

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.08.005

外源微生物强化人工湿地污染物去除研究进展

王鑫壹^{1,2}, 付保荣³, 祝惠¹, 陈欣¹, 程锐¹, 阎百兴¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 辽宁大学 环境学院, 辽宁 沈阳 110036)

摘要: 微生物是人工湿地处理污染物的主要贡献者,通过分析和整理国内外相关文献,总结了脱氮菌、特定污染物降解菌、耐盐菌和低温菌4类功能菌的研究现状,阐述了外源微生物强化技术在人工湿地中的研究进展和应用潜力,并探讨了菌剂直接投加和固定化微生物两种投加方式的研究现状。研究表明,接种外源微生物能够增强人工湿地的脱氮效果,提高人工湿地对特殊污染物的降解能力,并改善人工湿地在极端环境中功能受阻等问题。建议未来重点在高效降解菌的筛选与应用、外源微生物投加方式的优化、外源微生物强化人工湿地净化功能的长期运行效果以及外源菌种引入人工湿地的生态安全等方面开展研究,进一步提高人工湿地对废水中污染物的去除能力,完善微生物强化人工湿地净化功能技术体系。

关键词: 人工湿地; 微生物强化; 脱氮菌; 耐盐菌; 低温菌; 固定化微生物技术

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0033-08

Research Progress on Intensification of Pollutant Removal in Constructed Wetlands by Introducing Exogenous Microbials

WANG Xin-yi^{1,2}, FU Bao-rong³, ZHU Hui¹, CHEN Xin¹, CHENG Rui¹,
YAN Bai-xing¹

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: Microorganisms are the main contributors for pollutant removal in constructed wetlands (CWs). Based on the analysis and collation of domestic and foreign papers, recent research about four kinds of functional bacterium i.e. denitrifying bacteria, pollutant-degrading bacteria, halophilic bacteria and psychrotrophic bacteria were reviewed in this paper. The research progress and application potential of introducing exogenous microbial for intensifying the pollutant treatment function of CWs were analyzed. Moreover, the effects of exogenous microbial dosing methods (i.e. direct dosing bacteria and immobilized microorganisms) on the treatment performance of CWs were also discussed in detail. Bioaugmentation can not only enhance the degradation of nitrogen and specific pollutants in CWs, but

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300900); 中科院创新交叉团队项目(JCTD-2020-14)

通信作者: 祝惠 E-mail: zhuhui@iga.ac.cn

also improve the operation efficiency of CWs under severe environmental conditions. In order to enhance the removal efficiency of pollutants in CWs and complete the relative technology system to intensify CWs water pollution treatment function by microorganisms, the following four aspects were recommended for future research: (1) the screening and application of high-efficiency degrading bacteria; (2) the optimization of the dosing methods for bacterial agents; (3) the evaluation of exogenous microorganism intensified CWs on long-term efficiency; and (4) the ecological safety assessment of exogenous strains to CWs.

Key words: constructed wetlands; bioaugmentation; denitrifying bacteria; halophilic bacteria; psychrotrophic bacteria; immobilised microorganism technology

人工湿地通过物理、化学和生物相互协同作用来实现对水体中污染物的净化,其主要作用机理包括基质吸附、植物吸收和微生物代谢活动等。其中,微生物是人工湿地去除污染物的重要贡献者。研究表明,通过投加碳源,增加人工湿地中反硝化细菌的数量,可增强湿地中微生物的反硝化能力,提高湿地的脱氮能力^[1]。尽管人工湿地中微生物种类丰富,但是具有特定功能以及可适应于极端环境条件(如低温、高盐环境)的微生物数量有限,导致人工湿地对一些特殊废水(如含油废水、制革废水、含盐废水)的处理能力受限。因此,通过向人工湿地投加具有特定适应能力的外源微生物,可以在一定程度上保证人工湿地的净化效果,拓宽人工湿地的应用范围。

目前,已有较多研究通过投加营养物方式增强人工湿地中固有微生物的活性,以强化人工湿地去除污染物的能力^[2]。但这种方式只提高了人工湿地的脱氮能力,对其他污染物的去除能力仍较弱。人工湿地作为一个完整的生态系统,其系统内微生物的生长受温度、盐分、pH和含氧量等环境因素的影响。任何环境因素超出微生物的耐受范围,都会使微生物的生长受到抑制,降低人工湿地对污染物的去除能力。针对这些问题,国内外学者对外源微生物强化人工湿地去除污染物的能力开展了研究,并取得了一系列进展。本研究从外源微生物的种类和投加方式两方面,阐述了外源微生物强化人工湿地的研究现状和应用潜力,揭示了当前微生物强化人工湿地污染物去除研究中亟待解决的问题,同时提出了未来的研究重点。

