

# 阴极类型对微生物燃料电池阳极脱氮产电的影响

崔心水<sup>1,2</sup>, 赵剑强<sup>1</sup>, 闫龙梅<sup>2</sup>, 李亚妮<sup>2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安工程大学 城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 通过构建双室微生物燃料电池(MFC),研究了阴极类型对MFC产电特性和阳极脱氮性能的影响。试验结果表明,非生物阴极MFC(A-MFC)以欧姆内阻为主,而生物阴极MFC(B-MFC)以活化内阻为主,以 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ 作为电子受体的A-MFC的开路电压OCV、表观内阻 $R_{in}$ 、最大功率密度 $P$ 、库伦效率CE分别是以 $\text{NO}_3^-$ 为电子受体的B-MFC的1.9、0.7、15和3.5倍。A-MFC、B-MFC的阳极对TN的去除率分别为89.5%和75.4%,平均容积去除负荷分别为 $0.037$ 、 $0.031$   $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。B-MFC阳极对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率达到了95.0%,最大容积去除负荷达到了 $0.251$   $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,高于A-MFC,也高于传统阴极反硝化MFC;与非生物阴极相比,生物阴极更经济安全,不产生二次污染。

**关键词:** 微生物燃料电池; 生物阴极; 阳极脱氮; 产电

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)21-0097-06

## Influence of Cathode Types on Anode Denitrification and Electricity Generation of Microbial Fuel Cells

CUI Xin-shui<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian-qiang<sup>1</sup>, YAN Long-mei<sup>2</sup>, LI Ya-ni<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The influence of cathode types on electricity generation and anode denitrification performance of microbial fuel cell (MFC) was explored by constructing a two-chamber MFC. The results showed that abiotic cathode of MFC (A-MFC) was dominated by ohmic resistance, while that of the biocathode of MFC (B-MFC) was mainly activated internal resistance. Open circuit voltage (OCV), internal resistance ( $R_{in}$ ), maximum power density ( $P$ ) and coulombic efficiency (CE) of A-MFC with  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  as electron acceptor were 1.9 times, 0.7 times, 15 times, and 3.5 times of those of B-MFC with  $\text{NO}_3^-$  as electron acceptor. TN removal rates of A-MFC anode and B-MFC anode were 89.5% and 75.4%, respectively, and average volumetric removal loads were  $0.037$   $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  and  $0.031$   $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , respectively. The removal rate of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  by B-MFC anode reached 95.0%, and the maximum volumetric removal load reached  $0.251$   $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , which was higher than those of A-MFC and conventional cathode denitrification MFC. Compared with A-MFC, B-MFC is more economical and

safer and does not produce secondary pollution.

**Key words:** microbial fuel cell; biocathode; anode denitrification; electricity generation

微生物燃料电池(MFC)是一种利用微生物作为催化剂,将有机物中的化学能直接转化为电能的装置<sup>[1]</sup>。将MFC用于污水处理领域,在净化污水的同时能够获得电能,因此受到了广泛关注。最初,MFC主要用来降解水中的有机物并取得了很高的去除率<sup>[2]</sup>。近年来,通过构建单室或双室MFC,将MFC与传统的硝化/反硝化工艺相结合,从而实现污水同步脱氮产电已成为了研究热点<sup>[3]</sup>。

目前,关于MFC脱氮的研究大部分集中在阴极反硝化方面,即以 $\text{NO}_3^-$ 或 $\text{NO}_2^-$ 作为电子受体,利用阳极产生的电子进行反硝化<sup>[4]</sup>。而实际污水中,往往含有 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、有机物等多种污染物,因此研究MFC阳极脱氮效果及其对产电性能的影响是十分必要的。而对于MFC阳极脱氮的研究主要关注底物浓度对阳极脱氮产电性能的影响<sup>[5-7]</sup>,对阳极脱氮机理也有初步探讨<sup>[8]</sup>,但不同类型阴极MFC在产电和脱氮方面的差异却鲜有报道。为此,笔者通过构建双室MFC,考察了阴极类型对MFC阳极脱氮和产电性能的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 MFC的构造

