

人工湿地基质研究进展

莫晶 黄钰铃 骆辉煌 曹天正 杨青瑞

(中国水利水电科学研究院 北京 100038)

摘要: 人工湿地是处理不同领域复杂污染物的有效方法,已经被广泛应用。植物—基质—微生物三者之间协同作用是人工湿地去除污染物的主要机理,其中基质是系统中重要的组成部分,但日趋复杂的污染物组成对提高人工湿地性能和可持续性的基质提出了新的要求。本研究综述了人工湿地常用基质的理化性质、污染物去除效率,归纳了基质在人工湿地处理过程中遇到的问题,进一步结合国内外学者提出的解决方案,总结并提出了人工湿地优化措施,为人工湿地构建及处理效率优化提供了依据。

关键词: 人工湿地;基质;去污能力;优化

中图分类号: S156;X7

文献标识码: A

文章编号: 1004-3020(2024)02-0051-06

Research Progress of Substrates in Constructed Wetland

Mo Jing Huang Yuling Luo Huihuang Cao Tianzheng Yang Qingrui

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research Beijing 100038)

Abstract: Artificial wetlands is an effective solution for addressing complex environmental pollutants. The synergy among plants, substrates, and microorganisms is the key mechanism driving the removal of pollutants in artificial wetlands, with the substrate playing a particularly vital role. However, the growing complexity of pollutants necessitates the development of sustainable substrates and more efficient artificial wetland systems. This study begins by conducting a comprehensive review of the physico-chemical properties, pollutant removal mechanisms, and efficiency of commonly used substrates. Challenges faced by substrates during the treatment process in constructed wetlands are also brought to the forefront. By amalgamating the solutions proposed by both domestic and foreign scholars, this research outlines and proposes optimization measures for constructed wetlands. In conclusion, this study serves as a foundational resource for the construction of constructed wetlands and the enhancement of treatment efficiency in the face of evolving environmental challenges.

Key words: constructed wetland; substrate; decontamination ability; optimization

人工湿地是一种通过模拟天然湿地作用原理,进行人工调控以增强污水处理效果的系统,是由人工基质、水生植物组成的基质—植物—微生物生态系统。自 20 世纪 60 年代德国的 Seidel 首次研究人工湿地处理废水技术以来,人工湿地处理城市污水的方式逐渐受到重视并得到了各国的青睐^[1]。

人工湿地主要通过植物净化和微生物吸附降解两种方式进行水质净化,无论哪种方式都须将基

质作为媒介,基质在协调人工湿地生态系统各个组分间关系中发挥重要的作用。过去对于人工湿地基质的研究主要集中在对土壤、砂石等传统性基质,因其成本低廉易获取而被广泛应用^[2]。随着对人工湿地研究的不断深入,传统性基质存在污染物去除能力较低、易堵塞等问题,而陶粒、生物炭等比表面积大和吸附性能强的多孔基质因其高效的氮磷去除能力,近年来受到国内外学者广泛关注,但

* 收稿日期:2023-09-19;修回日期:2023-11-06

基金项目:中国长江三峡集团有限公司资助科研项目(202103360);长江生态环保集团有限公司资助科研项目“污水厂尾水生态湿地及河道生态用水技术研究”(HB/AH 2021046)。

作者简介:莫晶(1991—),女,工程师,主要从事河流生态学研究。

黄钰铃为通讯作者。

因其成本较高,适用范围并不广^[3]。因此选择人工湿地基质时,除了主要考虑不同基质对污染物的去除能力外,还应考虑人工湿地基质的易得性、价格成本以及是否易造成湿地堵塞等。

