

脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理太湖腐熟蓝藻性能

余亚琴^{1,2}, 吕锡武^{1*}, 吴义锋¹, 许丽娟¹

(1. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096; 2. 盐城工学院土木学院, 盐城 224051)

摘要:为实现太湖腐熟蓝藻的资源化处理, 研究新型厌氧反应器——脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理太湖腐熟蓝藻的效能及其运行特点。以城市污水处理厂剩余污泥为种泥, 污泥接种量混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 为 20 g/L, 进水化学需氧量 (COD) 质量浓度 2 000 mg/L, 水力停留时间 (HRT) 为 5 d, 中温(30~35 °C)厌氧条件下, 反应器可在 30 d 内成功启动并达到初步稳定运行, COD 去除率达到 60%左右, 产气率为 0.08 L/(L·d); 当进水 COD 容积负荷 3.5 kg/(m³·d)时, 仍能实现安全稳定运行, COD 去除率可以稳定在 80%左右, 产气率在 1.2 L/(L·d), 表明反应器抗冲击负荷能力较强, 同时沼液中藻毒素 (TMC-LR、EMC-LR) 去除率为 90%以上。稳定运行期间反应器厌氧颗粒污泥对腐熟蓝藻甲烷化的最大比基质降解速率为 1.253 mg/(mg·d), 半饱和常数为 11 770 mg/L, 甲烷产率系数为 0.256 mL/mg; 电镜观测发现稳定运行期颗粒污泥以产甲烷的八叠球菌为主, 伴有丝状菌和杆菌等, 同时发现其蛋白酶、TTC-脱氢酶和辅酶 F₄₂₀ 活性相对较高。研究发现脉冲循环式渠槽厌氧反应器能够有效地处理太湖蓝藻, 这对其资源化利用具有一定的指导意义。

关键词: 厌氧消化, 动力学, 酶活性, 腐熟蓝藻, 容积负荷

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.05.024

中图分类号: X5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-05-0179-06

余亚琴, 吕锡武, 吴义锋, 等. 脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理太湖腐熟蓝藻性能[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 179-186.

Yu Yaqin, Lü Xiwu, Wu Yifeng, et al. Capability of pulse cycle corridor anaerobic reactor treating composted algae water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 179-186. (in Chinese with English abstract)

0 引言

太湖流域某些水体富营养化引发蓝藻水华, 直接影响水的质量和利用度。及时打捞与收集蓝藻是迅速减少水体蓝藻浓度的常用手段, 同时能将湖中氮磷去除^[1]。但是大多打捞后的蓝藻被抛弃在打捞站附近的沟渠及湖边洼地, 没有及时有效处置, 不仅使水质恶化、腐烂发臭影响水体周边环境, 而且会发生藻毒素释放^[2-4]; 分解产生的氮、磷、藻毒素还会因为雨水冲刷、通过地表径流或淋溶再次流入太湖, 引发二次污染。因此, 如何处置打捞的蓝藻就成为主要关注的问题。目前国内外对蓝藻资源化利用主要有制备饲料^[5], 提取藻蓝蛋白^[6-7]可作为生物体内荧光跟踪物质用于临床医学诊断, 提取蓝藻中生物活性物质如蓝藻的抗病毒活性成分用于医

疗^[8], 提取胞外多糖用于工业生产^[9]和厌氧发酵生产沼气^[10]等。

打捞的太湖蓝藻水经过自然堆放腐熟成为一种典型的高浓度的有机废水, 厌氧生物处理技术被认为是处理高浓度有机废水最有效的方法^[11], 同时可以获得生物质能^[12-13]。但由于蓝藻具有伪空胞, 在反应器中容易上浮并结壳, 从而影响产气效率, 降低反应器处理效果^[14]。因此设计高效适合腐熟蓝藻厌氧发酵产气的厌氧反应器成为研究的热点。本文针对太湖熟蓝藻的特性, 设计脉冲循环式渠槽厌氧反应器, 考察其处理腐熟蓝藻运行特性及影响因素, 以期在蓝藻资源化处置中提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验地点位于宜兴周铁镇符渚港东南大学太湖蓝藻研究基地。脉冲循环式渠槽厌氧反应器见图 1, 装置主体用高强度、耐热耐压的厚度为 5 mm PVC 板制成。反应器由 3 部分组成: 主反应区 (渠槽), 上位池、下位池。主反应区 (渠槽) 尺寸 (长×宽×高) 为 600 mm×1 200 mm×300 mm, 净容积 216 L; 其分 4 层, 每层分隔成 3 条渠槽, 每条

收稿日期: 2012-09-27 修订日期: 2012-12-14

基金项目: 国家水污染重大科技专项 (2009ZX07101-011), 江苏省太湖治理科研项目 (TH2010206)

作者简介: 余亚琴 (1979-), 女, 江苏盐城, 博士, 水处理技术研究。南京 东南大学能源与环境学院, 210096。Email: yad981@163.com

*通信作者: 吕锡武 (1954-), 男, 安徽宣城, 教授、博导, 水处理理论及技术研究。南京 东南大学能源与环境学院, 210096。

Email: xiwulu@seu.edu.cn

槽宽 100 mm。上位池是暂时贮存脉冲用水，直径 500 mm，高 250 mm。下位池接纳脉冲跌水，同时还具有泥水分离和富集接种污泥的功能。下位池高为 650 mm，长宽均为 400 mm，最大水深 600 mm，最大容量 82 L。腐熟蓝藻水用泵打入上位池，通过管道与主反应区连接，脉冲出水跌入下位池，出水通过泵回流至上位池，完成一次循环。反应器设置自动控制装置及自动温度控制加热系统。

