

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.16.001

微生物燃料电池型水质生物毒性传感器的研究进展

刘艳娟¹, 卢洪斌², 孟丽聪¹, 黄张根²

(1. 唐山学院 唐山市水环境治理与水生态修复重点实验室, 河北 唐山 063000; 2. 中国科学院山西煤炭化学研究所 煤转化国家重点实验室, 山西 太原 030001)

摘要: 微生物燃料电池(Microbial fuel cell, MFC)是通过微生物的代谢过程将有机物中的化学能直接转化为电能的装置,在毒性传感器领域具有较好的应用和开发前景。为了更好地指导MFC作为毒性传感器的应用发展,就MFC作为毒性传感器的理论基础、构型选择、用于毒性评价的影响因素、研究现状以及存在的问题等方面进行了总结。结果表明,阳极微生物种类、剪切速率(体积流量)、外电阻、溶解氧、电导率等因素直接影响MFC对废水毒性的评价效果。已有研究实现了评价某特定毒性物质的毒性或应用于评价实际水体毒性,但仍有较多科学问题(如启动时间较长限制研究发展、尚未实现定性评价、稳定性欠佳等)亟待解决。

关键词: 微生物燃料电池; 毒性传感器; 生物毒性评价; 影响因素; 研究现状

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)16-0001-07

Research Progress of Microbial Fuel Cell as Wastewater Biological Toxicity Sensor

LIU Yan-juan¹, LU Hong-bin², MENG Li-cong¹, HUANG Zhang-gen²

(1. Tangshan Key Laboratory of Water Environment Treatment and Water Ecological Restoration, Tangshan University, Tangshan 063000, China; 2. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China)

Abstract: The microbial fuel cell (MFC) is a device that converts chemical energy in organic matters into electrical energy directly through the metabolic process of microorganisms, which has a good application and development prospect in the field of toxicity sensors. The theoretical basis, configuration selection, influencing factors for toxicity evaluation, research status and existing problems of MFC as a toxicity sensor were summarized to better guide the development of MFC as a toxicity sensor. The results showed that the types of anode microorganisms, shear rate (volume flow), external resistance, dissolved oxygen and electrical conductivity would directly affect MFC's effect in evaluating the toxicity of wastewater. It has been applied to assess the toxicity of a specific toxic substance or actual water toxicity. However, scientific problems such as long start-up time to limit research development, not yet achieved

基金项目: 唐山市水环境治理与水生态修复重点实验室开放基金项目; 中国科学院山西煤炭化学研究所自主创新基金项目-基础研究项目(SCJC-WRW-2023-18); 山西省基础研究计划项目(202203021222404); 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室开放基金项目(2022HPYB-09)

通信作者: 刘艳娟 E-mail: juan1809@163.com

qualitative evaluation, poor stability, etc., still need to be solved.

Key words: microbial fuel cell; toxicity sensor; biological toxicity evaluation; influencing factors; research status

微生物燃料电池(Microbial fuel cell, MFC)是通过微生物的代谢过程将有机物中的化学能直接转化为电能的装置。起初, MFC用于BOD₅的测试, 其与标准法相比只有10%的误差。直到近10年, 研究者们发现MFC具有用于生物毒性评价的潜力, 并进行了大量研究。例如, Kaur等^[1]在H型MFC中接种了厌氧消化污泥, 用于挥发性脂肪酸的分析; Liu等^[2]采用壁挂式MFC对上流式厌氧活性污泥床反应器进行监测, 结果表明MFC生物传感器可以与模拟废水和实际废水的生物产气率很好地响应; 王博等^[3]建立了MFC水质生物毒性预警系统, 用以保障水质应急预案的响应和执行工作。

MFC在污(废)水生物毒性评价方面表现出灵敏性好、检测速度快、可在线监测等优点, 具有广阔的应用前景。基于此, 就MFC的工作原理、构型、用于毒性评价的影响因素、研究现状以及存在的问题进行了总结和分析, 以期MFC作为毒性传感器的发展提供参考。