近年来,人工湿地基质相关研究逐渐增加,研究主要聚焦不同基质的去污能力、去污机理及影响因素、淤堵机理等方面^[4],但在实践中,基质选择通常以主观经验判断为主,缺乏针对性,基质往往较为单一,尤其缺少不同基质对污染物的去除效果的综合评估,因此不同基质的选择与配置成为了当前研究的热点。鉴于此,本研究综述了常见基质的理化性质及其污染物去除能力,为适用不同污染物的基质选择提供了参考,同时结合国内外研究进展总结了人工湿地常用的优化措施,并从处理效率和经济可行性两个方面对优化方法进行了比选,旨在为人工湿地基质的选择和优化提供理论依据与现实支撑。

1 人工湿地的基质类别

目前,湿地的填料种类较为丰富,根据来源和应用不同可分为天然材料、工农业副产品和人工合成基质材料三大类。

1.1 天然材料类

常见的天然材料类基质有砾石、沸石、麦饭石、

页岩、石灰石、火山石等(表1)。砾石是最早应用于人工湿地处理废水的基质,其渗透性比较好,对水中化学需氧量(COD)的去除率为80%左右,但对氮(N)和磷(P)的吸附能力较差,去除率小于30%^[5-7]。沸石具有多孔硅酸盐骨架,其物理吸附和化学吸附能力均较强,一方面多孔的结构增加了表面积,另一方面通过离子的交换,可以有效去除污染物和N,去除率均可达80%左右,但对P的去除率却低于30%^[8-10]。页岩、石灰石基质对P的去除能力较强^[11-12],有研究发现与沸石水平潜流湿地相比,石灰石水平潜流湿地则表现出了对磷素更佳的去除效果,其对污水厂二级出水中的总磷(TP)最高去除率达到了92%^[13]。但相对于去磷能力,页岩对COD的去除能力和石灰石对总氮(TN)的去除能力均比较低,有研究表明页岩对COD的去除效率仅40%,石灰石对TN的去除率为50.1%^[7,14]。因页岩强度较低,透水性能不强,容易造成堵塞等问题,而石灰石容易造成碱性环境不利于微生物生长,因此两者宜与其他基质组合使用。相对于页岩和石灰石,火山岩和麦饭石的综合去污能力均很强,有研究表明火山岩对COD、TP和氨氮(NH₃-N)的去除率分别为51.70%、47.06%和80.86%^[15-16];麦饭石对COD、TN和TP的去除率分别达到81.3%、79.2%和72%^[17-18]。

表1 常见天然材料基质理化性质及去污能力

基质	理化性质	去污能力			优缺点
		COD	N	P	
砾石	透水系数高,无毒无害。	中	低	低	渗透性好,对COD的去除效果比较好,但对N和P的吸附能力较差。
沸石	具有多孔硅酸盐骨架,易于与其他金属元素交换。表面通常带负电,具有较强的吸附和离子交换能力。	高	高	低	有利于微生物的生长,对COD和N的去除率高。
页岩	硬度低,颗粒易碎,透水系数较小。	低	中	高	对COD的去除性能差,但对TP表现出优异的吸附能力,抗压强度差,透水性不强。
石灰石	加工性和抛光性好,胶结性好,不溶于水,可用作吸附剂。	中	低	高	除P效果好,但渗透性不高,碱性环境不利于微生物的生存。
火山岩	良好的透水性、粗糙多孔的结构有利于微生物成膜。	中	高	高	原料易得,去污能力好,尤其除P效果很强。
麦饭石	多孔结构,比表面积大,其表面容易带负电,通过静电吸引阳离子,吸附能力很强。	高	中	中	有利于微生物生长,对污水的综合净化能力强。

