

生物电化学系统从废水中回收氨的研究进展

罗昕怡, 石玉翠, 叶延超, 马丽丽, 游少鸿

(桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西桂林 541004)

[摘要] 氨(NH_3)是引起水生生物毒害的主要因素, 又是工业生产肥料的重要原料, 因此, 从废水中回收氨成为了研究重点。相较于传统氨回收工艺, 生物电化学系统(BES)在处理废水的同时可回收有用资源, 降低了处理成本与能耗, 从而受到广泛关注。首先, 介绍了 BES 回收氨的机理, 并对其回收性能进行了评价; 其次, 阐述了 BES 回收氨过程中影响回收效率的主要因素; 最后, 讨论了今后可能面临的挑战, 以便扩大规模并应用于实践。

[关键词] 生物电化学系统; 废水处理; 氨回收

[中图分类号] X703; TM911.45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)01-0015-06

Advances in the recovery of ammonia from wastewater by bioelectrochemical systems

LUO Xinyi, SHI Yucui, YE Yanchao, MA Lili, YOU Shaohong

(Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology,
Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Ammonia is the main factor causing the toxicity of aquatic organisms and an important raw material for industrial fertilizer production. Therefore, the recovery of ammonia from wastewater has become a research focus. Compared with the traditional recycling process, the bioelectrochemical system (BES) can recover useful resources while processing wastewater, reducing the processing cost and energy consumption, and thus has attracted widespread attention. Firstly, the mechanism of ammonia recovery by BES was introduced, and its recovery performance was evaluated. Secondly, the main factors affecting the recovery efficiency in the process of BES ammonia recovery were explained. Finally, the challenges that might be faced in the future are discussed in order to scale up and apply the technology to practice.

Key words: bioelectrochemical system; wastewater treatment; ammonia recovery

氮作为可再生资源, 对生物生长至关重要^[1]。一般通过生物固氮将大气中的氮气(N_2)还原为氨(NH_3)。然而, 生物固氮产生的 NH_3 不足以满足农作物和植物需求。因此, 在工业规模上采用了哈伯-博施(Haber-Bosch)工艺, 以分子氮为原料生产 NH_3 , 但该工艺每年消耗的能源占全球能源使用量的 1%~2%^[2-3]。污水处理厂采用两级硝化-反硝化工艺除氮, 其中仅硝化曝气能耗就占废水处理总能量的 50%^[4], 成本占废水处理运行成本的 60%^[5]。此外, 研究发现, 微藻类可以吸收氮和磷并产生生物质, 可进一步用于生产能源或增值化合物^[6], 但从处理后的废

水中分离藻类是一个巨大的挑战。相较于传统去除和回收工艺带来的高能耗、高成本, 生物电化学系统(BES)作为一种基于电化学转化过程的新型方法, 能够利用微生物的催化活性转化可降解有机物中储存的化学能。BES 由阳极半电池、阴极半电池和一个可选的分离器组成^[7]。一般来说, 可生物降解废水在阳极室中被电化学活性细菌(EAB)氧化, 产生电子经外电路流到阴极^[8-9]。在阴极室中, 电子可用于直接发电(微生物燃料电池, MFC), 也可用于还原水或其他化学物质, 例如金属离子、二氧化碳或有机化学品(微生物电解槽, MEC 或微生物电合成, MES)。BES

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51868010); 广西自然科学基金(2019GXNSFBA245083); 桂林市科学研究与技术开发计划课题(20190219-3); 广西“八桂学者”团队项目(2016A10)

在可再生能源生产、生物修复、废水处理^[10-12]等领域有着广阔的应用前景,受到研究者的广泛关注。

1 BES从废水中回收 NH_3

1.1 BES回收 NH_3 机理

与其他营养物去除工艺或膜处理工艺相比,营养物回收被认为是BES系统的一个独特优势^[13-14]。在BES中,废水中的有机物在阳极被细菌氧化, NH_4^+ 通过阳离子交换膜(CEM)输送到阴极室,由于阴极氧还原反应(ORR)和析氢反应(HER)产生了 OH^- ,导致阴极液碱度升高,pH较高的阴极液可使 NH_4^+ 转化为挥发性 NH_3 , NH_3 可通过汽提的方法从阴极室中除去,BES脱氨与回收氨的机理见图1。因此,与其他回收技术相比,BES回收 NH_3 的优点之一是不需要额外添加苛性碱来增加溶液的碱度。此外,从废水中回收 NH_3 而不是还原为 N_2 ,会减少处理过程中的能耗,为氮循环创造一条捷径。

