



移动扫码阅读

陆敏博,侯中科,沈昊,等.城镇污水处理厂尾水湿地运行效能研究进展[J].能源环境保护,2022,36(3):1-7.
LU Minbo, HOU Zhongke, SHEN Hao, et al. Review on operational efficiency of constructed wetland in treating tail water of municipal wastewater treatment plant[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(3): 1-7.

城镇污水处理厂尾水湿地运行效能研究进展

陆敏博¹, 侯中科², 沈昊¹, 马宇辉¹, 杨小丽², 宋海亮³

(1. 悉地(苏州)勘察设计院有限公司, 江苏 苏州 215123; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 3. 南京师范大学 环境学院, 江苏 南京 210023)

摘要:通过文献调研总结了国内外尾水湿地对常规污染物和新兴污染物的去除效果,重点讨论了湿地基质和植物对尾水湿地运行效果的影响。基于中国知网数据库,利用文献计量法分析了与湿地基质和湿地植物相关的文献。已有研究表明:尾水湿地不仅对 COD 等常规污染物具有良好的去除效果,也可有效去除抗生素等新型污染物;受尾水可利用碳源及溶解氧限制,总氮去除效果受限;尾水湿地运行效能受基质类型、基质组合方式、植物种类及温度等因素影响;现有研究由机理及效果逐渐转向深度处理及植物碳源,强化基质脱氮效果和植物资源化将成为研究热点。

关键词:城镇污水;尾水;人工湿地;去除效果;文献计量

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1006-8759(2022)03-0001-07

Review on operational efficiency of constructed wetland in treating tail water of municipal wastewater treatment plant

LU Minbo¹, HOU Zhongke², SHEN Hao¹, MA Yuhui¹, YANG Xiaoli², SONG Hailiang³

(1. CCDI (Suzhou) Exploration & Design Consultant Co., Ltd., Suzhou 215123, China;
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The removal of conventional pollutants and emerging contaminants by the tail water wetland were summarized by literature investigation, and the effects of wetland substrate and plants on the operation of the tail water wetland were discussed. Based on the CNKI database, the literatures related to wetland substrate and plants were analyzed by bibliometric method. The existing research results show that tail water wetlands not only have good removal effects on conventional pollutants such as COD, but also can effectively remove some emerging contaminants such as antibiotic. However, the removal effect of TN is limited by the available carbon source and dissolved oxygen in the tail water. The operation efficiency of tail water wetland is affected by the type and combination of substrate, plant species and temperature. The focus of existing research has gradually shifted from mechanism and treatment effect to advanced treatment and plant carbon source. Strengthening the denitrification effect of substrate and resource utilization of plants will become the research hotspots.

Key Words: Municipal wastewater; Tail water; Constructed wetlands; Removal effects; Bibliometric

0 引 言

根据住房和城乡建设部公布的《2020 年城乡

建设统计年鉴》,截至 2020 年全国共有城镇污水处理厂 2 618 座,污水处理率达 97.53%,绝大部分处理厂出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标

准》中一级 A 标准。对受纳水体而言,该标准中规定的氮磷浓度仍可能会造成水体富营养化。为了进一步减轻影响,落实国家“水十条”等相关政策要求,各地污水处理厂纷纷实行提标改造方案对出水进一步优化^[1]。由于增加三级处理设施不仅会显著提高污水处理成本,残留药剂也会影响受纳水体安全。因此,尾水湿地因投资成本低、运行维护简单、生态功能丰富等特点得到广泛应用^[2]。

尾水湿地以污水处理厂二级出水为水源,通过湿地中的基质、植物和微生物对污染物进行净化。基质可以吸附水中氮磷成分;植物既可以直接吸收污染物,也可与根系微生物协同去除污染物;微生物依靠好氧和厌氧代谢过程去除污染物。当前针对尾水湿地的研究大多集中在方案比选阶段,即不同基质和植物的搭配在不同运行参数下的表现,缺乏对尾水湿地运行效能的综合描述,包括处理效果和存在的问题等方面,从而无法判断尾水湿地有效性及改进方向。因此,本文针对国内外尾水湿地运行效能开展研究,探讨尾水湿地系统对常规污染物和新兴污染物的去除效果,并从基质和植物两方面分析尾水湿地效能影响因素。

