

李世杰, 喻凯, 乌景秀, 等. 生态滤坝在水质净化中的研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 22-30,93.

LI S J, YU K, WU J X, et al. Research progress of ecological filter dam in water purification [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 22-30,93.

## 生态滤坝在水质净化中的研究进展

李世杰<sup>1,2</sup>, 喻凯<sup>1,2</sup>, 乌景秀<sup>1,2</sup>, 丁瑞<sup>1,2</sup>, 范子武<sup>1,2,\*</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要** 【目的】针对部分城市水体清澈度低、水质差等问题,传统水处理技术存在生态化不足的现状,本文旨在系统解析生态滤坝的多重净化机制,探讨其结构参数与功能组分的协同优化,为提升水体原位修复效能,促进生态治水技术创新提供理论支撑。【方法】本文通过文献以及现有技术调研,综述了生态滤坝的物理-生物协同净化机理,评估了植物对污染物的吸收特征,简述了基质附着微生物膜分解有机物原理,对比了不同坝体结构及基质材料的净化效果。【结果】生态滤坝通过物理截留、植物吸收与微生物降解的多级协同净化机制,结合优化结构设计及复合基质组配,显著提升了水体污染物去除效率。该技术已被广泛应用于河道治理、农业灌溉、湿地修复等领域,在改善水质透明度、降低营养盐浓度及促进生态平衡方面展现出显著的环境效益。【结论】本文总结了生态滤坝已有的工艺,提出了未来研究可聚焦在研发应用基质新材料、改善滤坝结构、多种植物选配组合等方向,以期为后续生态滤坝在实际应用中发挥更大作用提供参考价值,为实现水体生态修复和可持续发展提供有力支持。

**关键词** 生态滤坝 水体净化 基质组配 植物组合 滤坝结构 滤坝应用

**中图分类号**: X52 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2025)12-0022-10

**DOI**: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.003

## Research Progress of Ecological Filter Dam in Water Purification

LI Shijie<sup>1,2</sup>, YU Kai<sup>1,2</sup>, WU Jingxiu<sup>1,2</sup>, DING Rui<sup>1,2</sup>, FAN Ziwu<sup>1,2,\*</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of Taihu Basin Water Resources Management of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract** [Objective] In response to issues such as low water clarity and poor water quality in certain urban water bodies, as well as the current lack of eco-friendly approaches in traditional water treatment technologies, this review aims to systematically analyze the multiple purification mechanisms of eco-filter dams. It explores the synergistic optimization of structural parameters and functional components to enhance the efficiency of in-situ water restoration and advance the innovation of ecological water management technologies, thereby offering theoretical underpinnings for these efforts. [Methods] Based on literature review and existing technology research, this paper synthesizes the physico-biological synergistic purification mechanisms of eco-filter dams, evaluates the uptake characteristics of pollutants by plants, outlines the principles of organic matter decomposition by substrate-attached microbial biofilms, and conducts a comparative assessment of purification efficiencies across different dam structures and substrate materials. [Results] Through multi-level collaborative purification involving physical interception, plant absorption, and microbial degradation, combined with optimized structure and composite matrix configuration, eco-filter dams significantly improve pollutant removal efficiency. They have been widely used in river treatment, agricultural irrigation, and wetland restoration, showing remarkable environmental benefits in enhancing water transparency, reducing nutrient salt concentration, and promoting ecological balance. [Conclusion] This paper summarizes existing ecological filter dam processes and suggests future research focus on developing new

[收稿日期] 2025-04-27

[基金项目] 创建鄂尔多斯国家可持续发展议程创新示范区项目(2022EEDSKJXM005);南京水利科学研究所研究生学位论文基金(Yy125009)

[作者简介] 李世杰(2000—),男,硕士研究生,研究方向为环境科学与工程,E-mail:2579861505@qq.com。

[通信作者] 范子武(1970—),教授,主要从事洪灾风险分析、城市水力学、河湖治理、水利信息化等研究工作,E-mail:zwfan@nhri.com。

matrix materials, improving filter-dam structures, and exploring plant combination, to provide references for better practical application of eco-filter dams and support water-body ecological restoration and sustainable environmental development.

**Keywords** ecological filter dam water purification matrix composition plant combination filter dam structure filter dam application

随着我国社会、经济和科技的迅猛发展,资源开发与利用的规模不断扩大,人民生活水平显著提升<sup>[1]</sup>。然而,人类频繁的生活和生产活动也带来了诸多环境问题。大量未经充分处理的有害废水直接排入江河湖海,这些废水中含有对人体健康和动植物生存有害的物质,导致水体受到严重污染<sup>[2]</sup>。目前,全国多数城镇和农村的河流水体污染形势严峻,水生态系统的健康与稳定受到严重破坏,其可持续发展的能力也受到极大阻碍。

在此背景下,生态滤坝作为一种结合人工湿地和快速渗滤原理的生态治污技术应运而生<sup>[3]</sup>。生态滤坝的概念最早可追溯至20世纪90年代,其设计理念源于自然河道的自净机制。早期的研究聚焦于利用碎石、卵石等天然材料构建简易过滤结构,通过物理截留作用降低悬浮物浓度。随着生态工程学的交叉融合,生态滤坝逐渐发展为集物理过滤、植物吸收与微生物降解于一体的复合系统<sup>[4]</sup>。生态滤坝通常由砾石、卵石、碎石等滤料基质填充而成,利用物理过滤、生物降解和植物吸收等多级净化机制,对水体中的污染物进行去除,并且成本低、维护简单、净化效率高,因此,其被广泛应用于河流、湖泊、城市河道以及污水处理厂尾水处理等领域。

作为一种新型生态原位水处理技术,目前国内

外学者对生态滤坝的研究主要包括净化原理、滤坝结构、基质组配与应用实践。本文主要从坝身物理过滤、坝上植物吸收和坝内微生物分解3个部分介绍生态滤坝的工作原理,阐述生态滤坝的结构设计及其优化,总结坝体基质的选择与组配对净化效果的影响。最后,总结生态滤坝在实际应用中的进展与效果。基于当前研究和实践的进展,未来可以通过优化结构设计,提高净化效率;创新基质材料,增强多元净化机制;协同植物与微生物作用提升生态滤坝自我修复能力为研究方向,进一步加强生态滤坝在水环境治理中发挥的作用,为实现水资源的可持续利用和生态环境改善提供有力保障。