1 MFC作为毒性传感器的理论基础

在厌氧条件下, 随着培养时间的延长, MFC阳极电极材料上会附着具有产电能力的微生物, 许多厌氧微生物只能将电子传递给可溶性外源化合物如硫酸盐或硝酸盐, 而这类产电细菌可以直接将电子转移给化合物或间接电子受体, 使得MFC系统产电得以实现。微生物在新陈代谢过程中产生电子, 并通过一组呼吸酶在细胞内传递, 以ATP形式为细胞提供能量, 电子进而被释放给最终电子受体, 最终电子受体得到电子后被还原, 其还原产物会从细胞中扩散出来。

因此有机物被降解的同时将会产生质子和电子, 产生的质子通过MFC两电极之间的质子交换膜进入阴极室, 而电子则通过MFC阴阳极之间的外电路被输送进入阴极室, 在阴极室内, 质子和电子和电子受体发生化学反应, 完成整个电流循环的过程, 并产生电压和电流。

MFC型毒性传感器的具体工作原理^[4]如图1所示。

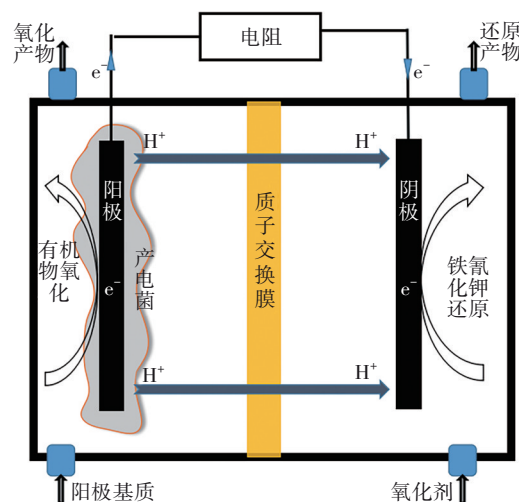


图1 MFC原理

Fig.1 Principle of microbial fuel cell

阳极上具有产电活性的细菌通过代谢作用产生的电子与电极表面发生的传递机制, 对于生物传感器的研究具有重要的作用。已发现的阳极电子传递机制主要有3种: 纳米导线传递、细胞色素c传递和电子解体传递机制。具有产电活性的微生物可以产生纳米导线(类似于纤毛状的具有电子传导能力的结构), 到目前为止, 虽然纳米导线的导电性能得到了确认, 但是电子的传递机制尚不十分明确。以游离状态存在于细胞膜内的多血红细胞色素c能够实现电子的转移, 具体方式为: 产电微生物细胞内形成的电子以脱氢酶、辅酶Q等有机物为载体被运送至细胞膜内膜, 与内膜上的细胞色素c蛋白结合后再转移至细胞膜外膜, 最终转移至与细胞接触的电子受体。具有产电活性的微生物产生电子以后, 利用溶液中的氧化还原介体将产生的电子从细胞呼吸链传递到电极表面。电子介体主要包括人为加入的外源性电子介体、微生物自身分泌的初级代谢产物及或次级代谢产物。目前已发现的外源性电子介体有Fe(III)-EDTA、可溶性醌、中性红、甲基紫精、亚甲基蓝等。外源电子介体应具有较好的性能, 如获得电子能力强、无毒且易于降解、具有稳定的氧化还原状态等。但是此种化学品普遍存在价格昂贵、难以重复利用、具有生物毒性等

不足,限制了其实际应用。可以作为初级代谢产物的物质有 H_2S 、乙醇、甲酸等,这些物质可在细胞的呼吸过程或发酵过程中产生。微生物的次级代谢产物如绿脓菌素、核黄素等物质,作为电子介体传递电子的过程与初级代谢产物的传递过程类似,且同样可以被重复利用。由MFC产电原理可知,当有毒物质进入MFC并与具有产电活性的微生物接触时,微生物的代谢将受到有毒物质的抑制,从而导致产电活性变差,输出的电压/电流降低。而电压/电流的下降程度与有毒物质的种类、浓度、微生物的产生环境均有一定的关系。微生物受到的毒性冲击越大,输出电压/电流的下降程度就越大,因此可根据有毒物质与输出电压/电流的降低幅度之间的关系来构建毒性传感器。

