

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.009

铁碳功能载体在河湖原位强化净化及生态修复中的应用

李成志^{1,2,3}, 丁红岩⁴, 张浩亮⁵, 赵艳⁶, 陆泯峰⁷, 欧子旋^{1,2,3},
郝梁山^{1,2,3}, 冯 骞^{1,2,3}

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 国河环境研究所<南京>有限公司, 江苏 南京 211599; 4. 常州市连城管道网络有限公司, 江苏 常州 213000; 5. 常州新美水务集团有限公司, 江苏 常州 213022; 6. 常州新景水环境技术有限公司, 江苏 常州 213000; 7. 常州新岸水利有限公司, 江苏 常州 213000)

摘 要: 针对河湖原位水质改善与生态功能提升中生物膜修复技术挂膜启动、高效运行等方面的难题,从载体开发和使用的角度综述了河湖原位净化和修复领域铁碳功能载体的制备和应用进展。结合载体应用的条件,分析了铁碳功能载体原位强化净化污染河湖与生态修复的原理,提出了铁碳功能载体钝化过程缓解、铁碳载体与其他净化技术耦合等未来研究与发展方向,以期为河湖原位水生态修复领域铁碳功能载体的应用提供支撑。

关键词: 铁碳功能材料; 河湖水生态修复; 污水处理; 原位修复

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0054-08

Application of Iron-Carbon Functional Carrier in In-situ Enhanced Purification and Ecological Restoration of Rivers and Lakes

LI Cheng-zhi^{1,2,3}, DING Hong-yan⁴, ZHANG Hao-liang⁵, ZHAO Yan⁶,
LU Min-feng⁷, OU Zi-xuan^{1,2,3}, HAO Liang-shan^{1,2,3}, FENG Qian^{1,2,3}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Guohe Environmental Research Institute <Nanjing> Co. Ltd., Nanjing 211599, China; 4. Changzhou Liancheng Pipeline Network Co. Ltd., Changzhou 213000, China; 5. Changzhou Xinmei Water Group Co. Ltd., Changzhou 213022, China; 6. Changzhou Xinjing Water Environmental Technology Co. Ltd., Changzhou 213000, China; 7. Changzhou Xin'an Water Conservancy Co. Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: In view of the difficulties in the start-up and efficient operation of biofilm repair technologies in the in-situ water quality enhancement and ecological restoration of rivers and lakes, this study reviews advancements in the preparation and application of iron-carbon functional carriers in in-situ purification and restoration from the perspective of carrier development and utilization. The mechanisms of in-situ enhanced the purification of polluted rivers and lakes and ecological restoration

基金项目: 常州市科技计划资助项目(CJ20210049); 国家重点研发计划项目(2023YFC3208900)

通信作者: 冯骞 E-mail: xiaofq@hhu.edu.cn

were analyzed based on the conditions of carrier application. Furthermore, the study identifies future research directions, including mitigating the passivation of iron-carbon functional carriers and integrating them with other purification technologies. These findings aim to support the broader application of iron-carbon functional carriers in in-situ water ecological restoration of rivers and lakes.

Key words: iron-carbon functional materials; ecological restoration of river and lake; wastewater treatment; in-situ restoration

在河湖水体中设置人工水草等悬浮型微生物载体以提高附着微生物的数量,进而通过环境调控提升微生物的活性,是河湖原位生物修复中常用的技术。目前,使用的微生物载体多采用比表面积大、使用寿命长、安装更换方便的有机化学合成材料(如聚乙烯、聚氯乙烯、聚丙烯等)^[1],但在实际应用中受材料表面性质和环境条件影响,往往出现微生物挂膜启动时间长、附着生物膜稳定性差、有效微生物数量活性不足、水体自净能力提升有限等共性问题^[2]。因此,开发生物亲和性强、挂膜速度快、强化净化能力突出的新型生物膜载体,成为近年来河湖原位强化净化及修复领域研究的热点之一^[3]。

铁碳材料是近年来水处理领域研究应用较多的一种新型功能材料,与溶液接触时因铁碳材料间的电位差而在其内部形成原电池反应,产生大量电子及还原性活性物质,从而促进水中污染物的去除^[4]。自20世纪60年代相关技术被研发以来,铁碳功能材料以其电子传递速度快、污染物降解效率高的特点,在印染、电镀、焦化、制药等行业的工业废水和城镇污水处理中被广泛应用^[5-6]。近年来,随着我国水生态文明建设要求的不断提高,铁碳功能载体在河湖水质改善和生态修复领域受到了越来越多的关注。