1 尾水湿地运行效果研究现状

1.1 国外运行效果研究现状

国外很早就开始利用人工湿地处理废水,对污水厂处理后的尾水进行深度处理的案例也比较多。1996 年,荷兰特塞尔岛采用表面流人工湿地对污水厂三级出水进行深度净化,结果显示可以去除 92% 的大肠杆菌、26% 的总氮以及 5% 的总磷,出水满足废水排放标准但未达到荷兰地表水标准^[3]。2001 年,意大利开展了一项为期 3 年的监测研究,结果表明人工湿地可以去除污水厂出水中 74% 的 COD,使出水浓度达 45.9 mg/L^[4]。对于进水 BOD 浓度小于 40 mg/L 的三级出水,全球 122 个表面流湿地的调研结果显示出水平均 BOD 浓度可降至 6.8 mg/L,去除率可达 60.7%^[5]。7 座爱尔兰的表面流人工湿地对城镇污水厂二级出水进行处理,效能分析显示 BOD、COD、氨氮、总磷的平均去除率分别为 84%、72%、37%、54%,平均出水浓度分别为 8、45、6、5 mg/L,除总磷出水浓度高于最大允许浓度 0.7 mg/L 外,其他出水指标均达到要求^[6]。2019 年,印度通过一项 3 个月的监测研究比较了水平潜流和垂直流湿地对二级出水的

处理效果,BOD 去除率为 77% 和 83%,COD 去除率为 60% 和 65%,氨氮去除率为 67% 和 84.47%,磷酸盐去除率为 85% 和 90%,结果显示两者均为有效的尾水处理方式^[7],但垂直流湿地比水平潜流湿地具有更高的污染物去除效率,充分说明了不同流动方式对处理效果的影响。为验证尾水湿地出水回用有效性,2021 年突尼斯公布了一项为期 3 年的监测研究结果,采用水平潜流湿地和稳定塘耦合系统处理二级出水,BOD₅、COD、TKN、TP 的去除率分别为 45.24%、37.52%、56.53%、69.09%,并且稳定塘对大肠杆菌有很好的去除效果,出水用于农田灌溉,可以实现水资源的有效利用^[8]。

1.2 国内运行效果研究现状

我国对尾水湿地的研究和应用起步较晚,至今还未形成尾水湿地出水规范,但对处理效果的要求大致分为两个阶段。为避免重复表达,下文中“一级 A、B 标准”均以《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)为依据,“地表 I、II、III、IV、V 类”均以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)为依据。

第一阶段的尾水湿地处理后出水满足一级 A 标准。2009 年,韩瑞瑞^[9]采用复合垂直流人工湿地处理模拟污水厂尾水的配水,在低水力负荷下 COD、氨氮、总氮、磷酸盐的去除率分别为 87.4%、82.15%、60.32%、30.15%,出水浓度分别为 8、2、5.49、1.0 mg/L,去除效果比较明显,但是除 COD 出水达到 I 类外,其他指标仍处于劣 V 类水平。增加了曝气的垂直潜流湿地可以有效提高尾水的处理效果,出水 COD 基本稳定在 15 mg/L 以下,并且可以达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水平,出水总氮和总磷分别稳定在 2 mg/L 和 0.1 mg/L 以下,整体上净化至一级 A 标准^[10]。由于 2015 年国务院发布的《水污染防治行动计划》中要求新建城镇污水处理设施出水水质于 2017 年底全面执行一级 A 标准,而在此阶段之前污水厂出水大多执行一级 B 标准,对尾水湿地出水要求不高,上述尾水湿地的出水未能达 V 类也符合现实要求。

随着污水厂出水要求的提高,第二阶段的尾水湿地出水要求也登上新台阶。由于单一人工湿地易受环境因素等影响导致处理效果不佳,组合式的尾水湿地开始被广泛运用。通过在尾水湿地主体部分前设置预氧化构筑物,如生态氧化

池^[11]、曝气生物滤池^[12]、臭氧接触氧化池^[13]等,实现对有机物和总氮的有效去除,将污水由一级A标准净化至Ⅳ类水标准,可用作景观娱乐补充水,改善环境效益。但是曝气会增加额外的运行费用,与人工湿地本身的低成本运行特点相悖。实际工程中采用较多的方案是多生态工艺组合,如单一人工湿地和生态塘耦合系统^[14]、表面流人工湿地和潜流人工湿地组合系统^[15-16]、在表面流