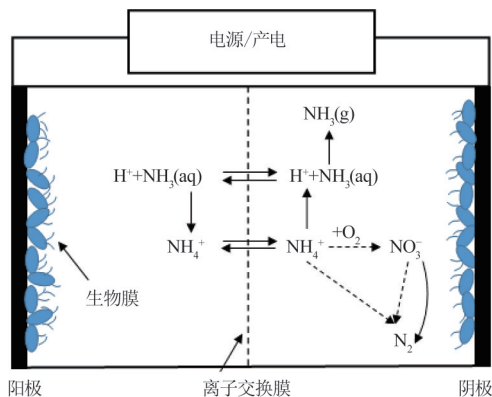


图1 BES脱氨与回收氨的机理

Fig. 1 Mechanism of BES deamination and recovery of ammonia

在配备CEM的BES中, NH_4^+ 和其他阳离子可以通过迁移和扩散的方式从阳极转移到阴极室。电场诱导引起离子迁移,浓度梯度引起离子扩散。Ying LIU等^[15]研究发现,中等电流密度($I=1 \text{ A/m}^2$)下 NH_4^+ 的扩散作用实际上强于迁移作用,因为阳极电解液呈酸性,阴极电解液呈碱性,氮元素在阳极电解液中主要以 NH_4^+ 的形式存在,在阴极电解液中主要以 NH_3 的形式存在。因此阳极电解液中的 NH_4^+ 浓度总是比阴极电解液中的高得多,浓度梯度引起 NH_4^+ 的强扩散通量;而在高密度电流($I>5 \text{ A/m}^2$)下,电场诱导的离子迁移则成为主要的传输机制。J. R. KIM等^[16]研究了单、双室MFC中养猪废水的 NH_3 损失。

单室MFC阴极暴露在空气中,5 d内 NH_3 去除率达到60%。双室MFC由阴阳2个电极室组成,使用磷酸盐缓冲液和铁氰化物作为阴极电解液,13 d内 NH_3 去除率达到68%。作者认为这种去除 NH_3 的主要机理是 NH_4^+ 的迁移,氨损失随着发电量的增加而加快。单室MFC在发电过程中阴极附近的pH升高, NH_4^+ 转化为更易挥发的 NH_3 。双室MFC中 NH_4^+ 通过连接阳极室和阴极室的膜扩散造成氮损失,因为膜的电荷转移, NH_4^+ 的传输速率增加。利用这种氨损失机制, NH_3 被认为是一种合适的质子穿梭机,以维持 H^+ 在装有CEM的BES中穿梭,达到动态控制pH的效果,提高 NH_3 的回收效率^[17-18]。

在生活污水中,75%的氮来自尿液。这些氮以尿素 $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$ 的形式被人类排出体外, $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 水解为氨基甲酸,随后氨基甲酸分解生成 NH_3 和 H_2CO_3 ,反应方程式如下:



因此尿液被视为 NH_3 回收的潜在资源。P. KUNTKE等^[19-20]构建了气体扩散阴极双室MFC,研究其回收 NH_3 及产生能量的可行性。研究表明 NH_4^+ 的质量浓度在 $0.07\sim 4 \text{ g/L}$ 时不会影响MFC回收 NH_3 的性能;在电流密度为 0.5 A/m^2 下,尿液中 NH_3 回收速率为 $3.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,系统净生产能量为 3.46 kJ/g 。

1.2 BES与其他技术耦合回收 NH_3

大多数BES回收 NH_3 依赖于CEM,虽然在阴极获得的浓缩 NH_3 可被视为最终产品,但无法进一步提取。目前,已研究BES与汽提、浓缩、跨膜化学吸附(TMCS)、正渗透(FO)等传统回收工艺相结合,将 NH_3 作为更精细或更纯的产品回收。

汽提是通过喷射高度分散的气体来实现从浓缩废水中回收 NH_3 的常用技术。高溶解度的 NH_3 需要高温、高pH和高气体流量进行回收,因此传统汽提工艺的能量需求高^[21]。在BES中,进水或阳极溶液中的 NH_4^+ 在阴极室转化为 NH_3 浓缩,然后通过氨汽提从碱性溶液中回收。与单独使用汽提工艺相比,在BES阴极上采用氨汽提工艺可提高 NH_3 回收效率,降低能源需求^[22-27]。

BES耦合TMCS相较于氨汽提耦合系统更加简单。 NH_4^+ 在系统阴极上转化为 NH_3 ,随后 NH_3 通过透气疏水膜在酸性溶液中以 NH_4^+ 的形式回收。P.