两组H型双室MFC均由有机玻璃制成<sup>[9]</sup>。阳极室和阴极室均为圆柱形,顶部加盖,内部净尺寸为 $\varnothing 12\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ ,单室有效容积为2 L,通过法兰对接并由质子交换膜( $\varnothing 7\text{ cm}$ )分隔。阴极和阳极均采用导电石墨碳毡( $20\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ )作为电极材料。两电极通过钛丝与电阻箱( $100\ \Omega$ )连接。

质子交换膜和导电石墨碳毡在使用前需进行活化,活化方法详见文献[10]。

### 1.2 试验方法

该试验采用间歇培养的模式,试验过程中利用电动搅拌机进行混合,在 $(28 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 水浴池中平行运行两组MFC,一组为非生物阴极MFC(A-MFC),另一组为生物阴极MFC(B-MFC),试验原理如图1所示。

将取自西安北石桥污水处理厂氧化沟厌氧段和好氧段的污泥按1:1混合后,与两组MFC的阳极培养液和B-MFC的阴极培养液按1:1混合接种到对应的阳极室和阴极室,A-MFC阴极室不接种。两

组MFC的阳极培养液组分相同,即 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 为2.65 g/L, $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 为4.33 g/L, $\text{NH}_4\text{Cl}$ 为0.38 g/L, $\text{NaNO}_2$ 为0.64 g/L, $\text{NaHCO}_3$ 为1.00 g/L, $\text{CaCl}_2$ 为0.15 g/L,葡萄糖为0.50 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为0.05 g/L,以及1 mL/L的微量元素<sup>[11]</sup>。阴极培养液的主要组分与阳极培养液相同,但不含 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 和 $\text{NaNO}_2$ ,A-MFC阴极根据需要添加 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ,B-MFC阴极添加20 mmol/L的 $\text{KNO}_3$ 。调节所有培养液的初始pH值为7.0。两组MFC接种后,定时监测输出电压,当输出电压低于20 mV时,更换全部阳极和阴极培养液,当连续两个批次的输出电压变化趋势相似、最大值相差不大( $<5\%$ )时,认为系统启动成功。系统启动成功以后,在A-MFC阴极中 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 初始浓度为20 mmol/L的情况下,分析不同阴极类型(生物阴极和非生物阴极)对阳极脱氮以及产电性能的影响,同时探讨两种阴极的选择方法。

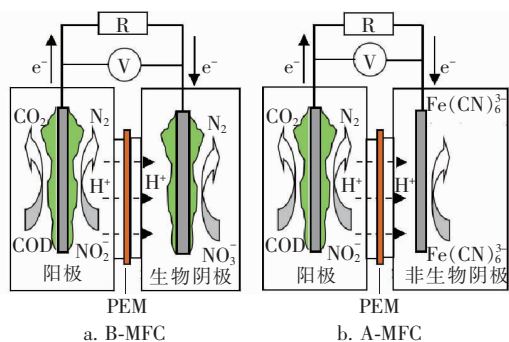


图1 试验原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of experiment principle

### 1.3 测定项目与分析方法

输出电压 $U$ 采用数字万用表(VC890D)测定,功率密度 $P$ 根据欧姆定律计算,库伦效率CE按文献[1]计算。

内阻 $R_{in}$ 采用极化曲线法测定<sup>[1]</sup>,极化曲线采用稳态放电法测定,即待MFC运行稳定后,先将外电路断开,测量电路的开路电压OCV,再逐步减小外电阻,对MFC的电压值进行测量,计算相应的电流及功率密度,并作功率密度和极化曲线,将极化曲线的欧姆极化区线性拟合,得到的直线斜率即为电池的表观内阻 $R_{in}$ 。常规指标均按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同阴极MFC的产电特性

装置启动期间,当输出电压低于 20 mV 时,标志着一个周期的完成。这种驯化方式可以让产电微生物经历放电,进而激发电化学活性。试验发现,随着驯化时间的增加,后一个周期的最大输出电压较前一个周期都有所增加,最后逐渐趋于稳定。一个周期内两组 MFC 的输出电压随着时间的延长均呈现“上升—短暂平稳—下降”的趋势,见图 2(A-MFC 为第 4 周期,B-MFC 为第 5 周期)。A-MFC 以及 B-MFC 分别经过 4 个周期和 5 个周期的间歇运行,连续两个周期的最大输出电压分别达到  $(426.3 \pm 3.5)$  mV 和  $(163.8 \pm 3.7)$  mV,系统启动成功。在相同外阻条件(100  $\Omega$ )下,A-MFC 与 B-MFC 相比,最大输出电压较高,换液后电压上升快,持续产电的周期长,而且培养驯化所需的时间短,说明 A-MFC 比 B-MFC 更容易启动。