### 1 生态滤坝净化原理

生态滤坝在不影响水体流动的前提下,主要利用坝体基质本身吸附性、水生植物根系吸收和基质附着生物膜降解3个方面共同净化水体(图1)。河道水体遇到生态滤坝截流时,在上游形成缓冲区,通过抬高水位的方式使流速下降,使得部分水体污染物在坝前沉淀,同时在坝身水力停留时间延长,提高生态滤坝自身物理吸附能力去除更多水体悬浮物,利用水生植物根系对水体氮、磷等营养盐进一步吸收,提升水体水质。坝身由于基质堆积,增加水体与颗粒接触面积,易形成生物膜,生物膜通过自身代谢过程又进一步降解吸收水体污染物。

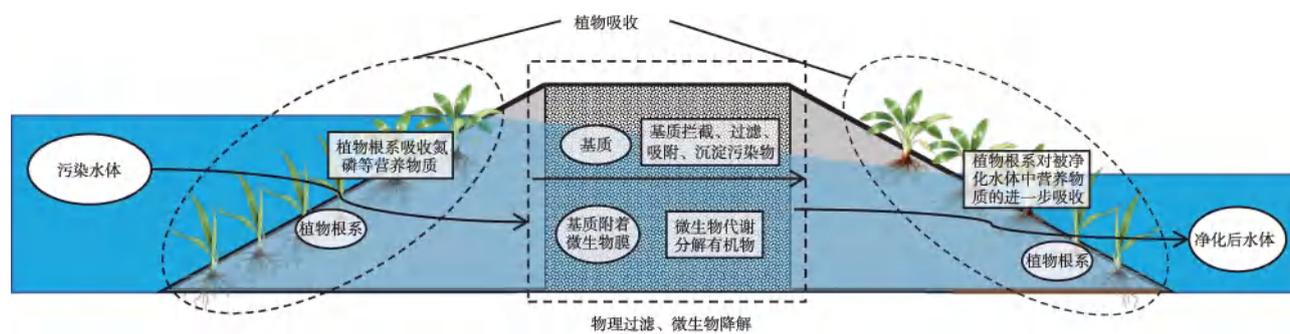


图1 生态滤坝原理

Fig. 1 Principle of Ecological Filter Dam

#### 1.1 物理过滤机制

生态滤坝的物理过滤主要依靠基质颗粒吸附性达到净化水质的效果。生态滤坝的存在抬高了上游

水位,使上下游出现流速差,有利于水流中颗粒状污染物的沉降<sup>[5]</sup>。坝体是由不同粒径基质组成,较大的悬浮物会预先被拦截,沉淀至上游底部,河道水体

通过渗流经过坝体时,较小的悬浮物将被粒径小的颗粒吸附<sup>[6]</sup>。不同基质类型对不同污染物吸附效果是不一样的,同时基质粒径大小也会影响吸附污染物的效果,较小粒径基质处理效果好,但是渗流流速随之也会下降,反之较大粒径基质过流流量大,但处理效果或许和预期有差异。

## 1.2 植物吸收特征

在生态滤坝坝体表面种植具有净水功能的水生植物,可有效提升生态滤坝的过滤效率。这些植物能直接从流经坝体的富营养化水体中摄取氮、磷等关键营养物质以支持其自身的生长和发育,从而加速氮、磷的去除<sup>[7]</sup>。部分根系发达的水生植物会延伸至坝体内部并扎根于基质中,通过根系直接吸收水中以氮、磷为主的营养物质<sup>[8]</sup>。这有助于降低这些营养物质在水体中的浓度,防止过度富营养化,从而净化水质<sup>[9]</sup>。同时,植物的根系也可以充当天然过滤器,过滤掉水中的悬浮颗粒、沉淀物,从而提高水体清澈度。须根发达、根毛丰富的植物通常吸收面积更大,效率更高。深根系有利于稳定坝体结构和吸收深层营养盐。随着水体透明度增加、营养盐浓度降低,下游水质得到了显著改善,这种改善不仅巩固了滤坝自身的净化效果,也为下游的水生植物生长创造出了更有利的条件。

水生植物的净化效果受到植物种类、组合方式及生长阶段的显著影响(表 1)。不同类型的水生植物对不同水体污染物表现出去除偏好和效率差异。陈伟江等<sup>[10]</sup>分析总结出不同水生植物对总氮、总磷的去除效果,结果表明,红鸢尾、水葫芦对水体中的总氮、总磷去除效果均较好,灯心草和香蒲则更擅长去除氮,而水菖苳对总磷的去除率最高,在静态试验条件下去除率可达到 93.6%。郑洁敏等<sup>[11]</sup>选取常见的 39 种观赏性挺水植物作为研究对象,判断各种植物对总氮和总磷的去除潜能,同时考虑植物的易

存活性等因素,发现泽苔和菖蒲更适合用作净化水体的植物。郭淑婷等<sup>[12]</sup>经研究发现,芦苇、黄花鸢尾和菖蒲等挺水植物对试验水体的氨氮去除率较高,可达 90%以上。同时,选取植物组合能进一步提升滤坝整体的净化效能,筛选出具有互补净化功能的植物,可以针对性强化对特定污染物的去除。杨帆等<sup>[13]</sup>选取东方蓼草、水葱、香蒲、菰、菖蒲、欧菱和荇菜进行对比试验,发现东方蓼草、香蒲和荇菜的组合对水体中总氮、氨氮和硝氮的去除效果最佳,而菖蒲、水葱和欧菱的组合对水体中的总磷去除效果最佳。

除物种差异外,植物的生长阶段也是影响其吸收能力的关键因素。秦腾等<sup>[14]</sup>的研究发现,菖蒲、凤眼莲、狐尾藻、苦草、睡莲和菹草等水生植物在生长初期(约第 10 d)时对总磷、总氮的吸收能力最强,随后随时间的推移吸收能力逐渐减弱。这表明选择处于快速生长期的植物或适时种植新植物,有利于维持滤坝植物高效去除污染物的能力。