ZAMORA 等^[28]首次报道了 MEC 耦合 TMCS 技术从尿液中回收营养物质的研究。该耦合系统处理尿液包括两个阶段:第一阶段磷以鸟粪石的形式回收;第二阶段通过 MEC 耦合 TMCS 技术从阴极回收 NH_3 并产生 H_2 。结果表明,当施加电压为 0.5 V,平均电流密度为 $(1.7 \pm 0.2) \text{ A/m}^2$ 时,总氨氮(TAN)在 CEM 上的传输效率为 $(92 \pm 25)\%$,回收率为 $(31 \pm 59)\%$,回收所需电能为 $(4.9 \pm 1.0) \text{ MJ/kg}$,低于传统电化学脱氮/回收技术。

FO 是利用半透膜将水从溶解的溶质中分离出来的技术,是基于两种溶液的浓度差异所产生的渗透压差实现水传递的膜分离过程。MEC-FO 耦合系统已被用于处理城市垃圾渗滤液并同时回收 NH_3 和 H_2O 。在 MEC 中,有机化合物被降解,产生的电子促进 NH_3 的回收,以制备碳酸氢铵溶液,用作 FO 中的

抽提溶液。FO 进行水萃取后,将浓缩的进料溶液返回 MEC 进一步处理。MEC 反应器在阴极曝气的情况下,可以回收 $(65.7 \pm 9.1)\%$ 的 NH_3 。以 2 mol/L 的碳酸氢铵作为抽提溶液,FO 工艺在 3.5 h 内从 MEC 阳极出水中回收了 51% 的清洁水^[29-30]。Shiqiang ZOU 等^[31]在耦合系统中增加鸟粪石沉淀步骤,最大限度地提高 NH_3 的回收效率,但增加了处理过程的复杂性。已有研究将 FO 膜作为阳极和阴极室间的分离器,简化了系统结构,当电流密度从 0 增加到 $(1.8 \pm 0.1) \text{ A/m}^2$ 时, NH_4^+ 的去除率从 $(40.7 \pm 2.4)\%$ 增加到 $(85 \pm 3.5)\%$ ^[32]。MEC-FO 系统已经证明了从废弃物中回收资源的潜力,并为可持续废水管理提供了一种新的解决方案,笔者总结了 BES 采用不同方法回收 NH_3 的性能,结果见表 1。

表 1 BES(MFC 和 MEC)回收氨的性能
Table 1 Performance of BES(MFC and MEC) to recover ammonia

废水来源	类型	回收方法	回收效率/%	电流密度/ ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)	回收速率/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	输入能量/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$)	参考文献
尿液	MEC	浓缩	33.4	14.6	162	2.3	[33]
尿液	MEC	汽提	—	2.7	11.8	2.67	[26]
尿液	MEC	TMCS	46.0	1.6	19	2.6	[27]
尿液	MEC	TMCS	26.5	1.6	27	1.1	[28]
猪粪水	MFC	汽提	—	0.07	3.7	—	[25]
污泥水	MEC	汽提	79.0	28.2	—	20.5	[34]
合成废水	MEC	汽提	51.0 ± 0.5	27.0	226	6.0 ± 1.8	[22]
合成尿液	MEC	浓缩	49.5 ± 1.8	29.3	519.5	2.4	[35]
垃圾渗滤液	MEC	汽提/FO	63.7 ± 6.6	0.8	—	5.5	[30]
合成消化液	MFC	汽提	88.0	7.6	80	—	[23]
合成消化液	MFC	汽提	51.7	4.3	86	0.03	[24]
合成养殖废水	MEC- O_2	汽提/FO	81.0	1.8	7.6	5.1	[29]
合成养殖废水	MFC- O_2	FO	52.5 ± 4.7	2.6	25.9	—	[32]
合成养殖废水	MEC	汽提/FO/MAP	99.7 ± 13	0.76	—	1.1 ± 0.05	[31]