颗粒污泥甲烷化动力学研究采用图 2 试验装置^[15]。发酵瓶为 500 mL 的抽滤瓶，分别留有沼液取样口和气体收集口，通过恒温振荡器使其在 35℃、100 r/min 条件下反应。试验采用排饱和氢氧化钠溶液法集气。发酵瓶中分别加入 200 mL 的颗粒污泥和 200 mL 的腐熟蓝藻。颗粒污泥取自稳定运行期脉冲循环式渠槽厌氧反应器内。腐熟蓝藻取自打捞站，根据试验配置其 COD 质量浓度分别为 578、813、1 086、1 459、2 705 及 3 196 mg/L。进料完毕后，使之混合均匀，氮气吹扫 5 min 以排除空气，然后迅速密封抽滤瓶。实时取样测定混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 和化学需氧量 (COD)。

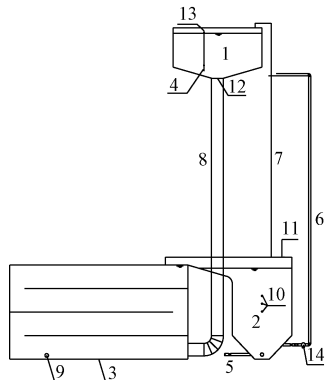


图 1 脉冲循环式渠槽厌氧反应器结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the pulse cycle corridor reactor

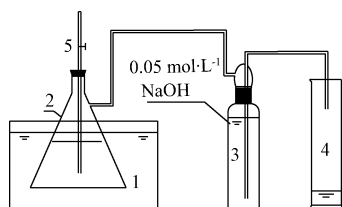


图 2 颗粒污泥产甲烷化动力学研究试验装置
Fig.2 Sketch of the experimental equipment on anaerobic the methanogenesis kinetics of granular sludge

1.2 试验水质

试验所用太湖腐熟蓝藻取自宜兴市周铁镇符渚港太湖蓝藻打捞站蓝藻堆放池，其自然腐熟 5~7 d，水色为棕黄色，水质情况见表 1。蓝藻化学需氧量 (COD)、悬浮固体 (SS) 浓度较高，同时由于在蓝藻堆放池自然腐熟，水质呈弱酸性。

表 1 腐熟蓝藻水质

Table 1 Characteristics of composted algae water				
化学需氧量 COD/(mg·L ⁻¹)	总氮 TN/(mg·L ⁻¹)	总磷 TP/(mg·L ⁻¹)	悬浮固体 SS/(mg·L ⁻¹)	pH 值
3 000~6 600	55~125	12~46	365~1 002	5.8~7.0

1.3 分析项目与方法

水质分析方法采用《水和废水监测分析方法》^[16]，其中 COD：重铬酸钾法，污泥 (MLVSS 采用重量法测定)，沼气采用湿式防腐气体流量计 (长春汽车滤清器有限责任公司) 计量。藻毒素采用高效液相色谱 (HPLC) 法测定总微囊藻毒素 (TMC-LR)、胞外微囊藻毒素 (EMC-LR)^[17]。厌氧颗粒污泥经预处理后采用 XL30E 型扫描电子显微镜分析厌氧微生物^[18]。TTC-脱氢酶采用 TF 定量分析法^[19]、蛋白酶采用 McDonald-Chen 分光光度法^[20]、辅酶 F₄₂₀ 采用分光光度法^[21]。

1.4 试验运行控制条件

脉冲循环式渠槽厌氧反应器厌氧接种污泥取自宜兴市清源污水处理厂的剩余污泥，污泥接种量 MLVSS 为 20 g/L。试验采用间歇式进水方式，通过控制进水 COD 质量浓度和水力停留时间 (HRT) 的方式来逐步提高容积负荷。整个过程经历污泥驯化启动期、容积负荷提高期、稳定运行期 3 个阶段，历时 90 d。污泥驯化启动期：采用低浓度低流量的进料方式，控制进水 COD 质量浓度在 1 000~2 000 mg/L 左右，HRT 为 5 d，脉冲时间为 50 min，容积负荷为 0.2~0.4 kg/(m³·d) 左右，驯化时间为 30 d；容积负荷提高期：进水 COD 质量浓度在 2 400~6 000 mg/L，HRT 为 1.5~3 d，脉冲时间 50~35 min，容积负荷为 0.8~3.5 kg/(m³·d)，持续 35 d；稳定运行期：进水 COD 质量浓度在 6 000~6 600 mg/L，HRT 为 36 h，脉冲时间为 35 min，容积负荷在 4.0 kg/(m³·d) 左右，运行 25 d。

2 结果与分析

2.1 脉冲循环式渠槽厌氧反应器腐熟蓝藻 COD 去除效果

如图 3、4 所示在驯化启动阶段反应器进水 COD 为 1 000~2 000 mg/L，出水 COD 在 500~965 mg/L，去除率为 50% 左右，反应器的容积负荷较低，为 0.2~0.4 kg/(m³·d)。这主要考虑到太湖蓝藻细胞