2 MFC作为毒性传感器的构型选择

MFC构型随着使用场合和试验目的的不同得到了不同的发展。两瓶型MFC是早期MFC研究中使用较多的一种构型,该构型因为质子交换膜的面积较小、内阻较大,其灵敏性较低。因此,该构型MFC不适合用作毒性传感器。但是,有学者将两瓶型MFC作为电极材料的预培养装置,在电极材料上提前挂膜,可以极大缩短MFC的启动时间,为MFC毒性传感器的研究提供了足够稳定而充足的电活性微生物。Liu等^[5]开发了单室空气型MFC,氧气传质是其关键的问题。该型MFC同时还存在两个主要缺陷:一是需要昂贵的贵金属(如铂)作为催化剂,大大提高了MFC的成本;二是由于阴极直接暴露在空气中,部分氧气通过阴极渗透到阳极中,降低了阳极微生物的工作效率,导致库仑效率降低。因此较少有学者将该构型MFC作为毒性传感器。双室型MFC通过增大中间质子交换膜的面积,有效降低了内阻。阳极室含有电极材料、微生物及微生物生长需要的营养基质,其中电极材料除了起到转移电子的作用外,同时还为微生物的生长提供附着场地。理想的阳极材料必须具备良好的导电性能、生物亲和性以及化学稳定性,如石墨、碳纸、碳布、碳纳米管、碳刷、活性炭、活性炭纤维以及碳网等。研究者尝试用各种方法对阳极材料进行表面改性,希望以此提高阳极材料的性能。在众多的方法中,将金属或者金属氧化物负载到阳极表面是一种有效提高输出功率的方法。除了利用金属、金属氧化

物和其他非金属材料来修饰电极表面以提高输出功率外,一些化学的改性方法也可以提高阳极的生物亲和性,从而提高阳极效率。Feng等^[6]利用酸洗、加热或两者联合等方法处理碳纤维作为阳极,也将MFC的输出功率从 $1\,020\text{ mW/m}^2$ 提高到 $1\,370\text{ mW/m}^2$ 。Zhu等^[7]分别利用硝酸和乙二胺对活性炭纤维阳极进行表面修饰,通过改变阳极表面基团,提高了其生物亲和性,大大缩短了MFC的启动时间,并使其输出功率分别提高58%和25%。阴极室为质子、电子、氧化剂发生反应的场所,电子受体有多种,如铁氰化钾、高锰酸钾、重铬酸钾、空气、微生物等,电解液阴极具有较高的氧化还原电位,其作为阴极的MFC可以获得较高的输出电压,且相比于空气阴极和微生物阴极也更加容易控制。毒性传感器在进行毒性测试之前,需要具备较好的稳定性和可比较性;而测试过程需要具备较好的灵敏性。双室MFC可以人为选择电子受体,更容易控制电池的性能,因此被广泛作为毒性传感器的构型。

3 MFC用于毒性评价的影响因素

MFC的性能及毒性评价受到许多因素的影响,具体包括阳极微生物种类、剪切速率(体积流量)、外电阻、溶解氧、电导率等方面。

3.1 阳极微生物种类

不同的接种条件和接种源会对MFC的稳定性和微生物群落造成显著影响。Tran等^[8]研究表明,用天然土壤接种的MFC可产生更高且更稳定的电流 $[(0.53\pm0.03)\text{ mA}]$,并且不同接种源的MFC达到稳定状态后,菌落结构也有很大的区别。Patil等^[9]研究表明,在有毒物质(磺胺甲恶唑、磺胺嘧啶、氯胺、 Cu^{2+} 、 Ag^{+} 、 Pb^{2+} 和 Hg^{2+})浓度接近或高于其在实际废水中的浓度时,电活性生物膜对毒性物质具有很强的抗性,MFC输出电流基本没有变化;而悬浮细胞MFC的输出电流则随着有毒物质浓度的升高而下降,因此应对阳极接种微生物进行筛选。但是仅接种一种微生物的生物传感器容易触发假阳性或假阴性信号,因此接种混合微生物或整个污泥微生物群则可能避免这些问题。Hsieh等^[10]认为把几种已知的微生物菌株混合接种到MFC阳极中可保持MFC的长期稳定运行并避免不确定性。此外,产电菌的产电活性受多种因素的影响,如电解液及底物的种类、浓度、培养温度、pH、物质代谢的产物和溶

