

孙健, 李露, 王媚, 等. 人工湿地对城镇污水处理厂尾水深度处理技术研究现状[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 27-36.

SUN J, LI L, WANG M, et al. Current research of constructed wetlands for advanced treatment technologies of WWTPs tailwater[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 27-36.

人工湿地对城镇污水处理厂尾水深度处理技术研究现状

孙 健, 李 露, 王 媚, 李 卿, 邹 磊*, 刘海燕

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010)

摘 要 人工湿地作为城镇污水处理厂尾水深度处理的典型工艺, 具有运行费用低、维护简单、景观效果好等优点。【目的】虽然尾水人工湿地存在脱氮除磷效率不高(尤其是脱氮)的问题, 但可通过一些措施有效提高处理效率。【方法】文章从提高尾水人工湿地处理效果的主要措施(水生植物、基质、组合工艺、与电化学工艺耦合以及提升反硝化脱氮)进行了总结。【结果】不同水生植物对营养盐具有不同的去除效果, 采用不同植物组合的方式可以提高尾水人工湿地的净化效果; 为保证人工湿地较好的净化效果, 根据所需去除的污染物可选取高效基质, 但需考虑基质吸附饱和后湿地的处理效率降低以及基质费用等因素; 实际工程中选择不同类型湿地串联组合可以有效避免一种流态湿地的自有缺陷, 提高尾水深度净化的效果; 将电化学技术与人工湿地耦合处理尾水虽然能够提升湿地处理效率, 但相关研究目前处于小试阶段, 离工程应用还有段距离; 向湿地系统中添加额外的碳源可以增强人工湿地的异养反硝化能力, 但对工程实践的指导性不强。自养反硝化尤其是硫基自养反硝化可以维持湿地高效的氮去除能力, 但需考虑湿地出水存在硫酸盐含量偏高以及 pH 偏低的问题。【结论】在尾水人工湿地实际工程应用中, 设计人员应依据不同技术的优缺点制定具体实施方案, 以保障人工湿地对尾水高效的净化效果。

关键词 人工湿地 城镇污水处理厂尾水 水生植物 基质 组合工艺 电化学工艺 反硝化脱氮

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)04-0027-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.004

Current Research of Constructed Wetlands for Advanced Treatment Technologies of WWTPs Tailwater

SUN Jian, LI Lu, WANG Mei, LI Qing, ZOU Lei*, LIU Haiyan

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract Constructed wetland is a typical technology for the advanced treatment of effluent from urban wastewater treatment plants (WWTPs), offering advantages such as low operating cost, simple maintenance, and good landscaping effects. [Objective] Constructed wetlands for effluent treatment often exhibit low nitrogen and phosphorus removal efficiencies, especially for nitrogen. But some measures can be taken to improve the efficiency of treatment. [Methods] The main measures to improve the treatment performance of constructed wetlands for effluent are summarized, including aquatic plants, substrates, combined processes, coupling with electrochemical processes, and enhancing denitrification. [Results] Different aquatic plants have varying removal effects on nutrients, and using a combination of different plants can enhance the purification effect of constructed wetlands. To ensure good purification performance, efficient functional substrates can be selected based on the pollutants to be removed, but factors such as the decline in treatment efficiency after substrate saturation and the cost of substrates need to be considered. Selecting different types of wetlands in series can effectively avoid the inherent defects of a single type wetland and improve the advanced purification effect in practical engineering. Coupling electrochemical technology with constructed wetlands can enhance treatment efficiency, but relevant research is currently in the pilot stage and is currently impossible in engineering applications. Adding additional carbon sources can enhance the heterotrophic denitrification capacity of constructed wetlands, but it has limited guidance for engineering practice;

[收稿日期] 2024-06-14

[基金项目] 湖北省中国科学院科技合作专项项目(KY-N-S-2022-002)

[作者简介] 孙健(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事人工湿地和水体生态修复设计及科研工作, E-mail: sunjian813@163.com。

[通信作者] 邹磊, 正高级工程师, E-mail: 10027238@qq.com。

autotrophic denitrification, especially sulfur-based autotrophic denitrification, can maintain high nitrogen removal efficiency, but it is necessary to consider issues such as high sulfate content and low pH in the effluent. [Conclusion] Therefore, in practical engineering applications designers should develop specific implementation plans based on the advantages and disadvantages of different technologies to ensure high-efficiency purification of effluent by constructed wetlands.