壁外面的胶质（黏胶）的天然屏障使蓝藻降解较困难。试验通过增加水力停留时间来降低容积负荷，从而促进颗粒污泥的生长，提高反应器对太湖腐熟蓝藻的处理效果。在负荷提高阶段，COD 容积负荷从 $0.8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 上升到 $3.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ，进水 COD 质量浓度为 $2\,400 \sim 6\,000 \text{ mg}/\text{L}$ ，通过调节反应器的脉冲时间（从 50 min 缩短到 35 min ），延长太湖蓝藻

在反应器渠槽流行时间，也就提供更多厌氧微生物与蓝藻接触机会，太湖蓝藻降解 COD 的去除率最终达到 80% 左右。在稳定运行阶段，水力停留时间为 36 h ，进水 COD 质量浓度在 $6\,000 \sim 6\,600 \text{ mg}/\text{L}$ 左右，COD 容积负荷达到 $4.0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 左右时，反应器 COD 的去除率稳定达到 80% ，出水 COD 质量浓度在 $1\,500 \text{ mg}/\text{L}$ 以内。

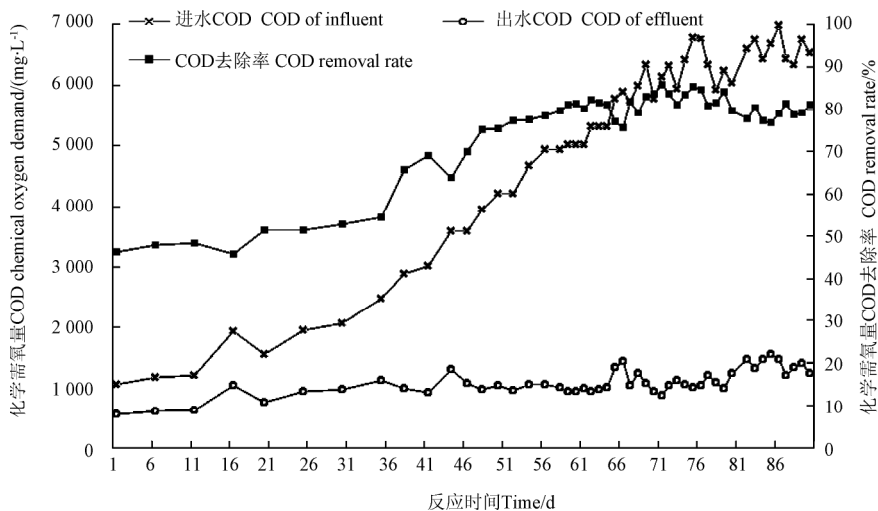


图 3 脉冲循环式渠槽厌氧反应器对 COD 去除规律

Fig.3 Variations in COD removal of pulse cycle corridor anaerobic reactor

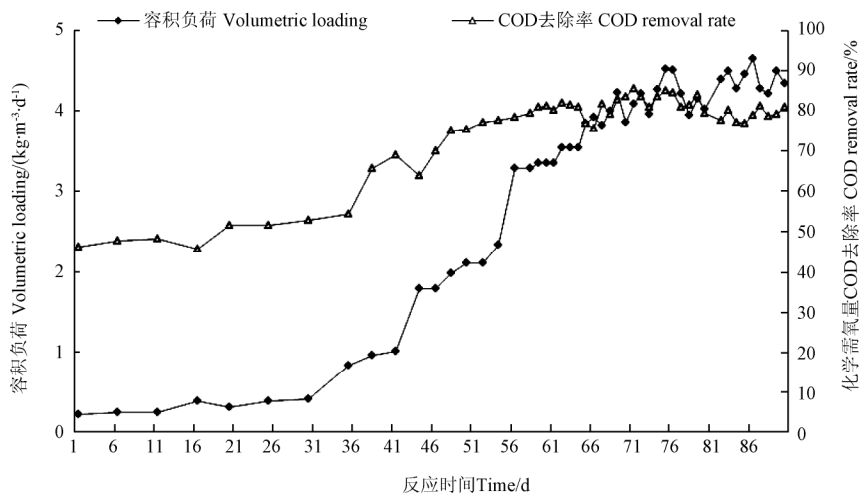


图 4 脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理太湖蓝藻时 COD 去除率与容积负荷关系

Fig.4 Relationship between volumetric loading and COD removal of pulse cycle corridor anaerobic reactor

随着脉冲循环式渠槽厌氧反应器运行时间的增长，颗粒污泥中的有机成分和活性有所提高，微生物更加成熟。在进水 COD 浓度较高，水力停留时间较短时，反应器可以通过缩短脉冲时间，增加蓝藻在反应器的循环次数，延长蓝藻在反应器渠槽流动的时间，增加与活性污泥接触的机率，提高反应器处理效率，因此其在处理太湖腐熟蓝藻时具有良好的抗负荷冲击能力。

2.2 系统运行产气速率的变化规律

脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理太湖腐熟蓝藻试验过程中容积负荷与产气率的关系见图 5。在驯化阶段，前 15 d ，反应器的产气速率比较低，大约为 $0.05 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ，这说明反应器中产甲烷菌的活性相对较弱。经过 30 d 左右驯化进入负荷提高期，反应器的产气率随着容积负荷的增大而迅速提高。容积负荷从 0.8 上升到 $3.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时，产气率达到

