

生物电化学处理水体富营养化研究进展

徐毓敏, 赵霞, 李博文, 张家轩, 裴维娜

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730000)

[摘要] 水体富营养化问题日趋严峻, 氮磷营养元素大量进入水体, 严重危害人体健康和生态环境。生物电化学系统(BES)作为一种新型绿色技术, 在处理废水的同时能够产电回收能量。综述了BES脱氮反应器构型及其与其他水处理技术耦合工艺在水体治理方面的研究进展, 以及BES除磷技术的效果及存在问题。指出: 将反应器进行放大试验, 有效经济地应用于污水处理实践是未来急需解决的问题。

[关键词] 水体富营养化; 生物电化学; 脱氮; 除磷; 污水处理

[中图分类号] X524

[文献标志码] A

[文章编号] 1006-1878(2021)03-0273-06

[DOI] 10.3969/j.issn.1006-1878.2021.03.004

Research progresses on treatment of water eutrophication by bioelectrochemical system

XU Yumin, ZHAO Xia, LI Bowen, ZHANG Jiaxuan, PEI Weina

(School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The eutrophication of water body is becoming more and more serious. A large amount of nitrogen and phosphorus nutrients enter the water body, causing serious harm to human health and the ecological environment. As a new green technology, microbial electrochemical system (BES) can produce electricity and recover energy while treating wastewater. The research progresses of configuration of BES denitration reactor and the combination processes with other water treatment technologies in water treatment, as well as the effects and existing problems of BES phosphorus removal technology are reviewed. It is pointed out that the scale-up test of the reactor and its effective and economical application in sewage treatment practice are the main problems that need to be solved in the future.

Key words: water eutrophication; bioelectrochemistry; nitrogen removal; phosphorus removal; sewage treatment

工农业生产废水及生活污水中含有大量氮磷营养元素, 这些废水排入环境水体后造成水体富营养化愈加严重, 极大地影响了水资源的循环利用。为了改善氮磷对环境水体的影响, 去除水体中的氮磷化合物及回收营养物质已成为研究热点。

本文综述了生物电化学系统(BES)脱氮反应器构型及其与其他水处理技术耦合工艺在水体治理方面的研究进展, 以及BES除磷技术的效果及存在问题。为解决水体富营养化, 有效去除和回收氮、磷等营养元素提供新的研究思路。

1 BES脱氮技术

BES技术通过促进微生物的电子传递, 在加快去除有机污染物的同时, 将化学能转化为电能, 可同时实现污水中有机污染物去除和能源、资源回

收, 具有广阔的发展前景, 符合我国绿色可持续发展的理念。

传统生物脱氮技术有序批式反应器(SBR)工艺、活性污泥法、A²O脱氮除磷工艺等。目前传统生物脱氮技术已较为成熟, 效果好, 成本低, 无二次污染, 存在的主要问题是需要大量碳源, 微生物生长周期长, 且易受环境影响, 在处理低浓度废水时, 由于缺少碳源会限制反硝化细菌的生长, 反硝化效率不佳^[1]。BES脱氮技术是由自养型反硝化细菌进行脱氮^[2-3], 解决了生物对碳源的依赖, 废水处理成本低, 剩余污泥产生量少。

[收稿日期] 2020-07-31; [修订日期] 2020-11-27。

[作者简介] 徐毓敏(1996—), 女, 甘肃省武威市人, 硕士生, 电话 18722063282, 电邮 xuyuming123@163.com。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(21667017)。

1.1 氮的回收

BES通常采用冷凝的方法将氮以液氨的形式回收。在工业原料和农业肥料中通过 NH_3 与 CO_2 反应生成 NH_4HCO_3 将其回收,或与稀硫酸反应生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 以回收利用^[4]。

1.1.1 微生物燃料电池(MFCs)氮回收

在MFCs的阳极室中,有机物被驯化的产电菌降解,产生的电子通过外电路形成电流到达阴极,阳极室废液中的 NH_4^+ 依靠扩散和电子迁移,通过阳离子交换膜(CME)传递到阴极室;阳离子到达阴极室后,由于pH升高使 NH_4^+ 以 NH_3 形式挥发^[5],可采用空气或 N_2 气提的方法,将 NH_3 吹脱回收。