2 BES 回收 NH_3 的影响因素

2.1 电流密度

电流密度的高低会显著影响 BES 回收 NH_3 的效率。因为高电流密度可以加速 NH_4^+ 从阳极液到阴极液的迁移,并且提供更多的电子促进阴极液 pH 的增加,提高 NH_3 回收效率^[36]。 NH_4^+ 的解离常数为 9.25,大多数 NH_4^+ 在 pH 大于 9.25 时会转化为 NH_3 。P. KUNTKE 等^[37]通过 MFC 回收尿液中的 NH_3 ,在电流密度为 2.6 A/m^2 时,尿液中的 NH_3 回收速率为 $9.56 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,系统净生产能量为 10 kJ/g 。P. KUNTKE 等^[33]进一步利用 MEC 从尿液中回收 NH_3 同时产生 H_2 ,在电流密度为 $(14.64 \pm 1.65) \text{ A/m}^2$ 时, NH_3 的去除速率为 $162.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;在 $(23.07 \pm 1.15) \text{ A/m}^2$ 的电流密

度下, NH_3 的最大去除速率为 $173.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,结果表明电流密度越大, NH_3 去除速率越高。同样 Xue WU 等^[34]通过研究发现,电流为 5 mA 时阴极液的 pH 下降到 8.6, NH_3 回收效率是 52%;电流为 15 mA 时,阴极液中的 pH 达到 12, NH_3 回收效率为 94%。

2.2 共存阳离子

除 NH_4^+ 外,废水中其他阳离子,如 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 也会受电场诱导从阳极迁移到阴极,以保持 BES 的电荷中性。而这些常见阳离子的迁移速率为: $\text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$ ^[38],此外, H^+ 的迁移速率大约是 NH_4^+ 的 2 倍,所以 H^+ 首先从阳极传输到阴极生成 H_2 或 H_2O ,由于 H^+ 不断被消耗,阴极 pH 升高。然后 K^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 依次从阳极向阴极迁移。因此,当

BES的电流密度相对较低时,大量电荷最初可能被 H^+ 或 K^+ 中和, NH_3 的迁移受到负面影响,同时共存阳离子会影响鸟粪石回收氨的效率^[39]。 K^+ 、 Ca^{2+} 与 NH_4^+ 共同竞争 PO_4^{3-} ,干扰鸟粪石的形成。并且当溶液中 Ca^{2+} 含量增加时,鸟粪石的纯度非线性下降至60%,这将对实际应用造成严重影响。因为在高浓度 Ca^{2+} 条件下,需要在废水中投加镁,这将导致成本升高, NH_3 回收难以实现。

2.3 微生物

溶液中的游离氨容易穿透微生物细胞,扰乱胞内pH平衡,抑制酶活性,被认为对微生物有毒害作用。游离氨在溶液中的浓度取决于TAN的浓度、pH等^[40]。Luguang WANG等^[41]研究发现,在pH约为8的尿液中,TAN质量浓度高达3.9 g/L时,不会抑制MFC微生物产电。另一项研究也表明,在人工合成尿液中,当阳极电解液pH为7.1~7.45,TAN质量浓度高达5.88 g/L时,对微生物没有任何抑制作用^[35]。相反,M. MAHMOUD等^[42]指出,电化学活性细菌

(EAB)对高浓度TAN不具有抵抗力。因此,微生物是BES回收 NH_3 的关键。

2.4 能量平衡

汽提被广泛用于从BES阴极电解液中分离 NH_3 ,大量的能量被消耗在气泵上以促进这种分离。研究表明,超过90%的能源被外部电源和阴极电解液曝气消耗^[43]。施加适中的电压可降低能耗,从而提供更高能效的 NH_3 回收系统。此外,可以通过在MFC中直接发电或在MEC中生产 H_2 或沼气来补偿能耗。例如,可从产生的 H_2 中回收13.7 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 的能量,占 NH_3 回收比能耗的94.5%,净生产能量为-0.8 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ^[34]。目前只有处理 $\text{COD}>1\,000\text{ mg/L}$ 的高浓度废水的研究表明BES回收 NH_3 的平均净能量生产为 $(-3.6\pm 2.8)\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$,低于Haber-Bosch工艺 $(-14\sim -8\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg})$ ^[44]和厌氧氨氧化工艺^[45] $(-12\sim -6\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg})$,高浓度有机废水回收 NH_3 所需的净生产能量见表2。因此,需要建立能量天平在提高 NH_3 回收效率的同时节约能源。

