秸秆、蓝藻和接种污泥的混合比例为 2:8:1 时，即碳氮比是 21.3:1 时混合发酵的累计产气量最大为 5 155 mL。此研究结果进一步证明了需要将碳氮比控制在一个合适的范围内，才能实现较好的混合厌氧发酵过程。

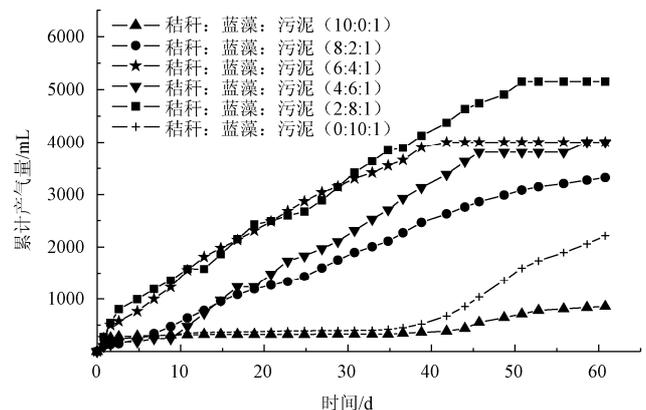


图 1 玉米秸秆、蓝藻和接种污泥混合发酵过程累计产气量  
Fig.1 Total gas production during co-digestion process of corn stover, algae and sludge

表 4 反应结束气体总产量

Table 4 Total gas production at end of reaction

试验编号	甲烷体积分数/%	累计产气量/mL	每克挥发性固体产气量/mL
0	5.75	30	40
1	51.6	854	113.9
2	42.9	3 321	442.8
3	45.1	4 002	533.6
4	48.0	4 001	533.5
5	63.3	5 155	687.3
6	64.4	2 216	295.5

注：试验编号代表的玉米秸秆、蓝藻、污泥(挥发性固体质量比)见表 3，下同。

如表 4 中所示，0 号甲烷体积分数最低是 5.75%，这由于污泥中有机物有限，因此产气量有限，甲烷含量也最低。不同体系内甲烷含量的差异可以归结于蓝藻和玉米秸秆的厌氧消化过程。作为固体有机废弃物，二者都必须先水解、酸化然后才能进入产甲烷阶段。玉米秸秆成分为纤维素、半纤维素及木质素，蓝藻主要成分为多

糖、蛋白质, 这决定了两者厌氧消化的限速步骤都是水解。而蓝藻的水解速率高于玉米秸秆, 其更容易进入产甲烷阶段。另一方面, 水解酸化阶段的主要产物是二氧化碳和有机酸, 产甲烷阶段为二氧化碳和甲烷。因此, 随着 2—5 号反应器内蓝藻组分的增多, 进入产甲烷阶段的时间也更早, 甲烷体积分数逐渐递增, 而且在 1、6 号分别是单纯的玉米秸秆和巢湖蓝藻的反应器中, 6 号反应器内甲烷体积分数比 1 号高。徐双锁等研究的稻秸和蓝藻混合发酵试验中, 随着厌氧发酵反应的进行, 甲烷体积分数先增高, 再降低<sup>[14]</sup>。本试验的 1—6 号反应系统中, 2—5 号反应系统反应已经结束, 而 1、6 号反应系统未结束。因此, 1 号反应器的平均甲烷体积分数是 51.6%, 比 2、3、4 号反应器略高。5 号反应容器的平均甲烷体积分数达到 63.3%, 甲烷平均体积分数最大的是 6 号, 达到 64.4%。而产气效果最佳的 5 号反应容器的总产气量是 5155 mL, 单位 VS 气体产率最高达 687.3 mL。翟志军等研究了巢湖蓝藻的产沼气潜力, 在 27.5℃ 左右, 厌氧污泥与新鲜蓝藻的体积比为 1:2 时, 单位 VS 的产沼气潜力为 383.33 mL/g<sup>[20]</sup>。而本试验中, 单位 VS 气体产率比上述研究结果提高了约 300 mL。巢湖蓝藻的主要组分为多糖和蛋白, 其生物可降解性要高于木质纤维素为主要组分的玉米秸秆。本研究中混合底物中蓝藻加入量由 20% 增加至 80% 时, 总产气量也由 3 321 mL 显著增加到 5 155 mL。而完全以蓝藻为底物的系统中产气量仅为 2 216 mL, 如图 1 所示, 其经历了较长的停滞期。这表明秸秆的加入具有缩短停滞期, 提高厌氧微生物活性的作用。其主要原因可以归因于 2 个方面: 调节碳氮比, 满足厌氧微生物生长需要; 玉米秸秆含有溶解性的可生物降解组分, 其迅速释放能够为厌氧微生物生长初期提供碳源, 进而微生物产生水解酶以分解利用蓝藻和秸秆进行代谢活动。因此, 6 号瓶中停滞期较长, 而蓝藻和秸秆混合消化系统内停滞期较短(图 1)。