CLAUWAERT等^[6]以阳极中的乙酸盐被氧化反应为微生物提供电子进行脱氮,设计了一种内部带有阴极的管式反应器,阴极中将 NO_3^- 作为最终的电子受体,成功去除有机碳和硝酸盐,实现了MFC生物阴极反硝化。VIRDIS等^[7]通过设计反应器构型将硝化反应整合到阴极室中,实现同步硝化和反硝化。

1.1.2 微生物电解池(MECs)氮回收

MECs是在外加电压的情况下,微生物降解酶被激活后将污染物去除同时产氢,阴极液生成的 H_2 将 NH_3 吹脱回收^[8]。

LIU等^[9]研究发现,当电流密度为 1 A/m^2 时,以 NH_4^+ 扩散作用为主导。DESLOOVER^[10]研究发现,当电流密度大于 5 A/m^2 时,以电子迁移为主导。可见在MECs脱氮工艺中,外加电压的选择会影响 NH_4^+ 和电子的转移方式。

1.2 BES脱氮工艺

常见的BES脱氮反应器构型分为单室反应器、双室反应器及多室反应器。

1.2.1 单室反应器

单室反应器是将阴极和阳极置于同一反应室中,无分割膜,具有离子传递速率快、内阻小、中间离子交换膜成本低等优点^[11],单室中阴极电子受体为空气中的氧气。ZHANG等^[12]开发了一种单室旋转生物阴极MFC,对COD和TN的去除率分别为85.7%和91.4%。该装置进一步证明了电化学方法可有效催化硝酸盐发生还原反应,顶部旋转阴极上生物膜外层发生硝化反应,内部发生反硝化反应,实现了自养反硝化,直接以阴极微电子供体脱氮。自养反硝化解决了微生物对碳源的依赖,降低了废水处理成本。

ZANG等^[13]采用单室MFC处理尿素废水,氮、磷以磷酸铵镁形成沉淀。罗净净等^[14]设计的单室空气阴极MFC反应器以碳布为电极材料,氮回收效果不佳,对阳极液进行曝气后磷酸盐以鸟粪石结晶的形式被去除,去除率达95.2%,TN去除率达79.6%。

高秀红等^[15]采用单室沉积型微生物燃料电池(SMFC)处理垃圾渗滤液和污泥,COD和氨氮去除率分别为96.18%和80.60%,实现了净水、污泥减量及产电一体化,但燃料电池内阻过大,限制了MFC的产电性能。

1.2.2 双室反应器

双室反应器是用离子交换膜或盐桥等将单阳极和单阴极分隔开,阳极室中主要发生氧化反应并产生质子,阳极室中的质子穿过质子交换膜进入阴极室,阻止阴极室的溶解氧扩散进入阳极室,质子在阴极上发生还原反应并降解污染物。

KUNTKE等^[16]在高氨浓度下设计的双室MFC以有机底物产生电子,铁氰化钾作为阴极电子受体,实现了氮回收并产生电能。WU等^[17]开发了生物电化学双室反应器用于同步产氢和氮回收,阳极产生的质子传递到阴极被还原成氢气后,阴极pH升高使得 NH_4^+ 转化成氨气被酸化回收,在模拟废水中氮回收率达94%,在实际废水中氮回收率达79%。黄丽巧等^[18]构建了基于阴离子交换膜的双室微生物燃料电池(AEM-MFC)体系,实现了阴极硝化和阳极反硝化的同步进行,AEM-MFC在66 h内可去除 200 mg/L 的TN,无需外加酸或碱,节约了运行成本且回收了电能。

双室反应器改善了COD和氨氮处理效果,提高了出水水质,但在实际应用中因离子交换膜价格昂贵,长期使用影响质子传递速率,质子易堆积沉淀在离子交换膜上,导致内阻变大,耗能提高,成本上升。

1.2.3 多室反应器

多室反应器是由多个阳极室和阴极室组成的,各极室之间用质子交换膜分隔。ZHANG等^[19]构建了管状双阴极MFC,可发生外阴极的硝化和内阴极的反硝化过程,双阴极MFC成功将氨氮转化为硝酸盐,再转化为氮气,氨氮去除率达96%以上,总氮去除率为66.7%~89.6%。该装置两个阴极共用一个阳极,可有效提高污染物去除率。由于阴阳极室之间增加了阴离子交换膜和阳离子交换膜,