和潜流湿地前后设置生态塘或植物塘等复合系统^[17-18],大量实验和案例证明组合系统能有效去除污染物,大部分指标基本可达到地表Ⅳ类水标准,某些出水指标甚至可达到地表Ⅱ类水标准。部分组合系统处理效果如表1所示。组合工艺充分发挥单个处理单元的优势且弥补不足,故不同湿地系统组合,以生态处理为主要去除过程,提高出水质量的同时也凸显了生态和景观的协同效益。

表1 尾水湿地处理工艺及运行效果

Table 1 Treatment technologies and operation effect of tailwater wetlands

处理工艺	进水/(mg·L ⁻¹)	平均去除率/%	出水/(mg·L ⁻¹)
生态氧化池+VFCW* ^[11]	COD:47.8	COD:61.8	COD:18.3
	BOD:12.2	BOD:64.4	BOD:4.4
	NH ₄ ⁺ -N:5.84	NH ₄ ⁺ -N:82.60	NH ₄ ⁺ -N:0.99
	TP:0.96	TP:75.20	TP:0.24
臭氧接触反应池+VFCW* ^[13]	COD:23.0	COD:42.7	COD:5.5
	BOD:7.2	BOD:47.4	BOD:2.0
	NH ₄ ⁺ -N:6.30	NH ₄ ⁺ -N:50.40	NH ₄ ⁺ -N:0.67
	TN:12.20	TN:44.20	TN:0.96
VFCW*+生态塘 ^[14]	TP:0.48	TP:45.50	TP:0.12
	COD:26.55	COD:41.62	COD:15.50
	NH ₄ ⁺ -N:4.54	NH ₄ ⁺ -N:75.11	NH ₄ ⁺ -N:1.13
	TN:13.30	TN:91.20	TN:1.17
VFCW*+HFCW**+SFCW***+氧化塘 ^[17]	TP:0.51	TP:52.94	TP:0.24
	COD:50.0	COD:47.4	COD:26.5
	NH ₄ ⁺ -N:4.0	NH ₄ ⁺ -N:72.6	NH ₄ ⁺ -N:1.1
VFCW*+SFCW***+沉水植物氧化塘 ^[18]	TP:0.50	TP:45.80	TP:0.27
	COD:35.76	COD:36.55	COD:22.00
	NH ₄ ⁺ -N:0.43	NH ₄ ⁺ -N:53.50	NH ₄ ⁺ -N:0.20
	TN:8.12	TN:82.50	TN:1.42
	TP:4.10	TP:63.40	TP:0.15

注:VFCW*——垂直流人工湿地(vertical subsurface flow constructed wetland);
HFCW**——水平潜流人工湿地(horizontal subsurface flow constructed wetland);
SFCW***——表面流人工湿地(surface flow constructed wetland)

从单一尾水湿地处理系统到组合湿地处理系统,广泛应用的尾水湿地已被证明可有效去除常规污染物。但是,现阶段对尾水湿地效能研究仍存在一些不足。

首先,基于大量尾水湿地运行效能研究,除少数研究未考虑总氮外^[19],总氮去除效果均不理想。单组湿地如水平潜流湿地^[20]、表面流湿地^[21],组合湿地如多级串联表流湿地和潜流湿地^[22]、生态塘-组合湿地^[23]和垂直流湿地-多级生态塘^[24],其出水TN均为劣Ⅴ类标准。但上述湿地都已具备去除其他污染物,使出水水质达到地表Ⅲ类或Ⅳ类标准的能力,因此,湿地构型不是

限制总氮去除效果的关键因素。

推其原因,一是尾水中碳源不足,湿地对有机物的去除效果又比较好,反硝化过程缺少碳源,严重影响对TN的降解;二是好氧环境使得氨氮容易转变硝态氮,由于缺乏合适的厌氧环境,进一步加剧硝态氮的积累,故往往氨氮去除效果较好而TN的去除效果不好。而在冬季,由于低气温限制了微生物和植物的生命活动,导致去除TN效果更差。为了提高低温下TN的去除效果,郑晓英^[25]构建了铁炭内电解尾水湿地,电解过程产生的Fe²⁺可以促进大分子有机物转变为小分子,使微生物充分利用碳源进而强化反硝化脱氮,并且Fe²⁺