表2 高浓度有机废水回收 NH_3 所需的净生产能量

Table 2 The net production energy required for the recovery of NH_3 from high-concentration organic wastewater

反应器类型	废水类型	COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH_4^+ 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	催化剂	净生产能量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$)	参考文献
MEC	合成养殖废水	1 170	393	Pt	-4.5	[43]
MEC	污泥水	1 280	1 000	—	-0.8	[36]
MEC	合成养殖废水	2 000	1 000	Pt	-1.6	[31]
MEC	合成废水(葡萄糖)	3 201	790	Pt	-5.1	[29]
MEC	垃圾渗滤液	4 540	1 000	Pt	-8.5	[30]

3 挑战与展望

BES在处理废水的同时可回收有用资源,在回收 NH_3 的所有技术中展现了巨大的潜力。但是,由于效率、成本、长期稳定性仍是未知的,且目前仍在实验室操作阶段,因此需要在这一领域做出更多努力使其应用于实际,未来应该从以下几方面做进一步的研究:

(1)改进反应器的设计,便于从浓缩的阴极电解液中连续提取 NH_3 。 NH_4^+ 的积累和 H^+ 在阴极的快速消耗增加了 H_2 析出或氧还原反应的过电位,最终限制了 NH_4^+ 向阴极电解液中的迁移。因此,从阴极电解液中在线提取游离 NH_3 十分重要,特别是设计透气膜和膜反应器选择性回收 NH_3 。最近的一项研究强调了设计膜电极以回收碱性界面上 NH_3 的重要性^[46]。

(2)因为铵盐沉淀在BES的阴极表面,所以应该

详细分析沉积物的成分,从肥料功效的角度确定它们对农作物和植物的影响,并且评估铵基沉淀物对阴极电极性能的影响以及被沉淀物覆盖的阴极再生或置换处理的可行性。

(3)影响BES回收 NH_3 的因素包括电流密度、阴极液pH、共存离子等。但这些因素中有一些是相互依赖的,因此需要对它们之间的相互作用进行分析,以提高 NH_4^+ 的迁移和扩散速率以及 NH_3 的回收率。

(4)负载比是优化当前从尿液中回收 NH_3 的关键参数。负载比表示施加电流密度与TAN加载速率的比值,是评估生物电化学系统中TAN去除效率和能量输入的重要参数,适宜的负载比可在最小的能量输入下实现最大限度的 NH_3 回收。

(5)从废水中回收 NH_3 扩展到从污泥中回收 NH_3 。氮以有机氮的形式存在于污泥中,有机氮占

污泥干重的3%~4%^[47]。一般来说, NH_3 挥发可以通过堆肥实现,但在堆肥发酵过程中容易流失氮素并且 NH_3 挥发到空气中会产生难闻气味^[48]。因此,寻找一种从污泥中有效释放 NH_3 的方法是必要的,该方法应具有分解不稳定有机氮,加快污泥释放 NH_3 的速度,从重金属等杂质中分离 NH_4^+ 的能力。

4 结论

本研究对 BES 回收 NH_3 的机理、性能及影响因素进行了概括总结。目前工业上使用的传统回收工艺通常需要投加药剂或是属于能源密集型。而 BES 不仅降低了处理成本和能源投入,还与传统工艺相结合,提高了 NH_3 回收效率;此外, NH_3 作为资源回收后可用于工业肥料生产,形成良性循环。尽管目前仍在实验室操作阶段,存在一些尚未解决的问题,但 BES 已经显示出替代传统工艺的潜力。随着对微生物作用机理和能量平衡的深入研究以及系统配置的改进, BES 将扩大规模,为废水中营养物质的高效去除和回收提供新的途径。