增加了成本。以降低耗能、提高内阴极自养反硝化效率来实现短程硝化是双阴极MFC未来的发展方向。

XIE等^[20]研发的由好氧生物阴极MFC和厌氧生物阴极MFC耦合的生物燃料电池,对废水中有机物和总氮的去除率分别达98.8%和97.4%。SAN-MARTÍN等^[21]利用MEC同步脱氮除碳,将MEC由5个电极对分成6个反应室,每个阳极和阴极之间由阴离子交换膜分离,总有机碳和总氮去除率分别为80%和70%。但该硝化反应器未能完全将氨氮转化为硝酸盐,反硝化受限。

与单、双室反应器不同,多室反应器可同时处理多种物质,但由于各极室间增设的分割膜导致成本上升,在长期运行中面临膜污染问题,不利于该体系长期稳定运行,这将限制实际工艺的应用。

1.2.4 BES耦合工艺

随着BES在水处理技术中的广泛应用,将BES与其他废水处理技术的耦合应用,同步实现废水氨氮处理和能源回收引起了不少学者的关注^[22]。VIRDIS等^[23]将传统A/O污水处理技术和MFC耦合,将硝化反应器与MFC连接,使阳极出水中所含的 NH_4^+-N 在硝化反应器中氧化为 NO_3^--N ,然后进入MFC阴极进行脱氮反硝化。LIU等^[24]将BES与生物制氢技术进行耦合,提高了 NO_3^--N 的去除率。

QIN等^[25]将正向渗透(FO)与MEC耦合用于垃圾渗滤液的氨回收,在MEC阴极中通过与 CO_2 反应生成 NH_4HCO_3 进行回收,回收率达79.7%;阳极液流入FO系统中进行清水回收,回收率达51%。MEC-FO耦合工艺实现了对有机物和铵盐的连续处理,进一步优化了MEC和FO之间的协调性能。

LIU等^[26]采用MFC-MEC与厌氧折流板反应器(ABR)耦合,实现了粪便污水中氮与碳的同时去除和能量回收。ABR-MFC-MEC耦合增加了整体工艺的抗冲击能力,但氨氮去除率较低,这可能是由于COD的增加抑制了MEC中氨的阳极氧化^[23],因此,在ABR-MFC-MEC系统单室和双室中COD去除率达99.2%和98.9%,而 NH_4^+-N 去除率只有51.7%和46.4%。LOGAN等^[27]在2006年提出了MFC作为MBR预处理工艺的概念。LI等^[28]研究发现双室MFC与生物膜反应器(MBR)耦合系统的COD去除率为 $94.6\% \pm 3.0\%$, NH_4^+-N 去除率为 $90.9\% \pm 6.9\%$,出水水质稳定。

因人工湿地(CWs)处理低碳氮比废水脱氮效果差,HE等^[29]研发了一种新反应器CW-BES耦合系统,TN去除率达98.11%。XU等^[30]利用生物电化学辅助人工湿地(BECW)进行反硝化去除硝酸盐,在无碳源条件下,BECW具有很高的反硝化效率,在外加电流为15 mA时,TN去除率为 $78.92\% \pm 3.12\%$ 。XU等^[31]采用CW-MFC耦合工艺利用微生物产电同时净化废水,CW-MFC工艺的TN去除率达 $82.46\% \pm 4.74\%$,COD和TP去除率分别达 $82.32\% \pm 12.85\%$ 和 $95.06\% \pm 5.45\%$,均显著高于CW工艺。

BES与传统污水处理工艺进行耦合可实现优势互补,具有广阔的发展前景。

1.3 BES脱氮工艺存在的问题

BES应用在水处理技术中具有巨大的潜力。传统水处理技术需要消耗大量能源,BES处理废水时,可避免耗能,减少碳源等成本。目前,BES中通过优化反应器构型,在避免电极材料和能量损耗的同时,强化传统水处理技术与BES耦合,进一步提高能源回收效率。在BES反应器中进行脱氮时,需注意 NO 、 NO_2 等中间产物,避免造成二次污染。研究表明,利用MFCs去除TN,效率要比产电更有价值,现有的脱氮技术并没有很好地解决污染物的能量回收问题,因此BES在资源、能源回收方面应加大研发力度。