光照、覆盖率等环境条件也影响水生植物的去除效率。倪蒙等<sup>[15]</sup>设计了一项关于轮叶黑藻、空心菜、鸢尾、香蒲等水生植物在不同浮床覆盖率条件下对水体中污染物浓度变化影响的试验。试验结果显示:不同的水生植物对水体的净化效果存在显著差异,对比之下空心菜对水体净化效果最好,且浮床覆盖率越高,其对总氮、总磷的去除率最高。曹欠欠等<sup>[16]</sup>设计了一项关于轮叶黑藻、苦草、金鱼藻和狐尾藻 4 种植物在自然光照和避光条件下对水体中溶解氧与污染物浓度变化影响的试验,试验结果显示:沉水植物在复氧方面表现出显著效果,在自然光照下,轮叶黑藻、苦草、金鱼藻和狐尾藻对氨氮均显示出良好的污染物去除能力。然而,对于化学需氧量的去除效果则不太明显,甚至在试验后期,水体中的化学需氧量浓度出现了上升的趋势。

表 1 不同水生植物类型净化水体机制及效果

Tab. 1 Mechanism and Efficacy of Water Purification by Different Types of Aquatic Plants

植物分类	代表植物	机制与作用	净化效果
挺水植物	芦苇、菖蒲、香蒲、泽苔、黄花鸢尾	根系深入基质,吸收底泥释放的污染物;茎叶拦截悬浮物	对氨氮去除率高,有效吸收底泥污染物,提升水体透明度
沉水植物	狐尾藻、苦草、轮叶黑藻、金鱼藻	全株接触水体,促进复氧;根系吸附营养盐,抑制藻类	自然光照下对氨氮去除效果显著;提升溶解氧,但对化学需氧量去除效果不稳定
漂浮植物	水菖苳	直接吸收水中营养盐	对总磷去除率高(水菖苳可达 93.6%);高覆盖率下对总氮、总磷去除效果显著

不同学者在进行研究时,往往基于目标水体污染物种类、植物适用性等因素导致对植物组合的选择存在较大差别,因此,试验结果存在差异性。在生态滤坝设计前对于水生植物的选择需要考虑以下几点:(1)滤坝植物主要是根系去除水体污染物,因此,选择根系发达易存活的植物;(2)选择适应当地气候条件的植物;(3)根据污染物处理类型,选择相应净化效果好的植物;(4)综合考虑植物的生长周期和对环境变化的适应性,优先选择那些能够在多变环境条件下稳定发挥净化作用的植物种类;(5)植物选配需结合本地物种耐污能力与需求开展组合试验,以优化净化效能。

### 1.3 微生物降解路径

生态滤坝内微生物对污染物的分解作用,对净化水质也起着十分显著的作用。生态滤坝基质堆积,增加了水体与这些颗粒的接触,因此,水体微生物在坝体渗透时,更容易在基质表面和根系上形成具有净化作用的生物膜<sup>[17]</sup>。微生物是水中有机物的主要降解者之一,它们通过代谢过程将有机废物分解成较简单的化合物,降低水体中有机物的浓度<sup>[18]</sup>。这有助于改善水质,减轻水体中的污染负担。在进行水体原位修复时,微生物技术的应用主要涵盖3种方法:接种微生物技术、富集培养土著微生物技术以及固定化微生物技术。通过这些微生物技术的应用,可以有效地提升水质,促进水生态系统的健康恢复<sup>[19]</sup>。与此同时,微生物表面的胞体、胞外多糖等可以吸附一些悬浮颗粒、细菌和其他微生物,形成团块或胶体,从而使其沉降。这有助于净化水体,去除悬浮颗粒和微生物。坝体内的氧气一部分来自水体自身溶解氧,另一部分来自坝上水生植物根毛的释放,导致坝体氧分的分配不均,会自然形成富氧区、贫氧区和缺氧区,使得坝体内微生物多样性大大增加,更有利于水体污染物的去除<sup>[20]</sup>。低流速状况下更有利于生物膜的积累,当流速过大时,生物膜易从基质上剥离,生态滤坝的存在使水体经过基质的流速大大减少,营造了微生物生长的条件<sup>[21]</sup>。

周石磊等<sup>[22]</sup>经过筛选,选择了23株贫营养好氧反硝化细菌,并且组合得到了高效好氧反硝化功能菌群,通过与对照组比较,发现菌群对总氮和氨氮的去除率达到51.32%和43.57%,去除效率优于对照组。刘树彬等<sup>[23]</sup>在培养基上选择合适的枯草芽

孢杆菌,以研究该菌群对模拟废水的净化效果,在氨氮降解筛选培养基试验中,枯草芽孢杆菌展现出了优异的氨氮降解能力,在试验的第4 d对氨氮的去除率最高,达到了57.58%。进一步模拟废水净化试验表明,枯草芽孢杆菌在不同密度下均能有效降低模拟废水中的化学需氧量和pH。周跃龙等<sup>[24]</sup>针对南昌市主要河流的水质问题,对比选择了去除污染物效率高的菌群,通过分析试验数据可以得出,硝化细菌对亚硝酸盐氮的去除效率尤为突出,最高可达100%,而硝化细菌对氨氮的去除率也达到了82.75%;聚磷菌对总磷的去除效果同样显著,降解率为58.57%;当3种优势菌株以1:1:1的质量比混合时,混合菌株对氨氮和总磷的降解效率分别达到了85%和22.86%。

## 2 生态滤坝结构优化与设计参数

生态滤坝设计时,要考虑到生态滤坝的结构。生态滤坝的概念最初由田猛等<sup>[25]</sup>提出,坝体采用梯形结构,由不同粒径碎石按一定比例人工垒筑而成,用于控制农村面源,通过试验验证了该技术对水体有一定净化效果且具有取材方便、施工简单等优点。然而,早期的堆石形式滤坝存在明显的局限性,其采用的单一粒径碎石或级配简单的堆积方式,导致坝体内部孔隙分布不均、过滤精度低,难以有效截留细小污染物。同时,简易结构长期受水流冲击,存在结构失稳和渗漏等风险。因此,在后续的坝体设计中可以通过改变坝体结构、优化基质级配等手段进一步提升生态滤坝的稳定性、功能性。