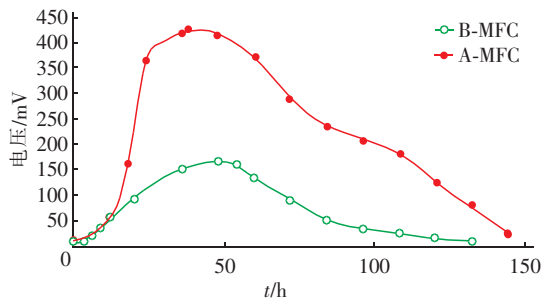


图2 不同类型阴极 MFC 输出电压曲线

Fig. 2 Output voltage curves of different cathode MFCs

待 MFC 运行稳定后,绘制功率密度和极化曲线,如图 3 所示。

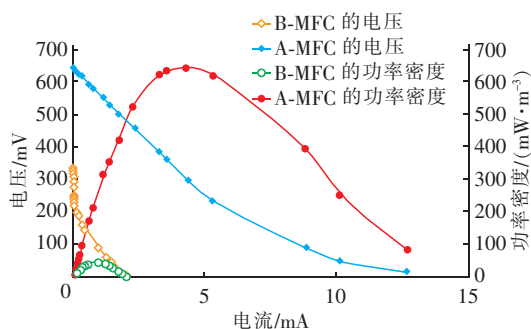


图3 不同类型阴极 MFC 的功率密度和极化曲线

Fig. 3 Power density and polarization curves of different cathode MFCs

从图 3 可以看出,随着电流的增加,输出电压逐渐减小,功率密度先增加后减小,且 A-MFC 的电压

和电流近似呈直线关系,说明 A-MFC 主要以欧姆内阻引起的欧姆损失为主,但仍存在非欧姆损失,尤其是高电流区的传质损失较为明显。而 B-MFC 以活化内阻为主,在低电流区(0 ~ 0.03 mA)内活化损失显著,中电流区(0.03 ~ 1.43 mA)内欧姆损失也较为明显,而在高电流区(> 1.43 mA)由扩散阻力引起的传质损失可以忽略不计,说明 B-MFC 阴极电极微生物的数量有限或催化活性不高。

由于  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  作为电子受体时不易极化,反应速率快、可逆性好,且能加快传质过程,降低活化能,以  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  作为电子受体的 A-MFC 的开路电压 OCV、表观内阻  $R_{in}$ 、最大功率密度  $P$ 、库伦效率 CE 是以  $\text{NO}_3^-$  为电子受体的 B-MFC 的 1.9、0.7、15 和 3.5 倍,见表 1。这是因为铁氰化钾在电极上被还原成了亚铁氰化钾,而亚铁氰化钾可以在电极表面形成性质稳定的导电聚合物膜,促进电子的传递过程。许鸿雁等<sup>[12]</sup>的研究也表明,铁氰化钾能明显改善 MFC 阴极性能并用于曝气阴极,以提高产电性能。两个 MFC 系统的 CE 都较低,这是由于异养反硝化减少了传递到电极表面的电子,同时与微生物的生长以及有机物的发酵和产甲烷过程有关<sup>[13]</sup>。

表1 不同类型阴极 MFC 的产电特性

Tab. 1 Electricity generation characteristics of different cathode MFCs

项 目	OCV/mV	$R_{in}/\Omega$	$P/(\text{mW} \cdot \text{m}^{-3})$	CE/%
A-MFC	642.0	68.2	642.3	10.8
B-MFC	332.0	100.0	42.3	3.1

### 2.2 不同阴极MFC 阳极室底物的降解特性

不同类型阴极 MFC 阳极室中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD 和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度的变化如图 4 所示。