针对我国生态文明建设中幸福河湖建设的重大工程需求,围绕河湖原位水质改善与生态功能提升中生物膜修复技术存在的难点,综述了铁碳功能载体的改性制备方法、铁碳功能载体在河湖原位水质改善与生态修复中的应用,以及铁碳功能载体原位强化净化污染河湖与生态修复的原理,在此基础上分析论述了现阶段铁碳功能载体在河湖水生态修复领域应用中亟待解决的关键科学问题,展望了该领域未来的研究与发展方向,以期对河湖原位水生态修复领域铁碳功能载体的推广应用提供重要的支撑。

1 铁碳功能载体的制备

1.1 铁碳堆积法

铁碳堆积法是铁碳功能载体的传统制备技术。该方法主要采用钢铁加工产生的废铁屑、铁刨花作为填料,将其直接进行堆积,或加入一定比例的碳粉与铁粉均匀混合,形成铁碳功能载体。尽管制备简单、成本低廉,但在实际使用过程中容易出现由于铁碳密度差异大造成的铁碳分离现象,影响材料性能的发挥。此外,铁粉氧化后出现的板结问题也会制约载体对污染物的去除效果^[7]。

1.2 规整填料法

规整填料法是工业应用中采用较多的制备方法。该方法利用黏合剂在专用设备(如造粒机、压模机)中将一定比例的碳粉和铁粉制作成球形或其他形状,进而通过高温烧制获得最终的铁碳功能载体^[8]。与铁碳堆积法制备的载体相比,高温烧制成型后的铁碳材料不仅有效缓解了材料的板结现象,烧制后形成的疏松多孔表面结构还增强了材料的吸附性能。但黏合剂的使用在帮助材料成型的同时,也增加了无效成分的含量,降低了材料促进污染物降解的性能。因此,选择和使用高效的黏合剂,优化铁碳配比、烧制的时间和温度等其他因素,就成为规整填料法制备的关键^[9-11]。

1.3 液相还原法

液相还原法是通过液相反应的方式将铁负载到碳材料上,进而借助还原剂形成铁碳功能载体的制备方法^[12]。与使用黏合剂制作铁碳载体的规整填料法相比,液相还原法由于不添加黏合剂,有效成分含量高,且通过液相还原获得的铁碳材料相互结合紧密,材料强度、吸附等性能均得到有效提升^[13-14],载体材料板结现象减少。但是液相还原法制备程序较为复杂,加之流程标准化和规模化研究尚有较多不足,成本也相对较高,限制了在工程中的使用。

2 铁碳功能载体在河湖原位修复中的应用

原位修复技术是指在不改变污染物及其所在环境的条件下,直接在产生污染的位置进行治理的方法和技术。在河湖原位生态修复工程中,铁碳功能载体的应用主要有铁碳纤维水草强化净化、铁碳规整填料强化净化、铁碳微电解强化电化学净化等三类模式。

2.1 铁碳纤维水草强化净化模式

铁碳纤维水草是一种典型的铁碳堆积载体,它主要通过铁丝、铁片、铁丝网等铁基材料和碳纤维人工水草直接组合的方式,在水中形成铁碳材质的半软性组合填料载体样式,实现对河湖水体的强化净化。碳纤维人工水草作为先进复合碳材料中的典型代表,以其生物亲和性强、比表面积大、相对密度小的特点^[15],自20世纪末在日本发明以来,在河湖原位强化净化领域得到了较为广泛的应用。基于微电解强化的铁碳纤维人工水草净化技术,是在碳纤维人工水草强化的基础上,借助铁碳原电池对电子传递的促进作用,与曝气、植物等多种技术耦合,多途径提升水体净化能力的技术方法。铁碳纤维水草强化净化模式^[16-17]见图1。