1.2 工农业副产品类

工业副产品基质指的是工业生产和建筑施工过程中产生的粉煤灰和钢渣等废弃物,具有金属元素含量高、结构多孔和机械强度高特性;而农业副产品基质具有孔网结构丰富、来源广泛和可再生性强的特点,适于处理低碳氮比的污水。WANG R 等^[19]利用小麦秸秆、杏核和核桃壳作为基质处理低碳氮比废水,结果表明对氨氮、总氮和总磷去除率分别可达 98.8%、51.8%和 80.3%。粉煤灰是从煤燃烧后的烟气中收捕下来的细灰,其表面多孔且微孔小,比表面积大,具有较好的吸附能力,对 P 的净化效果较好,但其本身碱性较高,容易对植物生长造成一定的伤害^[20-21]。钢渣由生铁中的硅、锰、磷、硫等杂质在熔炼过程中氧化而成的各种氧化物以及这些氧化物与溶剂反应生成的盐类所组成,可与游离的磷酸盐结合为磷酸钙沉淀,对 TP 的去除效率可以达到 98%,但因其碱性也会抑制其与氨氮的离子交换作用和微生物反硝化过程,因此对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的去除率较低^[22]。

1.3 人工合成类

人工合成基质材料主要是指加工生产新基质,或对已有基质进行改性,增加基质的吸附性能,主要包含陶粒、活性炭和有机碳等。研究表明陶粒可为微生物的生长繁殖提供有利环境,进而提升对废水中 COD、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和 TP 的去除效率^[23-24],对 TP 去除率甚至高达 90%以上^[25],同时对 N 的去除能力也比较好^[26]。活性炭是一种多孔性含碳物质,主要是通过物理吸附去除污染物,但总体去除效率较低,对 COD 的吸附能力仅为中等,对 TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附能力也较弱^[27-29]。生物炭作为一类新型环境功能材料,具有高碳含量和多孔结构,比表面积大,同时具有较多的活性反应点,吸附能力强,对 COD、TN 和 TP 具有较高的去除效率^[30-31]。

2 基质的优化及其对污染物的去除

不同基质具有不同的污染物吸附能力,其污染物去除效率也不尽相同,在污染物组成日趋复杂的情况下,单一基质的人工湿地系统已难以满足污水净化需求。同时,单一类型基质极易造成堵塞,难以维持人工湿地的可持续运行。因此,亟待开展基质组合和基质改性研究以提高污染物综合去除

效率。在单一基质各自去除污染物的基础上,基质的优化可从改良传统基质理化性质、优化不同基质的配比、多层基质配置三个方面开展。

2.1 改性基质

改性基质是通过一系列酸碱热等物化增加吸附位,或在基质表层添加物质构建活性层来提高对污染物的去除能力,不仅可以提高对 COD、N、P 等常规污染物的去除效率,对重金属也有较好的去除效果。与传统湿地基质材料相比,改性后的湿地基质对污染具有吸附容量更大、吸附速率更快、反应时间更持久等优点。

2.1.1 对有机物的去除

污水中可溶性有机物需通过生物膜的吸附、吸收及生物代谢降解过程被去除,提高污水中 COD 去除效率的常用基质改性方法主要是增加其表面积,以提高微生物活性,增加有机物的物理截留和吸附能力。陈巧珍等^[32]研究结果表明,ZnCo-LDHs 改性沸石基质对 COD_Cr 的去除率达到了 76%;陈俊杰^[33]研究结果表明,CoCa-LDHs 改性沸石对有机物的去除效果最好。

2.1.2 对氮的去除

基质改性可以促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与基质之间的阳离子交换反应,增加基质的吸附能力,从而提高对污水中 N 的去除能力。张翔凌等^[34]研究结果发现, Mg^{2+} 参与合成的改性基质对 TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的净化效果明显增强, Fe^{3+} 的加入对改性基质去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 效果产生影响。何佳宁等^[35]研究 Fe 系改性烧结多孔砖基质的脱氮除磷效果,表明 Ca-Fe LDHs 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的净化效果最高,达到了 98.06%。

2.1.3 对磷的去除

污水中磷去除主要通过金属 Al、Mg、Fe 和 Ca 与污水中的磷酸盐反应形成沉淀,因此,对于污水中的磷污染,可以对基质进行改性去增加吸附活性位点从而提高对磷的去除能力。陈丽红等^[36]研究表明,Zn 系双金属层改性沸石对总磷、溶解性总磷及磷酸盐的平均去除率均超过 90%,最大理论吸附量可达原始沸石的 3 倍。葛姗姗等^[37]研究发现利用空心砖进行 ZnFe-LDHs 双金属覆膜改性后对总磷的吸附量提升了 17%。

