

# 好氧颗粒污泥处理纤维素乙醇废水的 试验研究

刘苏彤,李雪,梁红\*,高大文\*

(东北林业大学林学院,黑龙江哈尔滨150040)

**摘要:**利用SBR反应器考察了好氧颗粒污泥处理纤维素乙醇废水的可行性。结果表明,当进水为与自来水按15%比例混合的纤维素乙醇废水时,COD及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别为73.82%及76.92%。当进水更换为100%厌氧出水时,系统的COD及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为5.51%和52.95%。监测1个周期内溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)及氧化还原电位(Oxidation-Reduction Potential, ORP)的变化,DO在开始2 min急剧下降稳定40 min后呈上升趋势,在第6 h后DO稳定在5.85 mg/L左右。ORP在前1.5 h呈急剧上升的趋势,随后呈缓慢上升趋势,最终达到49.70 mV。以葡萄糖作为共代谢基质,在葡萄糖质量浓度分别为1.87 g/L和3.75 g/L时,废水中COD的去除率提高了3.53%和3.20%。因此,添加适宜的葡萄糖有利于促进纤维素乙醇废水中COD的去除。随着葡萄糖质量浓度的增加,总无机氮的去除率升高,分别为38.58%、46.88%和53.54%。说明葡萄糖的投加有“一碳两用”的作用,即葡萄糖既可作共代谢基质,又能为反硝化菌提供碳源和电子供体。

**关键词:**纤维素乙醇废水;好氧颗粒污泥;脱氮;共代谢;生物反应器

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)04-0083-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.04.020

## Experimental study on the treatment of cellulosic ethanol wastewater with aerobic granules

LIU Su-tong, LI Xue, LIANG Hong\*, GAO Da-wen\*

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The feasibility of the treatment of cellulosic ethanol wastewater with aerobic granules is investigated in SBR reactor. The results indicate that the removal rates of COD and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  are 73.82% and 76.92%, respectively, when the influent is the cellulose ethanol wastewater mixed with tap water at 15%. The removal rates of COD and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  are 5.51% and 52.95%, respectively, when 100% anaerobic effluent is changed as influent. The changes of Dissolved Oxygen (DO) and (Oxidation-Reduction Potential (ORP)) in one cycle are monitored. DO is sharply declined at the beginning of 2 min, then exhibits an upward trend after 40 min and finally remains stable at 5.85 mg/L after 6 h. ORP shows a sharp upward trend in the first 1.5 h, which is followed by a slow upward trend and finally reaches 49.70 mV. The removal rates of COD in wastewater are 3.53% and 3.20% when the glucose concentrations are 1.87 g/L and 3.75 g/L, respectively. It indicates that the addition of appropriate glucose is beneficial to promote the removal of COD in cellulosic ethanol wastewater. With the increase of glucose concentration, the removal rate of total inorganic nitrogen is increased by 38.58%, 46.88% and 53.54%, respectively, suggesting that the glucose is not only useful for co-metabolic substrate but also could offer carbon source and electron donor for denitrification bacteria.

**Key words:** cellulosic ethanol wastewater; aerobic granules; nitrogen removal; co-metabolism; bioreactors

能源供给是人类社会发展的支柱,目前被广泛利用的能源多为不可再生的化石能源<sup>[1]</sup>,预计至21世纪上半叶这些能源储量将接近枯竭<sup>[2]</sup>。燃料乙醇作为可再生能源近年来受到广泛关注。而以粮食为原料的燃料乙醇存在成本过高及“与人争粮、与粮争地”等问题<sup>[3]</sup>。欧盟于2012年10月公布了新生物燃料法令规定到2020年以粮食为原料的生物燃料的使用比例不得超过5%<sup>[4]</sup>。近年来,中国农

村地区对秸秆的大规模露天焚烧已成为显著问题。秸秆焚烧会使大气中CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、可吸入颗粒物等污染物质量浓度急剧升高,降低空气能见度,增加霾天气的发生几率<sup>[5-6]</sup>。因此,利用农业废弃物秸秆生产燃料乙醇是未来发展生物质能源的必然趋势<sup>[7-8]</sup>。但随着纤维素燃料乙醇行业的扩大生产<sup>[9]</sup>,其废水污染问题也愈发突出。纤维素乙醇废水属于高质量浓度、高色度的有机废水<sup>[10]</sup>,其中无