2 BES除磷技术

磷作为一种不可再生资源,储量严重下降^[32]。通常磷较多存在于养殖废水和生活污水中,城市污水处理厂在对生活污水进行处理时,磷元素一般是以剩余污泥形式被处理^[33],不仅导致资源上的浪费,而且在流入地表水及地下水时易造成二次污染,加剧水体富营养化。研究者发现,BES耦合体系对废水中的磷具有有效的去除和回收效果。

2.1 BES除磷技术

2.1.1 BES-光反应器耦合除磷

传统MFCs对废水的除磷效率较低。研究者们发现,在光合作用下,微藻类可以有效地去除废水中的氮和磷^[34]。为了提高废水的处理效率,有研究者开发了由MFC和微藻培养组成的组合工艺,处理废水中的氮磷。ZHANG等^[35]开发出细菌-微藻耦合系统,这是一种在微藻作用下的沉积型微生物燃料电池(PFC),能在提取能量的同时去除废水

中的碳、氮、磷，其中磷的去除率达69.8%。研究发现，藻类浓度对MFC的TP去除率有较大影响。

XIAO等^[36]将MFC放置在藻类生长反应器内，集成的光电化学系统(IPB)的COD去除率达92%， NH_4^+ -N和 PO_4^{3-} 的去除率分别为98%和82%，产电的最大功率密度为2.2 W/m³，藻类生物量128 mg/L。研究发现，体系中的藻类可为MFC阴极反应提供溶解氧，MFC阴极上的电化学氧化还原缓冲了藻类生长的pH，说明MFC与藻类生物反应器的结合能更好地实现有机物和营养物的同时去除，并在该过程中产生电能和藻类生物，但该研究也需要进一步改善产电量。JIANG等^[37]将上流式无膜微生物燃料电池(upflow ML-MFC)和光生物反应器组成耦合系统，将上流式ML-MFC阴极室的出水流入外置的光生物反应器，利用微藻去除剩余的氮和磷，TP去除率达99.3%，TN去除率达99.0%。WANG等^[38]研究发现，微藻类固定化光合自养微生物燃料电池(PMFC)对COD、TN和 PO_4^{3-} 的去除率分别高达93.2%、95.1%和82.7%，最大产电功率密度达466.9 mW/m³。

LIU等^[39]设计了微生物燃料电池与太阳能电池(MFC-SC)耦合系统，该系统的TP去除率从传统MFC的13.0%提升到24.4%，证明微生物燃料电池可实现与太阳能电池的耦合来强化MFC对水体富营养化的处理。

2.1.2 其他BES耦合技术除磷

有研究表明^[40]，MFC可以和渗透膜生物反应器(OMBRs)结合，使用新型薄膜复合材料(TFC)膜的MFC-OMBR磷去除率超过99%。HOU等^[41]将BES单元整合到厌氧渗透膜生物反应器(AnOMBR)中，显示出优异的有机物去除率(>93%)和磷去除率(>99%)。DENG等^[42]开发了一种带有海绵的阴极室和两个阳极室组成的生物燃料电池(Sponge-MFC)，其除磷率(82.06% ± 1.21%)比传统MFC(53.97% ± 2.32%)更高。该系统适用于处理低C/N废水。

如今将BES与其他技术耦合同步去除磷等营养元素的研究越来越广泛，为实际应用BES有效去除污染物打下了坚实基础。

2.2 磷去除及回收的问题和挑战

目前利用BES技术去除磷的研究相对于脱氮技术的研究较少，发展较为缓慢，原因可能是在去除磷的方式上是以沉淀形式为主，且磷化合物不参与

氧化还原等电子转移过程。通常在传统除磷工艺的基础上进一步改善工艺技术，更多情况是将BES与传统工艺耦合进行除磷。目前磷相关的环境污染问题依然很严重，水体富营养化问题日渐加剧，如何高效去除和回收磷，有效从排放的废水中获得磷资源成为应首要解决的技术难题。