1.10 L/(L·d)。在稳定运行期, 为提高反应器处理太湖腐熟蓝藻的效率, HRT 调为 36 h, 通过缩短脉冲时间, 增加蓝藻在反应器的脉冲次数, 克服蓝藻在容积负荷大的条件下, 蓝藻极易上浮并结壳, 使其

在渠槽中与污泥充分接触, 提高反应器的产气速率, 反应器的产气率达到 1.20 L/(L·d), 说明通过脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理腐熟蓝藻能够实现蓝藻资源利用。

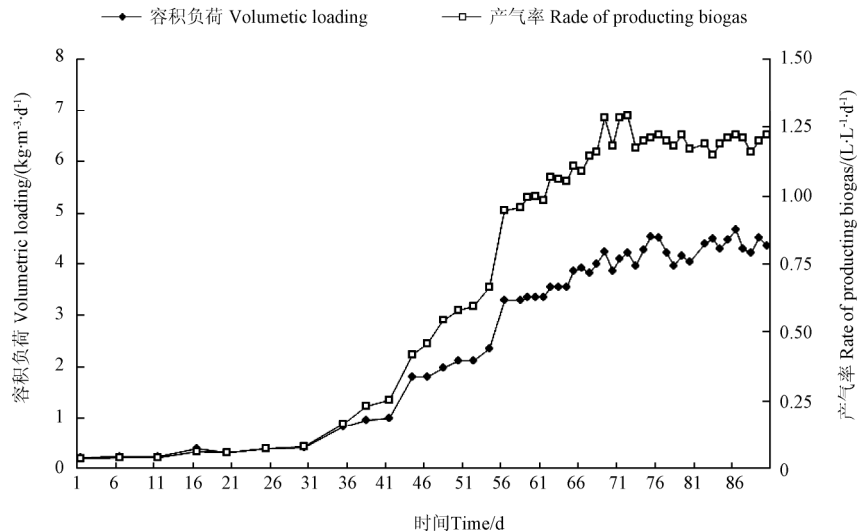


图 5 脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理太湖蓝藻时产气率与容积负荷关系

Fig.5 Relationship between biogas production rate and volumetric loading of pulse cycle corridor anaerobic reactor

2.3 系统运行中藻毒素去除

蓝藻中的微囊藻属 (*Microcystis*)、鱼腥藻属 (*Anabaena*)、颤藻属 (*Oscillatoria*) 及念珠藻属 (*Nostoc*) 的某些微藻能够产生次生代谢产物微囊藻毒素 (*Microcystin*, MC)。而微囊藻毒素由于毒性大, 分布广, 结构稳定, 从而成为水环境中的潜在危害物质^[22-23]。反应器在稳定运行期间对腐熟蓝藻中总微囊藻毒素 (TMC-LR) 和胞外藻毒素 (EMC-LR) 的降解效果较好。腐熟蓝藻水中 TMC-LR、EMC-LR 的质量浓度分别在 517~345、311~205 $\mu\text{g/L}$, 通过脉冲循环式渠槽厌氧反应器, 出水中 TMC-LR、EMC-LR 的质量浓度分别降低至 31~15、21~11 $\mu\text{g/L}$, 平均去除率均达到 90% 以上。反应器对腐熟蓝藻的藻毒素具有良好的去处效果主要由于其培养出大量的厌氧颗粒污泥对进水中的蓝藻有效拦截, 同时反应器中富集培养大量土著菌种进一步降解蓝藻中的藻毒素。

2.4 脉冲循环式渠槽厌氧反应器颗粒污泥特性

2.4.1 反应器中颗粒污泥的变化

脉冲循环式渠槽厌氧反应器处理太湖腐熟蓝藻运行至第 10 天, 反应器中就出现少量直径在 1 mm 左右的黑色球状颗粒污泥。随反应器的运行, 渠槽中颗粒污泥的体积逐渐增大, 污泥的浓度不断增加。在第 70 天时通过扫描电子显微镜 (SEM) 对反应器中颗粒污泥进行观测 (如图 6) 发现, 颗

粒污泥中有大量的微生物, 生物相复杂, 其中以产甲烷的八叠球菌为主, 同时还有丝状菌和杆菌等, 它们相互缠绕在颗粒污泥内部形成网状结构。甲烷八叠球菌所形成的颗粒污泥较紧密, 相对密度大, 沉降性能好, 具有较强的产甲烷能力^[24]。

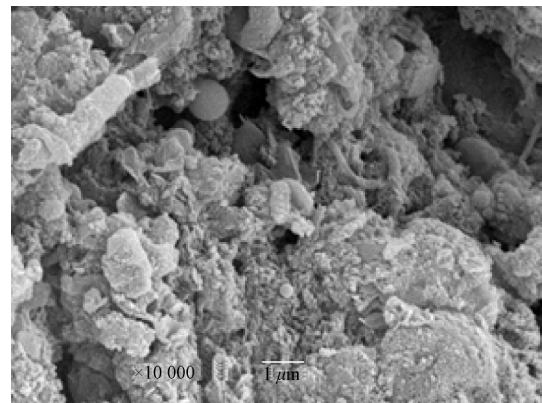


图 6 扫描电镜观察反应器中颗粒污泥

Fig.6 SEM of sludge surface

2.4.2 颗粒污泥的甲烷化动力学模型

Monod 模型是废水生物处理工程中的基本动力学模型之一, 被广泛应用于描述各种有机废水生物处理过程中的基质降解规律和微生物生长规律^[25], 其表达式如下

$$V = \frac{1}{X} \frac{d(S - S_m)}{dt} = V_{\max} \frac{S - S_m}{K_s + S - S_m} \quad (1)$$