也可以加快微生物细胞电子传递速率,提高生物活性。此外,也有研究通过外加碳源^[26]和外加菌群^[21]提高冬季脱氮效率,方法虽然有效,但投加成本和长期运行的影响还需进一步讨论。

其次,现阶段尾水湿地的监测指标并未考虑水生生物等水生态监测内容。水生态监测是指从水体生态系统完整性出发,对水体中各个生物要素、环境要素、生物与环境要素之间的响应关系进行监测,分析水体现状并为水生态修复提供依据^[27]。尾水湿地降解污染物依赖于系统中的基质、微生物、植物,其自身是一个小型生态系统,而仅考虑常规水质指标监测不能说明其生态效果。根据《水环境监测规范》(SL 219—2013)、《河湖健康评估技术导则》(SL/T 793—2020)、《河流水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》等,后续对尾水湿地处理效果的监测应考虑浮游生物、底栖动物、鱼类和生物毒性等参数,进一步建立尾水湿地的效能评价体系,对尾水湿地的运行效果形成标准化评价。

1.3 对新兴污染物的去除效果

新兴污染物(ECs)通常包括抗生素、内分泌干扰物、微塑料等,对其危害和去除机理的研究已经得到广泛关注。人工湿地对新兴污染物的去除效果也得到大量研究,其去除机理主要是吸附和降解作用^[28]。阿丹^[29]以垂直-水平潜流组合湿地研究对喹诺酮类、大环内酯类、四环素类、磺胺类四大类抗生素的去除效果,前三者抗生素的出水浓度显著低于进水浓度($P<0.05$),充分说明了人工湿地的不同构型和组成对不同ECs的去除效率不同,并且也有学者证明去除效率还受温度影响。李超予^[30]通过潜流湿地研究对广谱抗菌剂三氯生(TCS)和非甾体抗炎药物双氯芬酸(DCF)的去除效果时,发现夏季平均去除率为91.72%和85.86%,高于冬季52.88%和32.47%的去除率。此外,王亮^[31]在研究复合垂直流湿地对16种内分泌干扰物的去除情况时,说明了基质吸附和降解优势菌的作用,丁仁伟^[32]在其实验中证明了基质吸附能力和微生物降解能力受进水四环素浓度影响。

因此,尾水湿地可以有效去除ECs,但是处理效果受污染物种类、湿地构型、基质类型、植物、温度、水力负荷等影响,这与其他研究者的结论一致^[33]。此外,由于污水处理厂对ECs的去除有一定效果,现有研究多采用人工投加ECs的方法,其投加浓度与真实尾水中的浓度可能会存在差别,对判断去除机理

和不同运行条件的影响还需进一步探讨。

2 尾水湿地运行效果的影响因素

尾水湿地的运行效果受多种因素的影响。尾水湿地发挥净化作用的机理是湿地基质、植物和微生物的协同作用,因此,为进一步探究尾水湿地运行效果,针对基质材料和湿地植物两个影响因素开展研究。

2.1 湿地基质的影响

湿地基质一方面作为湿地系统的骨架起支撑作用,另一方面对有机物、氮磷等污染物质起过滤和吸附作用^[34]。传统人工湿地的基质主要由土壤、沙砾、砾石、页岩、陶粒等组成,不同基质对污染物的去除特性不一致^[35]。由于传统基质对TN去除能力有限且波动较大,故研究者针对加强基质吸附及促进反硝化展开研究。因普通沸石只能对氨氮吸附但不能彻底去除,故依托于孔隙中微生物的降解,生物沸石可以硝化去除吸附的氨氮,出水氨氮浓度可低于0.5 mg/L^[36]。同理,生物炭强化下的湿地系统比相同条件下的沸石湿地系统具有更高的氨氮去除效率以及处理负荷^[37],但因碳源的不足严重影响反硝化,导致出水总氮过高。

冯牧雨^[38]对海绵铁-砾石潜流人工湿地、硫酸铜改性海绵铁-砾石潜流人工湿地、海绵铁耦合碳源-潜流人工湿地的常规污染物去除能力进行比较,结果显示海绵铁的吸附以及铜铁微电解的作用对TN有一定去除效果,虽然未达标准,但是从化学角度论证了零价铁可以促进微生物的自养反硝化。实验证明,基于零价铁-生物炭湿地系统的硝态氮去除能力相比生物炭和沸石湿地系统有显著提升,出水可以稳定达到准Ⅳ类标准^[37]。这是因为生物炭多孔结构中积聚的微生物强化了硝化过程,生成的硝态氮在零价铁的作用下发生反硝化过程,从而TN被有效去除。