收稿日期:2016-10-31

基金项目:哈尔滨市应用技术与开发项目(2016RAXXJ010)

作者简介:刘苏彤(1990-),女,硕士研究生,研究方向为污水生物处理理论与新工艺, pieder@126.com;高大文(1967-),男,博士生导师,教授,主要从事污水生物处理理论与新工艺、膜法水处理理论与技术等研究,通讯联系人, dawengao@gmail.com。

机盐以及木质素分解产物的含量均非常高,处理难度很大<sup>[11-12]</sup>。目前对此类废水的处理方法主要为厌氧和好氧的生物处理法。厌氧技术虽能适应纤维素乙醇废水的高有机负荷,但其出水的 COD 和氮素质量浓度依然较高<sup>[13]</sup>。好氧技术难以适应废水的高有机质量浓度,因此一般与厌氧技术组合来处理纤维素乙醇废水<sup>[14]</sup>。好氧颗粒污泥作为新兴的水处理技术,在荷兰已经实现工程化<sup>[15]</sup>。该技术具有良好的沉降性能,较高的容积负荷以及更好的脱氮除磷能力<sup>[16-17]</sup>。而好氧颗粒污泥处理纤维素乙醇厌氧出水的研究鲜见报道。

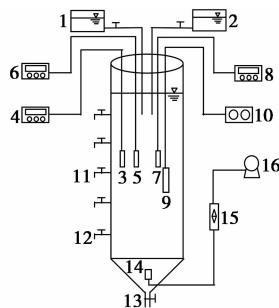
笔者以某纤维素乙醇厂的生产废水和经 IC 厌氧处理后的生产废水为研究对象,以葡萄糖作为共代谢基质,在维持相同的曝气量、温度、HRT 等因素的条件下,考察了葡萄糖质量浓度对好氧颗粒污泥处理纤维素乙醇废水系统效能的影响,分析了不同葡萄糖质量浓度下氮平衡的差异,以期为好氧颗粒污泥技术在处理实际纤维素乙醇废水中的应用提供理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 试验装置与材料

本试验中采用 SBR 反应器,反应器为玻璃圆柱体,其内径为 7 cm,高度为 40 cm,有效容积为 1 L。采用鼓风曝气,转子流量计计量曝气量,并实时监控

系统的 pH、DO 质量浓度及 ORP 值。试验装置如图 1 所示。



1—药液存放罐;2—废水储存箱;3—pH 传感器;4—pH 测定仪;5—DO 传感器;6—DO 测定仪;7—ORP 传感器;8—ORP 测定仪;9—温度传感器;10—温度控制仪;11—取样口;12—排水口;13—排泥口;14—微孔曝气头;15—转子流量计;16—电磁式空气泵

图 1 反应装置示意图

试验所用废水为某纤维素乙醇厂的生产废水及经 IC 厌氧处理后得到的厌氧出水。水质情况如表 1 所示。试验所用污泥为前期培养成功的好氧颗粒污泥。

表 1 纤维素乙醇废水及厌氧出水水质

废水来源	质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )					pH
	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		
纤维素乙醇	38954.2 ±	1960.2 ~	9.8 ~	391.1 ~	3.9 ~	
生产废水	2000	2666.1	12.1	320.2	4.5	
厌氧出水	1998.9 ±	302.8 ~	0.4 ~	99.5 ~	8.5 ~	
	100	402.6	0.9	143.9	9.2	

(上接第 82 页)

## 3 结论

(1)在对医用液体石蜡的氧化改性反应制备氧化蜡的反应中,氧气作为氧化剂较空气氧化效果好,最佳反应条件为:氧化温度为 130℃,氧化时间为 6 h,氧气流量为 0.15 m<sup>3</sup>/h,引发剂质量分数为 0.05%。

(2)氧化蜡乳液呈乳白色,酯香味,分散性为一级,稳定性极好,且含油量低,密度符合要求。

### 参考文献

[1] 梁文平. 乳化液科学与技术基础[M]. 北京:科学出版社,2001:56-68.  
 [2] 郑立辉,盛奎龙,潘金亮. 石油蜡的生产及深加工[M]. 北京:化学工业出版社,2008:126-180.  
 [3] Hikmet C Ibrahimov, Joerg F Friedrich, Etibar H Ismailov, et al. Thermal and magnetic peculiarities of metal-containing carbon nano-phase formed in the reaction of fine-dispersed aluminium with

dichloretha in the paraffin medium[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2012, 2(2):196-202.