解氧浓度等。同时,微生物本身还存在菌种衰退问题。

3.2 剪切速率(体积流量)

Hsieh等^[10]研究表明,体积流量越低,MFC的毒性敏感性越高。Patil等^[9]研究表明,在高体积流量下,电活性生物膜更易形成;而与悬浮微生物相比,电活性生物膜对毒性物质的抗性更强,敏感度较差。

3.3 外电阻

常定明等^[11]研究了双室MFC对汞的生物毒性评价,以及不同外电阻对MFC毒性评价器的影响,结果表明,外电阻越小,MFC对生物毒性的检测灵敏度越高,并具有更短的响应时间和更低的检测限;但是,外电阻太小会导致MFC无法实现长期的稳定运行。

3.4 溶解氧

在MFC中,具有产电活性的微生物多为厌氧菌或兼性厌氧菌,阳极基质中的溶解氧含量对产电优势菌种的筛选具有较大的影响。Rago等^[12]研究表明,三种MFC在高溶解氧条件下,生物阴极中好氧微生物群落、嗜盐菌属、假单胞菌属和其他微需氧菌属占比达50%以上,而低DO浓度则限制了阴极对电子的转移能力。樊立萍等^[13]研究了不同的阴极电解液和曝气条件对MFC在废水处理及发电方面的效果,发现对阴极进行适当的曝气可以有效提高MFC的处理及发电效果。

3.5 电导率

提高MFC反应器中阳极、阴极基质的电导率,可以有效降低MFC的内阻,也可能影响毒性评价系统的灵敏性。毛艳萍^[14]研究发现,MFC的内阻随着PBS缓冲液浓度的增大而降低。但是,基质浓度过高会导致微生物的活性变差、质子转移速度下降等问题。Karthikeyan等^[15]研究表明,以海水为基质的MFC,其峰值功率密度比生活污水的MFC高20倍。

4 MFC作为毒性传感器的研究现状

4.1 MFC用于特定毒性物质的毒性评价

利用MFC对特定物质进行毒性评价多是根据电压或产电量的变化进行的。Davila等^[16]研究发现,当MFC阳极室加入甲醛时,MFC的输出电压会立即降低。易雯等^[17]比较了微生物燃料电池与发光细菌对水中砷毒性的测定,发现微生物燃料电池

对砷离子的响应更灵敏,稳定性较高。Xie等^[18]利用双室MFC研究了4种重金属(铬、镉、铜和锌)对电活性微生物的冲击效果,发现基于电压信号变化可实现对毒性物质的快速实时监测,电活性微生物产电能力与重金属浓度密切相关。

为了提高传感器的灵敏度、稳定性、可信度等性能,学者们进行了相关研究。Jiang等^[19]以还原反应的生物阴极作为MFC传感器中的传感元件进行毒性监测,发现随着电导率和溶解氧浓度的增加,生物阴极传感元件的响应更快,并且在有机物/毒性联合冲击下降低了报警失败的可能性。为了解决MFC灵敏度差的问题,Jiang等^[20]在研究中开创了一种瞬态工作模式,在测定有机物质毒性时,灵敏度提高了50%~247%。余登斌等^[21]研究表明,用碳纳米材料修饰阳极电极组装MFC,提高了其毒性检测灵敏度。Tan等^[22]通过添加醋酸盐和葡萄糖的方式增强了MFC在家庭废水检测方面的稳定性。该研究表明,在添加醋酸盐浓度为500 mgCOD/L时性能达到最佳。Jiang等^[23]基于仅将生物阳极用作感测和换能元件的原理,通过消除阴极性能变化来设计共阴极MFC传感器阵列,提高了检测可信度。在研究中,四个集成的MFC表现出很好的平行性,并且独立性没有受到交叉污染或电信号干扰。