Keywords constructed wetland tailwater of WWTP aquatic plants substrates combined processes electrochemical process denitrification

2022年,我国污水处理总量约为626亿 m^3 ^[1]。其中,城镇污水处理厂尾水主要执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。与受纳水体目标水质相比,其氮磷含量相对偏高,氮磷总量相对较大。因此,对尾水进行进一步的深度处理后排放具有一定的必要性。目前,尾水深度处理的方式主要有臭氧/活性炭^[2]、高效沉淀池^[3]、膜分离^[4]、生物滤池^[5]、人工湿地^[6],其中人工湿地因运维费用低、简单以及景观效果好等而得到应用。

截至2022年10月,我国污水处理厂尾水人工湿地工程数量约为155个^[7]。然而,城镇污水处理厂尾水因碳氮比(C/N)低,可生化性较差,导致反硝化脱氮效率偏低^[8]。加上由于土地资源的有限性,湿地占地面积大的特性在当前环境下显得尤为突出。在尾水人工湿地的研究中,如何有效提升其脱氮除磷的效率,同时增大水力负荷并减少占地面积,已成为当前关注的焦点问题。目前,许多研究与设计人员通过采取一定的措施来提高尾水人工湿地的处理效果,主要有植物选取、基质选择、工艺组合、反硝化脱氮提升。因此,本文简述了现有提高尾水人工湿地处理效率的措施,讨论了不同措施的最新研究进展,以期为人造湿地的尾水治理以及制定科学合理的修复方案提供理论依据和技术支持。

1 水生植物

湿地植物是人工湿地中的重要组成部分,不仅促进湿地系统对水体中污染物质的净化作用,而且营造了良好的湿地景观效果^[9]。不同植物对营养盐的去除效果是不同的。因此,在设计和构建人工湿地时,植物类型的选择成为了一个至关重要的考虑因素^[10]。何君^[11]通过设置8种水生植物构建人工湿地,研究了不同植物对太湖流域污水处理厂尾水的净化效果,发现在高温季节再力花对氮磷的去除效果最差以及花叶芦竹对氨氮和 COD_{Cr} 的去除效果最差,在低温季节四季鸢尾对氮磷和 COD_{Cr} 的

去除效果最佳。

由此可见,选择不同的水生植物会对尾水人工湿地带来不同的处理效果^[12]。同时,人工湿地种植单一种类植物时,其尾水净化效果容易不佳^[13]。因此,通过采用不同植物组合的方式可以提高尾水人工湿地的净化效果,可设置不同植物组合^[14]。Luo等^[15]采用“芽球菊苣+黑麦草+羊蹄”组合植物,发现不仅提高了湿地的生物量,而且促进了系统对氮的去除。高紫荆等^[16]通过湿地中组合种植“千屈菜+芦苇”,在增加根际微生物丰度同时改善了湿地的水处理性能。

湿地植物的净化机理主要体现在直接吸收利用污水中物质和改善根区微生物生长环境促进微生物的降解功能^[17]。研究^[18]指出,植物虽然能直接吸收利用污水中物质来净化水体,但湿地植物所能整合的营养物质含量不到进水氮负荷的10%、磷负荷的5%,说明植物直接吸收利用的净化作用偏小。湿地植物改善根区微生物生长环境主要通过根部泌氧使根系环境呈现好氧—缺氧—兼氧的连续状态,促进湿地的硝化和反硝化作用^[17]。人工湿地常用水生植物如表1^[19]所示。

2 基质

基质是人工湿地(尤其是潜流人工湿地)的核心部分,主要通过吸附为微生物提供生长条件等方式对污水处理厂尾水发挥净化作用^[20]。选取不同种类的湿地基质,会营造湿地内部不同的水力特性,存在不同的微生物群落结构。同时,基质对污染物的截留吸附效果随着基质种类的不同而存在差异^[21]。人工湿地基质分为常规基质和高效基质。其中,常规基质主要包括砾石、卵石及石灰石等,价格低廉,方便可取;高效基质主要指沸石、无烟煤、高炉钢渣、生物陶粒等,对氮磷表现出较好的去除效果。胡杰军等^[22]采用沸石人工湿地中试系统处理某城镇污水处理厂尾水,通过9个月的运行,发现对氨氮的平均去除率达到90.5%。杨大杰等^[23]选用

表 1 人工湿地常用水生植物^[19]