## 2.2 混合发酵结束后沼液的特征分析

混合发酵试验前后, 分别对各反应器中沼液的 pH 值、NH<sub>4</sub>-N 浓度、磷酸盐浓度、COD、TOC 及 TC 进行了测定。表 3 反映的是试验体系反应前溶液特征, 表 5 反映的是反应结束后沼液的特征。由表 3 可以看出, 0 号的 NH<sub>4</sub>-N 质量浓度最低, 是 22.5 mg/L, 随着蓝藻比例的增大, NH<sub>4</sub>-N 质量浓度也逐渐增大, 6 号 NH<sub>4</sub>-N 质量浓度是 206 mg/L。磷酸盐质量浓度也是 0 号最低, 随着蓝藻比例的增大, 磷酸盐变化规律不明显。3、5、6 号的磷酸盐浓度较高, 达到 84 mg/L。COD、TOC、TC 的变化趋势较一致, 都随着蓝藻比例的增大, COD、TOC、TC 在溶液中的质量浓度也逐渐增大。0 号的 COD 最低是 7 755 mg/L, 6 号最高是 37 752 mg/L; 0 号的 TOC 最低是 353 mg/L, 6 号最高是 12 157 mg/L; 0 号的 TC 最低是 1 027 mg/L, 6 号最高是 12 377 mg/L。作为试验材料的蓝藻是经过自然晾干, 然后冷冻保存, 取用的过程是室温解冻, 冷冻的过程可能蓝藻细胞的液体膨胀, 细胞破裂, 解冻的过程细胞内的有机物包括氨氮就流失在反应溶液中。

表 5 沼液的特征分析

试验编号	pH 值	NH <sub>4</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	磷酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	TOC/(mg·L <sup>-1</sup> )	TC/(mg·L <sup>-1</sup> )
0	6.90	0.62	1.75	1 095	216	544
1	6.01	1.30	7.62	4 630	696	1 005
2	6.70	2.68	4.42	1 992	395	730
3	7.10	5.51	7.20	3 389	748	1 242
4	7.80	11.52	6.51	7 048	1 741	2 630
5	7.81	9.9	8.80	8 807	1 911	2 787
6	7.80	9.38	6.86	12 104	1 544	2 208

从表 5 中可以看出, 随着蓝藻浓度的增大, pH 值由 1 号反应器的 6.01 逐渐增大到 4 号反应器的 7.80, 之后虽然蓝藻浓度继续增加, 则 pH 值依然维持在 7.80 左右。1 号和 2 号反应器的沼液显酸性, 可以归因于秸秆产甲烷过程中有机物的迅速水解酸化。3—6 号反应器中 pH 值随蓝藻浓度增加而提高直至稳定, 主要由于蓝藻在厌氧消化过程中产生了大量的氨氮, 而当氨氮浓度达到一定时, 溶液中存在着 NH<sub>3</sub>+H<sup>+</sup> ↔ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的动态平衡, pH 值也就稳定在一定的范围内<sup>[16,21]</sup>。