3 结语

BES系统能高效脱氮除磷，成本低且无二次污染。电极材料的选用以及改性等会影响BES的性能。反应器构型的设计在节约材料成本、优化占地面积以及改善产电性能等方面的优势，将有助于提高BES脱氮除磷效率和实际应用。目前BES应用在实际工业处理中较为困难，仍然局限在小型反应器的试验之中，反应器体积过小，发电量不足等导致与实际应用脱轨，因此，将反应器进行放大试验，有效经济地应用于污水处理实践是未来急需解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 赵慧敏. 双室微生物燃料电池脱氮特性及微生物学机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [2] 郑贤虹. 微生物电化学系统强化废水生物脱氮的工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [3] NANCHARAI AH Y V, MOHAN S V, LENS P N, et al. Recent advances in nutrient removal and recovery in biological and bioelectrochemical systems[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 215: 173–185.
- [4] ISKANDER S M, BRAZIL B, NOVAK J T, et al. Resource recovery from landfill leachate using bioelectrochemical systems: opportunities, challenges, and perspectives[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 215: 347–354.
- [5] KELIY P T, ZHEM H. Nutrients removal and recovery in bioelectrochemical systems: a review[J]. *Bioresour Technol*, 2014, 153 (2): 351–360.
- [6] CLAUWAERT P, RABAEY K, AELTERMAN P, et al. Biological denitrification in microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41 (9): 3354–3360.
- [7] VIRDIS B, RABAEY K, ROZENDAL R A, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and carbon removal in microbial fuel cells[J]. *Water Res*, 2010, 44 (9): 2970–2980.
- [8] HADDADI S, ELBESHBI SHY E, LEE H S. Imple-

- cation of diffusion and significance of anodic pH in nitrogen-recovering microbial electrochemical cells[J]. *Bioresour Technol*, 2013, 142: 562 – 569.
- [9] LIU Y, QIN M, LUO S, et al. Understanding ammonium transport in bioelectrochemical systems towards its recovery[J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 22547.
- [10] DESLOOVER J, WOLDEYOHANNIS A A, VERSTRAETE W, et al. Electrochemical resource recovery from digestate to prevent ammonia toxicity during anaerobic digestion[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(21): 12209 – 12216.
- [11] 孙丹. 定向优选阳极微生物促进生物电化学系统效能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [12] ZHANG G, ZHANG H, ZHANG C, et al. Simultaneous nitrogen and carbon removal in a single chamber microbial fuel cell with a rotating biocathode[J]. *Process Biochem*, 2013, 48(5): 893 – 900.
- [13] ZANG G, SHENG G, LI W, et al. Nutrient removal and energy production in a urine treatment process using magnesium ammonium phosphate precipitation and a microbial fuel cell technique[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2012, 14(6): 1978 – 1984.
- [14] 罗净净, 周少奇, 许明熠, 等. 单室微生物燃料电池产电与脱氮除磷的研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(6): 1955 – 1961.
- [15] 高秀红, 郭彩芳, 石瑛君, 等. 垃圾渗滤液-沉积污泥微生物燃料电池的产电性能[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(11): 6519 – 6523.
- [16] 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]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(6): 4376 – 4382.
- [17] WU X, MODIN O. Ammonium recovery from reject water combined with hydrogen production in a bioelectrochemical reactor[J]. *Bioresour Technol*, 2013, 146: 530 – 536.
- [18] 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.
- [19] ZHANG F, HE Z. Integrated organic and nitrogen removal with electricity generation in a tubular dual-cathode microbial fuel cell[J]. *Process Biochem*, 2012, 47(12): 2146 – 2151.
- [20] XIE S, LIANG P, CHEN Y, et al. Simultaneous carbon and nitrogen removal using an oxic/anoxic-bio-cathode microbial fuel cells coupled system[J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(1): 348 – 354.
- [21] SAN-MARTÍN M I, MATEOS R, CARRACEDO B, et al. Pilot-scale bioelectrochemical system for simultaneous nitrogen and carbon removal in urban wastewater treatment plants[J]. *J Biosci Bioeng*, 2018, 126(6): 758 – 763.
- [22] 赵楠. 生物电化学系统(BES)强化废水中氨氮的去除和回收研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- [23] VIRDIS B, RABAEY K, YUAN Z, et al. Microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal[J]. *Water Res*, 2008, 42(12): 3013 – 3024.
- [24] LIU H, YAN Q, SHEN W, et al. Biohydrogen facilitated denitrification at biocathode in bioelectrochemical system (BES)[J]. *Bioresour Technol*, 2014, 171: 187 – 192.
- [25] QIN M, HE Z. Self-supplied ammonium bicarbonate draw solute for achieving wastewater treatment and recovery in a microbial electrolysis cell-forward osmosis-coupled system[J]. *Environ Sci Technol Lett*, 2014, 1(10): 437 – 441.
- [26] LIU H, LV Y C, XU S Y, et al. Configuration and rapid start-up of a novel combined microbial electrolytic process treating fecal sewage[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 705: 135986.
- [27] LOGAN E, HAMELERS B, ROZENDAL R, et al. Microbial fuel cells: methodology and technology[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17): 5181 – 5192.
- [28] LI Y H, LIU L F, YANG F L. Destruction of tetracycline hydrochloride antibiotics by FeOOH/TiO₂ granular activated carbon as expanded cathode in low-cost MBR/MFC coupled system[J]. *J Membr Sci*, 2017, 525: 202 – 209.
- [29] HE Y, WANG Y, SONG X, et al. High-effective denitrification of low C/N wastewater by combined constructed wetland and biofilm-electrode reactor (CW-BER)[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 203: 245 – 251.
- [30] XU D, XIAO E, XU P, et al. Performance and microbial communities of completely autotrophic denitrification in a bioelectrochemically-assisted constructed wetland system for nitrate removal[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 228: 39 – 46.
- [31] XU F, CAO F Q, KONG Q, et al. Electricity production and evolution of microbial community in the constructed wetland-microbial fuel cell[J]. *Chem Eng*