2.1.4 对重金属的去除

改性基质通过增加基质的官能团活性位点及其交换和吸附能力来提高对重金属的去除能力。大量研究表明,铜改性、酸碱改性和磁性 Fe_3O_4 改

性都可以提高对重金属的吸附能力^[38-41]。Zhang X L 等^[42]研究表明,改性沸石和石英砂对 Cr(VI) 的吸附类型由以物理吸附为主的多分子层吸附转变为以化学吸附为主的单分子层吸附,有利于 Cr(VI) 在水中的吸附。

2.2 混合基质

不同的人工湿地基质对相同污染物的去除能力不同,不同的基质进行配比和组合有利于增强基质间协同效应。季凌晨^[43]通过人工湿地脱氮除磷性能研究发现,含钛高炉渣和石子作为填料更利于污水中氨氮和总氮的去除,而含钛高炉渣和转炉炼钢渣作为填料更利于污水中总磷的去除。柯德峰^[44]的研究发现,单种填料对氨氮的吸附能力大小为沸石>页岩陶粒>石灰石>砾石,对磷素的吸附能力大小为石灰石>页岩陶粒>砾石>沸石;组合填料中沸石和页岩陶粒以质量比 1:2 组合对氨氮的吸附能力最强,石灰石和页岩陶粒以质量比 2:1 组合对磷素的吸附能力最强。赵东源^[45]通过动力学吸附实验发现将沸石:生物陶粒:石灰石质量比为 3:1:1 组合时对氨氮去除率最高,为 94.61%,较单一吸附最优的沸石高 12.92%;将沸石:陶瓷滤料:石灰石质量比为 3:1:1 组合时对磷的去除效率最高,为 65.65%,较单一吸附最优的沸石高 11.98%。兰伟^[46]的研究发现,由镁砂+泥炭+石英砂按 4:3:3 比例构建的镁砂改良人工湿地优化系统除了能较好地实现磷的高效去除,还能提高硝酸盐、亚硝酸盐和总氮的去除率。

当前人工湿地中混合基质的组合和配比还没有统一的设计方法。因不同地方污水情况不一样,应结合实际情况,充分考虑粒径、材质、脱氮除磷效果等这些影响基质处理效果的因素,选取合适的基质类型和混合比例。

2.3 多层基质

人工湿地基质选取一方面要考虑净化效果,同时也应兼顾解决湿地床体的堵塞问题。多层基质(不同的基质堆叠组合)可以提高人工湿地基质层流场的均匀性,可以有效减少死水面积,避免短流现象,能减少湿地床体的堵塞。

多层基质之间溶解氧含量的差异对脱氮效率的提高最为明显。Fu 等^[47]研究表明基质层间不同的孔隙形成不同的溶解氧条件,促进了好氧硝化一反硝化和厌氧氨氧化,从而提高了系统的脱氮效

率,对 NH_4^+-N 和 TN 的最大去除率分别高达 97.4% 和 96.2%。多层基质对 COD 和 TP 的去除率也很高。丁海静等^[48]研究表明,多层基质结构较单层基质结构的湿地系统对 COD、TSS 去除率要高,多层基质结构提高了系统污染物的去除效果,基于分层填充基质结构的人工湿地提高流场分布均匀性,能够有效减少滞留区和死区的体积,提高基质截留性能,同时避免短流或者溢流造成的有机物未经基质填料过滤直接冲出系统。

为了最大限度地发挥每层基质的优势,应顺着水流方向,首先放置对 COD 和 N 去除效率高的基质,然后放置对 P 去除能力好的基质,同时为了缓解或减少堵塞,还应考虑上下基质的粒度分布,基质的粒径大小应随着水流方向逐渐减小。此外,还应考虑基质表面是否有利于微生物的生存,应减少使用不利于微生物生存的基质。