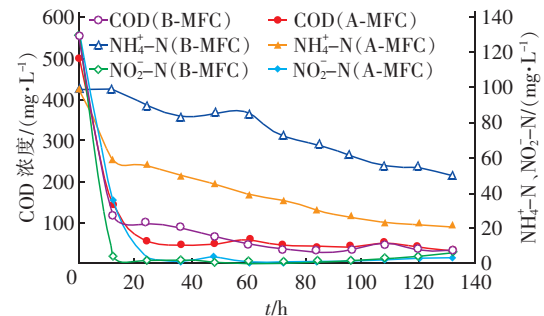


图4 不同类型阴极 MFC 阳极室中 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度的变化

Fig. 4 Change of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  concentrations in anode chamber of different cathode MFCs

从图4可以看出,不同阴极MFC阳极室中各污染物的去除过程均经历了先快速(换液后12 h内)后慢速两个阶段。全周期和快速去除阶段各污染物的去除率和平均容积去除负荷的情况见表2和表3。

表2 不同类型阴极MFC阳极室全周期底物去除情况

Tab.2 Removal of substrates in anode chamber of different cathode MFCs

项 目	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N		COD		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N		TN	
	去除率/ %	平均容积去除负荷/ (kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )	去除率/ %	平均容积去除负荷/ (kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )	去除率/ %	平均容积去除负荷/ (kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )	去除率/ %	平均容积去除负荷/ (kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )
B-MFC	49.8	0.009	93.3	0.085	95.0	0.022	75.4	0.031
A-MFC	78.9	0.014	93.7	0.085	97.6	0.023	89.5	0.037

注: NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N均未检出。

表3 不同类型阴极MFC阳极室12 h内底物去除情况

Tab.3 Removal of substrates within 12 h in anode chamber of different cathode MFCs

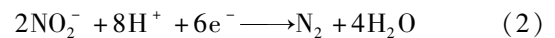
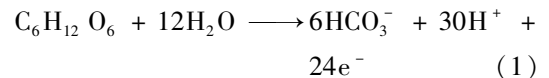
项 目	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N		COD		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N		TN	
	去除率/ %	平均容积去除负荷/(kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )	去除率/ %	平均容积去除负荷/(kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )	去除率/ %	平均容积去除负荷/(kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )	去除率/ %	平均容积去除负荷/(kg · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )
B-MFC	0.8	0.002	76.5	0.765	96.7	0.251	55.1	0.253
A-MFC	40.3	0.080	71.4	0.714	71.9	0.187	58.2	0.267

由表2可知,一个周期内B-MFC阳极室对氨氮的平均容积去除负荷为0.009 kg/(m<sup>3</sup> · d),去除率达到49.8%,而A-MFC分别为0.014 kg/(m<sup>3</sup> · d)和78.9%。关于氨氮在MFC阳极室去除的机理, Kim等<sup>[14]</sup>认为主要是氨氮的挥发作用和透过质子交换膜转移到阴极室造成的;He等<sup>[15]</sup>发现,氨氮的减少并不全是由于挥发和转移,其还参与了电流的产生过程。其中氨氮能够透过质子交换膜转移到阴极室的过程已在很多研究中得到证实<sup>[16]</sup>,而且提高电压或增大电流能够加快这一转移过程<sup>[14]</sup>。这也是本试验A-MFC阳极室NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N去除率和平均容积去除负荷都远高于B-MFC的原因,A-MFC的输出电压远大于B-MFC。

当进水COD在500 mg/L左右时,不同阴极MFC对阳极室COD和NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N均具有较好的去除效果,一个周期内A-MFC和B-MFC对COD和亚硝酸盐的去除率分别达到了93.0%以上和95.0%以上,平均容积去除负荷基本相同。A-MFC阳极室对TN的去除率达到89.5%,高于B-MFC的75.4%,这是由于A-MFC阳极室有较高的NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N去除率。由于微生物需要适应新环境,每次换液后一段时间(12 h)B-MFC阴极生物膜催化活性较低,利用质子和电子的能力较弱,从而影响了NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N透过质子交换膜转移的速度,造成换液后12 h内B-MFC对NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N的去除率和平均容积去除负荷仅分别

为0.8%和0.002 kg/(m<sup>3</sup> · d),远远低于A-MFC的40.3%和0.080 kg/(m<sup>3</sup> · d)。两种MFC阳极室中COD、NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N和TN主要在进水后12 h内得以去除,去除贡献率超过50%。