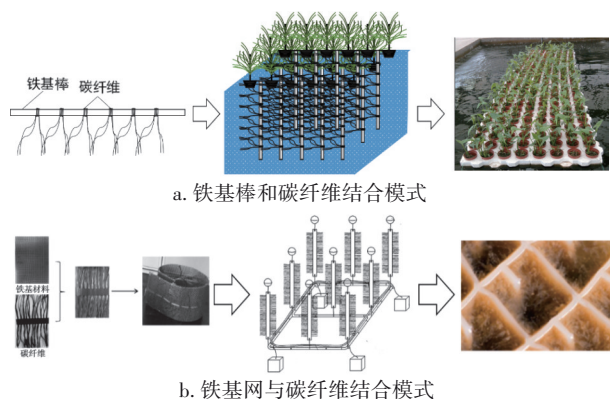


图1 铁碳纤维水草强化净化模式

Fig.1 Enhanced purification mode of iron-carbon fiber water grass

姚理为^[16]的研究表明,与碳纤维人工水草相比,使用铁碳纤维人工水草治理富营养化水体,对TOC的平均去除率从24.7%提高到37.5%,对总磷的平均去除率更是从23.0%提升至93.3%。胡艳平等^[17]在武汉某城市内湖的原位治理中,采用铁丝网与碳纤维人工水草的组合,并通过人工曝气强化净化效果,经10 h处理后水体总磷浓度即从原来的0.25 mg/L降至0.052 mg/L,总体去除率达到80%。

需要说明的是,铁碳纤维水草的强化净化效果与载体的设置密度、水体的溶解氧浓度、pH以及运行时间都有关系。运行一段时间后,裸露在外的阳极铁网会生锈并引起电子传递效率降低,从而抑制对污染物的净化,但在铁碳纤维上生长形成的电活性生物膜和特定优势种群仍能对水中氮、磷等典型污染物的净化起到持续促进和保持效果。

2.2 铁碳规整填料强化净化模式

与铁碳纤维水草强化净化模式相比,在河湖原位强化净化和生态修复领域使用铁碳结合稳定的规整填料,更有利于在铁碳之间形成稳定有效的电子传递,因此铁碳规整填料的原电池效应更加持久稳定。但在实际应用过程中,由于铁碳规整填料密度往往明显大于水体且填料粒径并不统一,因此除投加至河湖底部直接用于底质修复外,往往需要设置专门的悬挂装置,将其悬浮于河湖水体中,以实现河湖不同深度水体自净能力的提升。铁碳规整填料强化净化模式^[18-19]见图2。

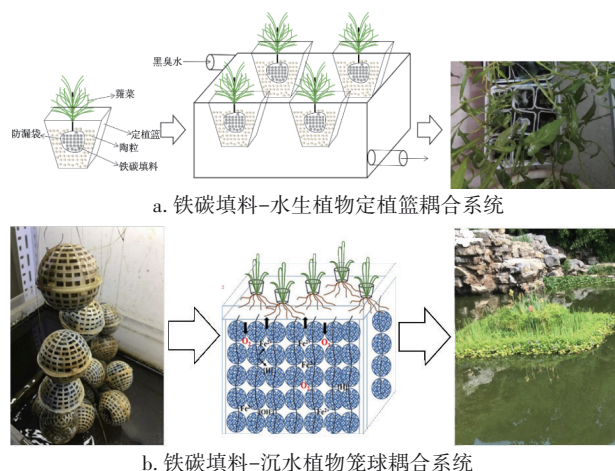


图2 铁碳规整填料强化净化模式

Fig.2 Enhanced purification mode of iron-carbon structured packing

陈胜男^[18]将铁碳填料和菹菜植株根系包裹于防漏袋中,与陶粒一起固定于水生植物定植篮中(植株密度80株/m²、铁碳填料用量18 g/L、陶粒用量52 g/L)净化重度黑臭水体(COD为79.48~122 mg/L, TP为2.46~4.26 mg/L, NH₄⁺-N为23.38~44.73 mg/L, TN为30.05~52.75 mg/L),经过22 d的净化,COD、TP、TN和NH₄⁺-N等指标分别稳定在(26.72±2.61)、(0.12±0.01)、(13.65±1.24)和(0.21±0.04) mg/L。Hu等^[19]将富铁基质(包括铁、活性炭和金属催化剂