3 结论与展望

本研究综述了常见单一基质的理化性质及其对 COD、N、P 的去除特性,总结了人工湿地基质的组合和改性等常用优化措施,主要结论如下:

(1)在选择单一基质时,沸石和生物炭有利于 COD 的去除;沸石、火山岩和生物炭有利于 N 的去除;页岩、石灰石、火山岩和钢渣有利于 P 的去除。考虑到污水中污染物的综合净化能力,可以选择火山岩、生物炭和沸石。

(2)当对基质进行改性时,去除 COD 的改性方法主要是增加基质的表面积和吸附能力,如酸改性和负载比表面积大的材料;去除 N 和 P 的改性方法主要是增加基质的阳离子交换能力和吸附活性位点,如金属阳离子改性;去除重金属的改性方法主要是提高底物的官能团活性位点和离子交换吸附能力,如强酸或碱改性和金属改性。

(3)在选择混合基质和多层基质时,应根据现场条件和获得材料的难度来确定混合基质的比例和多层基质的排列。建议以土壤为基础,添加如沸石、陶粒、砾石、石灰石和改性基质等材料。选择多层基质时应先沿水流方向放置对 COD 和 N 具有良好去除能力的基质,然后放置对 P 具有良好去除力的基质,同时还需要考虑基质粒径大小,应随水流方向逐渐减小。

总体来看,当前对基质的研究主要集中在不同类型基质对不同污染物的净化效果上,对基质联合应用的效果仍缺乏深入研究,在实际应用中仍有不

少的技术瓶颈亟待解决。为此,结合国内外的研究进展与趋势,建议今后的湿地基质应着重在新型材料开发利用、多种基质组合配置的互补效应与协同基质、基质与其他单元协同作用以及基质防堵措施等方面的研究,以提高人工湿地的净化效率和可持续性。