### 2.1 坝体结构优化

早期生态滤坝都是在工程的层面,杨静等<sup>[26]</sup>以工程角度,从总体布置到坝基处理、坝体设计介绍了生态滤坝工程搭建的过程,生态滤坝以砂卵石为基质,工程实施前后水的表观指标有所改善,可达到景观用水需要。随着对生态滤坝深入研究,对早期堆石形式生态滤坝进行改进优化,在原有基础上将坝体分为支撑部分、过滤部分、反滤部分,形成分段式生态滤坝<sup>[27]</sup>。分段式生态滤坝中支撑部分采用大颗粒堆石体,增强生态滤坝的稳定性,主要净水作用区为最中间的过滤体,采用小颗粒当地天然砂石,支撑部分与过滤部分之间由于颗粒粒径差异大可能会渗漏破坏,增设了反滤部分。

生态滤坝结构参数数值大小是否会影响对水体

净化效果,国内学者对此展开相关试验研究,张文生等<sup>[28]</sup>研究,生态滤坝在3组不同坡度(20°、25°、30°)下对水体污染物的去除效果,发现在生态滤坝坡度为20°,循环过滤到试验结束时,生态滤坝对化学需氧量、氨氮、总磷和总氮的削减效率均最高。刘露等<sup>[29]</sup>以沸石与砾石作为基质材料,设置滤坝基质厚度分别为20、30、50 cm的3组试验方案,通过分析滤料本身物理吸附及表面附着生物膜代谢作用,探究基质厚度对生态滤坝去除水体污染物效果,结果表明,基质厚度越大,吸附能力越大,生物膜附着效率越高,水体净化效果越好。赵双双<sup>[30]</sup>研究一种半透水坝技术,同时具有挡水和净水的功能,该生态滤坝主要存在2个部分:挡水坝与半透水槽。挡水坝污染物拦截在前置库中通过生物降解和植物吸收,半透水槽在挡水坝前置库一侧,待雨水中污染物在前置库被充分吸收后,通过半透水槽渗透到主库。

## 2.2 基质材料选择与级配优化

基质是构建生态滤坝的核心材料,也是污染物去除的关键区域。它不仅为水体中的微生物提供附着场所,还能通过拦截、过滤、吸附和沉淀等多种途径净化污染物<sup>[31]</sup>。早期生态滤坝大多以碎石、砾石作为生态滤坝的基质,但净化效果有限,对一些污染物甚至起不到净化效果,随之相关学者对其他滤料过滤污染物质的能力进行了试验研究。王志勇等<sup>[32]</sup>选择均质石英砂作为滤池过滤基质,降浊效果非常明显。Li等<sup>[33]</sup>在净水效果试验研究中也同样表明,沸石对氨氮的去除效果好。杨大杰等<sup>[34]</sup>选取了砾石、沸石和生物炭3种基质,研究不同基质对氮、磷的去除效果,结果表明在3种基质对不同的污染物去除效果不同,选取不同的基质组合可以提升对污染物的去除效率。戴斌等<sup>[35]</sup>选择将生物滤料及天然沸石等作为坝体基质,从而实现河道中氨氮有机物的高效降解,陈玲等<sup>[36]</sup>和Srinivasan等<sup>[37]</sup>研究果壳过滤性能,通过试验表明果壳对油脂及悬浮物含量削减效果好。

各种滤料对不同污染物质去除效果差异性较大,针对某种特定污染物可以选择对该污染物有良好去除效果的滤料,多种滤料组合净水可以达到更好的效果。目前,围绕生态滤坝基质组配水体净化效果影响已开展了相关研究。于鲁冀等<sup>[38]</sup>采用砾石和沸石构建生态滤坝,研究不同基质组配方式下滤坝对水体污染物的去除效果,试验结果表明基

质混合方式更利于去除水体污染物。张紫涵等<sup>[39]</sup>选取火山石和炉渣2种滤料,在滤料分开设置(前后顺序不同)和滤料均匀混合3种基质排布方式下进行滤坝对微污染水体净化效果试验,发现3种排布方式均有明显的净化效果,其中均匀混合配置方式更有利于总磷的去除,炉渣在前、火山石在后分开设置排布方式有利于总氮的去除,但对于化学需氧量和氨氮,3种基质排布方式去除效果相近。沈志伟等<sup>[40]</sup>选取砾石、沸石、陶粒、蛭石4种滤料并将其两两配对,进行不同基质组配和填充方式对生态滤坝净化效果影响试验,试验表明:化学需氧量去除效果最好的组配方式为砾石+陶粒,而砾石+沸石组配方式去除氨氮和总磷效果最好,在填充方式方面,砾石和沸石均匀混合填充利于化学需氧量的去除,沿水流方向先砾石后沸石填充方式利于氨氮和总磷的去除。朱柏林<sup>[41]</sup>通过静态试验研究,发现选取沸石和铝基锁磷剂作为混合基质对氮、磷的去除效果最佳,去除率可达98.02%、100%。Yuan等<sup>[42]</sup>采用石灰岩、石灰岩+砾石、石灰岩+煤矸石作为生态滤坝基质进行净水试验,发现组合滤料去除水体污染物效果优于单种滤料,其中石灰岩+砾石滤料组合更有利于悬浮物的去除,石灰岩+煤矸石滤料组合更有利于总氮、总磷的去除。

关于生态滤坝基质的选择,目前的研究大多聚焦在沸石、砾石、炉渣等典型的基质材料(表2)中,如何应用新型基质材料,突破传统基质的性能瓶颈,开发低成本、高吸附能力的新材料,增强对目标污染物的定向去除能力。针对不同水体的污染程度,设计多种基质协同作用从而提高生态滤坝净化水体污染物的效率,该领域研究可结合材料、环境、生态等多学科理论,为净化水环境提供更具经济性和适应性的解决方案。