1 外源微生物的种类

大多数外源微生物是在相同或受目标污染物

污染严重的环境中分离筛选获得。外源微生物菌剂可以由一株或多株具有高效降解目标污染物能力的强化菌扩增培养制成,按照主要功能,这些强化菌包括脱氮菌、特定污染物降解菌和适用于恶劣环境的耐盐菌、低温菌等。

1.1 脱氮菌

目前,微生物强化技术已成功应用在河道修复、湖泊富营养化治理以及人工湿地净化效能优化等领域。其中,微生物强化技术在人工湿地中的应用研究主要集中在生活污水和污水处理厂尾水的处理^[3]。针对不同环境条件,选择合适的脱氮菌是实现微生物强化人工湿地脱氮的重要前提。微生物在人工湿地中的生长和代谢活动受多种非生物因素及其与微生物之间相互作用的影响。因此,应保证投加的脱氮菌在人工湿地中能够正常生长和代谢。

因为具有良好的生物修复特性,一些脱氮功能菌被筛选并成功应用于强化人工湿地的废水处理。陈晶等^[4]在活性污泥中筛选出一株为恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)的反硝化聚磷菌B8,将制得的B8菌剂与污水处理厂尾水混合后投加到水平潜流人工湿地,对氮、磷的去除率分别为71.5%和63.1%,高于未加菌剂对照组(氮、磷去除率分别为50.2%和45.9%),证明投加该菌剂可以提高人工湿地的脱氮除磷能力。将外源脱氮菌引入人工湿地,不仅提高了其对废水中氮素污染物的去除能力,还与湿地中固有微生物存在相关联系(如共生关系),共同为湿地脱氮发挥作用。此外,脱氮菌也能缩短人工湿地的水力停留时间,加快其对废水中氮素污染物的去除速率。Shao等^[5]在秋季向种植香蒲的人工湿地中投加反硝化菌XP1用于处理生活污水,对化学需氧量、氨氮和总氮的最大去除率分别为

73%、94%和78%,其中出水氨氮浓度达到国家一级B标准的最佳水力停留时间为4 d,与未加菌剂对照组(18 d)相比,水力停留时间缩短14 d。由于植物种类的不同,人工湿地中微生物群落结构会发生变化。外源微生物引入人工湿地后具有一定的环境敏感性,若更换人工湿地的植物种类,则外源微生物的强化作用易受到影响。然而,研究表明反硝化菌XP1也能提高种植芦苇的人工湿地对化学需氧量、氨氮和总氮的去除能力,突破了外源脱氮菌投加到人工湿地中易受植物种类影响的局限^[3]。人工湿地中微生物种类众多且复杂,分布广泛,具有明显的分层结构。因此,投加外源脱氮菌剂的强化效果还受投加位置的影响。在人工湿地的地上层位置投加固定反硝化菌,其强化脱氮的能力最佳,对总氮的去除率为60.31%,高于未加菌剂对照组(37.24%)、下层投加菌处理(44.35%)和上下层投加菌处理(57.74%)^[6]。对脱氮菌进行固定化,并投加到人工湿地的特定位置,脱氮菌可发挥最佳的强化脱氮能力。

上述基于菌种、植物种类及投加位置的分析,表明外源脱氮菌强化人工湿地脱氮性能是一种经济高效的方法。在人工湿地中投加外源脱氮菌,可增加微生物数量和活性,加强湿地中微生物的硝化和反硝化作用,有助于解决人工湿地脱氮能力不佳的问题。

1.2 特定污染物降解菌

在自然环境中,存在着一些具有降解特定污染物能力的微生物,这些微生物可以通过分离、筛选和驯化获得。目前,已有较多关于使用特定污染物降解菌进行污染土壤修复和废水处理的研究,如多环芳烃降解菌、石油降解菌、抗生素降解菌以及藻毒素降解菌等^[7-9]。