4.2 MFC用于实际废水毒性评价

研究发现,利用MFC进行实际废水毒性评价是可行的。实际废水组分通常比较复杂,含有多种有毒物质,这些物质的综合作用对MFC毒性评价能力和结果可能会造成不同的影响。Tan等^[24]针对MFC选择性低的问题,研究了有毒重金属操作产生干扰的因素,并提出了降低干扰的措施,设计出可以用于监测昼夜流量波动大的毒性传感器。Kharkwal等^[25]设计了一种新型MFC用于连续监测实际废水的BOD₅,利用二氧化锰作为阴极氧化还原的催化剂,使用乙酸钠溶液和实际生活污水对BOD₅传感器进行了全面研究。结果表明,该MFC运行稳定,拓宽了此类设备的应用范围。王博等^[3]报道了改进的基于MFC的水质生物毒性预警系统,成功预警了一次农药等有毒物质引发的自来水厂污染。然而预警后,对于污染物的种类及污染水平还需要水厂继续进行检测。

实际水体比较复杂,多种物质干扰下如何应对复杂环境的复合毒性是MFC毒性传感器面临的挑

战。生物处理毒性检测方法主要有活性污泥呼吸速率法、发光细菌法等。其中,发光细菌法通过氯化汞浓度来表达样品的毒性,活性污泥呼吸速率法利用2,4-氯苯酚来表达样品的毒性。监测实际水体毒性时,传感器面对的是混合毒性物质,因此可将混合毒性物质看作一个整体,通过某种具体的毒性物质进行表达。基于此,Lu等^[4]建立了基于MFC的毒性定量评价方法,通过电压下降斜率与甲醛浓度建立模型,并以此测试了不同石化废水的毒性。将未知毒性的石化废水毒性通过甲醛毒性表达,其毒性测试结果与厌氧微生物可降解性产甲烷毒性实验结果基本一致。

4.3 MFC毒性传感器的反馈速度与精度

MFC毒性传感器的反馈速度与精度^[4,26-27]如表1所示。

表1 MFC毒性传感器的反馈速度与精度

Tab.1 Feedback speed and accuracy of MFC toxicity sensors

MFC类型	污染物目标	反馈速度/min	精度/(mg·L ⁻¹)
双室微生物燃料电池	Fe ²⁺ 、Cu ²⁺ 、Mn ²⁺ 、Cd ²⁺	30	9~40、30~50、2~10、2~10
双室微生物燃料电池	Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 、Cr ⁶⁺ 、Cd ²⁺	60	40、15、0.3、0.4
双室微生物燃料电池	Ni ²⁺ 、Cu ²⁺ 、SDS(十二烷基硫酸钠)		13.2、2~85、50

MFC传感器可以测试重金属、有机化合物等物质,根据有机底物在阳极的氧化反应导致的MFC电压或电流变化来提供总体毒性的集体信息。研究^[1]表明,MFC双室反应器采用恒定阳极电位和恒定外部电阻控制方式测定Ni,通过偏振、电流、电压的分析信号分别得到10、13.2、20 mg/L的检出限。MFC毒性传感器的检测极限受电活性微生物对有毒物质的响应影响,有研究^[2-4]使用单双室、膜电极组件反应器对Cu²⁺进行测定,运用不同的控制方式和分析信号得到的检出限低至0.01 mg/L。已有研究表明,对Pb²⁺、Cd²⁺、Hg²⁺、As³⁺、Cr⁶⁺、Fe³⁺等重金属离子的检出限为0.001~10 mg/L^[5-6],对左氧氟沙星的检出限最低仅为0.1 μg/L,对羟基噻吩青霉素和妥布霉素的检出限可高达100 mg/L^[8-10]。作为毒性传感器,经过一次毒性测试后,电极材料上的微生物活性将发生变化,即便经过再次培养,也很难恢复到

测试之前的稳定水平,或者很难与其他传感器具有可比性。因此,一个电极材料在经过毒性物质冲击后,更换新的电极材料是目前常用做法。

5 存在的问题

尽管MFC用于生物毒性评价具有预报及时、稳定性好、易于维护等诸多优点,但是仍然存在诸多问题。首先,该装置的启动时间较长(10~15 d)。在基于MFC的毒性评价方法研究中,产电稳定的MFC与毒性物质接触后菌落结构或电池性能将发生较大变化,为了使数据更具可靠性和可比性,每一个MFC反应器只能进行一次毒性试验。因此,在毒性评价方法建立试验中,需要大量的性能稳定的MFC反应器,而目前还没有形成可靠、快速的启动方式。其次,毒性评价结果缺乏可比性。目前,针对MFC毒性评价的研究主要集中在利用MFC实现重金属、有机物等毒性物质的定性分析,缺少定量评价,难以判断不同废水是否可以直接进入生物处理单元,并以此结果作为废水处理工艺选择的重要依据之一。