生态滤坝近年来发展迅速,从最初的简单梯形结构坝体发展到现在的分段式坝体。早期的堆石形式生态滤坝在结构稳定性和净水效果上存在不足,随着研究的深入及实际工程的发展应用,出现了分段式生态滤坝、生态滤坝与其他工程结合等多种形式,增强了坝体的稳定性和净水效果。同时,生态滤坝的结构参数,如坡度和基质厚度,对水体净化效果有显著影响,适当的坡度和基质厚度可以显著提高生态滤坝对化学需氧量、氨氮、总磷和总氮的削减效率。虽然生态滤坝的结构较最初的形式有较大改

表2 生态滤坝常用滤料及其特征  
Tab. 2 Ecological Filter Dams and the Characteristics of Common Filter Media

滤料种类	优点	缺点	对污染物净化效果
石英砂 <sup>[43]</sup>	化学稳定性高、耐磨性好、颗粒均匀、耐高温、承压能力强、可重复使用	质量大增加操作难度;需定期清洗或更换;对高污染水体需搭配其他滤料	有效去除悬浮物、泥沙,提高水体透明度;对高纯度水处理效果有限
无烟煤 <sup>[44]</sup>	物理强度高、比表面积大、亲水性强、化学稳定性好、抗生物附着、易反冲洗再生、低泥量	不适用于极端酸碱环境;可能释放初始颜色;成本较高	可除铁、重金属及溶解性有机物;适用于多层滤料配合使用
活性炭 <sup>[45]</sup>	比表面积大、吸附能力强(异味、颜色、有机溶剂、农药等)、可高温再生	对极性有机物和无机物吸附效果差;易饱和需更换;成本高;可能产生微小颗粒	对溶解性有机物吸附效果显著;对无机盐类几乎无效
沸石 <sup>[46]</sup>	多孔结构吸附性能强、离子交换能力(重金属去除)、化学及热稳定性高、环保	成本较高;颗粒易磨损;水质条件影响效果	可去除溶解性物质、颗粒物及气体;对铅、铜、锰等重金属离子有效
碎石 <sup>[47]</sup>	透水性好、机械过滤效果强(悬浮颗粒、泥沙)、耐腐蚀、成本低、维护简单、适用大流量、稳定性好	颗粒大导致过滤精度低;需较高滤层;吸附能力弱;对溶解性有机物/细菌效果差	适用于大颗粒杂质去除;需配合其他滤料使用
果壳 <sup>[48]</sup>	天然可再生、环保;促进生物膜形成;吸附有机物/重金属;成本低	颗粒不均匀;吸附容量有限;可能释放天然物质影响水质	适用于油水分离及简单水质处理;对有机物和重金属有部分吸附效果
锰砂 <sup>[49]</sup>	高效去除铁/锰;吸附溶解性有机物及重金属;还原氧化态铁锰;操作简单	反冲洗水量大且周期短;成本较高;可能释放锰离子影响水质;效果易受水质波动影响	专用于铁锰污染水体;对氧化态铁锰还原沉淀效果显著

变,但在实际应用中仍需进一步优化,以提高滤坝对污染物的去除效率及长期稳定的净水效果。除了净水功能外,生态滤坝还可以作为生态系统的组成部分,提供生物栖息地和促进生物多样性,如何在设计和运行中更好地发挥这些生态功能,是未来可以关注的问题。

### 3 生态滤坝应用场景适配性分析

生态滤坝凭借其物理截留、植物吸收与微生物降解的协同机制,以及结构灵活、成本相对较低、生态友好等优势,已从理论研究和实验室探索走向广泛的实际工程应用环节。目前,生态滤坝在实际中的应用已经取得了一定进展,其技术优势得以在不同应用场景中因地制宜地发挥实效。

#### 3.1 城市黑臭水体治理

梁灿钦<sup>[50]</sup>研究了一种结合水生植物和微生物降解功能的生态滤坝,并以城市湖汊涵洞口流出黑臭水体作为试验对象,在沿涵洞流水方向布设4道生态滤坝,研究生态滤坝对污染物的去除效果,污染水体经4道生态滤坝,在综合滤料、微生物和水生植物的吸附及生物作用净化作用下,生态滤坝对水体中的污染物有着非常明显的去除效果,其中氨氮削减率最高可达90%,此外,因水生植物向水中泌氧,又提升了水体溶解氧浓度。于鲁冀等<sup>[38]</sup>将铁碳电解技术融入生态滤坝,通过试验研究表明,添加铁碳

可以增加生态滤坝对水体污染物的去除能力。王兴召等<sup>[51]</sup>在溢流口利用生态滤坝装置对污水进行原位处理,结果表明经过生态滤坝对污染水体的净化后,试验点污水中总磷、总氮的去除率达到了65%以上,悬浮物和化学需氧量的去除率均达到80%以上,此试验表明生态滤坝可以有效去除污染水体中的污染物。喻凯等<sup>[52]</sup>以上海市蟠龙港为试验水源,通过水槽试验研究不同基质厚度对水体浑浊度的削减效果,发现基质厚度在60 cm时浑浊度削减度可达60%。宋德生等<sup>[53]</sup>以二级生化尾水作为试验对象,探究生态滤坝+生态河床集成系统对水体水质净化效果,结果表明:生态河床植物净化+生态滤坝净水基质的工艺组合对水质指标去除率一般,但在去除总量具有一定优势。

#### 3.2 农业面源污染控制

张迎颖等<sup>[54]</sup>将滤坝应用在农田中进行生态化改造,通过设置“湿生植物+1座生物填料箱+1座生态滤坝处理、湿生植物+2座生物填料箱+2座生态滤坝处理、湿生植物+3座生物填料箱+3座生态滤坝处理”3组装置进行对比试验,结果发现:第3组装置对总磷、总氮的去除效率最高且将污染物浓度降低至V类水标准时所需要的沟渠长度最短。李敏等<sup>[55]</sup>在不同降雨条件下,研究不同处理措施的滤坝对农业面源污染的净化效果,试验结果表明在降雨强度为低流量时,滤坝的净化效果最佳。