参考文献

- [1] LI Ruohong, LI Bing, LI Xiaoyan. An integrated membrane bioreactor system with iron-dosing and side-stream co-fermentation for enhanced nutrient removal and recovery: System performance and microbial community analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260: 248–255.
- [2] KUGLER K, OHS B, SCHOLZ M, et al. Towards a carbon independent and CO_2 -free electrochemical membrane process for NH_3 synthesis [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, 16(13): 6129–6138.
- [3] STRAND M C, GJERDE H, MØRLAND J. Driving under the influence of non-alcohol drugs [J]. *Forensic Science Review*, 2016, 28(2): 79–101.
- [4] FOLEY J, DE HAAS D, HARTLEY K, et al. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2010, 44(5): 1654–1666.
- [5] LEDEZMA P, KUNTKE P, BUISMAN C J, et al. Source-separated urine opens golden opportunities for microbial electrochemical technologies [J]. *Trends. Biotechnol.*, 2015, 33(4): 214–220.
- [6] CAI Ting, PARK S Y, LI Yebo. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19: 360–369.
- [7] DIPAK A J, SREEMOYEE G R, MAKARAND M G. Third generation in bio-electrochemical system research—A systematic review on mechanisms for recovery of valuable by-products from wastewater. Microbial electrosynthesis-revisiting the electrical route for microbial production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 1022–1031.
- [8] LOGAN B E. Microbial fuel cells: Methodology and technology [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(17): 5181–5192.
- [9] LOGAN B E, CALL D, CHENG SHAOAN, et al. Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(23): 8630–8640.
- [10] WANG Heming, REN Zhiyong. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology [J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31(8): 1796–1807.
- [11] RABAEY K, ROZENDAL R A, DUTTA P K, et al. Microbial electrosynthesis-revisiting the electrical route for microbial production [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(10): 706–716.
- [12] KELLY P T, HE Zhen. Nutrients removal and recovery in bioelectrochemical systems: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 153: 351–360.
- [13] COLOMBO A, MARZORATI S, LUCCHINI G, et al. Assisting cultivation of photosynthetic microorganisms by microbial fuel cells to enhance nutrients recovery from wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 237: 240–248.
- [14] QIN Mohan, HE Zhen. Resource recovery by osmotic bioelectrochemical systems towards sustainable wastewater treatment [J]. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2017, 3(4): 583–592.
- [15] LIU Ying, QIN Mohan, LUO Shuai, et al. Understanding ammonium transport in bioelectrochemical systems towards sustainable its recovery [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 22547–22557.
- [16] KIM J R, ZUO Yi, REGAN J M, et al. Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating animal wastewater [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 99(5): 1120–1127.
- [17] CORD-RUWISCH R, LAW Y, CHENG Kayu. Ammonium as a sustainable proton shuttle in bioelectrochemical systems [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(20): 9691–9696.
- [18] CHENG Kayu, KAKSONEN A H, CORD-RUWISCH R. Ammonia recycling enables sustainable operation of bioelectrochemical systems [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 143: 25–31.
- [19] KUNTKE P, SMIECH K M, BRUNING H, et al. Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell [J]. *Water Research*, 2012, 46(8): 2627–2636.
- [20] KUNTKE P, GELEJI M, BRUNING H, et al. Effects of ammonium concentration and charge exchange on ammonium recovery from high strength wastewater using a microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(6): 4376–4382.
- [21] PRADHAN S K, MIKOLA A, HEINONEN-TANSKI H, et al. Nitrogen and phosphorus harvesting from human urine using a stripping absorption and precipitation process [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 51(9): 5165–5171.
- [22] GILDEMYN S, LUTHER A K, ANDERSEN S J, et al. Electrochemically and bioelectrochemically induced ammonium recovery