为更好地说明湿地填料对湿地去除污染物的影响效果,基于Citespace5.8.R3知识图谱软件和文献计量学分析对相关文献进行可视化分析。以CNKI数据库中SCI来源期刊、EI来源期刊、北大核心、CSSCI、CSCD为分析数据来源,以主题为“湿地填料”或“湿地基质”精确检索,共得到384条结果(截至2021年12月27日)。剔除部分偏离主题结果,针对余下的367条结果,利用Citespace提取高频关键词进行关键词共现时区图谱分析,处理结果如图1所示。

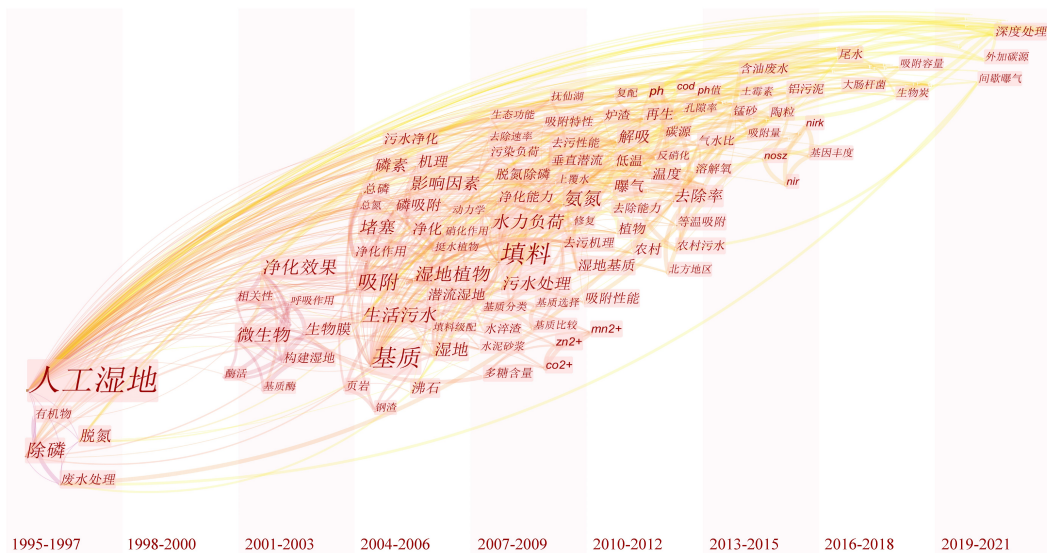


图 1 湿地基质关键词共现时区图谱

Fig.1 Keyword co-occurrence time zone map of wetland substrate

从图 1 中可以看出,人工湿地可以有效去除废水中的有机物和氮磷等污染物,其中发挥关键作用的是基质。基质主要以吸附作用实现脱氮除磷。研究者们多集中于湿地基质的净化作用展开研究。起初揭露了基质中微生物的作用机理,说明起净化作用的是基质表面的生物膜,随后多围绕基质对污染物的吸附作用开展研究。在基质的选材方面,页岩、沸石和钢渣最早得到广泛应用,并在吸附解吸特性、填料级配、性能比较等过程中研究选择最合适的填料方案。考虑到低成本及实现“以废治废”的目标,研究者通过实验说明了水淬渣、炉渣、铅污泥对磷具有很强的吸附性能,可以作为湿地填料。此外,以砖块为填料的尾水湿地也实现了有效的去污能力,对 COD 和 TP 的去除率可以分别达到 66.52% 和 91.55%^[39]。这些实验均为以后湿地填料的多样化打下基础。近年来,尾水湿地更加强调深度处理,在大多数基质对磷有较好吸附性能的基础上添加生物炭基质或额外投加碳源,进一步强化对氮的去除,整体提升出水水质。