[4] 陈文艺,段宁宁,李玉庆. 基于正交设计法的石蜡氧化改性研究[J]. 应用化工,2011,40(4):609-611.  
 [5] 黄玮,丛玉凤,郭大鹏. 基于 BP 神经网络的石蜡催化氧化反应的研究[J]. 石油化工高等学校学报,2012,25(6):30-33.  
 [6] 吕涯. 石蜡氧化改质的研究[J]. 精细石油化工,2002,(1):24-27.  
 [7] 李薇. 石蜡非催化空气氧化改性的研究[C]. 北京:中国科学技术协会年会论文集,2007.  
 [8] 刘娟,张明,付雪,等. 石蜡的无催化氧化研究[J]. 广东化工,2012,39(5):47-48.  
 [9] 陈尧,曹立民,孙彩兰. 石蜡无催化剂氧化工艺研究[J]. 应用化工,2012,41(6):1019-1021.  
 [10] 方静,杨基和,刘英杰. 石蜡氧气氧化和空气氧化动力学[J]. 化学反应工程与工艺,2011,27(5):432-437.  
 [11] 国家标准化管理委员会. GB/T 11543—2008 表面活性剂中、高粘度乳液的特性测试及其乳化能力的评价方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1-5.  
 [12] 国家标准总局. GB/T 2540—1981 石油产品密度测定法(比重瓶法)[S]. 北京:中国标准出版社,1981:289-291.  
 [13] 国家标准总局. GB/T 3554—2008 石油蜡含油量测定法[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1-8. ■

## 1.2 检测指标和测定方法

试验中 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  质量浓度等均按照国家环境保护总局颁发的标准方法进行分析测定<sup>[18]</sup>。pH、DO、ORP 采用德国 WTW 测定仪测定。

## 1.3 试验方法

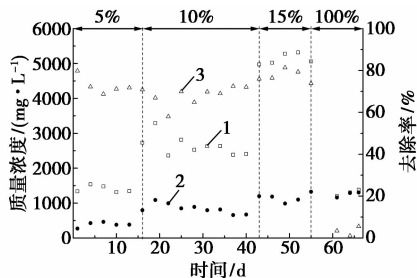
试验中设置曝气量为  $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ , 温度为  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 排水比为 78%, 试验每天运行 1 个周期, HRT 接近 24 h, 每周期运行方式为: 入水 1 min, 曝气运行 23 h 55 min, 沉降 2 min, 排水 2 min。试验初期以按比例与自来水混合的纤维素乙醇废水及 100% 的厌氧出水作为进水, 混合比例为废水占进水体积分的 5%、10%、15%。试验后期以葡萄糖作为共代谢基质, 葡萄糖质量浓度分别为 0、1.87、3.75 g/L。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 好氧颗粒污泥处理纤维素乙醇废水的效能

#### 2.1.1 对 COD 的去除

混合比例为 5% 的第 1 d 到第 7 d 和混合比例为 10% 的第 1 d 到第 7 d 均呈明显的下降趋势, 这是由于好氧颗粒污泥不适应实际废水造成的, 如图 2 所示。而混合比例为 15% 时并未出现 COD 去除率下降的情况, 说明系统对 COD 的去除率较稳定。15% 比例进水后, 测定第 55 周期 COD 的去除率为 73.82%。当进水改为 100% 的厌氧出水后, 系统的出水 COD 质量浓度几乎与进水 COD 质量浓度相当, COD 去除率骤然下降至 3.41%。出现这样情况的原因是经过 IC 厌氧处理的纤维素乙醇废水中的易降解有机物已近乎降解完全, 废水中的有机物多为难降解有机物, 废水的可生化性极低, 其中几乎没有好氧颗粒污泥可利用的 COD。最终 COD 的去除率为 5.51%。