近几年,利用特定污染物降解菌强化人工湿地处理废水中难降解污染物的研究和应用逐渐增多,主要包括对水华水体、纺织废水、制革废水、含油废水和农药废水等的处理。在人工湿地处理水华水体过程中,微生物作为降解微囊藻毒素的主要贡献者,贡献率可达88.85%,投加外源微囊藻毒素降解菌后,其贡献率提高到了99.23%,这是由于引入外源微囊藻毒素降解菌增强了湿地中微囊藻毒素降解基因*mcrA*的丰度^[10]。微囊藻毒素降解菌可以直接利用微囊藻毒素,或通过其共代谢作用对微囊藻

毒素的活性结构进行破坏,使其降解。在垂直流人工湿地处理纺织废水过程中,向其投加纺织废水降解内生菌:树状微杆菌TYSI04和短小芽孢杆菌PIRI30,增加了湿地系统中植物根际降解菌的数量,促进了植物生长,对化学需氧量、生化需氧量、溶解性固体总量的去除率分别为79%、77%和59%,都显著高于未加菌剂对照组(相应去除率分别为65%、56%和39%),其出水水质符合当地污水排放标准^[11]。在人工湿地中,内生菌增多对植物的生长具有积极的作用。将外源内生菌引入人工湿地处理制革废水,不仅促进了湿地植物的生长,同时还增强了植物根际耐铬细菌的丰度,可高效去除废水中多种污染物(如重金属、有机物和无机物等),并降低废水毒性^[12]。增加湿地植物根际、根和茎中特定污染物降解内生菌的数量是微生物强化人工湿地处理纺织废水和制革废水的有效途径之一。此外,微生物强化技术和人工湿地技术的联合使用,还能提高人工湿地对废水中特殊有机污染物(如油类、农药等)的降解能力。利用烃降解复合菌剂强化漂浮式人工湿地处理含油废水,对油类、化学需氧量和生化需氧量的去除率分别为97%、93%和97%,显著高于未加菌剂对照组(相应去除率分别为16%、27%和38%),证实了微生物强化人工湿地是一种有效的含油废水处理方法^[13]。在人工湿地中投加阿特拉津降解菌剂运行37 d后,湿地系统对阿特拉津的降解能力逐渐提高,其降解率由74.6%提高到87.1%,而未加菌剂对照组的降解率保持在69.8%~76.2%之间^[14]。综上所述,根据废水中难降解污染物的成分,选择合适的特定污染物降解菌,可以有效提高人工湿地对特定污染物的去除率。

目前,已有学者通过生物反应器和人工湿地组合,处理含难降解污染物的废水,并取得了良好的去除效果。人工湿地联合固定化微生物反应器处理工业型村镇废水,对10种主要有机难降解污染物的去除率均高于50%,其中乙酸苯酯的去除率高达95.6%^[15]。将利用特定污染物降解菌的固定化生物反应器作为人工湿地前处理工艺,有效降低了废水中难降解有机物对湿地的毒害作用,在缓解特定污染物对人工湿地的生态压力方面具有积极作用,间接改善了人工湿地对废水的处理效果。尽管针对其他难降解污染物的微生物强化去除在人工湿地中的研究和应用还较少,但已有在土壤含水层系统

和河道排口中的研究和应用^[16],且取得了良好效果,为未来微生物强化人工湿地去除难降解污染物提供了依据。

1.3 耐盐菌

利用物理化学法处理含盐废水成本高、能耗大,尤其是控制面源污染较难实施。人工湿地因其建设和运行成本较低,具有处理含盐废水的应用潜力。废水盐分过高会抑制人工湿地中微生物的生长代谢,导致人工湿地对含盐废水中的污染物去除受到限制。研究发现,随着盐分的增加,人工湿地中的微生物活性会降低,从而导致人工湿地对污染物的去除率降低。