由表3可知,换液后12 h内A-MFC和B-MFC对亚硝酸盐的平均容积去除负荷分别达到了0.187和0.251 kg/(m<sup>3</sup> · d),与传统反硝化反应器[0.1 ~ 0.5 kg/(m<sup>3</sup> · d)]相当,高于阴极脱氮MFC的硝酸盐去除负荷[0.070 ~ 0.180 kg/(m<sup>3</sup> · d)]<sup>[7]</sup>,而且体系中COD/N值为2.18,低于传统废水脱氮处理所需的COD/N值,也低于MFC阴极反硝化所需的COD/N值<sup>[17]</sup>,可见两种MFC的阳极都具有较好的脱氮性能。本试验阳极脱氮的机理主要包含两方面:氨氮的跨膜转移和亚硝酸盐的异养反硝化,且以异养反硝化为主,见式(1)和式(2),同时异养反硝化过程与产电过程在底物(葡萄糖)利用方面存在着对电子的竞争<sup>[4]</sup>。



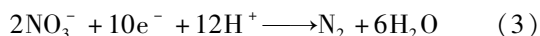
### 2.3 关于微生物燃料电池阴极的探讨

阴极是MFC的重要组成部分,试验结果表明阴极的类型(生物阴极和非生物阴极)对MFC脱氮产电性能有重要影响,尤其在产电方面,以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>为电子受体的生物阴极比以Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-</sup>为电子受体的非



生物阴极要弱很多,这可能与 MFC 的构型不够合理和操作条件尚未优化有关,后期还需进一步研究。在实践中,非生物阴极主要是使用含铂催化剂的空气阴极,或是利用昂贵、有毒、危险的化学试剂,如铁氰化物作为电子受体,使用这些化学试剂或催化剂可以验证 MFC 原理的可行性。但是需要注意的是,这些化学物质的使用是不经济的,也是不可持续的,甚至不适用于大规模应用。近年来,生物阴极已成为取代昂贵的非生物阴极的一种选择,将生物阴极技术应用于 MFC 的发电过程中,既可以提供先进的废水处理技术,又可以减少能源消耗、环境安全和成本问题,从而改善该技术的功能<sup>[18]</sup>。

生物阴极共分为两类:好氧生物阴极,即以氧为电子受体,以微生物作为催化剂辅助过渡金属化合物的氧化,如 Mn(II)或 Fe(II)等,将电子传递给氧;厌氧生物阴极,即以微生物为催化剂,利用硝酸盐、硫酸盐、铁、锰、硒酸盐、砷酸盐、尿液、富马酸盐和二氧化碳等化合物作为末端电子受体。在这些化合物中,硝酸盐因其较高的氧化还原电位而备受关注。在阴极室中,使用生物阴极并进行反硝化的 MFC[见式(3)]将是未来主要的研究方向。



厌氧生物阴极 MFC 的阳极室和阴极室都是厌氧环境,避免了氧渗透到阳极室中的风险,从而提高了阳极反应的效率,更具意义的是采用生物阴极 MFC 能够实现阳极室碳质底物和阴极室氮化合物的同步去除。

### 3 结论

① 非生物阴极 MFC (A-MFC) 以欧姆内阻为主,而生物阴极 MFC (B-MFC) 以活化内阻为主,A-MFC 的产电特性要优于 B-MFC。

② A-MFC 和 B-MFC 对 COD 均有较好的去除效果,去除率分别达到了 93.0% 以上和 95.0% 以上;就脱氮而言,A-MFC 略优于 B-MFC,对 TN 的去除率分别为 89.5% 和 75.4%。

③ 与 A-MFC 相比,B-MFC 更经济、更安全,不产生二次污染,是 100% “微生物”燃料电池,但脱氮产电性能尚需进一步优化。

### 参考文献:

[1] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, *et al.* Microbial fuel cells: methodology and technology[J]. Environ Sci

Technol, 2006, 40(17): 5181 – 5192.

[2] He L, Du P, Chen Y Z, *et al.* Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 388 – 403.

[3] 赵慧敏, 李晓玲, 赵剑强. 微生物燃料电池在污水生物脱氮中的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(4): 1216 – 1222.

Zhao Huimin, Li Xiaoling, Zhao Jianqiang. Research progress of biological nitrogen removal by microbial fuel cell [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(4): 1216 – 1222 (in Chinese).

[4] Gude V G. Wastewater treatment in microbial fuel cells—an overview [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 122: 287 – 307.