6 结论

MFC作为毒性传感器具有较好的应用和开发前景,当有毒物质进入MFC并与具有产电活性的微生物接触时,微生物的代谢将受到有毒物质的抑制,从而导致产电活性下降,输出的电压/电流降低,这是MFC作为毒性传感器的理论基础。电压/电流的下降程度与有毒物质的种类、浓度、微生物的生存环境有关;毒性冲击越大,输出电压/电流下降的程度越大。MFC应用于毒性评价过程中,受到阳极微生物种类、剪切速率(体积流量)、外电阻、溶解氧、电导率等方面的影响,目前已经实现了利用MFC评价某种特定毒性物质的毒性或应用于评价实际水体,但仅实现了定性评价。未来,应在缩短启动时间、定量评价毒性以及电池稳定性等方面加强研究。

参考文献:

- [1] KAUR A, KIM J R, MICHIE I, *et al.* Microbial fuel cell type biosensor for specific volatile fatty acids using acclimated bacterial communities [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2013, 47(18): 50-55.
- [2] LIU Z D, LIU J, ZHANG S P, *et al.* Microbial fuel cell based biosensor for in situ monitoring of anaerobic

- digestion process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(22): 10221–10229.
- [3] 王博, 王红晓. 水质生物毒性预警系统建设及在海宁市饮用水源保护中的应用 [J]. *环境监控与预警*, 2012, 4(5): 10–13.
- WANG Bo, WANG Hongxiao. Toxicity early-alarm biomonitoring system and its application in drinking water source protection in Haining [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2012, 4(5): 10–13 (in Chinese).
- [4] LU H B, YU Y, ZHOU Y X, *et al.* A quantitative evaluation method for wastewater toxicity based on a microbial fuel cell [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 183: 109589.
- [5] LIU H, LOGAN B E. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(14): 4040–4046.
- [6] FENG Y J, YANG Q, WANG X, *et al.* Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(7): 1841–1844.
- [7] ZHU N W, CHEN X, ZHANG T, *et al.* Improved performance of membrane free single-chamber air-cathode microbial fuel cells with nitric acid and ethylenediamine surface modified activated carbon fiber felt anodes [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(1): 422–426.
- [8] TRAN P H N, NGUYEN L, NGUYEN H, *et al.* Effects of inoculation sources on the enrichment and performance of anode bacterial consortia in sensor typed microbial fuel cells [J]. *AIMS Bioengineering*, 2016, 3(1): 60–74.
- [9] PATIL S, HARNISCH F, SCHRODER U. Toxicity response of electroactive microbial biofilms—a decisive feature for potential biosensor and power source applications [J]. *ChemPhysChem*, 2010, 11(13): 2834–2837.
- [10] HSIEH M C, CHUNG Y C. Measurement of biochemical oxygen demand from different wastewater samples using a mediator-less microbial fuel cell biosensor [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(17): 2204–2211.
- [11] 常定明, 卢智昊, 吴陈巍, 等. 外电阻对MFC型生物毒性检测器性能的影响 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(10): 5113–5117.
- CHANG Dingming, LU Zhihao, WU Chenwei, *et al.* Effect of external resistance on performance of biological toxicity detector based on microbial fuel cells [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(10): 5113–5117 (in Chinese).
- [12] RAGO L, CRISTIANI P, VILLA F, *et al.* Influences of dissolved oxygen concentration on biocathodic microbial communities in microbial fuel cells [J]. *Bioelectrochemistry*, 2017, 116: 39–51.
- [13] 樊立萍, 郑钰姣, 苗晓慧. 阴极液及溶氧对微生物燃料电池性能的影响 [J]. *高校化学工程学报*, 2016, 30(2): 491–496.
- FAN Liping, ZHENG Yujiao, MIAO Xiaohui. Effects of catholyte and dissolved oxygen on microbial fuel cell performance [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2016, 30(2): 491–496 (in Chinese).
- [14] 毛艳萍. 微生物燃料电池中硫化物氧化和生物阴极的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- MAO Yanping. Study on Sulfide Oxidation and Biocathode in Microbial Fuel Cell [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010 (in Chinese).
- [15] KARTHIKEYAN R, SELVAM A, CHENG K Y, *et al.* Influence of ionic conductivity in bioelectricity production from saline domestic sewage sludge in microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 845–852.
- [16] DAVILA D, ESQUIVEL J P, SABAT N, *et al.* Silicon-based microfabricated microbial fuel cell toxicity sensor [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2011, 26(5): 2426–2430.
- [17] 易雯, 严惠华, 林秀榕, 等. As水质毒性发光细菌及微生物燃料电池在线监测技术的比选研究 [J]. *中国环境监测*, 2017, 33(3): 133–138.
- YI Wen, YAN Huihua, LIN Xiurong, *et al.* Comparison research on two on-line bio-monitoring technologies based on luminescent bacteria and microbial fuel cells for the water quality toxicity of As [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(3): 133–138 (in Chinese).
- [18] XIE T, GAO Y, ZHENG Q, *et al.* A double-microbial fuel cell heavy metals toxicity sensor [C]//ICSEEE. *Proceedings of 2017 2nd International Conference on*