Tab. 1 Common Aquatic Plants in Constructed Wetlands^[19]

种类名称	形态特性	耐寒性	氮磷吸收能力/ [g·(kg·a) ⁻¹]
黄菖蒲	又名黄花鸢尾、水生鸢尾;多年生挺水草本植物;株高为 50~70 cm,根茎短粗;叶剑形,互生;花黄色,花期为 4 月—6 月	耐寒能力强,生长适温为 15~30 ℃,10 ℃ 以下停止生长	TN≥25.3 TP≥2.63
千屈菜	又名水柳、对叶莲、水枝锦;多年生挺水草本植物;株高可达 1.5 m 左右;叶对生或轮生,披针形;总状花序生于上部叶腋;小花多而密,粉色、洋红色至紫色,花期为 7 月—10 月	性耐寒,我国南北各地均可露地越冬	TN≥115 TP≥12.5
花叶芦竹	又名意大利芦苇、银边芦竹、金边芦竹;多年生挺水草本植物,株高可达 4.6 m;具有光滑笔直的外观,呈现出明显的节间分隔,类似于竹子的形态;叶互生;圆锥花序形似毛帚,花期为 10 月	较耐寒,生长适温为 18~35 ℃	TN≥37.6 TP≥4.8
鸢尾	多年生常绿挺水草本植物;株高为 80~100 cm;根状茎短;花单生,为蝎尾状,聚伞花序,花呈蓝紫色,花期为 4 月—5 月	怕热,夏季滨岸带种植易发黄,耐寒,能常绿越冬	TN≥31.3 TP≥2.8
菖蒲	又名水菖蒲、泥菖蒲、臭菖蒲;多年生挺水草本植物,有香气;长为 50~120 cm;花茎基生出,叶状佛焰苞长为 20~40 cm;肉穗花序直立或斜向上生长,黄绿色,花期为 6 月—9 月	稍耐寒,最适宜生长温度为 20~25 ℃,10 ℃ 以下停止生长	TN≥24.1 TP≥2.3
再力花	又名水竹芋、白粉塔利亚;多年生挺水草本植物;植株高为 2~3 m,株幅为 2 m;叶片呈卵状披针形;花紫色,成对排成松散的圆锥花序,花期为 5 月—11 月	不耐寒,生长适宜温度为 20~30 ℃,短时间能耐-5 ℃ 低温。入冬后水上部分枯死	TN≥100.1 TP≥7.3
旱伞草	又名伞草、风车草、水竹;多年生挺水草本植物;高为 40~150 cm,茎秆粗壮,直立生长,丛生;叶状苞片呈螺旋状排列在茎秆的顶端,扩散呈伞状;聚伞花序,花期为 7 月—9 月	不耐寒,生长适温为 15~25 ℃,冬季温度应保持在 5~10 ℃	TN≥86.7 TP≥9.6
美人蕉	多年生挺水草本植物;株高为 70~160 cm;叶片呈阔椭圆形;总状花序顶生;花色有红、粉红、白、黄及杂色,花期为 5 月—10 月	不耐寒,全年气温高于 16 ℃,可终年生长开花,温度低于 16 ℃ 时生长缓慢甚至休眠	TN≥93.8 TP≥9.1
梭鱼草	又名海寿花,多年生挺水草本植物;株高为 80~150 cm;叶长卵性;穗状花序顶生;花紫蓝色,花期为 5 月—10 月	不耐寒,适宜温度为 18~35 ℃,10 ℃ 以下停止生长	TN≥63.9 TP≥5.2

砾石、生物炭和沸石 3 种不同基质构建垂直潜流湿地处理尾水中的环丙沙星和氮磷,发现生物炭和沸石与砾石相比,对环丙沙星的去除效率分别提高了 10.3%和 19%,对 TN 去除效率分别提高了 1.3%和 28.3%,对 TP 去除效率分别提高了 8.6%和 11.2%。

选用高效基质虽然能提高湿地对污染物的去除效果,但实际工程中需考虑基质的寿命问题。一方面,基质吸附饱和后,湿地的处理效率显著降低,另一方面,在潜流人工湿地建设费用中,基质费用占据较大比例。因此,如何在处理效果和投资成本之间寻求一个平衡点是筛选高效基质的重点^[24]。