等)装束于笼球中,衬于沉水植物之下,构建铁碳耦合生态浮床体系原位处理重度富营养化景观水。88 d的试验表明,耦合系统不仅成功抑制了藻类的繁殖,且 NH_4^+-N 从 3.0 mg/L 降至 0.6 mg/L、TN 从 4.8 mg/L 降至 1.1 mg/L,TP 在第 40 天从 1.44 mg/L 降至 0.04 mg/L。陈超^[20]利用直径为 0.3~1.5 cm 的规则铁碳球与 3~5 mm 的陶粒混合,置于浮水植物定植篮中,与沉水植物苦草联合使用,用于改善河道黑臭水体的水质。结果表明,多品种的水生植物与铁碳填料形成的耦合系统对黑臭水的净化效果显著优于单一的苦草、铁碳填料组,溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)提升速度更快,微生物多样性和丰度也出现了增加,与降解有机物、脱氮除磷等过程相关的微生物群落相对丰度增加更显著。

2.3 铁碳微电解强化电化学净化模式

铁碳微电解强化电化学净化模式主要利用铁碳功能材料提供的电子流促进电化学氧化还原过程的进行。具体来说,就是向生物电化学系统(BES)中投加一定量的铁碳功能材料,在降低系统阴阳两极电阻的同时,为阴极提供充足的电子,实现系统对各类污染物净化能力的提升^[21]。目前,研究较多的是铁碳填料与微生物燃料电池(MFC)的耦合,但在实际工程中,由于电化学系统构建较为复杂,且阴阳极的选择和使用要求较多,也给该模式的应用带来诸多不便^[22],相关研究多集中在小试、中试阶段。

崔颖等^[23]将简单堆填的铁碳填料填充到 MFC 的阴极中,在铁碳比为 1:1、进水 pH 为 7 的条件下,铁碳耦合 MFC 系统对水中硝态氮(10 mg/L)的去除率高达 90.33%。阳极传递的电子对阴极中铁的腐蚀起到了补充电子的作用,阳极同时产生的 H^+ 在阴极中可以使更多的 Fe^{2+} 参与反硝化反应,从而暴露更多的零价铁参与微电解和硝酸盐的还原,有效缓解铁碳填料的板结和钝化,提升了铁碳填料的利用效率。Li 等^[24]将铁碳填料作为人工湿地(CW)和 MFC 耦合体系的基质,也实现了对污水中污染物的强化净化,COD、 NH_4^+-N 和 TP 的去除率分别提高了 10.2%、8.1% 和 8.78%。Yang 等^[25]将 MFC 耦合生态浮床,构建了原位电化学修复系统。结果发现,与未引入电化学的系统相比,耦合系统对 NH_4^+-N 和 TN 的去除率分别提高了 2.54%~16.40% 和 2.91%~16.86%,进一步证实了铁碳微电解强化电

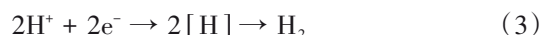
化学净化模式的潜能。

3 铁碳功能载体用于水体生态修复的原理

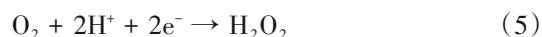
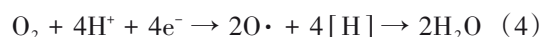
铁碳功能载体在河湖水体强化净化和生态修复过程中会产生原电池反应与氧化还原、微电场与电富集、物理化学吸附、化学絮凝沉淀、微生物附着与降解等多种过程。这些过程的共同作用,有效去除了河湖水体中的污染物,强化了污染水体的生态修复过程。

3.1 原电池反应与氧化还原

当铁碳功能载体接触受污染水体时,由于铁和碳之间的电极电位差,会在铁(阳极)和碳(阴极)之间形成大量的微小原电池,自发进行氧化还原反应^[26]。其中原电池的反应机理如下:



在酸性曝气条件下,阴极反应如下:



在中性或碱性曝气条件下,阴极反应如下:



在上述反应中,阳极产生的 Fe^{2+} 和阴极产生的 $[\text{H}]$ 具有较强的化学活性,在曝气条件下 O_2 接收电子生成 H_2O_2 ,在随后的 Fenton 反应中, Fe^{2+} 和 H_2O_2 反应产生羟基自由基,可以通过羟基取代反应、脱氢反应和电子转移反应等将有机物完全矿化^[27]。此外,铁阳极作为一种活泼金属,还能将金属活泼顺序表中排在其后的金属高价态离子(如 Cr^{4+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+})还原成低价态或者单质状态,因此对部分重金属也有去除作用^[28]。