## 4 结论与展望

生态滤坝作为一种创新的生态原位修复技术,已在多个地区的水质净化实践中显示出其独特的优势。根据生态滤坝不同的基质组配、结构,通过物理截留、植物吸收与微生物降解的多级协同机制,在提升水体清澈度与改善水质方面展现出了显著优势,对改善水体污染状况具有重要意义。本文系统地分析了生态滤坝的技术原理与应用进展,得出以下结论与展望。

(1)生态滤坝主要通过坝身过滤作用、坝上植物吸收、微生物分解作用对水体进行净化。物理过滤依靠基质颗粒的吸附性,植物吸收通过水生植物根系摄取氮、磷等营养物质,微生物分解则通过生物膜降解有机物。不同植物和微生物对污染物的去除效果存在差异,且植物在不同生长阶段和组合方式下对污染物的吸收能力也有所不同。

(2)生态滤坝的结构设计对其净化效果至关重要。早期的堆石形式已逐渐发展为分段式结构,通常包含支撑部分、过滤部分和反滤部分。结构参数(如坡度、基质厚度等)也会影响净化效果,而合理的结构设计能显著提高污染物的去除效率。在后续的试验应用中,可以探索不同的坝体结构形式,开发模块化组装等新型结构,以适应多变的地形与不同需求,从而充分发挥生态滤坝的价值。

(3)基质是生态滤坝的核心材料,通过拦截、过滤、吸附和沉淀等途径净化污染物。不同基质对污染物的去除效果存在差异,组合使用多种基质可以达到更好的净化效果。研究表明,基质混合方式更有利于水体污染物的去除,且不同的基质组配和填充方式对净化效果有显著影响。在未来的研究中,不仅需要尝试探索不同的基质组合通过协同效应进一步提升其过滤效率,还需聚焦于新型材料的研发。包括开发具有特定目标污染物去除能力的改性材料,例如:陶粒负载铁氧化物以增强除磷能力;设计性能更加优越的复合材料,如以生物炭为基底、具有高比表面积和丰富官能团的复合材料,从而提高有机物吸附容量等,进一步提升滤坝的整体净化效率。

(4)生态滤坝目前在生活中应用广泛。不仅可以用来净化河道中的污染物,提升水质,改善环境,还可以应用在农业方面,净化灌溉水源,保障农作物

健康生长。此外,生态滤坝在水产养殖、中小河流治理以及湿地公园等领域,生态滤坝也发挥着重要的作用,为动植物提供适宜的生存环境,促进生态平衡。

## 参考文献

- [1] 张楚汉,王光谦. 关于黄河流域生态保护和高质量发展的思考[J]. 人民黄河, 2024, 46(9): 1-7.  
ZHANG C H, WANG G Q. Thoughts on ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2024, 46(9): 1-7.
- [2] 程思雯,王鹏飞,周启星. 基于碳中和的微污染复杂水体治理与修复[J]. 科学通报, 2024, 69(19): 2789-2803.  
CHENG S W, WANG P F, ZHOU Q X. Treatment and remediation of micro-polluted complex water based on carbon neutrality [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(19): 2789-2803.
- [3] 许继军,景唤. 河流生态修复理念与技术研究进展[J]. 农业现代化研究, 2022(4): 691-701.  
XU J J, JING H. Research progress of river ecological restoration concept and technology [J]. Research of Agricultural Modernization, 2022(4): 691-701.
- [4] 徐静. 盐城盐龙湖人工构造湿地水质净化研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.  
XU J. The water purification research of Yanlonghu constructed wetland in Yancheng [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [5] 宋德生. 原位生态净化集成系统对微污染河水净化效果研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.  
SONG D S. Study on the purification effect of in-situ integrated ecological purification technology for micro-polluted river water [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [6] 刘峥. 组合式生态透水坝设计论证与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.  
LIU Z. Design demonstration and experimental study of composite structure ecological permeable dam [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [7] 聂司宇,孟昊,李婷婷,等. 水生植物对富营养化水体中氮磷去除的研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(4): 47-51.  
NIE S Y, MENG H, LI T T, et al. Research progress on nitrogen and phosphorus removal from eutrophicated water by aquatic plants [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2020, 40(4): 47-51.
- [8] SUFIAN J, GOLCHIN A, AVANES A, et al. The effect of three types of aquatic plants on water purification and removal of cadmium under different salinity conditions in northwestern Iran [J]. Aqua: Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2022, 71(2): 301-311.