[5] 张吉强, 郑平, 何崧飞, 等. 废水中硝氮和 COD 浓度对 AD-MFC 脱氮产电性能的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4508 – 4514.

Zhang Jiqiang, Zheng Ping, He Zhanfei, *et al.* Influence of nitrate and COD concentrations on nitrogen removal and power production performance of AD-MFC [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(10): 4508 – 4514 (in Chinese).

[6] Zhang J Q, Zheng P, Zhang M, *et al.* Kinetics of substrate degradation and electricity generation in anodic denitrification microbial fuel cell (AD-MFC) [J]. Bioresour Technol, 2013, 149: 44 – 50.

[7] 王荣昌, 周欣逸, 姚佳斌, 等. 硝酸盐浓度对微生物燃料电池阳极产电性能的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1608 – 1614.

Wang Rongchang, Zhou Xinyi, Yao Jiabin, *et al.* Influence of nitrate concentration in anolyte on electricity generation of microbial fuel cell [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1608 – 1614 (in Chinese).

[8] 张建民, 闫龙梅, 崔心水. 异养反硝化微生物燃料电池脱氮产电性能研究[J]. 工业水处理, 2017, 37(4): 87 – 90.

Zhang Jianmin, Yan Longmei, Cui Xinshui. Research on the heterotrophic denitrification in microbial fuel cells affecting denitrification electrogenesis capacity [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(4): 87 – 90 (in Chinese).

[9] 张建民, 杨赛凤, 崔心水, 等. 微生物燃料电池阳极氮损失机理研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(5): 38 – 42.

Zhang Jianmin, Yang Saifeng, Cui Xinshui, *et al.*

- Mechanism of ammonia loss in anode chamber of two-chamber microbial fuel cell [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(5): 38–42 (in Chinese).
- [10] 王晓丽. 质子交换膜燃料电池膜电极结构研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006.
- Wang Xiaoli. Studies on Membrane Electrode Assembly of Proton Exchange Membrane Fuel Cells[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese).
- [11] Xie S, Liang P, Chen Y, *et al.* Simultaneous carbon and nitrogen removal using an oxic/anoxic-biocathode microbial fuel cells coupled system [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(1): 348–354.
- [12] 许鸿雁, 赵剑强, 胡博, 等. 铁氰化钾对双室微生物燃料电池曝气阴极性能的改善[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(6): 2847–2852.
- Xu Hongyan, Zhao Jianqiang, Hu Bo, *et al.* Improvement of aeration-cathode performance of a double chamber microbial fuel cell with potassium ferricyanide used[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(6): 2847–2852 (in Chinese).
- [13] Zhu G C, Onodera T, Tandukar M, *et al.* Simultaneous carbon removal, denitrification and power generation in a membrane-less microbial fuel cell [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 146: 1–6.
- [14] Kim J R, Zuo Y, Regan J M, *et al.* Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating animal wastewater [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2008, 99(5): 1120–1127.
- [15] He Z, Kan J J, Wang Y B, *et al.* Electricity production coupled to ammonium in a microbial fuel cell [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(9): 3391–3397.
- [16] 崔心水, 赵剑强, 薛瑶, 等. 双阴极微生物燃料电池同步脱氮产电研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(5): 71–76.
- Cui Xinshui, Zhao Jianqiang, Xue Yao, *et al.* Simultaneous nitrogen removal and electricity generation in dual-cathode microbial fuel cells[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(5): 71–76 (in Chinese).
- [17] 黄丽巧, 易筱筠, 韦朝海, 等. 阴极硝化耦合阳极反硝化实现微生物燃料电池技术脱氮[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(10): 5118–5124.
- Huang Liqiao, Yi Xiaoyun, Wei Chaohai, *et al.* Cathode nitrification coupled to anode denitrification for nitrogen removal in a dual-chamber microbial fuel cell using anion exchange membrane [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(10): 5118–5124 (in Chinese).
- [18] Pandit S, Nayak B K, Das D. Microbial carbon capture cell using cyanobacteria for simultaneous power generation, carbon dioxide sequestration and wastewater treatment[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 107: 97–102.



作者简介: 崔心水(1980—), 男, 陕西商洛人, 博士, 讲师, 研究方向为水污染控制技术。

E-mail: cuixinshui@xpu.edu.cn

收稿日期: 2019-05-22

水利工程补短板, 水利行业强监管