3.2 微电场与电富集作用

铁碳功能载体在水中形成的微电解体系还会在阴阳两极形成一定强度的微电场,在微电场作用下,水中分散的胶体颗粒、极性分子、细小污染物等以电泳方式向相反电荷的电极方向移动,进而聚集在电极上形成大颗粒沉淀^[29]。

3.3 物理化学吸附

铁碳功能载体具有较大的比表面积和丰富的孔隙度,置于水中后,在水流的交换作用下,具有较强吸附性能的碳质材料还可吸附水中的 COD、氨氮、悬浮颗粒等典型污染物。受环境水体中污染物

特性及环境条件的影响,这种吸附过程也会呈现物理吸附、化学吸附等不同的规律^[30]。此外,铁碳功能载体在高温烧制过程中,还能增加材料表面含氧官能团的数量和不饱和键的丰度,从而进一步提高材料的吸附性能^[31]。

3.4 化学絮凝沉淀

铁碳功能载体中的铁在水中氧化会生成 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} , 与水中带负电的胶体态污染物发生絮凝作用, 并以絮凝体的形式在水中沉降去除。一些特殊的无机质(如磷酸盐)还能与水中的铁离子形成稳定的复杂基质, 发生共沉淀效应从而实现去除^[32]。

3.5 微生物附着与降解

与常规水生态修复中的功能载体相比,铁碳功能载体表面更有利于微生物的附着和生长。生物多样性的分析^[33]表明,铁碳载体表面能够富集更多的变形菌门细菌,在提高脱氮相关的放线菌和硝基螺旋菌丰度的同时,增加除磷相关厚壁菌的比例。此外,铁碳功能载体上形成的电活性生物膜还有助于强化电极与微生物之间的电子传递,提升氨单加氧酶(AMO)、羟胺氧化还原酶(HAO)、聚磷酸激酶(PPK)等脱氮除磷关键酶活性,从而提升水中常规污染物的去除效果。

铁碳功能载体水体生态修复原理见图3。

表1 铁碳功能载体对其他水体污染物的去除

Tab.1 Iron-carbon functional carriers used for the removal of other wastewater pollutants

应用模式	铁碳形态制备方式	目标污染物	处理效果	涉及机理
铁碳生物膜载体基曝气反应器	铁碳纤维铁碳堆积法	农村生活污水: COD 为 (300 ± 20) mg/L, NH_4^+-N 为 (35 ± 1) mg/L, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 (5 ± 0.5) mg/L	COD、 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 去除率分别为 94.84%、64.93%、85.01%(30 d)	化学沉淀、微生物附着与降解
铁碳基人工湿地	球型填料规整填料法	污水处理厂出水 TP 为 0.36 mg/L	TP 去除率 > 90%(5 d)	化学沉淀、微生物降解、植物根系吸收
铁碳基生物滤池	球型填料液相还原法	低温(10℃)污水厂出水 NH_4^+-N 为 5~6 mg/L	NH_4^+-N 去除率为 97.9%(150 d)	前期以物理化学吸附为主,后期以微生物附着与降解为主
铁碳+菌藻基 SBR	球型填料铁碳堆积法	低浓度农村生活污水: COD 为 (100.66 ± 2.17) mg/L, NH_4^+-N 为 (19.85 ± 0.08) mg/L, TN 为 (19.85 ± 0.08) mg/L, TP 为 (1.53 ± 0.11) mg/L	COD 为 (50.23 ± 1.61) mg/L, NH_4^+-N 为 (1.90 ± 0.25) mg/L, TN 为 (5.96 ± 0.48) mg/L, TP 为 (0.43 ± 0.07) mg/L(4 h)	氧化还原、微生物降解与同化、化学沉淀
铁碳基人工湿地	球型填料铁碳堆积法	Cr(VI) 为 1.5 mg/L	Cr(VI) 去除率为 65.1%(100 d)	物理化学吸附、氧化还原、微生物降解
铁碳基 CW-MFC	球型填料铁碳堆积法	环丙沙星为 2 mg/L	环丙沙星去除率为 $(91.2 \pm 3.4)\%$ (70 d)	电化学和微生物降解