另外,建筑物废弃块也可作为人工湿地的基质。研究^[25]指出,建筑物废弃块不仅能为湿地生物膜附着生长的载体,而且适合湿地植物的正常生长,对尾水中污染物的去除有积极作用。杜曼曼等^[26]利用建筑物废弃块建造了处理规模为 5 000 m³/d 的尾水人工湿地深度净化系统,在实现对氮磷营养物质高效去除的同时,节约了人工湿地建设成本 20%~30%。但利用建筑物废弃块作为人工湿地基质时,需考虑废弃块本身是否含有污染物质,以避免影响湿地系统的处理效果。实际工程中人工湿地常用基质如表 2 所示。

表 2 实际工程中人工湿地常用基质

Tab. 2 Common Substrates in Constructed Wetlands in Practical Project

填料种类	代表性 填料	优缺点	主要目标污染物	工程应用情况			参考 文献
				多	中	少	
天然矿物 填料	石灰石	储存量、来源广泛、容易获取、价格低廉;但植物生长困难、污染物去除能力差、通透性差,易堵塞、存在二次污染风险	对 PO ₄ ³⁻ -P 具有较好的去除效果	√	—	—	[27]
	砾石		对 COD _{Cr} 有一定的去除,对氮磷的去除较差	√	—	—	[28]
	沸石		对氨氮具有较强的去除效果	—	√	—	[29-30]
	页岩		对磷去除较强,对 COD _{Cr} 和氮去除较弱	—	—	√	[31]
	黄铁矿		对 TN、TP 去除效果较好	—	—	√	[32]

(续表2)

填料种类	代表性 填料	优缺点	主要目标污染物	工程应用情况			参考文献
				多	中	少	
工业副产 物填料	铝污泥	以废治废、来源广泛、价格低廉;但不同 种类填料的理化性质、去污能力及应用 成本因原料和工艺的不同而产生较大的 差异,同时具有二次污染的风险	对 TP 去除效果较好	—	—	✓	[33]
	炉渣		对 TP 去除效果较好	—	—	✓	[30]
	钢渣		对 TP 和重金属去除效果较好	—	—	✓	[34]
	无烟煤		对 TP 去除效果较好	—	—	✓	[35]
人工合成 填料	陶粒	具有优异的理化性质,如较大的表面积, 适宜的多孔结构、污染物去除性能高,二 次污染小等;但成本高,基建费用大	对 TP 去除效果较强,对 TN 有一定的去除效果	—	✓	—	[36]
	活性炭		对 COD _{Cr} 、TP 和氨氮具有一定的去除效果	—	—	✓	[37]
	生物炭		对 COD _{Cr} 、TN 和 TP 具有较高的去除效果	—	—	✓	[38]
建筑物废 弃块	废砖	有效降低了基质采购和运输成本,同时 对废弃物的再使用实现了废弃物的资源 化,但会造成出水的 pH 升高,从而降低 了湿地污染物的去除能力	对 TP 去除效果较好	—	—	✓	[39]
	废混凝 土块		对 TP 去除效果较好	—	—	✓	[21]

3 组合工艺

3.1 复合流人工湿地

表面流人工湿地虽然对有机物具有较好的降解作用,但在去除氮磷方面的效果还有提升空间;水平潜流人工湿地虽然具有一定的脱氮能力,但由于氧气传输的受限性,使得硝化反应不能充分进行;而垂直潜流人工湿地凭借其出色的复氧性能虽然具有较好的硝化作用,但在保持稳定的反硝化作用方面却存在不足。因此,合适地串联不同类型湿地,可以有效避免单一流态湿地的固有局限,容易发挥各自处理优势,提升净化效果^[40]。研究^[41]表明,当选择恰当的湿地类型或其合理的组合,并且湿地面积配置得当时,经过深度处理的水质从理论上讲,基本上满足地表水准Ⅳ类标准(不包括 TN 指标)。

实际工程中,氧化塘、潜流人工湿地以及表面流人工湿地构成了复合流人工湿地。根据不同湿地的特点,用于城镇污水厂尾水处理的人工湿地主要分为 4 种组合技术:强化预处理、氧化塘与潜流人工湿地、氧化塘与表面流人工湿地以及氧化塘(或潜流人工湿地)与表面流人工湿地^[7,42]。