式中, V 为比基质降解(COD/VSS)速率, $\text{mg}/(\text{mg}\cdot\text{h})$; V_{\max} 为最大比基质降解 (COD/VSS) 速率, $\text{mg}/(\text{mg}\cdot\text{h})$; S 为基质质量浓度, mg/L ; S_m 为难生物降解基质质量浓度, mg/L ; K_s 为半饱和常数, mg/L ; X 为厌氧微生物浓度, mg/L ;

本试验所用的基质为腐熟 7 d 左右蓝藻藻浆, 忽略难降解物质, 上述公式可简化为

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (2)$$

进一步整理得

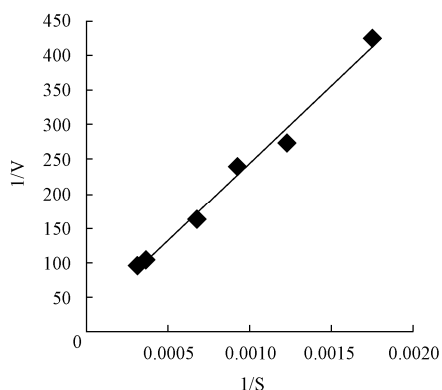
$$\frac{1}{V} = \frac{K_s}{V_{\max}} \frac{1}{S} + \frac{1}{V_{\max}} \quad (3)$$

根据式 (3), 结合基质降解动力学试验数据 (见表 2), 对 $1/V \sim 1/S$, 进行直线拟合, 如图 7 所示, 得到脉冲循环式渠槽厌氧反应器培养的颗粒污泥对腐熟蓝藻降解动力学方程式为

$$V = 0.0522 \frac{S}{11770 + S} \quad (4)$$

表 2 不同基质浓度下的比基质降解速率和比产甲烷速率
Table 2 Specific substrate degradation rate and specific methane production rate under different concentrations

基质质量浓度 substrate concentrations/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	比基质降解 (COD/VSS) 速率 specific substrate degradation rate/ ($\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	比产甲烷 (CH_4/VSS) 速率 specific methane production rate/ ($\text{mL}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
570	0.00237	0.00689
816	0.00357	0.0099
1075	0.00418	0.00112
1465	0.00615	0.00164
2715	0.00966	0.00249
3190	0.01054	0.00259



注: S 为基质质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, V 为比基质降解速率, $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$

图 7 $1/V \sim 1/S$ 拟合直线

Fig.7 Fitting curve between $1/V$ and $1/S$

脉冲循环式渠槽厌氧反应器培养的颗粒污泥在处理腐熟 7 d 左右蓝藻时, 其 V_{\max} 为 $0.0522 \text{ mg}/(\text{mg}\cdot\text{h})=1.253 \text{ mg}/(\text{mg}\cdot\text{d})$, $K_s=11770 \text{ mg}/\text{L}$, 决定系数 $R^2=0.9896$ 。王向东等^[26]在 55°C 条件下测得制

酒废糟液最大比基质降解速率为 $4.97 \text{ mg}/(\text{mg}\cdot\text{d})$, K_s 为 $10093 \text{ mg}/\text{L}$; 徐向阳等^[27]在 28°C 条件下测得食糖废水产甲烷过程中最大比基质降解速率为 $1.25 \text{ mg}/(\text{mg}\cdot\text{d})$, 本研究采用 Monod 模型的修正模拟试验结果所得的动力学参数与王向东、徐向阳等研究的部分结果在数量级范围之内, 从而进一步证明, 腐熟蓝藻降解过程可采用 Monod 模型来描述。同时可以发现本试验中脉冲渠槽式厌氧反应器所培养的厌氧颗粒污泥的 K_s 相对较大, V_{\max} 相对较小, 这可能和所反应的基质不同有关。

试验过程中忽略衰减微生物对产甲烷速率的影响, 产甲烷速率与比基质降解速率之间的关系如式 (5) 所示^[28]。

$$\frac{dG}{X dt} = y \left(\frac{dS}{X dt} \right) \quad (5)$$

式中, dG/Xdt 为比产甲烷速率, 单位时间内单位污泥量的甲烷产量, $\text{mL}/(\text{mg}\cdot\text{h})$; y 为甲烷产率系数, 去除单位 COD 的甲烷产量, mL/mg ; dS/Xdt 为比基质降解 (COD/VSS) 速率, $\text{mg}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ 。

根据式 (5) 和表 2 试验结果, 对比产甲烷速率和比基质降解速率进行线性拟合见图 8, 可得甲烷产率系数 y 为 $0.256 \text{ mL}/\text{mg}$, 太湖蓝藻的理论产甲烷系数为 $0.35 \text{ mL}/\text{mg}$ ^[14], 是理论值的 73%。比产甲烷速率与比基质降解速率之间有显著相关性, 其决定系数为 0.9909。