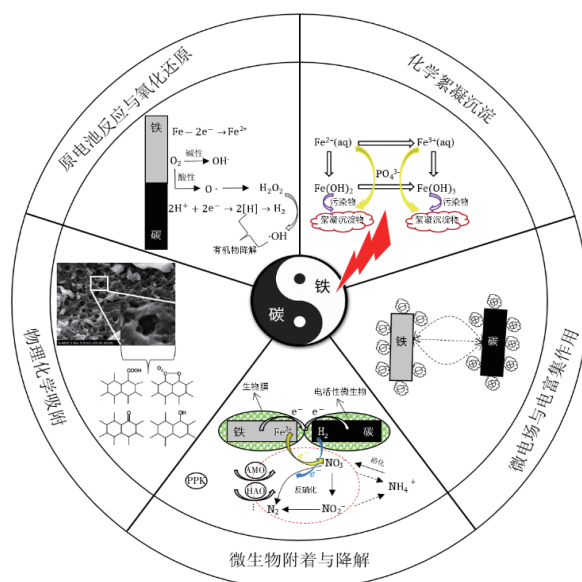


图3 铁碳功能载体水体生态修复原理

Fig.3 Principle of ecological restoration of water bodies of iron-carbon functional carriers

铁碳功能载体针对其他不同水质及目标污染物的去除机理也不尽相同,虽然大多体现为异位修复,但作为河湖生态环境潜在的外源污染同样不能忽略。表1列举了不同铁碳功能载体针对自然环境水体以外的其他污水污染物的应用模式及其处理效果^[34-39]。

4 结论与展望

铁碳功能载体在河湖原位强化净化及水生态修复领域中具有较为广泛的应用价值和前景,尽管相关研究已经取得了一定的成果,但仍有一些共性问题有待进一步研究和探索。

① 受环境条件的影响,铁碳功能载体使用一段时间后往往会面临铁基材料钝化和难以回收利用的问题。如能在制备和使用过程中,通过对制备材料和工艺的筛选、使用方式的优化,将大幅提升铁碳功能材料在水体生态修复领域的应用空间。

② 截至目前,铁碳功能载体材料在水生态修复领域的应用方式仍较为单一,因此如何针对河湖原位强化净化及水生态修复领域的实际需求,充分结合河湖水动力和环境要素特征,与其他强化净化技术相耦合,形成实用性强、系统完整、特征鲜明的综合治理技术,也是未来亟待研究的重要内容。此外,面向对其他难降解实际废水的处理应用,可以考虑将铁碳微电解与其他技术如超声、芬顿、臭氧氧化等结合,实现对铁碳功能载体材料在环境领域的全面推广。

③ 对于铁碳微电解的机理解析在实际应用中的指导作用是当前必须思考的问题。尽管针对铁碳介导的电子传递和微生物附着降解作用已展开研究,但是如何最大化利用铁碳在环境修复中的优势,仍需要进行多角度分析,比如开展相关模拟研究和组学研究等。

参考文献:

- [1] MAO Y J, QUAN X, ZHAO H M, *et al.* Accelerated startup of moving bed biofilm process with novel electrophilic suspended biofilm carriers [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 315: 364–372.
- [2] ZHAO Y, LIU D, HUANG W, *et al.* Insights into biofilm carriers for biological wastewater treatment processes: current state-of-the-art, challenges, and opportunities [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121619.
- [3] MORGAN-SAGASTUME F. Biofilm development, activity and the modification of carrier material surface properties in moving-bed biofilm reactors (MBBRs) for wastewater treatment [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, 48(5): 439–470.
- [4] ZHAO H, ZHAO H, HUANG X, *et al.* Enhancing Fe–C micro-electrolysis by coupling MF with electrolyte solution: mechanism and application [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 257: 117887.
- [5] HUANG C, PENG F, GUO H J, *et al.* Efficient COD degradation of turpentine processing wastewater by combination of Fe–C micro-electrolysis and Fenton treatment: long-term study and scale up [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 351: 697–707.
- [6] HUANG X, YANG X M, ZHU J, *et al.* Microbial interspecific interaction and nitrogen metabolism pathway for the treatment of municipal wastewater by iron carbon based constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 315: 123814.
- [7] 苏志敏, 韩严和, 刘立娜. 铁碳微电解填料改性的研究进展 [J]. *现代化工*, 2022, 42(5): 35–39.
SU Zhimin, HAN Yanhe, LIU Lina. Advances on modification of iron–carbon micro-electrolytic fillers [J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(5): 35–39 (in Chinese).
- [8] YANG R H, ZHU J Z, LI Y L, *et al.* A study on the preparation of regular multiple micro-electrolysis filler and the application in pretreatment of oil refinery wastewater [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(5): 457.
- [9] 陈金辉. 烧制工艺对铁碳微电解陶粒物理特性的影响研究 [J]. *工程技术研究*, 2019, 4(23): 111–112.
CHEN Jinhui. Study on the influence of firing process on the physical properties of iron–carbon micro-electrolytic ceramics [J]. *Engineering and Technological Research*, 2019, 4(23): 111–112 (in Chinese).
- [10] YANG Z M, MA Y P, LIU Y, *et al.* Degradation of organic pollutants in near-neutral pH solution by Fe–C micro-electrolysis system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 315: 403–414.
- [11] ZHU X Y, CHEN X J, YANG Z M, *et al.* Investigating the influences of electrode material property on degradation behavior of organic wastewaters by iron–carbon micro-electrolysis [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 338: 46–54.
- [12] ZHU S S, HUANG X C, WANG D W, *et al.* Enhanced hexavalent chromium removal performance and stabilization by magnetic iron nanoparticles assisted biochar in aqueous solution: mechanisms and application potential [J]. *Chemosphere*, 2018, 207: 50–59.

- [13] FENG Z Q, YUAN R F, WANG F, *et al.* Preparation of magnetic biochar and its application in catalytic degradation of organic pollutants: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142673.
- [14] CHANDRAIAH R M. Facile synthesis of zero valent iron magnetic biochar composites for Pb(II) removal from the aqueous medium [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2016, 55(1): 619–625.
- [15] PHAN N H, RIO S, FAUR C, *et al.* Production of fibrous activated carbons from natural cellulose (jute, coconut) fibers for water treatment applications [J]. *Carbon*, 2006, 44(12): 2569–2577.
- [16] 姚理为. 碳素纤维在水质改善与生态修复领域的应用研究 [D]. 湘潭:湘潭大学, 2012.
- YAO Liwei. The Application of Carbon Fiber in Water Purification and Ecological Restoration [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012 (in Chinese).
- [17] 胡艳平, 王振华, 李青云, 等. 新型铁碳微电解材料对水体磷的净化效果 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(7): 24–28, 35.
- HU Yanping, WANG Zhenhua, LI Qingyun, *et al.* Removal of water phosphorus by iron-carbon micro-electrolysis material [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(7): 24–28, 35 (in Chinese).
- [18] 陈胜男. 铁碳微电解耦合蔬菜净化河道黑臭水的研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- CHEN Shengnan. Purification of Black and Odorous Water by Iron-carbon Micro-electrolysis Coupled with *Ipomoea aquatica* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [19] HU Z, LI D, GUAN D. Water quality retrieval and algae inhibition from eutrophic freshwaters with iron-rich substrate based ecological floating beds treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 135584.
- [20] 陈超. 铁碳微电解耦合苦草净化河道黑臭水的研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- CHEN Chao. Study on the Purification of Black Odorous Water from Rivers by Iron-Carbon Microelectrolysis Coupled with *Vallisneria spiralis* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [21] XIE F, MA X, ZHAO B W, *et al.* Promoting the nitrogen removal of anammox process by Fe-C micro-electrolysis [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122429.
- [22] YUAN H Y, HOU Y, ABU-REESH I M, *et al.* Oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells for energy-efficient wastewater treatment: a review [J]. *Materials Horizons*, 2016, 3(5): 382–401.
- [23] 崔颖, 赵博玮, 谢飞, 等. 微生物燃料电池强化铁碳微电解去除低浓度硝态氮技术 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(30): 390–396.
- CUI Ying, ZHAO Bowei, XIE Fei, *et al.* Enhance iron-carbon micro-electrolysis for the removal of low concentration nitrate nitrogen by microbial fuel cell [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(30): 390–396 (in Chinese).
- [24] LI C, HAO L S, CAO J S, *et al.* Mechanism of Fe-C micro-electrolysis substrate to improve the performance of CW-MFC with different factors: insights of microbes and metabolic function [J]. *Chemosphere*, 2022, 304: 135410.
- [25] YANG X L, LI T, XIA Y G, *et al.* Microbial fuel cell coupled ecological floating bed for enhancing bioelectricity generation and nitrogen removal [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(20): 11433–11444.
- [26] SHEN Y H, ZHUANG L L, ZHANG J, *et al.* A study of ferric-carbon micro-electrolysis process to enhance nitrogen and phosphorus removal efficiency in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359: 706–712.
- [27] ZHANG L L, YUE Q Y, YANG K L, *et al.* Enhanced phosphorus and ciprofloxacin removal in a modified BAF system by configuring Fe-C micro electrolysis: investigation on pollutants removal and degradation mechanisms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342: 705–714.
- [28] YANG Z, MA Y, LIU Y, *et al.* Degradation of organic pollutants in near-neutral pH solution by Fe-C micro-electrolysis system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 315: 403–414.
- [29] 李子轩, 王继全. 铁碳微电解技术及其在处理工业废水中的研究进展 [J]. *建材世界*, 2020, 41(4): 100–102.
- LI Zixuan, WANG Jiquan. Iron-carbon micro-electrolysis technology and its research progress in industrial wastewater treatment [J]. *The World of Building Materials*, 2020, 41(4): 100–102 (in Chinese).
- [30] WANG R Z, HUANG D L, LIU Y G, *et al.* Recent advances in biochar-based catalysts: properties,