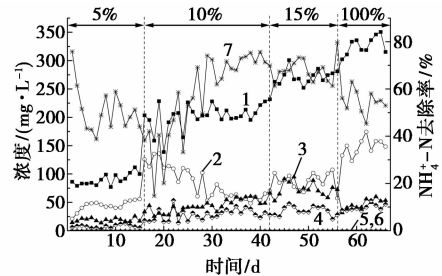
1—进水 COD 质量浓度; 2—出水 COD 质量浓度; 3—COD 去除率

图 2 COD 进出水质量浓度及去除率变化

#### 2.1.2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除

在混合比例为 5% 的前期,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率由

75.81% 降低至 38.73%; 当混合比例为 10% 时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率波动上升; 当混合比例为 15% 时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率最终为 76.92%, 如图 3 所示。而当进水改为完全的厌氧出水时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率为 52.95%, 明显低于处理纤维素乙醇废水时的效能。主要原因是废水经过 IC 厌氧处理后其可生化性低, 同时其 C/N 比低, 不利于好氧颗粒污泥脱氮。



1—进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ; 2—出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ; 3—进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ;  
4—出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ; 5—进水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ; 6—出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ;  
7— $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率

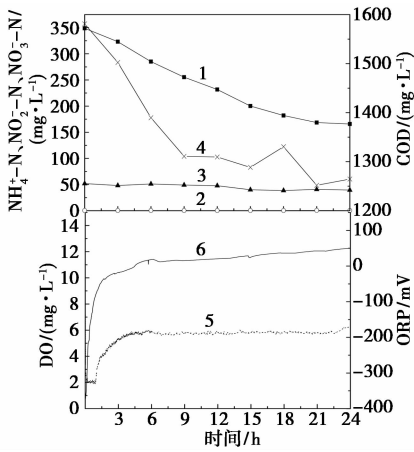
图 3  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  进出水质量浓度及去除率变化

系统的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  进出水质量浓度均很低, 未检测到  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的累积。当纤维素乙醇废水占进水总体积的 5%、10%、15% 及完全使用厌氧出水时, 进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  质量浓度分别为 7.51、28.15、35.24、40.76 mg/L。当混合比为 5%、10%、15% 时,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除质量浓度分别为 11.20、16.05、38.57 mg/L。与使用纤维素乙醇废水时不同, 使用厌氧出水时, 出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  质量浓度与进水时相比几乎没有降低, 主要原因是进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  质量浓度增高和反硝化菌可利用的有机物(电子供体)较少所致。

### 2.2 DO 及 ORP 的变化规律

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的降解速度在前 15 h 明显快于后 9 h,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在反应进行到第 21 h 近乎降解完全, 说明 24 h 的 HRT 较适合, 如图 4 所示。在整个反应进行中没有  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的积累, 说明硝化反应生成的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  被反硝化菌氧化为  $\text{N}_2$  排出系统, 好氧颗粒物污泥进行了同步硝化反硝化。

DO 在经历开始 2 min 的下降和前 47 min 的平稳后呈上升趋势, 这是由于硝化菌进行硝化反应的速率随着氨氮量的减少而不断降低, 耗氧速率小于供氧速率。在第 6 h 后 DO 呈现稳定趋势, 维持在 5.85 mg/L 左右。在第 23 h DO 出现上升趋势, 自



1—NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N; 2—NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; 3—NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N; 4—COD; 5—DO; 6—ORP

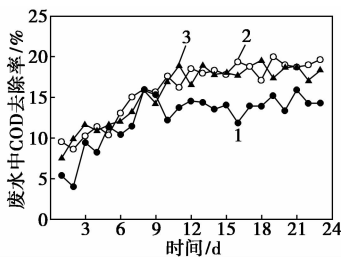
图 4 第 66 周期中 DO、ORP 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、COD 质量浓度的变化

养菌不再消耗溶解氧,自养菌和异养菌内源呼吸的耗氧率远远低于供氧率。ORP 在前 1.5 h 呈急剧上升的趋势,随后呈缓慢上升趋势,最终达到 49.70 mV。此规律与前期的研究结果不符<sup>[19]</sup>,其原因是由于处理的废水为实际的纤维素乙醇废水厌氧出水,与处理配水不同,难以显示出明显的变化点。