Park 等研究的厌氧过程对藻类氨氮的释放试验中, 得出这样的结论, 厌氧过程一方面利于藻类氮元素的释放, 另一方面利于厌氧细菌的生长<sup>[22]</sup>。表 3 试验体系初始溶液中, 氨氮质量浓度最低是 22.5 mg/L, 最高是 206 mg/L。而表 5 中发酵后的沼液中的 1 号氨氮质量浓度最低是 1.30 mg/L, 4 号反应器氨氮质量浓度最高是 11.52 mg/L。这表明蓝藻释放的氨氮被利用消耗。试验结束的沼液中, 氨氮质量浓度随着蓝藻在混合物中比例的升高先升高再下降, 因此氨氮质量浓度也先升高。但是由于在 4 至 6 号反应器中 pH 值较高, 沼液中氨氮质量浓度也相对稳定。5 号反应器中碳氮比最适宜厌氧细菌的生长, 细菌生长的消耗了较多的氮, 因此 5 号沼液中氨氮质量浓度略微降低。

表 3 中, 试验体系中磷酸盐质量浓度的最小值是 0 号 18 mg/L, 最大值是 84 mg/L。而发酵结束后沼液的磷酸质量浓度都较低, 2 号最低是 4.42 mg/L, 5 号最高是 8.80 mg/L。王新民等研究了夏玉米和冬小麦秸秆对石灰性土壤磷吸附特性及磷素形态的影响, 得出了玉米秸秆和小麦秸秆对磷元素有一定的吸附作用<sup>[23]</sup>。本试验厌氧发酵过程中, 玉米秸秆的吸附作用也应该是 1-5 号反应器中磷酸盐显著减少的原因。刘荣厚等在研究沼气发酵工艺参数对沼气及沼液成分影响的试验中, 磷酸盐在发酵过程中经历了先下降再上升的过程, 这可能是反应未结束的 6 号反应器的磷酸盐的含量较低的原因; 同时研究得出微生物的菌群有自己适宜的 pH 值范围, 其分解和吸收磷元素的数量与速度因 pH 值的不同而异<sup>[24]</sup>。本试验中, 2 号反应器的沼液显酸性, 3、4、5 号反应器的沼液显碱性, 因此 2 号反应器沼液磷酸盐质量浓度 4.42 mg/L, 而 3、4、5 号反应器磷酸盐质量浓度分别为 7.20、6.50、8.80 mg/L, 在产气终止的 4 个反应器中基本接近。

表 3 中, 随着蓝藻在混合底物比例的增加, 初始试验体系中的 COD、TOC、TC 的整体趋势是逐渐升高的。在表 5 中, 反应结束时体系中的沼液中的 COD、TOC、TC

的整体趋势是随着蓝藻比例的增加先下降再升高,但6号反应器中的TOC、TC比5号略降,这应该是由6号反应器中100%的蓝藻底物消化产生了氨氮增高所导致的。2号反应器中COD、TOC和TC值最低,分别是1992、395和730 mg/L,可能原因是虽然2号反应器的酸化量较1号反应器多,但是其产气量更大。在表3中,1号的COD是16300 mg/L,6号最高是37752 mg/L。而在表5的COD一栏中1号的反应器COD值是4630 mg/L,6号100%蓝藻发酵瓶最高,达到12104 mg/L。相对于表3,表5中对应反应器的COD显著下降,这主要由于产甲烷的过程是消耗了反应体系中大量的有机物,这也是TOC和TC显著下降的原因。在表3中,1号的TOC、TC分别是2303、2442 mg/L,6号最高TOC、TC分别是12157、12377 mg/L。而在表5的COD一栏中1号反应器TOC、TC分别是696、1005 mg/L,6号反应器TOC、TC分别是1544、2208 mg/L,表5中的TOC、TC相对于表3也显著下降,大量有机物的消耗是TOC和TC显著下降的原因。蓝藻占混合底物80%的5号反应器中TOC和TC值最高,分别是1911和2787 mg/L。这表明5号反应器内仍有部分溶解性有机质未被转化为甲烷,可能是不能被产甲烷菌利用的大分子有机酸或其他难生化分解的物质<sup>[12,25]</sup>。