耐盐菌能够在盐分变化幅度较大的含盐环境中稳定生长和活动。已有大量研究证实耐盐菌不仅能在盐胁迫条件下正常生存,还能有效去除含盐废水中的一般污染物(如氮素污染物和有机物等)。在这些研究基础上,已有研究将耐盐菌引入人工湿地,用以提升其对含盐废水中氮素污染物的去除率。当进水盐度EC为15 mS/cm时,投加别样希瓦氏菌(*Alishewanella* sp.) F2菌剂的人工湿地对氨氮和总氮的去除率(95.7%和99.4%)显著高于未加菌剂对照组(相应去除率分别为68.5%和76.4%)^[17]。通过高通量测序技术,发现*Alishewanella* sp. F2菌剂的投加改变了人工湿地中微生物群落的结构和丰度,增加了湿地系统中固有脱氮功能菌群所占的丰度。不仅如此,还促进了湿地植物的生长和整株植物全氮积累能力^[17]。除氮素污染物外,具有其他污染物降解功能的外源耐盐菌也能在人工湿地中发挥自身作用。Karajic等^[18]从盐田筛选出耐盐菌,接种到中试规模的潜流人工湿地中,对含盐量为1.5%的合成废水中的化学需氧量去除率为83.6%。投加耐盐菌强化人工湿地具有高效、经济、环保等优势,既可弥补污水处理厂成本过高的不足,又有望解决盐分过高抑制人工湿地净化功能的问题。

通过对耐盐菌及其应用进展的总结和分析,投加耐盐菌强化人工湿地是一种有效的含盐废水处理办法。今后的研究重点可以集中在筛选具有针对某一种污染物降解能力的耐盐菌和制备具有多种功效的耐盐复合菌剂等方面,高效利用耐盐微生物以强化人工湿地处理不同类型的含盐废水。

1.4 低温菌

我国北方地区冬季寒冷,人工湿地中的植物多

处于休眠或死亡状态,微生物的生长代谢也被抑制,而基质吸附对人工湿地去除污染物的作用有限。因此,低温环境大大降低了人工湿地对废水的处理效果。

在温度变化幅度较大的低温环境中,存在着一些可以正常生长与代谢的低温菌。在低温条件下,利用低温菌强化人工湿地废水处理效果更有优势。目前,已有许多学者成功筛选出低温菌,且制备的低温复合菌具有在低温条件下对废水污染物的高效降解能力。唐美珍等^[19]在山东省微山湖人工湿地的底泥中筛选出一株黄假单胞菌(*Pseudomonas flava*)的低温菌WD-3,在温度为16℃条件下对模拟废水中的化学需氧量、总磷和氨氮的去除率分别为62.92%、56.42%和50.63%。基于低温菌在生化处理系统中的成功应用,也有一些学者将低温菌应用到强化人工湿地对污染物的去除研究中,并证实了低温菌在改善人工湿地低温运行效率方面具有广阔的应用前景。赵昕悦^[20]研究表明,在温度为15℃条件下,向人工湿地分别投加0.25%、0.5%和1%的低温菌剂处理生活污水,发现0.25%投加量处理组出水总氮浓度符合一级B标准,0.5%和1%投加量处理组则符合一级A标准,但是1%投加量处理组中的总氮去除率低于0.5%投加量处理组。菌剂投加量的选择是外源微生物强化人工湿地净化效能的前提。在相同的水力停留时间下,外源菌剂的投加量直接影响了湿地净化的强化效果。当投加量过低时,外源菌对湿地净化功能的强化作用受到外源菌活性不足的限制;当投加量过高时,其强化能力会由于过量外源菌之间产生的竞争关系而受到抑制。同时,研究还证实了低温微生物强化人工湿地在低温胁迫下处理生活污水的可行性。Zhao等^[21]在10℃条件下将低温复合菌剂投加到中试规模人工湿地,进水第5天对氨氮和总氮的去除率分别达到100%和80%左右,显著高于未加菌剂对照组(相应去除率分别为70%和60%)。通过高通量测序分析可知,外源低温菌引入人工湿地后,导致湿地中微生物群落结构发生改变,并重新建立菌群平衡,其中耐受低温的脱氮菌丰度增加。基于脱氮效率和微生物群落结构两方面的响应,低温复合菌剂投加可以调整人工湿地中的微生物种群,提高低温条件下人工湿地的脱氮效率。

总之,投加低温菌剂可以提高人工湿地在低温

条件下对污染物的去除能力。利用低温菌自身在低温环境下的生长特性,结合其对废水中污染物的降解能力,低温菌可被应用于增强北方寒冷地区人工湿地的净化效能,扩大人工湿地的应用范围。