### 2.3 共代谢去除污染物初探

#### 2.3.1 对废水中 COD 的去除

当葡萄糖质量浓度为 1.87 g/L 时,废水中 COD 的去除率最高,如图 5 所示。说明共代谢基质的投加能够促进微生物对厌氧出水中难降解有机物的降解。原因是葡萄糖的代谢能够诱导相应的酶来降解纤维素乙醇废水 IC 厌氧出水中的难降解有机物<sup>[20]</sup>。当增加葡萄糖质量浓度至 3.75 g/L 时,废水中 COD 的去除率反而有微小的降低,原因是由于生长基质过多,难生物降解有机物对于酶的竞争处于劣势。

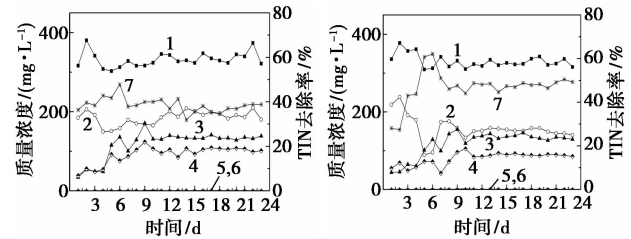


1— $\rho$ (葡萄糖) = 0 g/L; 2— $\rho$ (葡萄糖) = 1.87 g/L;  
3— $\rho$ (葡萄糖) = 3.75 g/L

图 5 不同质量浓度葡萄糖下废水中 COD 的去除率

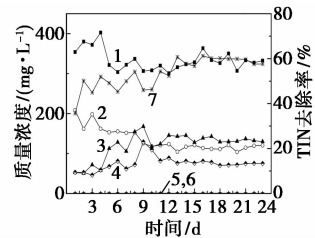
#### 2.3.2 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除

投加了葡萄糖的反应器在运行前期 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率都出现较大波动,如图 6 所示。投加葡萄糖质量浓度为 0、1.87、3.75 g/L 的反应器对应的总无机氮的去除率平均为 38.58%、46.88% 和 53.54%。3 个反应器的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 进出水质量浓度差别不大,都维持在 1 mg/L 以下。3 个反应器中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 均有去除,3 个反应器中均未出现 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的累积,系统为同步硝化反硝化工艺。



(a) 葡萄糖 = 0 g/L

(b) 葡萄糖 = 1.87 g/L



(c) 葡萄糖 = 3.75 g/L

1—进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N; 2—出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N; 3—进水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N;  
4—出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; 5—进水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N; 6—出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N;  
7—TIN 去除率

图 6 不同葡萄糖质量浓度下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的变化及 TIN 去除率

对比 3 个反应器的脱氮效果可以发现,脱氮效果随葡萄糖质量浓度的升高而升高,说明葡萄糖质量浓度为 3.75 g/L 最有利于氮素去除,这是由于葡萄糖的加入,提高了 C/N 比,增加了氮素的去除效果,原因是污泥中的硝化菌多为自养型微生物,其生长较慢;而反硝化菌属异养型微生物,生长较快<sup>[21-22]</sup>,其一方面在厌氧条件下以有机物作为电子供体,将在好氧条件下硝化菌氧化的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 还原为 N<sub>2</sub>;另一方面,利用有机物作为营养物质进行反硝化菌的生长繁殖<sup>[23]</sup>。然而在低 C/N 比下多数有机物已被其他异养菌所消耗,所剩的有机物不能满足反硝化菌所需,碳源的不足抑制了反硝化过程,这是葡萄糖质量浓度低时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率较低的根本原因。综合分析葡萄糖质量浓度对废水中 COD 及总无机氮的去除率可知,葡萄糖的投加

有“一碳双用”的作用,即葡萄糖的加入既可以作为共代谢基质促进微生物对厌氧出水中难降解有机物的降解,同时还能够为反硝化菌提供碳源和电子供体以促进硝化时间的提前。

### 3 结论

(1)在混合比例为5%和10%的前期,COD及 $\text{NH}_4^+$ -N去除率波动较大,混合比例为15%时并未出现此情况。当进水改为100%的厌氧出水后,系统的COD及 $\text{NH}_4^+$ -N去除率骤降。说明废水的可生化性极低,另外C/N比低,不利于好氧颗粒污泥脱氮。