- [ 9 ] WANG S R. The distribution pattern and ecological restoration technology of aquatic plants in a eutrophic water landscape belt [J]. *Water Supply*, 2022, 22(1): 860-873.
- [ 10 ] 陈伟江, 廖月清, 王苗苗, 等. 水体富营养化修复技术研究进展[J]. *应用化工*, 2022(2): 531-537.  
CHEN W J, LIAO Y Q, WANG M M, et al. Research progress on ecological restoration of water eutrophication [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022(2): 531-537.
- [ 11 ] 郑洁敏, 牛天新, 陈煜初, 等. 三十九种观赏挺水植物应用于人工浮岛水质净化潜力的比较[J]. *北方园艺*, 2013(6): 72-76.  
ZHENG J M, NIU T X, CHEN Y C, et al. Comparison of the potential water purification by 39 usually used ornamental emerged plants in the artificial floating island [J]. *Northern Horticulture*, 2013(6): 72-76.
- [ 12 ] 邹淑婷, 周之栋, 华建峰, 等. 浮水植物-底泥-微生物系统对富营养化水体氮的净化作用[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(10): 1341-1351.  
WU S T, ZHOU Z D, HUA J F, et al. Study on the N purification of eutrophic water by floating plant-sediment-microbial system[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(10): 1341-1351.
- [ 13 ] 杨帆, 刘赢男, 焉志远, 等. 不同水生植物组合对污染水体净化能力比较[J]. *国土与自然资源研究*, 2025(2): 91-93.  
YANG F, LIU Y N, YAN Z Y, et al. Compare the water purification ability of different plant combinations [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2025(2): 91-93.
- [ 14 ] 秦腾, 骆辉, 陈厉旻, 等. 水生植物对微污染水体生态修复的研究综述[J]. *应用化工*, 2024(2): 398-402.  
QIN T, LUO H, CHEN L M, et al. Research on ecological of micropolluted water by aquatic plants [J]. *Applied Chemical Industry*, 2024(2): 398-402.
- [ 15 ] 倪蒙, 储忝江, 刘梅, 等. 水生植物种类及覆盖率水质净化效果研究[J]. *水产科学*, 2023, 42(6): 1063-1071.  
NI M, CHU T J, LIU M, et al. Effects of different aquatic macrophytes and coverages on purification of aquaculture wastewater[J]. *Fisheries Science*, 2023, 42(6): 1063-1071.
- [ 16 ] 曹欠欠, 于鲁冀, 吕翠美, 等. 四种沉水植物对城市污染水体的净化效果研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(5): 76-80.  
CAO Q Q, YU L J, LÜ C M, et al. Research of effects on the contents of dissolved oxygen and water quality by four submerged plants in urban polluted water[J]. *Yellow River*, 2017, 39(5): 76-80.
- [ 17 ] PETERSON S B, TEAL J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems [J]. *Ecological Engineering*, 1996, 6(1/2/3): 137-148.
- [ 18 ] SINGH G, SINGH A, SINGH P, et al. The fate of organic pollutants and their microbial degradation in water bodies [M]// *Pollutants and Water Management: Resources, Strategies and Scarcity*, 2021.
- [ 19 ] 刘敏, 左倬, 王嘉伟. 生态修复技术在上海市黑臭水体治理工程中的应用进展[J]. *净水技术*, 2021, 40(12): 97-106.  
LIU M, ZUO Z, WANG J W. Application progress of ecological restoration technology for remediation project of blank and odorous water body in Shanghai City[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(12): 97-106.
- [ 20 ] 宗绪成, 李广. 微生物原位净化城市河道黑臭水体应用研究[J]. *水资源开发与管理*, 2019, 5(1): 53-57.  
ZONG X C, LI G. Study on the application of microorganism in situ purification in black and smelly water in urban river [J]. *Water Resources Development and Management*, 2019, 5(1): 53-57.
- [ 21 ] LAU Y L. Modelling the consumption of dissolved contaminants by biofilm periphyton in open-channel flow [J]. *Water Research*, 1990, 24(10): 1269-1274.
- [ 22 ] 周石磊, 黄廷林, 张海涵, 等. 贫营养好氧反硝化菌群的筛选及源水脱氮特性[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(6): 2955-2961.  
ZHOU S L, HUANG T L, ZHANG H H, et al. Isolation of oligotrophic aerobic denitrifiers and its characteristics of nitrogen removal in source water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(6): 2955-2961.
- [ 23 ] 刘树彬, 王新锐, 林壮其, 等. 枯草芽孢杆菌 HAINUP40 水质净化作用的研究[J]. *水产科学*, 2018(2): 159-166.  
LIU S B, WANG X R, LIN Z Q, et al. Purification of aquaculture effluent by *Bacillus subtilis* HAINUP40 [J]. *Fisheries Science*, 2018(2): 159-166.
- [ 24 ] 周跃龙, 胡美丹, 汪新强, 等. 固定化硝化细菌与聚磷菌对南昌市内河流水污染物降解的研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 75-78.  
ZHOU Y L, HU M D, WANG X Q, et al. Research on degradation of the river pollutants in Nanchang City based on immobilized nitrifying bacteria and phosphate accumulating organisms [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 75-78.
- [ 25 ] 田猛, 张永春. 用于控制太湖流域农村面源污染的透水坝技术试验研究[J]. *环境科学学报*, 2006(10): 1665-1670.  
TIAN M, ZHANG Y C. Experimental study on permeable dam technique to control rural non-point pollution in Taihu basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006(10): 1665-1670.
- [ 26 ] 杨静, 王萌, 王黎明. 生态滤水坝在改善河道水环境中的应用[J]. *水利科技与经济*, 2010, 16(10): 1199-1200.  
YANG J, WANG M, WANG L M. Application of ecological filter dam in improving river water environment [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(10): 1199-1200.
- [ 27 ] 张安庆. 田间排水沟滤水截污水力翻板闸坝设计研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.