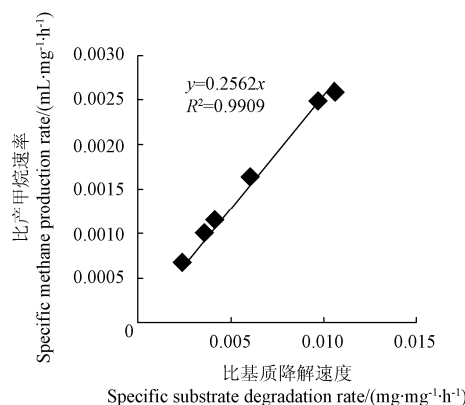


图 8 比产甲烷速率与比基质降解速率拟合直线

Fig.8 Fitting curve between specific methane production rate and specific substrate degradation rate

2.4.3 颗粒污泥酶活性变化

在厌氧反应器中, 蓝藻的消化过程与甲烷化过程相互联系, 厌氧微生物所产生的各种酶参与不同的消化过程及甲烷化过程。通过测量颗粒污泥酶的活性, 可进一步探求脉冲循环式渠槽厌氧反应器中颗粒污泥蓝藻消化产甲烷的能力。试验选择以蛋白酶活力代表水解过程的酶行为; TTC-脱氢酶活力代表厌氧系统内微生物的酶行为; 辅酶 F_{420} 含量代表

产甲烷厌氧微生物的产甲烷活性。

反应器中颗粒污泥酶活性如图 9 所示。颗粒污泥的蛋白酶活性在启动期间随时间的增长呈上升趋势,这说明反应器中水解酸化腐熟蓝藻在逐步提高。稳定期蛋白酶值在 $25.0\sim 26.4\ \mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g})$,这表明反应器内水解过程的酶行为较活跃;TTC-脱氢酶在启动初期略有下降,这可能是因为在初期反应器中含有一定的氧气,但随着反应历时的延长,反应器

中厌氧系统内微生物的脱氢酶值呈上升趋势,最后在 $153\sim 180\ \mu\text{g}/(\text{min}\cdot\text{g})$ 范围内波动;辅酶 F_{420} 是产甲烷细菌所特有的一种辅酶,可作为低电位电子转移的载体,在甲烷的形成过程中起着重要作用^[29-30]。反应器稳定期颗粒污泥辅酶 F_{420} 在 $0.45\sim 0.55\ \mu\text{mol}/\text{g}$,说明污泥的甲烷活性较高。随着脉冲循环式渠槽厌氧反应器运行时间的增长,颗粒污泥中的有机成分和活性得到有效提高,微生物更为成熟。

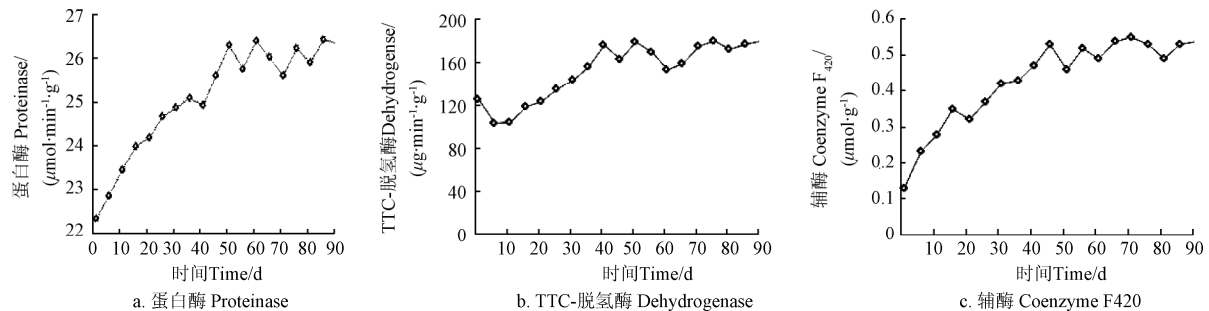


图 9 酶活力的变化

Fig.9 Variation of enzyme activities

3 结论

1) 脉冲循环式渠槽厌氧反应器能高效、稳定地处理太湖腐熟蓝藻。当水力停留时间 HRT 为 $3\sim 1.5\ \text{d}$ 、COD 质量浓度为 $2\ 400\sim 6\ 000\ \text{mg}/\text{L}$, 脉冲时间为 $35\ \text{min}$ 腐熟蓝藻 COD 去除率 80%左右,产气率达到 $1.2\ \text{L}/(\text{L}\cdot\text{d})$, 沼液中 TMC-LR、EMC-LR 平均去除率均达到 90%以上。

2) 本试验用 Monod 模型修正模拟得到反应器稳定运行期间厌氧颗粒污泥对腐熟蓝藻的甲烷化的最大比基质降解速率为 $1.253\ \text{mg}/(\text{mg}\cdot\text{d})$, 半饱和常数为 $11\ 770\ \text{mg}/\text{L}$, 甲烷产率系数为 $0.256\ \text{mL}/\text{mg}$, 为蓝藻理论甲烷产率系数的 73%。

3) 脉冲循环式渠槽厌氧反应器稳定运行后培养大量厌氧颗粒污泥,其蛋白酶、TTC-脱氢酶和辅酶 F_{420} 活性较高,能够有效地降解太湖腐熟蓝藻。

[参 考 文 献]

[1] 韩士群, 严少华, 王震宇, 等. 太湖蓝藻无害化处理资源化利用[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 431—438. Han Shiqun, Yan Shaohua, Wang Zhenyu, et al. Harmless disposal and resources utilizations of Taihu lake blue algae[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3): 431—438. (in Chinese with English abstract).