### 2.3 混合发酵结束后沼渣的特征分析

图2给出了产气效果较好的3组蓝藻秸秆混合物的沼渣测定分析结果,秸秆、蓝藻和污泥的混合比例分别为6:4:1、4:6:1和2:8:1。

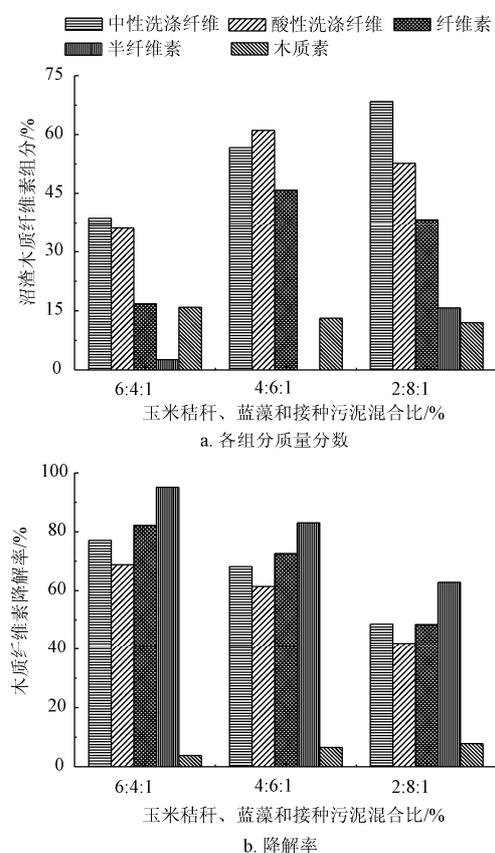


图2 不同系统中沼渣木质纤维素的含量及降解率

Fig.2 Lignocellulose content in different digester residues and their digestion efficiency

如图2所示,随着蓝藻比例的增加,中性洗涤纤维含量增加,这说明纤维类物质在沼渣干物质中比例增加,出现这种情况的原因主要是蓝藻中富含多糖、蛋白质,在厌氧发酵过程中更容易被分解利用,秸秆中的木质纤维素相对分解效率较低,进而造成中性洗涤纤维含量升高<sup>[26-28]</sup>。玉米秸秆中的木质素质量分数为7.6%,而且在厌氧消化过程中几乎不发生降解,因此随着添加的蓝藻比例增加,沼渣中木质素的逐渐减小<sup>[29-30]</sup>。对反应前后的木质纤维素等的降解率研究表明,半纤维素的分解效率最高,其次为纤维素,而木质素几乎不发生分解。另外,蓝藻加入比例的提高,木质纤维素各组分的分解效率逐渐降低,这表明蓝藻对木质纤维素的分解机制有显著影响。一方面,由于蓝藻较木质纤维素的厌氧生物可降解性更好,微生物更容易利用蓝藻;另一方面也可能是蓝藻或其水解产物对微生物的水解酶活性有影响。具体的作用机制尚需进一步研究。

### 3 结论

和玉米秸秆或巢湖蓝藻为单一底物的系统相比,混合厌氧发酵体系的产气效率和产气速率均显著提高。当玉米秸秆、蓝藻和接种污泥的挥发性固体(VS)质量分数是2:8:1时,厌氧产沼气效果最好,混合底物单位挥发性固体产率可达到687.3 mL/g,甲烷体积分数为63.3%,纤维素和半纤维素降解率分别为48.5%和62.8%。混合厌氧发酵过程中,秸秆半纤维素的分解效率远远大于纤维素,随着蓝藻加入量的增加,纤维素和半纤维素的降解效率逐渐降低。