曹大伟等^[43]利用“垂直流人工湿地—水平潜流人工湿地—氧化塘”的组合技术,对尾水进行了深度处理研究,发现对 COD_{Cr}、BOD₅、氨氮、TN 和 TP 的去除效果分别达到 58.28%、59.53%、46.33%、49.90%和 51.86%。潘成荣等^[44]采用了“微曝气垂直流湿地—水平潜流湿地—沉水植物氧化塘”的组合工艺,对肥西县中派污水处理厂的尾水进行了深度净化。结果显示,处理后水质的 TN、COD_{Cr}、SS、氨

氮以及 TP 均优于或达到相关标准。黄峻楠等^[40]构建了“浅池+双向横流过滤+折流式潜流+水平潜流+表流湿地”多个处理单元的湿地系统,处理能力达到 1 200 m³/d。该系统在秋冬低温期能有效地去除 COD_{Cr}、TN、氨氮和 TP,平均去除率分别为 25%、24%、44%和 34%,出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅳ类(除 TN 外)。王翔等^[45]采用“澄清池—人工湿地—氧化塘”工艺处理城镇污水厂尾水,使湿地系统出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准,具有较好的环境效益和社会效益。

然而,目前人工湿地的组合大多依赖于经验,导致湿地系统的净化效果存在不稳定现象。因此,如何确保人工湿地组合系统能够持续稳定地发挥高效的去除作用,仍然是一个亟待解决的难题^[21]。

3.2 与电化工艺耦合

为提高人工湿地尾水处理的脱氮除磷效果,相关研究人员采取人工湿地与其他处理工艺的耦合方式。其中,电化学技术(如微生物燃料电池和电解技术)应用于人工湿地中已成为尾水人工湿地处理领域中的研究热点。

管凛等^[46]采用微生物燃料电池—人工湿地耦合工艺对城镇污水厂尾水进行处理,发现尾水中 TN 得到显著去除。徐凤英^[47]利用电解—人工湿地耦合工艺处理 SO₄²⁻含量较高的污水处理厂尾水,由于耦合作用促进了硫自养反硝化作用,进而提高了系统的脱氮效果。

于元超等^[48]构建电解强化潜流人工湿地,探究

了解电解对湿地处理效果的影响,发现通过适宜的电解措施可以增加湿地内部反硝化细菌的种类和丰度,从而提高湿地反硝化脱氮作用。Fan 等^[49]构建了以椰子纤维为基质和固体碳源的电解辅助人工湿地,对尾水 TN 和 TP 的去除率分别为 69.4% 和 93.3%,与砾石人工湿地相比, TN 去除率提高了 39.9%。

这些研究表明,人工湿地与电化学工艺的耦合能够提升其处理效率,然而耦合工艺存在一些不足,如相关研究主要针对小试试验、试验条件设置严格等。因此,这种耦合技术后期需在中试或小规模现场试验中进一步验证效果。此外,关于这种耦合技术的成本核算问题,目前的相关报道^[21]还比较少见。

4 提升反硝化脱氮

污水处理厂尾水的一个显著特征是其 C/N 偏低,这意味着碳源的匮乏,会给人工湿地的脱氮能力带来不利影响。因此,提升尾水湿地在脱氮方面的性能,成为了当前研究的一个重要方向。

4.1 异养反硝化

目前,为了增强人工湿地的异养反硝化能力,主要采取的措施是向湿地系统中添加额外的碳源。碳源主要分为 3 类。一是可溶性碳源,如蔗糖、污泥发酵液、甲醇等。将蔗糖以 72 g/m^3 的平均质量浓度作为外加碳源投加进入潜流人工湿地中试系统中, $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{TN}$ 由 6:1 提升至 19:1,水平潜流人工湿地 TN 平均去除率高达 76.01%,垂直潜流人工湿地 TN 平均去除率达到 71.69%^[50]。但在投加过程中可溶性碳源的量不易控制,且在好氧环境下易被降解而不能保证发挥持续作用。二是固体碳源,指不溶于水且可生物降解的有机物。Shen 等^[51]采用玉米淀粉为主要材料制作为人工湿地的固体碳源,填充于湿地内部一段时间后,湿地脱氮效果得到有效提升。与可溶性碳源不同,固体碳源的效果持久稳定。由于固体碳源的填充是与湿地基质的填充同时进行,固体碳源的后续补充比较麻烦。三是来自植物,比如椰棕、植物发酵液等,这些都可以作为有效的碳源使用。何强等^[52]以陶粒和椰棕为基质构建垂直流人工湿地小试系统,发现脱氮功能微生物相对丰度的提高,成功缓解了低温条件下人工湿地脱氮效果下降的问题,从而提高了湿地系统的脱氮效