2 外源微生物在人工湿地中的投加方式

2.1 直接投加菌剂的方式

在人工湿地中,直接投加具有降解目标污染物能力的菌剂是微生物强化人工湿地应用最简单、最普遍的方法之一。在外源微生物被分离、筛选、驯化和富集后,将其制成外源强化菌剂,并按投加比例与废水充分混合后,以游离态形式随着废水直接进入人工湿地。投加的外源微生物可以吸附在基质表面,形成生物膜,也可以游离态的形式存在于废水中。在充足的营养物质和合适的运行条件下,直接投加外源微生物菌剂可以缩短人工湿地的微生物挂膜时间,也可以缩短微生物在湿地中的驯化时间,提高湿地对目标污染物的去除能力。Pei等^[22]研究表明,在夏季时,直接向河滨人工湿地中投加枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*) FY99-01净化水体,其硝态氮的去除率高达36.1%,而未投加菌剂的对照组则无明显去除效果。在人工湿地中,通过直接投加外源微生物来提高硝酸盐的去除效果是一种经济且有效的措施。

然而,在人工湿地中直接投加单一菌剂对污染物的处理效果不太理想,因此可以通过投加混合菌剂,提高人工湿地对污染物的去除能力。林静等^[23]向人工湿地直接投加复合硝化菌剂和酶制剂处理受污染的苏州河水,其对氮素污染物(如氨氮)的去除率与硝化细菌的关系系数为0.84,显著高于未加菌剂对照组(0.54),表明湿地氨氮去除能力与菌剂投加之间具有直接关系。同时,复合硝化菌剂的投加还会提高湿地系统中的酶活水平,在投加菌剂处理组,硝化细菌与酶活性的相关性达到0.8以上,显著强化了湿地系统中氨氮的降解转化^[23]。混合菌剂依靠各单菌株的相互协作、相互提供生长所需的营养物质或消除抑制对方生长代谢的阻碍因子,其处理效果往往优于各单菌株的处理效果。

2.2 固定化微生物投加方式

固定化微生物技术是利用物理或化学方法,将特定微生物固定在合适的载体上,保证微生物活性,并使微生物能在适宜条件下快速生长和大量繁

殖的一种生物技术。固定化微生物具有微生物密度高、不易流失、环境适应能力强(温度、pH)、对有毒物质耐受力强等优点,可以在外界环境中长时间维持较高的微生物活性。固定化微生物技术解决了投加菌在人工湿地中易被清洗或被捕食的问题,并能有效增加湿地中的微生物数量,维持较高的微生物活性,提高人工湿地对废水中污染物的去除能力。微生物的固定化方法较多,包括吸附法、包埋法、交联法、介质截留法、自固定法和复合固定化法等。其中,人工湿地的应用中以吸附法和包埋法为主。

2.2.1 吸附法

吸附法作为最早在废水处理中应用的微生物固定化方法,具有易操作、条件温和、不易对微生物活性造成影响和吸附载体可再生使用等优点,常用的吸附载体有海绵、活性炭、生物炭、木屑、多孔陶瓷、硅藻土、硅胶、纤维素和离子交换树脂等。唐美珍等^[24]以黄假单胞菌WD-3为固定化对象,以水稻秸秆炭化制得的生物炭为吸附剂,将固定化的黄假单胞菌WD-3投加到人工湿地中,在冬季其对废水中化学需氧量、氨氮和总磷的去除率分别为游离菌处理组的1.03、1.15和1.14倍。Shao等^[25]以液态菌剂和固态菌粒(吸附载体为微孔聚氨酯)两种方式分别投加反硝化细菌CL-5来处理校园污水,显著提高了对化学需氧量、总氮和总磷的去除效果,但微孔聚氨酯固定菌粒的投加方式对污染物的去除效果更持久。这些研究表明,与液体菌剂直接投加相比,投加固定化外源微生物对人工湿地去除污染物的效果更好。改变吸附载体也能使外源脱氮菌发挥高效降解能力,李政^[26]研究表明,将海绵作为反硝化细菌CL-5的吸附载体,对校园污水的处理效果良好且运行稳定,对化学需氧量、氨氮、硝态氮、总氮和总磷的去除率分别高于75%、75%、82%、69%和78%,高于未加菌剂对照组(相应去除率分别为60%、54%、14%、43%和65%)和菌剂直接投加处理组(相应去除率分别为63%、63%、21%、49%和70%),出水水质符合一级A标准。外源微生物通过不同吸附载体进行固定化,并投加到人工湿地中,均能提高外源微生物在人工湿地的存活时间,使人工湿地的净化能力具有持久性。