#### [参考文献]

- [1] 何开丽. 巢湖富营养化现状与治理对策[J]. 环境保护, 2002(4): 22-24.  
He Kaili. Study of eutrophication control in chao lake[J]. Environmental protection, 2002(4): 22-24. (in Chinese with English abstract)
- [2] 程真文. 巢湖藻类污染的研究和对策[J]. 水处理技术, 2003, 29(4): 247-248.  
Cheng Zhenwen. Countermeasures of algae pollution of Chaohu lake[J]. Technology of water treatment., 2003, 29(4): 247-248. (in Chinese with English abstract)
- [3] 蒋雪英. 巢湖“水华”的形成和防治对策[J]. 内陆水产, 2000, 12(38): 38-39.  
Jiang Xueying. “Water bloom” formation and Prevention Countermeasures in Chaohu lake[J]. Inland aquatic product, 2000, 12(38): 38-39. (in Chinese with English abstract)
- [4] 韩志国, 武宝王, 郑解生, 等. 淡水水体中的蓝藻毒素研究进展(综述)[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2001, 22(3): 129-134.  
Han Zhiguo, Wu Baosheng, Zheng Jiesheng, et al. Advance research on cyanobacterial toxins in freshwater bodies(A review)[J]. Journal of Jinan University: Natural Science, 2001, 22(3): 129-134. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨海麟, 李克朗, 张玲, 等. 蓝藻资源无害化利用技术的

- 研究[J]. 生物技术, 2008, 18(6): 95—98.
- Yang Hailin, Li Kelang, Zhang Ling, et al. Study on the using of cyanobacteria[J]. Biotechnology, 2008, 18(6): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [6] Zhou W G, Cheng Y L, Li Yun, et al. Novel fungal pelletization-assisted technology for algae harvesting and wastewater treatment[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2012, 167(2): 214—228.
- [7] Ellis J T, Hengge N N, Sims R C, et al. Acetone, butanol and ethanol production from wastewater algae[J]. Bioresource Technol, 2012, 111: 491—495.
- [8] Zhang Q T, Ma J, Qiu G Yu. Potential energy production from algae on marginal land in China[J]. Bioresource Technol, 2012, 109: 252—260.
- [9] Thomsen M S, Bettignies T, Wernberg Thomas. Harmful algae are not harmful to everyone[J]. Harmful Algae, 2012, 16: 74—80.
- [10] Yan Q, Zhao M X, Miao H F, et al. Coupling of the hydrogen and polyhydroxyalkanoates (PHA) production through anaerobic digestion from Taihu blue algae[J]. Bioresource Technol, 2010, 101(12): 4508—4512.
- [11] 王寿权, 严群, 缪恒锋, 等. 接种比例对猪粪与蓝藻混合发酵产甲烷的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 172—176.
- Wang Shouquan, Yan Qun, Miao Hengfeng, et al. Effect of inoculum to substrate ratios on methane production in mixed anaerobic digestion of pig mature and blue-green algae[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 172—176. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡萍, 严群, 宋任涛, 等. 蓝藻与污泥混合厌氧发酵产沼气的初步研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(3): 591—563.
- Hu Ping, YanQun, Sun Rentao, et al. Biogas production through anaerobic digestion from the mixture of blue algae and sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(3): 591—563. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王玉万, 徐文玉. 木质纤维素固体基质发酵物中半纤维素、纤维素和木质素的定量分析程序[J]. 微生物学通报, 1987(2): 82—84.
- Wang Yuwan, Xu Wenyu. Quantitative analysis program of lignocellulose solid substrate fermentations of hemicellulose, cellulose and lignin[J]. Microbiology, 1987(2): 82—84. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐双锁, 刘爱民, 蔡欣, 等. 稻秸与蓝藻混合厌氧发酵产沼气试验研究[J]. 安徽师范大学学报, 2011, 34(3): 260—264.
- Xu Shuangso, Liu Aiming, Cai Xin, et al. Study on the Anaerobic Fermentation With Rice Straw and Blue Algae[J]. Journal of Anhui Normal University, 2011, 34(3): 260—264. (in Chinese with English abstract)
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] Ehimen E A, Carrington C G, Birch E J, et al. Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process[J]. Applied Energy, 2011, 88(10): 3454—3463.
- [17] Sterling M C, Lacey R E, Engler C R, et al. Effects of ammonia nitrogen on H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> production during anaerobic digestion of dairy cattle manure[J]. Bioresource Technol, 2001, 77 (1): 9—18.
- [18] Yen H W, Brune D E. Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane[J]. Bioresource Technol, 2007, 98 (1): 130—134.
- [19] Smith A D, Holtzapple M T. Investigation of the optimal carbon-nitrogen ratio and carbohydrate-nutrient blend for mixed-acid batch fermentations[J]. Bioresource Technol, 2011, 102 (10): 5976—5987.
- [20] 翟志军, 马欢, 李军, 等. 巢湖蓝藻产沼气的试验研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(12): 5084—5087.
- Zhai Zhijun, Ma Huan, Li Jun, et al. Study on the production biogas with blue algae from Chaohu Lake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(12): 5084—5087. (in Chinese with English abstract)
- [21] Gustin S, Marinsek L R. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89 (1): 61—66.
- [22] Park J, Jin H F, Lim B R, et al. Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga *Scenedesmus* sp[J]. Bioresource Technol, 2010, 101(22): 8649—8657.
- [23] 王新民, 侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 440—443.
- Wang Xinming, Hou Yanlin. Effects of organic matter addition on the characteristics of phosphate asorption and forms of phosphorus in a calcareous soil[J]. Acta scientiae ciraumstant, 2004, 24(3): 440—443. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘荣厚, 郝元元, 叶子良, 等. 沼气发酵工艺参数对沼气及沼液成分影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 85—88.
- Liu Ronghou, Hao Yuanyuan, Ye Ziliang, et al. Experimental research on technical parameters of anaerobic fermentation for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(10): 85—88. (in Chinese with English abstract)
- [25] Jeong T Y, Cha G C, Seo Y C, et al. Effect of COD/sulfate ratios on batch anaerobic digestion using waste activated sludge. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2008, 14 (5): 693—697.
- [26] Jaihanipour A, Niklasson C, Taherzadeh M J. Enhancement of solubilization rate of cellulose in anaerobic digestion and Drawbacks[J]. Process Biochem, 2011, 46 (7): 1509—1514.
- [27] Siegert I, Banks C. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors[J]. Process Bioche, 2005, 40 (11): 3412—3418.
- [28] Yang Y G, Tsukahara K, Yagishita T, et al. Performance of a fixed-bed reactor packed with carbon felt during anaerobic digestion of cellulose[J]. Bioresource Technol, 2004, 94 (2): 197—201.