参 考 文 献

- [1]刘华清.人工湿地基质堵塞形成机制、作用效能及防治技术研究[D].山东:山东大学,2019.
- [2]曹笑笑,吕宪国,张仲胜,等.人工湿地设计研究进展.湿地科学[J].2013,11(1):121-128.
- [3]周审言.不同进水盐度下表流人工湿地基质应用策略[D].南京:南京大学,2022.
- [4]阮晶晶,高德,洪剑明.人工湿地基质研究进展[J].首都师范大学学报(自然科学版),2009,30(6):85-90.
- [5]张忠广,黄津辉,周绪申,等.人工湿地基质挂膜降解COD小试试验[J].环境科技,2013,26(1):4-7.
- [6]杨子,汪家权.5种人工湿地基质对磷的吸附特性研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(7):981-986.
- [7]Saeed T, Miah M J, Majed N, *et al.* Pollutant removal from landfill leachate employing two-stage constructed wetland mesocosms: Co-treatment with municipal sewage[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 28316-28332.
- [8]肖烨,黄志刚,令玉林,等.人工湿地不同基质对城市生活污水净化效果研究[J].安徽农业科学,2022,50(17):52-55,61.
- [9]孔令华,施春红,马方曙,等.不同填料潮汐流人工湿地处理SBR尾水的对比[J].环境工程报,2017,11(1):379-385.
- [10]赵林丽,邵学新,吴明,等.人工湿地不同填料和粒径对污水净化效果的比较[J].环境科学,2018,39(9):4236-4241.
- [11]刘霄,黄岁樑,刘学功.3种人工湿地基质对磷的吸附特性[J].环境工程学报,2012,6(10):3367-3372.
- [12]王媛媛,张衍林,董仁杰.对不同的人工湿地基质除磷性能的比较[C].北京:中国农业工程学会,2005.
- [13]王昊,崔艳婷,刘贺.不同潜流湿地去除污水中磷素的反应动力学[J].河北联合大学学报(自然科学版),2014,36(4):122-127.
- [14]王忠诚.皇竹草生物炭基质对垂直流人工湿地处理城市污水厂尾水中COD的影响[J].化工管理,2019(6):150-151.
- [15]张海波.人工湿地对沙湖水的净化实验研究.广东化工[J].2019,46(13):56-59+74.
- [16]宋长友.不同基质人工湿地对氨氮及硝酸盐氮净化效果的研究[J].山东化工,2022,51(2):201-203.
- [17]Lu S, Zhang X, Wang J, *et al.* Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment. [J] Journal of Cleaner Production, 2016:127.
- [18]程锦,张国珍,武福平,等.基于保氮保磷理念下麦饭石填料在人工湿地的运用[J].水处理技术,2021,47(9):121-124.
- [19]Wang R, Zhao X, Liu H, *et al.* Elucidating the impact of influent pollutant loadings on pollutants removal in agricultural waste based constructed wetlands treating low C/N wastewater [J]. Bio resource Technology, 2019, 273: 529-537.
- [20]王万宾,胡飞,孔令瑜,等.人工湿地脱氮除磷基质的吸附能力及其影响因子[J].湿地科学,2016,14(1):122-128.
- [21]李慧君,罗建中,冼国勇,等.粉煤灰用作人工湿地基质处理含磷废水[J].广东化工,2008(4):83-84,88.
- [22]Xu R, Zhang Y, Liu R, *et al.* Effects of different substrates on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 16229-16238.
- [23]Wang Y, Yang J, Xu H, *et al.* Preparation of ceramsite based on waterworks sludge and its application as matrix in constructed wetlands[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(15):2637.
- [24]金宜英,杜欣,王志玉,等.采用污水厂污泥制陶粒的烧结工艺及配方研究[J].中国环境科学,2009,29(1):17-21.
- [25]李强,张敬申,梁瑞恒,等.人工湿地新型陶粒基质的制备及除磷性能研究[J].环境科学与技术,2021,44(12):13-22.
- [26]罗书舟,王东田.净水污泥柠檬酸钠改性焙烧制备陶粒吸附剂及其对废水中氨氮吸附性能的研究[J].安全与环境工程,2021,28(5):230-239.
- [27]陈军,李赫龙,卢斌,等.垂直流人工湿地填料对尾水深度处理的效果[J].河北环境工程学院学报,2020,30(4):77-82.
- [28]李琼辉,于伟鹏,李小荣,等.6种人工湿地填料对氮·磷的吸附效果研究[J].安徽农业科学,2016,44(4):83-86.
- [29]朱文涛,司马小峰,方涛.几种基质对水中磷的吸附特性[J].中国环境科学,2011,31(7):1186-1191.
- [30]Saeed T, Yasmin N, Sun G, *et al.* The use of biochar and crushed mortar in treatment wetlands to enhance