- ZHANG A Q. Research on the hydraulic flap gate and filter dam in the field ditch for controlling water pollution[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [28] 张文生, 于鲁冀, 吕晓燕, 等. 生态滤坝坡度对水体污染物去除效率的影响[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 30-34.  
ZHANG W S, YU L J, LÜ X Y, et al. Effects of ecological filter dams' gradient on removal efficiency of water pollutants[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 30-34.
- [29] 刘露, 于鲁冀, 李廷梅, 等. 基质厚度对生态滤坝净化水体效果及机理的研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 13-17.  
LIU L, YU L J, LI T M, et al. Effect and mechanism of substrate thickness on water purification of ecological filter dam[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 13-17.
- [30] 赵双双. 前置库及半透水坝的结构设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
ZHAO S S. Study on structural design of semi-permeable dam and pre-reservoir[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [31] 李阳阳. 复合悬浮生态岛和生态滤坝对微污染河水(清溪河)净化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.  
LI Y Y. Research on micro-polluted water of Qingxi River purification by compound ecological floating island and ecological filter dam[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [32] 王志勇, 杜伊明, 周娟, 等. 均质滤料级配恢复在净水厂的应用[J]. 供水技术, 2022, 16(6): 39-43.  
WANG Z Y, DU Y M, ZHOU J, et al. Application of homogeneous filter media gradation restoration in waterworks[J]. Water Technology, 2022, 16(6): 39-43.
- [33] LI M Y, ZHU X Q, ZHU F H. Application of modified zeolite for ammonium removal from drinking water[J]. Desalination, 2011 (1/2/3): 295 - 300. DOI: 10.1016/j. desal. 2010. 12. 047.
- [34] 杨大杰, 刘翔, 李炳华, 等. 不同基质人工湿地去除尾水中环丙沙星性能研究[J]. 人民长江, 2023, 54(12): 58-64.  
YANG D J, LIU X, LI B H, et al. Remove of ciprofloxacin from tail water by constructed wetlands with different substrates[J]. Yangtze River, 2023, 54(12): 58-64.
- [35] 戴斌, 王继军, 陈志冰, 等. 一种应用于河道污水治理中的生物坝: 201820538543.2 [P]. 2018-04-13.  
DAI B, WANG J J, CHEN Z B, et al. A biological dam applied in river sewage treatment; 201820538543.2 [P]. 2018-04-13.
- [36] 陈玲, 孙浩, 缪福俊, 等. 澳洲坚果壳滤料的制备与过滤性能的研究[J]. 吉林农业, 2011(5): 134-135, 137.  
CHEN L, SUN H, MIU F J, et al. Preparation and filtration performance of macadamia shell filter media[J]. Agriculture of Jilin, 2011(5): 134-135, 137.
- [37] SRINIVASAN A, VIRARAGHAVAN T. Removal of oil by walnut shell media[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17): 8217-8220.
- [38] 于鲁冀, 吕晓燕, 李阳阳, 等. 生态滤坝处理微污染河水实验研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(5): 88-92.  
YU L J, LÜ X Y, LI Y Y, et al. Experimental study of micro-polluted river treatment by ecological filter dam[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(5): 88-92.
- [39] 张紫涵, 代嫣然, 梁威. 滤坝基质排布方式对微污染水体净化效果的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(12): 3916-3923.  
ZHANG Z H, DAI Y R, LIANG W. Effect of the packing arrangement of filter dam on the purification of slightly-polluted water body[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(12): 3916-3923.
- [40] 沈志伟, 张晓雷, 余亮, 等. 基质组配、填充方式及水力负荷对生态滤坝净化效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 37-43.  
SHEN Z W, ZHANG X L, YU L, et al. Effects of substrate combination, packing arrangement and hydraulic loading on the purification performance of ecological filter dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 37-43.
- [41] 朱柏林. 活性滤坝对城市内河中氮磷的削减效果及机理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2021.  
ZHU B L. Effect and mechanism study on reduction of active filter dam on nitrogen and phosphorus in urban inner river[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2021.
- [42] YUAN X C, QIAN X. Notice of retraction: Experimental study on intercepting rainfall runoff with a permeable dam [C]. Wuhan: 2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2011.
- [43] 车飞翔, 樊婷婷, 薛波, 等. 石英砂陶粒组合支撑剂导流能力影响因素[J]. 断块油气田, 2022, 29(1): 134-138.  
CHE F X, FAN T T, XUE B, et al. Influencing factors of flow conductivity of combined quartz sand-ceramsite proppant[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(1): 134-138.
- [44] 李冬, 杨昊, 李相昆, 等. 无烟煤滤料在生物除铁除锰水厂中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(5): 818-821.  
LI D, YANG H, LI X K, et al. The application of anthracite in water plant for biological removal of iron and manganese[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2007, 23(5): 818-821.
- [45] 罗海斌. 活性炭对污水净化的性能研究[J]. 炭素, 2023(3): 19-22.  
LUO H B. Study on the performance of activated carbon for wastewater purification[J]. Carbon, 2023(3): 19-22.

(下转第93页)

XIE Z Z, LIU G. Road map for constructing carbon neutral wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering,

2023, 41(9): 181-186.

(上接第 30 页)

[46] 贺君, 张腾达, 裴宪, 等. 一种新型曝气生物滤池填料的研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(3): 14-16.

HE J, ZHANG T D, PEI X, et al. Study on a new biological aerated filter filler[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(3): 14-16.

[47] 蔡云龙, 臧维玲, 姚庆祯, 等. 四种滤料去除氨氮的效果[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(2): 138-142.

CAI Y L, ZANG W L, YAO Q Z, et al. Effects of removing ammonia with four filters [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(2): 138-142.

[48] 常青, 吕名云. 含油废水接触过滤处理中滤料性能的研究[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(3): 52-54.

CHANG Q, LÜ M Y. Study on properties of filter media in oil-laden sewage treatment by contact flocculation [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(3): 52-54.

[49] 李丛宇, 方月英, 薛璐璐, 等. 锰砂滤料负载纳米零价铁去除水与废水中 Sb(V) 的试验[J]. 净水技术, 2020, 39(3): 64-70.

LI C Y, FANG Y Y, XUE L L, et al. Experiment of Sb (V) removal from water and wastewater by manganese sand filter loaded with nano-zero-valent iron [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(3): 64-70.

[50] 梁灿钦. 生态过滤坝修复污染水体的研究[J]. 广东化工, 2022, 49(22): 155-158.

LIANG C Q. Study on remediation of polluted waters by ecological filter dam [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(22): 155-158.

[51] 王兴召, 吴佩, 张祥菊, 等. 基于生态过滤技术的某溢流口水污染治理的研究[J]. 环境科学导刊, 2024, 43(4): 44-49.

WANG X Z, WU P, ZHANG X J, et al. Research on water pollution control of the overflow outlet based on ecological filtration technology [J]. Environmental Science Survey, 2024, 43(4): 44-49.

[52] 喻凯, 丁瑞, 陈宇, 等. 生态滤坝对水体浊度的净化效果研究[J]. 水利规划与设计, 2025(8): 67-70.

YU K, DING R, CHEN Y, et al. Research on the purification effect of ecological filter dam on water turbidity [J]. Water Resources Planning and Design, 2025(8): 67-70.

[53] 宋德生, 于鲁冀, 曾科, 等. 原位生态净化集成系统对二级生化尾水的处理效果[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 1-5.

SONG D S, YU L J, ZENG K, et al. Treatment effect on in-situ ecological purification integrated system on the secondary biochemical tail water [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12): 1-5.

[54] 张迎颖, 李敏, 潘吴意, 等. 生态沟渠对农田退水污染物的净化效能及其配置规模[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1): 105-116.

ZHANG Y Y, LI M, PAN W Y, et al. Purification efficiency of pollutants in farmland runoff by the ecological ditch and its configuration scale [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(1): 105-116.

[55] 李敏, 张迎颖, 王岩, 等. 不同强化处理措施生态沟渠的净化效果对比分析[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 526-536.

LI M, ZHANG Y Y, WANG Y, et al. Comparative analysis of purification effect of ecological ditches with different enhanced treatment measures [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2025, 41(3): 526-536.