- [29] Yang S G, Li J H, Zheng Z, et al. Lignocellulosic structural changes of *Spartina alterniflora* after anaerobic mono- and co-digestion[J]. International Biodeter Biodegrad, 2009, 63 (5): 569—575.
- [30] Teater C, Yue Z B, MacLellan J, et al. Assessing solid digestate from anaerobic digestion as feedstock for ethanol production[J]. Bioresource Technol, 2011, 102 (2): 1856—1862.

## Performance of anaerobic co-digestion of corn straw and algae biomass from lake Chaohu

Peng Shuchuan<sup>1</sup>, Hou Chenghu<sup>1</sup>, Wang Jin<sup>1</sup>, Chen Tianhu<sup>1</sup>, Liu Xiaomeng<sup>2</sup>, Yue Zhengbo<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Academy of Environmental Science Research, Hefei 230071, China)

**Abstract:** To enhance the resourcelization of algae biomass, the corn stover was used as the co-digestion substrate for biogas production. Results showed that the biogas yield was improved significantly in the co-digestion process compared to that using only corn stalk or algae biomass. When the ratio of corn stalk, algae biomass and sludge was 2:8:1, a maximum value of 687.3 mL/g VS with methane content of 63.3% was achieved. Simultaneously in the aqueous phase, the concentration of phosphate, total carbon and total organic carbon were the highest. Results indicated that digestion efficiency of algae biomass was promoted significantly in this case.

**Key words:** methane, straw, fermentation, blue-green algae