2.2 湿地植物的影响

除基质外,植物也在湿地中发挥关键的净化作用。早有研究证明湿地植物对重金属(如汞、铬、镉、砷、铅等)有去除作用^[40],通过根部和茎叶吸收重金属并在体内富集^[41]。对常规污染物,未栽种植物时主要依靠基质的吸附作用去除,栽种植物后通过植物自身的吸收净化作用可以提高对 COD 和 TN 的去除效率^[42]。因此,植物对提高尾水湿地处理效能起关键作用。

湿地植物种类繁多,通常可分为挺水植物、浮叶植物和沉水植物,不同植物的污染物去除效能也不一致。吴丹^[43]比较了 8 组湿生植物表面流湿地在去除氮磷方面的表现,结果显示挺水植物圆叶草和大聚藻组合对氮磷去除能力最好,浮叶植物睡莲次之,并且生物量与去除效果并不成正相关。表面流湿地中,挺水植物风车草和再力花组合的去除效果优于苦草和黑藻沉水植物系统^[44],而四季常青苦草、黑藻和狐尾藻沉水植物系统的出水 COD 和 TP 浓度分别可以达到地表水Ⅰ类和Ⅱ类标准^[45]。潜流人工湿地中,芦苇可以提高湿地的脱氮能力,对硝态氮的去除率从 5.46% 提升至 27.69%,对氨氮的去除能力无明显影响,这说明芦苇可以增加反硝化细菌的数量并促进反硝化进程^[46]。

除植物本身对污染物去除有不同偏向性外,季节的变化也会影响植物的去除效果,如春季芦苇湿地对 COD、氨氮和 TN 的去除效果好,但夏季丝带状草湿地对 COD 的去除效果最好,秋季风车草湿地对 TP 的去除效果最好,冬季美人蕉湿地对氨氮和 TP 的去除效果最好^[47]。因此,实际工程中,针对不同种类污染物、不同构型湿地、不同季节和运行情况,湿地植物表现各异,应尝试多种植物搭配。在不同情况下种植最佳植物来稳定并提高尾水湿地的去除效果。

为更好地说明湿地植物对湿地去除污染物的影响效果,使用前述方法,以主题为“人工湿地植物”精确检索,共得到 621 条结果(截至 2021 年 12 月 27 日)。剔除部分偏离主题结果,针对余下的