率。《污水处理厂尾水人工湿地深度净化技术指南》(T/CSES 30—2021)^[53]指出,向人工湿地适当补充经过厌氧发酵形成的湿地植物液,可有效避免尾水碳源缺乏以及冬季脱氮微生物活性低等导致湿地脱氮不理想的现象。湿地植物经过厌氧发酵后产生的液体,其碳、氮、磷的比例最好控制在 200:5:1~300:5:1。向尾水中添加这种发酵液时,以调整尾水的 C/N 至 3:1~5:1 为宜。虽然植物性碳源价格低廉且容易获取,但其效果不够稳定,容易受到外部因素的干扰,同时,使用这种碳源可能会导致处理后的水色度上升。

然而,通过补充湿地碳源来提升湿地的处理效率研究还处于实验室小试阶段,在工程实践中的应用指导尚显不足^[7]。

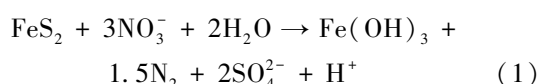
4.2 自养反硝化

自养反硝化是营自养生活的微生物利用某些特定的无机物质作为电子供体,以硝态氮为电子受体,进行氧化还原反应。在过程中,生成氮气(N_2)等物质,从处理过的水中释放出来,由此完成反硝化脱氮的任务。与传统的异养反硝化相比,一个显著特点是不需要额外添加碳源^[54]。《污水处理厂尾水人工湿地工程技术规范》(DB41/T 1947—2020)指出,当尾水人工湿地出水水质考虑 TN 指标时,可填充自养反硝化基质^[7]。目前,自养反硝化的研究主要有氢基自养反硝化、铁基自养反硝化和硫基自养反硝化。其中,氢基自养反硝化和铁基自养反硝化处于理论研究阶段,在城镇污水厂尾水人工湿地深度处理方面的研究相对较少^[55]。

硫基自养反硝化是无机化养或光养细菌在缺氧条件下以还原态硫作为电子供体, NO_3^- 作为电子受体产生 N_2 和 SO_4^{2-} 的过程。研究表明,在 C/N 降低到 1.0 和 0.5 的情况下,硫元素湿地仍能维持高效的氮去除能力,相比之下,普通湿地的氮去除效率则大幅下降。这表明硫元素湿地对低碳氮废水具有更强的适应能力。*Thiobacillus*、*Sulfuritalea* 被认为是影响硫基脱氮进程的主要原因^[56]。王翔等^[57]以污水厂尾水为研究对象,发现当还原态硫、沸石、砾石以 1:1:1 的体积比组合时,构建的人工湿地具有最佳的脱氮效果。特别值得注意的是,还原态硫的引入大幅度增强了潜流湿地的脱氮性能。试验结果显示,在温度为 25~30℃ 和 17~19℃ 时,硫自养潜流湿地表现出良好的脱氮效果,其效率达到 90%

以上。

已发现形成的主要硫基自养反硝化电子供体包括还原性无机硫化物,包括单质硫(S^0)、硫化物(S^{2-})和硫代硫酸盐($S_2O_3^{2-}$),以及其他含硫物质黄铁矿(FeS_2)、亚硫酸盐(SO_3^{2-})和硫氰酸盐(SCN^-)。其中,黄铁矿是一种广泛参与硫和铁生物地球化学循环的矿物,硫酸盐产量相对较低, NO_3^- 去除率较高,已被一些研究人员使用。黄铁矿脱氮反应如式(1)。



硫自养反硝化虽然具有高效的脱氮能力,但也存在一些显著的缺点,如出水中 SO_4^{2-} 含量偏高、反应过程中产生大量的 H^+ 导致出水的pH急剧下降。 SO_4^{2-} 还原的产物硫化物的产生,这对微生物和大型植物具有剧毒,也会消耗氧气^[55]。

5 结论与展望

人工湿地作为城镇污水处理厂尾水深度处理的典型生态工艺,得到广泛应用。但存在脱氮除磷效率不高(尤其是脱氮)的现象。因此,在实际工程应用中,应加强以下工作。

(1)结合尾水水质和现场实际情况,实际工程中为保障人工湿地对尾水高效的净化效果,可采用不同植物组合、选用高效基质、选择不同类型湿地串联组合、使用含硫基质促进湿地反硝化脱氮等方式。