[2] Chen Xiaoguo, Yang Xia, Yang Lili. An effective pathway for the removal of microcystin LR via anoxic biodegradation in lake sediments[J]. Water Research, 2010, 44(6): 1884—1892.

[3] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu lake[J]. Science, 2007, 317(5842): 1166.

[4] 戴瑾瑾, 陈德辉, 高云芳, 等. 蓝藻毒素的研究概况[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(1): 90—97. Dai Jinjin, Chen Dehui, Gao Yunfang, et al. Research Progress on Cyanobacterial Toxin[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2009, 27(1): 90—97. (in Chinese with English abstract).

[5] Tripathi R D, Dwivedi S, Shukla M K, et al. Role of blue green algae biofertilizer in ameliorating the nitrogen demand and flyash stress to the growth and yield of rice (*Oryza sativa*L.)[J]. Plants Chemosphere, 2008, 70(10): 1919—1929.

[6] 赵以军, 王旭, 程凯. 滇池微囊藻“水华”藻胆蛋白资源化研究[J]. 华中师范大学学报, 1998, 32(3): 333—336. Zhao Yijun, Wang Xu, Cheng Kai. Research on phycobiliproteins from microcystin Dianchi lake, China[J]. Journal of Central China Normal University, 1998, 32(3): 333—336. (in Chinese with English abstract).

[7] 李冰, 张学成, 高美华, 等. 钝顶螺旋藻藻蓝蛋白和多糖的抗肿瘤免疫活性研究[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(3): 396—402. Li Bing, Zhang Xuecheng, Gao Meihua, et al. Study on the antitumor immune activities of phycocyanin and polysaccharide from spirulina platensis[J]. Periodical of ocean university of China, 2004, 34(3): 396—402. (in Chinese with English abstract).

[8] Hee J, Masabiro M, Hisashi M, et al. Oscillapeptin, an elastase and chymotrypsin inhibitor from the cyanobacterium *oscillatoria agardhii* (NIES-204)[J]. Tetrahedron Letters, 1995, 36(29): 5235.

[9] 王志方, 艾秀莲, 李晨华, 等. 蓝细菌多糖研究进展[J].

- 新疆农业科学, 2003, 40(1): 20-23.
- Wang Zhifang, Ai Xiulian, Li Chenhua, et al. Study on the polysaccharides from cyanobacteria[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2003, 40(1): 20-23. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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): 173-179.
- 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): 173-179. (in Chinese with English abstract)
- [11] Frankin R J. Full scale experiences with anaerobic treatment of industrial wastewater[J]. Wat. Sci. Tech., 2001, 44(8): 1-6.
- [12] 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): 5084-5085, 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): 5084-5085, 5087. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
- [14] 杜静, 严少华, 常志州, 等. 太湖蓝藻产沼气潜力及复合折流板反应器(ABR)工艺中试[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(6): 948-953.
- Du Jing, Yan Shaohua, Chang Zhizhou, et al. Potential of methane production of blue algae and its feasibility of fermentation with anaerobic baffled reactor[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2008, 24(6): 948-953. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张代钧, 任宏洋, 祖波, 等. NO_2 对对颗粒污泥甲烷化动力学特性的影响[J]. 环境工程学报, 2007, 1(12): 33-36.
- Zhang Daijun, Ren Hongyang, Zu Bo, et al. Effects of NO_2 on methanogenesis kinetics of granular sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(12): 33-36. (in Chinese with English abstract)
- [16] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 102-226.
- [17] 张立将, 尹立红, 浦跃朴, 等. 水中微囊藻毒素高效液相色谱检测与前处理条件优化[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(3): 446-451.
- Zhang Lijiang, Yin Lihong, Pu Yuepu, et al. Optimization in analysis and sample preparation of microcystins in water with high-performance liquid chromatography[J]. Journal of southeast university (medical science edition), 2005, 35(3): 446-451. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵来利, 余宗莲, 高孟春. 常温下 ABR 处理低浓度废水性能及污泥特性[J]. 环境工程学报, 2010, 4(4): 761-766.
- Zhao Laili, She Zonglian, Gao Mengchun. Treatment of low strength wastewater and sludge characteristics in anaerobic baffled reactor at normal temperatures[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(4): 761-766. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱南文, 闵航. TTC-脱氢酶测定方法的探讨[J]. 中国沼气, 1996, 14(2): 3-5.
- Zhu Nanwen, Min Hang. The study of determination on TTC-dehydrogenase activity[J]. China Biogas, 1996, 14(2): 3-5. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张寒俊, 刘大川, 杨国燕. 紫外光谱法定量测定不同种蛋白酶活力的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2004(9): 44-45.
- Zhang Hanjun, Liu Dachun, Yang Guoyan. Exploring the way of determining the activity of the different proteases by UV spectrophotometry[J]. Cereal and Feed Industry, 2004(9): 44-45. (in Chinese with English abstract)
- [21] 俞毓馨, 吴庆国, 孟宪庭. 环境工程微生物检验手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 186-189.
- [22] 程斌, 浦跃朴, 尹立红. 藻毒素的检测与生物学效应评价的研究进展[J]. 东南大学学报: 医学版, 2004, 23(1): 57-61.
- Cheng Bin, Pu Yuepu, Yin Lihong. Research advances on detection and biological effect evaluation of cyanobacteria[J]. Journal of Southeast University: Medical Science Edition, 2004, 23(1): 57-61. (in Chinese with English abstract)
- [23] Gupta N, Pant S C, Vijayaraghavan R, et al. Comparative toxicity evaluation of cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin variants (LR,RR,YR) in mice[J]. Toxicology, 2003, 188(2/3): 285-296.
- [24] 倪利晓, 李时银. UBF 厌氧反应器处理病毒唑制药废水的研究[J]. 河海大学学报, 2009, 37(3): 133-137.
- Ni Lixiao, Li Shiyin. Treatment of ribavirin medicine wastewater by UBF system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(3): 133-137. (in Chinese with English abstract)
- [25] 胡纪萃. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 137-141.
- [26] 王向东, 谢嘉, 杨靖霞. 制酒废水高温厌氧消化动力学研究[J]. 成都科技大学学报, 1996, 91(3): 43-47.
- Wang Xiangdong, Xie Jia, Yang Jingxia. Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of wine-distillery wastewater[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1996, 91(3): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- [27] 徐向阳, 冯孝善. 厌氧附着膨胀床反应器稳态运行的过程动力学[J]. 环境科学学报, 1989, 9(3): 267-275.
- Xu Xiangyan, Feng Xiaoshan. Process kinetics for anaerobic attached film expanded bed reactor under steady state operation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,