- Applied Water Science, 2019, 9 (6): 147.
- [8] ERGAIEG K, BEN MILED T. Full-scale hybrid constructed wetlands monitoring for decentralized tertiary treatment of municipal wastewater [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14 (14): 1407.
- [9] 韩瑞瑞, 袁林江, 孔海霞. 复合垂直流人工湿地净化污水厂二级出水的研究 [J]. 中国给水排水, 2009, 25 (21): 50-52.
- [10] 江林, 刘润龙, 朱丹, 等. 垂直潜流人工湿地处理城镇污水处理厂尾水的研究 [J]. 环境工程, 2015, 33 (9): 74-77+138.
- [11] 廖波, 林武. 强化型垂直流人工湿地用于污水处理厂尾水深度处理 [J]. 中国给水排水, 2013, 29 (16): 74-77.
- [12] 刘弥高. 曝气生物滤池+人工湿地深度处理污水厂尾水的研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2017: 46-51.
- [13] 刘洋, 林武, 王小江. 人工湿地与臭氧联合处理技术用于以再生水为补水水源的景观湖净化 [J]. 环境工程, 2017, 35 (5): 16-19.
- [14] 段田莉. 人工湿地+生态塘耦合深度处理污水厂尾水 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016: 31-42.
- [15] 胡颖, 张蔚. 常州新龙生态林低污染尾水净化与回用技术研究 [J]. 中国农村水利水电, 2016 (12): 49-52+58.
- [16] 胡洁, 许光远, 胡香, 等. 组合式人工湿地深度处理小城镇污水处理厂尾水 [J]. 水处理技术, 2018, 44 (11): 120-122+132.
- [17] 王翔, 朱召军, 尹敏敏, 等. 组合人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理 [J]. 中国给水排水, 2020, 36 (6): 97-101.
- [18] 潘成荣, 陈建, 彭书传, 等. 复合型人工湿地对污水厂尾水的深度处理效果 [J/OL]. 中国给水排水: 1-15 [2022-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20210330.1114.002.html>.
- [19] 杨立君. 垂直流人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理 [J]. 中国给水排水, 2009, 25 (18): 41-43.
- [20] 杨长明, 马锐, 汪盟盟, 等. 潜流人工湿地对污水厂尾水中有机物去除效果 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (8): 1210-1216.
- [21] 周新程, 彭明国, 陈晶, 等. 低温低碳源下表面流人工湿地净化污水厂尾水 [J]. 中国给水排水, 2017, 33 (17): 113-116.
- [22] 杨长明, 马锐, 山城幸, 等. 组合人工湿地对城镇污水处理厂尾水中有机物的去除特征研究 [J]. 环境科学学报, 2010, 30 (9): 1804-1810.
- [23] 徐南军, 李向阳, 祁琳琳, 等. 生化生态组合人工湿地系统对城镇污水处理厂尾水的净化效果研究 [J]. 环境工程, 2015, 33 (7): 46-50.
- [24] 段田莉, 成功, 郑媛媛, 等. 高效垂直流人工湿地+多级生态塘深度处理污水厂尾水 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (11): 5828-5835.
- [25] 郑晓英, 朱星, 王菊, 等. 内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 [J]. 环境科学, 2018, 39 (2): 758-764.
- [26] 苑天晓. 外加碳源人工湿地处理污水厂尾水的脱氮工艺研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 31-35.
- [27] 李德旺, 王春芳, 袁玉洁. 水生态监测国内外发展及在长江流域的应用思考 [J]. 水生态学杂志, 2021, 42 (5): 1-9.
- [28] SHAN A Q, WANG W J, KANG K J, et al. The removal of antibiotics in relation to a microbial community in an integrated constructed wetland for tail water decontamination [J]. Wetlands, 2020, 40 (5): 993-1004.
- [29] 阿丹. 人工湿地对 14 种常用抗生素的去除效果及影响因素研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2012: 36-43.
- [30] 李超予, 杨怡潇, 张宁, 等. 两种典型 PPCPs 在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 [J]. 环境科学, 2021, 42 (2): 842-849.
- [31] 王亮. 复合垂直流人工湿地对污水深度处理研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 40-49.
- [32] 丁仁伟. 曝气强化人工湿地深度处理污水厂尾水试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021: 43-51.
- [33] 杨海燕, 杨博, 孙广东. 人工湿地处理污水中药品及个人护理品的效能研究进展 [J]. 科技导报, 2017, 35 (9): 35-40.
- [34] 管策, 郁达伟, 郑祥, 等. 我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (12): 2309-2320.
- [35] 许兵. 人工湿地深度处理污水处理厂二级出水试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013: 21-23.
- [36] 胡杰军, 董婧, 沈志强, 等. 生物沸石人工湿地强化硝化处理污水处理厂二级出水研究 [J]. 环境工程技术学报, 2018, 8 (3): 274-281.
- [37] 马柯. 基于生物炭/零价铁强化的复合流人工湿地性能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 17-27.
- [38] 冯牧雨. 城市污水处理厂尾水的人工湿地处理技术研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021: 27-39.
- [39] ZHANG G Z, MA K, ZHANG Z X, et al. Wastebrick as constructed wetland fillers to treat the tail water of sewage treatment plant [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 104 (2): 273-281.
- [40] QIAN J H, ZAYED A, ZHU Y L, et al. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: III. Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plant species [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28 (5): 1448-1455.
- [41] CHENG S P. Heavy metals in plants and phytoremediation-A state-of-the-art report with special reference to literature published in Chinese journals [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2003, 10 (5): 335-340.
- [42] 赵赞. 人工湿地处理城镇污水厂尾水深度脱氮实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 20-28.
- [43] 吴丹, 缪爱军, 李丽, 等. 表面流人工湿地不同植物及其组合净化污水处理厂尾水研究 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (6): 115-121.
- [44] 范远红, 崔理华, 林运通, 等. 不同水生植物类型表面流人工湿地系统对污水厂尾水深度处理效果 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (6): 2875-2880.
- [45] 林运通, 崔理华, 范远红, 等. 5 种湿地沉水植物对模拟污水厂尾水的深度处理 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (12): 6914-6922.
- [46] 全欣楠. 芦苇对人工湿地脱氮效果影响研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 42-48.
- [47] 岑璐瑶, 陈滢, 张进, 等. 种植不同植物的人工湿地深度处理城镇污水处理厂尾水的中试研究 [J]. 湖泊科学, 2019, 31 (2): 365-374.