2.2.2 包埋法

包埋法是目前最常用的微生物固定化方法之

一,具有可工业化操作、载体种类多、固定化效果好和不易对微生物活性造成影响等优点,常见的包埋材料有明胶、聚乙烯醇和以海藻酸钠为代表的海藻酸盐。Wang等^[27]以松江市污水处理厂的活性污泥为研究对象进行硝化细菌的分离培养,利用聚乙烯醇和海藻酸钠作为包埋剂,反复冻融后对硝化细菌进行固定化,将其投加到人工湿地中处理富氮废水,其脱氮率为43%,显著高于未加菌剂对照组(31%)。固定化微生物技术是解决人工湿地硝化作用受阻的一种有效方法。在进水COD/N比较高时,以聚乙烯醇和以海藻酸钠包埋固定硝化细菌可以有效改善人工湿地的脱氮效果^[28]。温度、pH和溶解氧的波动对固定化反硝化细菌的脱氮效果影响均小于游离反硝化细菌。在温度为10℃条件下,以聚乙烯醇和以海藻酸钠包埋固定反硝化细菌处理污染程度较低的水体,总氮去除率为47%^[29]。以上研究验证了固定化微生物具有较强的环境适应能力,为后续固定化微生物强化人工湿地去除污染物的研究提供了基础。

针对低碳氮比的废水,仅向人工湿地投加外源微生物并不能得到有效的处理效果。在处理低碳氮比废水过程中,向人工湿地投加碳源,既可弥补湿地系统碳源不足的问题,又可为湿地系统中微生物提供附着载体。因此,一些学者利用包埋法,对外源微生物和外加碳源同时进行固定化,形成固定化颗粒,并将其投加到人工湿地进行研究。王春喜等^[30]利用包埋法固定反硝化细菌后,与稻壳形成固定化反硝化细菌联合固定碳源小球,将其投加到混合种植芦苇和香蒲的水平潜流人工湿地中基质的顶层部分(平铺密度为5个/cm²),用以处理低碳氮比污水,其中对化学需氧量、氨氮和总氮的去除率分别为78.98%、85.46%和78.33%,处理效果都优于对照组(相应去除率分别为61.90%、61.33%和21.74%)。外源微生物和碳源联合固定化形成的颗粒是强化人工湿地处理低碳氮比废水的一种有效方法。利用微生物固定化技术同时对微生物和碳源进行固定,增加了湿地中反硝化细菌数量和碳源含量,有效解决了人工湿地反硝化阶段缺少碳源的问题。

每种投加方式具有各自的优势,根据研究与应用的目的,选择合适的投加方式将外源微生物投加到人工湿地中,是提高人工湿地净化能力的前提。

直接投加液体菌剂,有利于保证外源微生物均匀分布于人工湿地不同位置,增加外源微生物与人工湿地中植物根系和基质的接触面积,使外源微生物在强化人工湿地除污效果中充分发挥作用。固定化微生物的投加,有利于提高外源微生物在人工湿地中的存活时间,使人工湿地的强化净化效果更持久。无论采用何种投加方式,引入一种或多种外源微生物,均有助于提高人工湿地对污染物的去除能力。因此,外源微生物强化技术在提升人工湿地净化功能方面具有较好的应用潜力。

3 结语

目前,关于外源微生物强化人工湿地多以小试和中试研究为主,实际应用案例相对较少。虽然多数研究表明,通过投加外源微生物来增加微生物数量,可以提高人工湿地的净化能力,但是无法证明已经分离得到的外源微生物适用于所有类型的人工湿地。分离、筛选和驯化具有高效降解能力的降解菌仍是未来研究的重点。在有针对性地直接投加外源微生物强化人工湿地处理污染物时,外源微生物的存活受到环境因素变化的影响,无法达到理想的预期效果。虽然固定化微生物技术可以增强外源微生物的环境适应能力,提高外源微生物强化人工湿地处理废水中污染物的长效性,但在实际应用中如何选择微生物固定化方法和固定化载体,如何确保固定化微生物的最佳活性,保证固定化微生物在人工湿地中较高的生物活性,并能稳定持久地发挥其作用是该技术能否广泛应用的关键。另外,外源菌种引入人工湿地,所造成的生态风险也是一个不可忽视的问题。因此,未来应重点开展以下几方面的研究:①分离、筛选和驯化可应用于强化不同类型人工湿地的具有高效降解能力的降解菌;②投加菌的存活率和投加频率与强化效果的关系,优化外源菌种投加方式,保证外源微生物在人工湿地中的最佳活性,能持久且高效地对废水中污染物进行去除;③考察投加外源微生物对人工湿地中微生物多样性的影响;④分析外源微生物自身毒性,检测在其去除污染物过程中的产物成分,对外源菌种引入人工湿地的生态安全进行评估;⑤根据废水类型、地理位置和环境条件等实际情况,深入开展微生物强化人工湿地去除污染物的研究,促进微生物强化在人工湿地中的推广应用。