(2)尾水人工湿地建成后,应加强科学的运行管理,以保持人工湿地处理系统对污染物稳定、高效的去除效果,同时可减少危害人工湿地使用寿命的情况发生。

(3)加强对大型尾水人工湿地案例的技术跟踪,加大对人工湿地新污染物削减、温室气体排放相关的研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban and rural construction statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [2] CHUANG Y H, SZSCUKA A, SHABANI F, et al. Pilot-scale comparison of microfiltration/reverse osmosis and ozone/

biological activated carbon with UV/hydrogen peroxide or UV/free chlorine AOP treatment for controlling disinfection byproducts during wastewater reuse[J]. Water Research, 2019, 125(1): 215-225.

- [3] 包鹏, 庞洪涛, 曹效鑫, 等. 高效沉淀池在市政污水深度处理中的应用研究进展[J]. 中国给水排水, 2023, 39(22): 13-20.
BAO P, PANG H T, CAO X X, et al. Research and application progress of high-performance sedimentation tank in domestic sewage advanced treatment[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22): 13-20.
- [4] 宋磊. 污水处理厂高标准提标改造设计——以安徽某污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 115-119.
SONG L. Design of higher standard upgrading and reconstruction project——A WWTP case in Anhui[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 115-119.
- [5] 许铮, 王彦飞, 李思敏, 等. 生物砂滤池深度处理污水厂尾水的研究现状及展望[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(2): 10-13, 58.
XU Z, WANG Y F, LI S M, et al. Research status and prospect of biological sand filter for advanced treatment of tail water from sewage treatment plant[J]. Industrial Water & Wastewater, 2023, 54(2): 10-13, 58.
- [6] 雷培树, 李卿, 孙健, 等. 两种潜流人工湿地对二级生化出水的处理效果[J]. 中国给水排水, 2022, 38(15): 115-120.
LEI P S, LI Q, SUN J, et al. Performances of two kinds of subsurface flow constructed wetlands for treatment of effluent from secondary biochemical process[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(15): 115-120.
- [7] 马昱新, 陈启斌, 王朝旭, 等. 技术标准视角下我国污水处理厂尾水人工湿地设计分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1287-1294.
MA Y X, CHEN Q B, WANG C X, et al. Design analysis of constructed wetlands for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants from technical standard perspective[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1287-1294.
- [8] 刘勇超, 陈启斌, 王朝旭, 等. 外加碳源对生物炭基潜流人工湿地净化污水处理厂尾水效能的影响[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1295-1303.
LIU Y C, CHEN Q B, WANG C X, et al. Effect of external carbon addition on pollutants removal from the tail water of a sewage treatment plant by biocharbased subsurface flow constructed wetland[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1295-1303.
- [9] 吴振斌, 成水平, 贺锋, 等. 复合垂直流人工湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WU Z B, CHENG S P, HE F, et al. Integrated vertical-flow constructed watland[M]. Beijing: Science Press, 2008.