- Environmental Science and Energy Engineering (ICESEE 2017). Beijing: ICESEE, 2017: 16–21.
- [19] JIANG Y, LIANG P, LIU P P, *et al.* A novel microbial fuel cell sensor with biocathode sensing element [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2017, 94:344–350.
- [20] JIANG Y, LIANG P, LIU P P, *et al.* Enhancement of the sensitivity of microbial fuel cell sensor by transient-state operation [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2017, 3(3):472–479.
- [21] 余登斌,江岚,王沛,等. 碳纳米材料修饰阳极电极对微生物燃料电池传感器水体毒性检测灵敏度的影响[J]. *分析化学*, 2018, 46(7):1032–1038.
- YU Dengbin, JIANG Lan, WANG Pei, *et al.* Effect of anode electrode modified with carbon nanomaterials of microbial fuel cell-based sensor on detection sensitivity of water toxicity [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(7):1032–1038(in Chinese).
- [22] TAN Y C, KHARKWAL S, CHEW K K W, *et al.* Enhancing the robustness of microbial fuel cell sensor for continuous copper(II) detection against organic strength fluctuations by acetate and glucose addition [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 259:357–364.
- [23] JIANG Y, LIANG P, LIU P P, *et al.* A cathode-shared microbial fuel cell sensor array for water alert system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(7): 4342–4348.
- [24] TAN Y C. Microbial Fuel Cell Sensor for Continuous Monitoring of Toxic Metals in Wastewater [D]. Singapore: National University of Singapore, 2017.
- [25] KHARKWAL S, TAN Y C, LU M, *et al.* Development and long-term stability of a novel microbial fuel cell BOD sensor with MnO₂ catalyst [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(2): 276.
- [26] 杨厚云,刘星鑫,黄显怀,等. 微生物燃料电池传感器对土壤中重金属的检测研究[J]. *安徽建筑大学学报*, 2020, 28(1):61–68.
- YANG Houyun, LIU Xingxin, HUANG Xianhuai, *et al.* Study on the detection of heavy metals in soil by microbial fuel cell sensor[J]. *Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry*, 2020, 28 (1) : 61–68 (in Chinese).
- [27] 高艳梅. 双室微生物燃料电池传感器对水中重金属和抗生素的检测研究[D]. 北京:北京化工大学, 2017.
- GAO Yanmei. Study on Detection of Heavy Metals and Antibiotics in Water by Double-microbial Fuel Cell Sensor [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017(in Chinese).

作者简介:刘艳娟(1975–),女,河北唐山人,硕士,教授,研究方向为水环境污染预防与控制。

E-mail:juan1809@163.com

收稿日期:2020-05-19

修回日期:2021-03-10

(编辑:丁彩娟)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命