- applications and mechanisms for pollution remediation [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 371: 380–403.
- [31] 张帅, 赵志伟, 彭伟, 等. 铁碳微电解技术在水处理中的应用 [J]. 化学与生物工程, 2016, 33(12): 14–18.
- ZHANG Shuai, ZHAO Zhiwei, PENG Wei, *et al.* Applications of iron-carbon micro-electrolysis technology in water treatment [J]. Chemistry & Bioengineering, 2016, 33(12): 14–18 (in Chinese).
- [32] 汪桐, 陈明功, 王志刚, 等. 铁碳微电解技术净化污水的研究进展 [J]. 安徽化工, 2020, 46(5): 6–10.
- WANG Tong, CHEN Minggong, WANG Zhigang, *et al.* Development of iron-carbon micro-electrolysis technology to purify wastewater [J]. Anhui Chemical Industry, 2020, 46(5): 6–10 (in Chinese).
- [33] REN Z, FU X, ZHANG G, *et al.* Study on performance and mechanism of enhanced low-concentration ammonia nitrogen removal from low-temperature wastewater by iron-loaded biological activated carbon filter [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113859.
- [34] FENG Q, GUO W, WANG T, *et al.* Iron coupling with carbon fiber to stimulate biofilms formation in aerobic biological film systems for improved decentralized wastewater treatment: performance, mechanisms and implications [J]. Bioresource Technology, 2021, 319: 124151.
- [35] HUANG X, YANG X M, ZHU J, *et al.* Microbial interspecific interaction and nitrogen metabolism pathway for the treatment of municipal wastewater by iron carbon based constructed wetland [J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123814.
- [36] REN Z J, FU X L, ZHANG G M, *et al.* Study on performance and mechanism of enhanced low-concentration ammonia nitrogen removal from low-temperature wastewater by iron-loaded biological activated carbon filter [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113859.
- [37] WANG D Y, LI A J. Effect of zero-valent iron and granular activated carbon on nutrient removal and community assembly of photogranules treating low-strength wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 151311.
- [38] KANG Y, SUN H, GAO B, *et al.* Enhanced reduction of Cr(VI) in iron-carbon micro-electrolysis constructed wetlands: mechanisms of iron cycle and microbial interactions [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 439: 135742.
- [39] DAI M X, WU Y M, WANG J, *et al.* Constructed wetland-microbial fuel cells enhanced with iron carbon fillers for ciprofloxacin wastewater treatment and power generation [J]. Chemosphere, 2022, 305: 135377.

作者简介:李宸志(1998–),男,江苏南京人,在读硕士,研究方向为污水处理技术。

E-mail:913729506@qq.com

收稿日期:2022-08-22

修回日期:2022-10-28

(编辑:丁彩娟)

**加强生态保护和修复,
提升生态系统多样性、稳定性、持续性**