- ry[J]. Journal of Visualized Experiments, 2015, 95: 3791-3803.
- [23] ZHANG Yifeng, ANGELIDAKI I. Submersible microbial desalination cell for simultaneous ammonia recovery and electricity production from anaerobic reactors containing high levels of ammonia[J]. Bioresource Technology, 2015, 177: 233-239.
- [24] ZHANG Yifeng, ANGELIDAKI I. Counteracting ammonia inhibition during anaerobic digestion by recovery using submersible microbial desalination cell[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2015, 112: 1478-1482.
- [25] SOTRES A, CERRILLO M, VINAS M, et al. Nitrogen recovery from pig slurry in a two-chambered bioelectrochemical system[J]. Bioresource Technology, 2015, 194: 373-382.
- [26] ZHANG Yifeng, ANGELIDAKI I. Recovery of ammonia and sulfate from waste streams and bioenergy production via bipolar bioelectrodialysis[J]. Water Research, 2015, 85: 177-184.
- [27] KUNTKE P, ZAMORA P, SAAKES M, et al. Gas-permeable hydrophobic tubular membranes for ammonia recovery in bio-electrochemical systems[J]. Water Research and Technology, 2016, 2(2): 261-265.
- [28] ZAMORA P, GEORGIEVA T, TER H A, et al. Ammonia recovery from urine in a scaled-up microbial electrolysis cell[J]. Journal of Power Sources, 2017, 356: 491-499.
- [29] QIN Mohan, HE Zhen. Recovering ammonium bicarbonate to achieve wastewater treatment and reuse in a microbial electrolysis cell-forward osmosis-coupled system[J]. Environmental Science and Technology Letters, 2014, 10: 437-441.
- [30] QIN Mohan, MOLITOR H, BRAZIL B, et al. Recovery of nitrogen and water from landfill leachate by a microbial electrolysis cell-forward osmosis system[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 485-492.
- [31] ZOU Shiqiang, KANIMBA E, DILLER T E, et al. Modeling assisted evaluation of direct electricity generation from waste heat of wastewater via a thermoelectric generator[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1215-1224.
- [32] QIN Mohan, HYNES E A, ABUREESH I M, et al. Ammonium removal from synthetic wastewater promoted by current generation and water flux in an osmotic microbial fuel cell[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 856-862.
- [33] KUNTKE P, SLEUTELS T H J A, SAAKES M, et al. Hydrogen production and ammonium recovery from urine by a microbial electrolysis cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(10): 4771-4778.
- [34] WU Xue, MODIN O. Ammonium recovery from reject water combined with hydrogen production in a bioelectrochemical reactor[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 530-536.
- [35] LEDEZMA P, JERMAKKA J, KELLER J, et al. Recovering nitrogen as a solid without chemical dosing: Bio-electroconcentration for recovery of nutrients from urine[J]. Environmental Science and Technology Letters, 2017, 4(3): 119-124.
- [36] ZHANG Fei, LI Jian, HE Zhen. A new method for nutrients removal and recovery from wastewater using a bioelectrochemical system[J]. Bioresource Technology, 2014, 166: 630-634.
- [37] KUNTKE P. Nutrient and energy recovery from urine[D]. Netherlands: Wageningen University, 2013.
- [38] KIM T, AN J, JAE K J, et al. Coupling of anaerobic digester and microbial fuel cell for COD removal and ammonia recovery[J]. Bioresource Technology, 2015, 195: 217-222.
- [39] RONTETAP M, MAURER M, GUJER W. Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine[J]. Water Research, 2007, 41(5): 977-984.
- [40] YENIGÜN O, DEMIREL B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review[J]. Process Biochemistry, 2013, 48(5/6): 901-911.
- [41] WANG Luguang, XIE Beizhen, GAO Ningshengjie, et al. Urea removal coupled with enhanced electricity generation in single-chambered microbial fuel cells[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(25): 20401-20408.
- [42] MAHMOUD M, PARAMESWARAN P, TORRES C I, et al. Electrochemical techniques reveal that total ammonium stress increases electron flow to anode respiration in mixed-species bacterial anode biofilms[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2017, 114(6): 1151-1159.
- [43] QIN Mohan, LIU Ying, LUO Shuai, et al. Integrated experimental and modeling evaluation of energy consumption for ammonia recovery in bioelectrochemical systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 327: 924-931.
- [44] JAN W E, MARK A S, JAMES G, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(10): 636-639.
- [45] WANG L K, SHAMMAS N K, HUNG Y T. Advanced biological treatment processes[M]. USA: Humana Press, 2010: 185-207.
- [46] HOU Dianxun, IDDYA A, CHEN Xi, et al. Nickel-based membrane electrodes enable high-rate electrochemical ammonia recovery[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(15): 8930-8938.
- [47] HARTMAN M, TRNKA O, POHORELÝ M. Oxidation of organic nitrogen in stoichiometric and balance calculations of the combustion of stabilized sewage sludge[J]. Chemicke Listy, 2007, 101(4): 310-314.
- [48] SHEN Ye, HE Chao, CHEN Xiaoping, et al. Effective nitrogen removal and recovery from dewatered sewage sludge using a novel integrated system of accelerated hydrothermal deamination and air stripping[J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49(11): 6872-6880.
- [作者简介] 罗昕怡(1996—), 硕士研究生。电话: 15959762054, E-mail: 939085965@qq.com。通讯作者: 游少鸿。E-mail: youshaohong@glut.edu.cn。
- [收稿日期] 2021-11-07(修改稿)