参考文献:

- [1] SI Z H, SONG X S, WANG Y H, *et al.* Intensified heterotrophic denitrification in constructed wetlands using four solid carbon sources: denitrification efficiency and bacterial community structure [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 416–425.
- [2] MENG P, PEI H Y, HU W R, *et al.* How to increase microbial degradation in constructed wetlands: influencing factors and improvement measures [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 157: 316–326.
- [3] PEI H Y, SHAO Y, CHANWAY C P, *et al.* Bioaugmentation in a pilot-scale constructed wetland to treat domestic wastewater in summer and autumn [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(8): 7776–7785.
- [4] 陈晶, 张敏特, 陈萍, 等. 菌剂强化潜流湿地总氮总磷去除及功能菌特性[J]. *环境化学*, 2015, 34(12): 2268–2274.
CHEN Jing, ZHANG Minte, CHEN Ping, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal and characteristics of functional microbes in subsurface flow wetland with microbe augmentation [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(12): 2268–2274(in Chinese).
- [5] SHAO Y, PEI H Y, HU W R. Nitrogen removal by bioaugmentation in constructed wetlands for rural domestic wastewater in autumn [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(34/36): 6624–6631.
- [6] 林燕, 张焕杰, 刘曦, 等. 固定反硝化菌强化人工湿地处理低污染水研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(11): 2154–2162.
LIN Yan, ZHANG Huanjie, LIU Xi, *et al.* Performance of immobilized denitrifying bacteria in constructed wetland for slightly-polluted water treatment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2154–2162(in Chinese).
- [7] 刘元望, 李兆君, 冯瑶, 等. 微生物降解抗生素的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 212–224.
LIU Yuanwang, LI Zhaojun, FENG Yao, *et al.* Research progress in microbial degradation of antibiotics [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 212–224(in Chinese).
- [8] WANG R, TAI Y P, WAN X, *et al.* Enhanced removal of microcystis bloom and microcystin-LR using microcosm constructed wetlands with bioaugmentation of degrading bacteria [J]. *Chemosphere*, 2018, 210: 29–37.
- [9] XU X J, LIU W M, TIAN S H, *et al.* Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: a perspective analysis [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 11.
- [10] 万翔. 复合降解菌强化人工湿地处理微囊藻毒素LR机制研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
WAN Xiang. The Removal Mechanism of Microcystin-LR by Constructed Wetlands with Bioaugmentation [D]. Guangzhou: Jinan University, 2017(in Chinese).
- [11] SHEHZADI M, AFZAL M, KHAN M U, *et al.* Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using *Typha domingensis* and textile effluent-degrading endophytic bacteria [J]. *Water Research*, 2014, 58: 152–159.
- [12] ASHRAF S, AFZAL M, NAVEED M, *et al.* Endophytic bacteria enhance remediation of tannery effluent in constructed wetlands vegetated with *Leptochloa fusca* [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(2): 121–128.
- [13] REHMAN K, IMRAN A, AMIN I, *et al.* Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 349: 242–251.
- [14] 赵昕悦. 阿特拉津降解菌 *Arthrobacter ureafaciens* ZXY-2 降解特性及对人工湿地强化机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
ZHAO Xinyue. Research on Characterization of Atrazine-degrading Strain *Arthrobacter ureafaciens* ZXY-2 and Bioaugmentation of Constructed Wetland [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [15] 满滢, 陶然, 杨扬, 等. 高效降解菌固定化反应器—人工湿地组合工艺处理工业型村镇废水[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(5): 1003–1011.
MAN Ying, TAO Ran, YANG Yang, *et al.* The use of immobilized microorganism reactor-integrated constructed wetland (IMR-ICW) system for rural comprehensive wastewater treatment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 1003–1011 (in Chinese).
- [16] ZHANG X, YANG Y S, LU Y, *et al.* Bioaugmented soil aquifer treatment for P-nitrophenol removal in wastewater unique for cold regions [J]. *Water Research*, 2018, 144: 616–627.