- the removal of nutrients from sewage[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 586-599.
- [31] 陈旭, 张璐. 生物炭基质潮汐流人工湿地处理生活污水性能[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1443-1449.
- [32] 陈巧珍, 张翔凌, 阮聪颖, 等. ZnCo-LDHs 改性人工湿地沸石基质对城市污水的净化效果[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 338-342.
- [33] 陈俊杰. 垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质净化效果研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [34] 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 等. 不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3012-3017.
- [35] 何佳宁, 刘春敬, 李思安, 等. 烧结多孔砖基质 Fe 系改性脱氮除磷效果研究[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(6): 104-109.
- [36] 陈丽红, 张翔凌, 何春艳, 等. Zn-LDHs 覆膜改性麦饭石对 Cd(II) 吸附性能及其作用机理研究. 环境科学学报[J]. 2019, 39(12): 4004-4014.
- [37] 葛姗姗, 刘春敬, 刘霞, 等. ZnFe-LDHs 覆膜改性人工湿地基质脱氮除磷性能研究[J]. 河北农业大学学报. 2017, 40(4): 108-113.
- [38] 赵宁, 孙奇娜, 黄海明, 等. 改性浒苔生物炭吸附水溶液体系中的 Cd²⁺[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(6): 999-1006.
- [39] 朱健, 王韬远, 王平, 等. 硅藻土基多孔吸附填料的制备及其对 Pb²⁺ 的吸附[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2205-2212.
- [40] 刘东京, 张祺, 吴江. 氯化铜改性石墨相氮化碳吸附剂的脱汞性能[J]. 环境工程学报, 2019, 13(7): 1687-1693.
- [41] 杨茂莺, 赵保卫, 索进苗, 等. 凹凸棒石负载铁氧化物复合材料的制备及应用进展[J]. 环境科技, 2022, 35(4): 59-64.
- [42] Zhang X, Zhao S, Gao J, *et al.* Microbial action and mechanisms for Cr(VI) removal performance by layered double hydroxide modified zeolite and quartz sand in constructed wetlands[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 636-646.
- [43] 季凌晨. 以含钛高炉渣为填料的人工湿地对生活污水中氮磷去除性能研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [44] 柯德峰. 人工湿地填料的筛选及其除磷机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [45] 赵东源, 张生, 赵胜男, 等. 人工湿地填料组合去除氮氨方案筛选及影响因素的动力学分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 121-126.
- [46] 兰伟. 以烧结镁砂为填料的人工湿地强化除磷效果及其作用机制[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [47] Fu G, Wu J, Han J, *et al.* Effects of substrate type on denitrification efficiency and microbial community structure in constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2020, 307: 1232.
- [48] 丁海静, 丁彦礼, 游俊杰, 等. 基质结构对人工湿地运行性能的影响分析[J]. 水处理技术, 2018, 44(12): 91-95.
- (编校: 郑京津)

(上接第 17 页)

- [9] 费学谦, 丁明, 周志春, 等. 七叶树属种和种群的遗传多样性及遗传分化研究[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(2): 166-171.
- [10] 黄晓丹, 张云贵, 应铁进. 高质量植物基因组 DNA 的提取[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(2): 311-314.
- [11] 史晓霞. RNA 干涉 PtBRC1 基因增加杨树分枝[D]. 贵州: 贵州大学, 2022.
- [12] 刘志格. 天师栗丰产栽培关键技术及种质资源遗传多样性研究[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2021.
- [13] 王绍文, 时明芝. 七叶树叶片的 DNA 提取[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 1.
- [14] 占塔鹏, 黄舒婷, 乔柱, 等. 山豆根基因组 DNA 高效提取方法的建立与优化[J]. 分子植物育种, 2020, 18(8): 6.
- [15] 闫玖英, 马长青, 常博, 等. 改良 CTAB 法用于苹果果实基因组 DNA 的提取[J]. 分子植物育种, 2017, 15(9): 3610-3615.
- [16] 李姗姗, 赵民楷, 冯丹彦, 等. 五种大蒜 DNA 提取方法的比较研究[J]. 岳阳职业技术学院学报, 2022, 37(1): 67-70.
- [17] 赵晓彤, 梁文达, 沈凤娇, 等. 微量苔藓样品 DNA 提取实验方案改良[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 515-521.
- [18] 易庆平. 柿属植物 DNA 提取纯化检测技术体系的建立[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [19] 程运江, 伊华林, 庞晓明, 等. 几种木本果树 DNA 的有效提取[J]. 华中农业大学学报, 2001, 20(5): 481-483.
- [20] 李丹, 凌定厚. 五种提取马尾松基因组 DNA 方法的比较[J]. 植物学报, 2000, 17(2): 168-173.
- [21] 文晓鹏, 邓秀新. 五种蔷薇属植物基因组 DNA 的提取及鉴定[J]. 种子, 2002(6): 4.
- (编校: 郑京津)