- 1989, 9(3): 267–275. (in Chinese with English abstract).
- [28] 顾夏声. 废水生物处理数学模式[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 56.
- [29] Cheng Yunhuan, Sang Shuxun, Huang Huazhou, et al. Variation of coenzyme F_{420} activity and methane yield in landfill simulation of organic waste[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 17(3): 403–408.
- [30] Dong Fang, Zhao Quanbao, Zhao Jinbao, et al. Monitoring the restart-up of an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for the treatment of a soybean processing wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1722–1726.

Capability of pulse cycle corridor anaerobic reactor treating composted algae water

Yu Yaqin^{1,2}, Lü Xiwu^{1*}, Wu Yifeng¹, Xu Lijuan¹

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Dept of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: As a typical high organic concentration wastewater, composted algae water from the Taihu Lake could be treated with anaerobic biological treatment technology for clean energy biogas. During this process, Cyanobacteria are easy to float and crust in the reactor, thus affecting the efficiency of the gas production and reducing the processing effect of the reactor. Therefore, the design of an efficient anaerobic reactor suitable to the characteristics of cyanobacteria was the main task of the study.

We designed a new type of anaerobic reactor, the pulse cycle corridor anaerobic reactor, and considered the performance of processing composted algae water from the Taihu Lake. Simultaneously, sequencing batch experiments on the methanation dynamics of the enriched granular sludge through the stable operation of the reactor was adopted to provide theoretical support on further promotion of treating cyanobacteria. Main contents and results were as follows:

With an inoculated aerobic activated sludge from municipal sewage treatment plant, the reactor started up at chemical oxygen demand (COD) concentration of 2000 mg/L, hydraulic retention time (HRT) of 5 d and temperature of (30-35)°C for 30 d; the pulse cycle corridor anaerobic reactor achieved a stable state. The COD removal efficiency was above 60%, and biogas productivities of unit volume was 0.08 L/(L·d) at this level. When volumetric loading rate increased stage by stage from 0.8 kg/(m³·d) to 3.5 kg/(m³·d), the reactor could perform steadily with a COD removal efficiency as high as 80%. Meanwhile, biogas productivities of unit volume was 1.2 L/(L·d). The reactor had some advantages of quick start-up speed, tending to forming the particulate the sludge and enduring pulse load by shortening the pulse time, increasing the number of cycle of cyanobacteria in the reactor, extending the flowing time of cyanobacteria in the reactor channel, overcoming the phenomenon of cyanobacteria floating, and raising the probability of contact between the cyanobacteria and the sludge.

The removal rate of microcystins (TMC-LR, EMC-LR) was over 90%, which indicated that the reactor had a good removal effect on microcystins of the composted cyanobacteria. The main reason for microcystins removal was the effective intercept of cyanobacteria by a large number of cultivated anaerobic granular sludge and the enrichment of numerous indigenous bacteria in the reactor.

The methanation kinetics of composted algae water substrated with the granular sludge from the pulse cycle corridor anaerobic reactor was investigated. The maximum specific degradation rate, half saturation constant, and yield coefficient were 1.253 mg/(mg·d), 11 770 mg/L, and 0.256 mL/mg, respectively. Observed by a scanning electron microscope (SEM), the granular sludge was found in the stabilization stage with coupled growing micro-organisms, including methanosarcina, filamentous bacteria, and rod-shaped bacteria. Proteinase, coenzyme F_{420} and TTC-dehydrogenase activity of granular sludge from pulse cycle corridor anaerobic reactor had been in high level during the duration of the experiment.

Results indicated that the pulse cycle corridor anaerobic reactor could effectively deal with the algae-laden water from the Taihu Lake. It provided important value for the biogas fermentation of algae.

Key words: anaerobic digestion, kinetics, enzyme activity, composted algae water, volumetric loading