- [17] WANG X Y, ZHU H, YAN B X, *et al.* Bioaugmented constructed wetlands for denitrification of saline wastewater: a boost for both microorganisms and plants [J]. *Environment International*, 2020, 138, 105628.
- [18] KARAJIC M, LAPANJE A, RAZINGER J, *et al.* The effect of the application of halotolerant microorganisms on the efficiency of a pilot-scale constructed wetland for saline wastewater treatment [J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2010, 75(1): 129–142.
- [19] 唐美珍, 李婷婷, 王艳娜, 等. 人工湿地中一株高效低温菌的分离鉴定与去除特性研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(3): 708–714.
TANG Meizhen, LI Tingting, WANG Yanna, *et al.* Identification and characterization of an efficient psychrotrophic bacterial strain isolated from artificial wetlands [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3): 708–714(in Chinese).
- [20] 赵昕悦. 复合菌剂的构建及其低温强化人工湿地净化效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHAO Xinyue. Construction of Compound Microorganism Bacterium Agent and Its Bioaugmentation Efficiency in the Constructed Wetland at Low Temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [21] ZHAO X Y, YANG J X, BAI S W, *et al.* Microbial population dynamics in response to bioaugmentation in a constructed wetland system under 10 degrees C [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 166–173.
- [22] PEI Y S, YANG Z F, TIAN B H. Nitrate removal by microbial enhancement in a riparian wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5712–5718.
- [23] 林静, 谢冰, 徐亚同. 复合微生物制剂对芦苇人工湿地去除污染物的影响[J]. *水处理技术*, 2007, 33(2): 38–41.
LIN Jing, XIE Bing, XU Yatong. Effect of compound microorganism preparation on pollutant removal in the the reed constructed wetlands [J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(2): 38–41(in Chinese).
- [24] 唐美珍, 汪文飞, 李如如, 等. 生物炭对 *Pseudomonas flava* WD-3 的固定化及其强化人工湿地污水处理研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(9): 3441–3448.
TANG Meizhen, WANG Wenfei, LI Ruru, *et al.* Immobilized *Pseudomonas flava* WD-3 by biochar for the sewage purification in the artificial wetland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(9): 3441–3448(in Chinese).
- [25] SHAO Y, PEI H Y, MENG P, *et al.* Bacteria immobilized on microporous polyurethane to enhance campus sewage treatment in constructed wetlands microcosms [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2016, 25(1): 337–344.
- [26] 李政. 固定化反硝化细菌强化人工湿地处理校园污水[D]. 济南: 山东大学, 2014.
LI Zheng. Bioaugmentation in Constructed Wetland by Immobilized Denitrifying Bacteria for Campus Sewage Treatment [D]. Jinan: Shandong University, 2014 (in Chinese).
- [27] WANG W, DING Y, WANG Y H, *et al.* Treatment of rich ammonia nitrogen wastewater with polyvinyl alcohol immobilized nitrifier biofortified constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 7–11.
- [28] WANG W, DING Y, WANG Y H, *et al.* Intensified nitrogen removal in immobilized nitrifier enhanced constructed wetlands with external carbon addition [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218: 1261–1265.
- [29] 张焕杰, 余璐, 朱文颖, 等. 固定化反硝化菌在低污水处理中脱氮性能研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 857–863.
ZHANG Huanjie, YU Lu, ZHU Wenying, *et al.* Nitrogen removal characteristics of immobilized denitrifying bacteria for treatment of slightly-polluted water [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(5): 857–863(in Chinese).
- [30] 王春喜, 余关龙, 张登祥, 等. 固定化反硝化菌联合固体碳源小球处理低碳氮比污水的性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(8): 870–874.
WANG Chunxi, YU Guanlong, ZHANG Dengxiang, *et al.* Study on performance of solid carbon source pellets combined with immobilized denitrifying bacteria for treating wastewater with low C/N ratio [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(8): 870–874(in Chinese).

作者简介: 王鑫壹(1995–), 女, 辽宁朝阳人, 博士研究生, 主要从事水环境污染与防治技术方面的研究。

E-mail: wangxy0331@126.com

收稿日期: 2020-03-17

修回日期: 2020-03-20

(编辑: 丁彩娟)