(2)不同共代谢基质质量浓度下废水的COD去除率分别为12.48%、16.01%和15.68%,说明共代谢基质的投加能够促进微生物对厌氧出水中难降解有机物的降解。对 $\text{NH}_4^+$ -N的去除率平均为44.41%、53.62%、64.13%,说明葡萄糖质量浓度为3.75 g/L时最有利于好氧颗粒污泥脱氮,这是因为葡萄糖的投加提高了C/N比,为反硝化菌提供了碳源和电子供体。葡萄糖的投加对废水中COD及 $\text{NH}_4^+$ -N的去除均有促进作用,因此,葡萄糖的投加有“一碳双用”的作用。

### 参考文献

[1] Ma F, Hanna M A. Biodiesel production: A review[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 70(1): 1-15.

[2] Farrell A E, Plevin R J, Turner B T, et al. Ethanol can contribute to energy and environmental goals[J]. *Science*, 2006, 311(5760): 506-508.

[3] de Souza R R, Schaeffer R, Meira I. Can new legislation in importing countries represent new barriers to the development of an international ethanol market? [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3154-3162.

[4] Daugbjerg C, Swinbank A. Globalization and new policy concerns: The WTO and the EU's sustainability criteria for biofuels[J]. *Journal of European Public Policy*, 2015, 22(3): 429-446.

[5] 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 585-592.

[6] 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 等. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(12): 3045-3055.

[7] Godfrey T, West S. *Industrial enzymology*[M]. New York: Stockton

Press, 1996.

[8] Hahn-Hagerdal B, Galbe M, Gorwa-Grauslund M F, et al. Bio-ethanol-the fuel of tomorrow from the residues of today[J]. *Trends in Biotechnology*, 2006, 24(12): 549-556.

[9] Sukumaran R K, Singhania R R, Mathew G M, et al. Cellulase production using biomass feed stock and its application in lignocellulose saccharification for bio-ethanol production[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(2): 421-424.

[10] Gerbens-Leenes P W, Hoekstra A Y, van der Meer T. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(4): 1052-1060.

[11] Himmel M E, Ding S Y, Johnson D K, et al. Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production[J]. *Science*, 2007, 315(5813): 804-807.

[12] Wyman C E, Dale B E, Elander R T, et al. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(18): 1959-1966.

[13] Torry-Smith M, Sommer P, Ahring B K. Purification of bioethanol effluent in an UASB reactor system with simultaneous biogas formation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, 84(1): 7-12.

[14] Shan L L, Yu Y L, Zhu Z B, et al. Microbial community analysis in a combined anaerobic and aerobic digestion system for treatment of cellulosic ethanol production wastewater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(22): 17789-17798.

[15] 郝晓地, 孙晓明, Mark, 等. 好氧颗粒污泥技术工程化进展一瞥[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(20): 9-12.

[16] 陈丽丽, 高大文. 微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中 $\text{N}_2\text{O}$ 产生量的研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3532-3537.

[17] 王珊珊, 梁红, 高大文. 盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 $\text{N}_2\text{O}$ 产生量的影响[J]. *环境科学*, 2014, (11): 4237-4243.

[18] 国家环保局. *水和废水监测分析方法*[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[19] Yuan X J, Gao D W. Effect of dissolved oxygen on nitrogen removal and process control in aerobic granular sludge reactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1/2/3): 1041-1045.

[20] 任源, 慎义勇, 韦朝海, 等. 驯化筛选微生物对油制气废水的降解特性[J]. *环境科学*, 2002, 23(5): 76-79.

[21] Mosquera-Corral A, de Kreuk M K, Heijnen J J, et al. Effects of oxygen concentration on N-removal in an aerobic granular sludge reactor[J]. *Water Research*, 2005, 39(12): 2676-2686.

[22] Pol L W H, Lopes S I D, Lettinga G, et al. Anaerobic sludge granulation[J]. *Water Research*, 2004, 38(6): 1376-1389.

[23] 张兰英. *现代环境微生物技术*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. ■