- J, 2018, 339: 479 – 486.
- [32] MAYER B K, BAKER L A, BOYER T H, et al. Total value of phosphorus recovery [J]. Environ Sci Technol, 2016, 50(13): 6606 – 6620.
- [33] RASHED E M, EL-SHAFEI M M, HEIKAL M A, et al. Application of contact stabilization activated sludge for enhancing biological phosphorus removal (EBPR) in domestic wastewater [J]. HBRC J, 2014, 10(1): 92 – 99.
- [34] MARTINEZ M E. Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus* [J]. Bioresour Technol, 2000, 73(3): 263 – 272.
- [35] ZHANG Y, NOORI J S, ANGELIDAKI I, et al. Simultaneous organic carbon, nutrients removal and energy production in a photomicrobial fuel cell (PFC) [J]. Energy Environ Sci, 2011, 4(10): 4340 – 4346.
- [36] XIAO L, YOUNG E B, BERGES J A, et al. Integrated photo-bioelectrochemical system for contaminants removal and bioenergy production [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(20): 11459 – 11466.
- [37] JIANG H, LUO S, SHI X, et al. A system combining microbial fuel cell with photobioreactor for continuous domestic wastewater treatment and bioelectricity generation [J]. J Cent South Univ, 2013, 20(2): 488 – 494.
- [38] WANG Y, LIN Z, SU X, et al. Cost-effective domestic wastewater treatment and bioenergy recovery in an immobilized microalgal-based photoautotrophic microbial fuel cell (PMFC) [J]. Chem Eng J, 2019, 372: 956 – 965.
- [39] LIU Z, WANG J, ZHANG T, et al. The effects of microbial fuel cells coupled with solar cells under intermittent illumination on sediment remediation [J]. Environ Sci Process Impacts, 2019, 21(12): 2141 – 2149.
- [40] HOU D, LU L, REN Z J, et al. Microbial fuel cells and osmotic membrane bioreactors have mutual benefits for wastewater treatment and energy production [J]. Water Res, 2016, 98: 183 – 189.
- [41] HOU D, LU L, SUN D, et al. Microbial electrochemical nutrient recovery in anaerobic osmotic membrane bioreactors [J]. Water Res, 2017, 114: 181 – 188.
- [42] DENG L, NGO H H, GUO W, et al. Evaluation of a new sponge addition-microbial fuel cell system for removing nutrient from low C/N ratio wastewater [J]. Chem Eng J, 2018, 338: 166 – 175.

(编辑 祖国红)



扫码了解更多相关信息