- [10] 陈嗣威, 郑海粟, 张晟曼, 等. 不同植物组合对模拟污水厂尾水的净化效果及对根系微生物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 387-393.
CHEN S W, ZHENG H S, ZHANG S M, et al. Effects of different plant combinations on purification effect of simulated wastewater treatment plant tail water and root microbial community [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(2): 387-393.
- [11] 何君. 人工湿地中不同水生植物对低污染水的净化效果研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(12): 106-110.
HE J. Purification effects of different aquatic plants on low polluted water in constructed wetland[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(12): 106-110.
- [12] 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.
CENG L Y, CHEN Y, ZHANG J. Pilot-scale study on advanced treatment of tail water of urban sewage treatment plant by constructed wetlands with different plants[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 365-374.
- [13] CANGIO L, SALOBEHAJ M, DEL D S, et al. Effect of wastewater on the composition of bacterial microbiota of *Phragmites australis* used in constructed wetlands for phytodepuration[J]. Plants, 2022, 11(23): 3210. DOI: 10.3390/plants11233210.
- [14] 卢秀秀, 刘云根, 王妍, 等. 典型挺水植物应用于湿地生态修复工程污染净化效应差异性研究[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(1): 87-92.
LU X X, LIU Y G, WANG Y, et al. Study on the difference of pollution purification effect of typical water-holding plants applied to wetland ecological restoration projects [J]. Environmental Pollution & Control, 2024, 46(1): 87-92.
- [15] LUO B, DU Y Y, HAN W J, et al. Reduce health damage cost of greenhouse gas and ammonia emissions by assembling plant diversity in floating constructed wetlands treating wastewater[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118927. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118927.
- [16] 高紫荆, 王文悦, 王晓燕, 等. 不同植物组合根际微环境对人工湿地性能及温室气体减排的影响[J]. 生态学杂志, 2025, 44(1): 94-106.
GAO Z J, WANG W Y, WANG X Y, et al. Effects of rhizosphere microenvironment of different plant assemblages on the performance of constructed wetlands and greenhouse gas emission reduction[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(1): 94-106.
- [17] 龚深, 巢传鑫, 邹冬生, 等. 人工湿地中植物对污染物去除机理研究进展[J]. 湿地科学, 2023, 21(6): 927-935.
GONG S, CHAO C X, ZOU D S, et al. Research progress on pollutant removal mechanism of plants in constructed wetland [J]. Wetland Science, 2023, 21(6): 927-935.
- [18] Jan Vymazal, 卫婷, 赵亚乾, 等. 细数植物在人工湿地污水处理中的作用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2): 25-30.
VYMAZAL J, WEI T, ZHAO Y Q, et al. Counting the roles of plants in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(2): 25-30.
- [19] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 城市河道生态治理技术导则[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Research Institute of Standards and Norms Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical guidelines for ecological control of urban river courses [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [20] 赵倩, 庄林岚, 盛芹, 等. 潜流人工湿地中基质在污水净化中的作用机制与选择原理[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 14-22.
ZHAO Q, ZHUANG L L, SHEN Q, et al. Role and design principles of substrate for wastewater purification in subsurface flow constructed wetland[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 14-22.
- [21] 纪伟, 朱洛娴, 张舒, 等. 人工湿地深度处理市政尾水研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 9-19.
JI W, ZHU M X, ZHANG S, et al. Research progress on constructed wetland for advanced treatment of municipal tailwater [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 9-19.
- [22] 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.
HU J J, DONG J, SHEN Z Q, et al. Nitrification performance for secondary effluent from MWTP using bio-zeolite constructed wetland[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, 8(3): 274-281.
- [23] 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. Removal of ciprofloxacin from tail water by constructed wetlands with different substrates[J]. Yangtze River, 2023, 54(12): 58-64.
- [24] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1489-1498.
CHENG S P, WANG Y Y, WU J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1489-1498.
- [25] 张国珍, 尚兴宝, 武福平, 等. 废砖基质折流式垂直流人工湿地处理二级生化尾水[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 100-105.
ZHANG G Z, SHANG X B, WU F P, et al. Tail water purification efficiency of baffled vertical-flow constructed wetland using broken bricks as substrate [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(9): 100-105.
- [26] 杜曼曼, 张琼华, 连斌, 等. 城市污水处理厂尾水人工湿地净化工程调试与运行[J]. 中国给水排水, 2020, 36(9): 94-101.

- DU M M, ZHANG Q H, LIAN B, et al. Commissioning and operation of constructed wetland project for purification of tail water from municipal wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(9): 94-101.
- [27] 代学民, 王立杰, 南国英, 等. 潜流人工湿地脱氮除磷基质的应用研究及展望[J]. *工业用水与废水*, 2024, 55(2): 1-6.
- DAI X M, WANG L J, NAN G Y, et al. Application research and prospect of nitrogen and phosphorus removal substrates in subsurface flow constructed wetland [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2024, 55(2): 1-6.
- [28] 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. DOI: 10.1007/s11356-020-09208-y.
- [29] 刘磐, 刘永军, 刘兴社, 等. 天然沸石对高浓度 NH_4^+ 吸附机理研究[J]. *工业水处理*, 2023, 43(2): 68-75.
- LIU P, LIU Y J, LIU X S, et al. Study on adsorption mechanism of natural zeolite to high concentration ammonium [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(2): 68-75.
- [30] 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]. *安徽农业科技*, 2022, 50(17): 52-55, 61.
- XIAO Y, HUANG Z G, LING Y L, et al. Study on the purification effect of different substrates in constructed wetland on urban domestic sewage [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(17): 52-55, 61.
- [31] 莫晶, 黄钰铃, 骆辉煌, 等. 人工湿地基质研究进展[J]. *湖北林业科技*, 2024, 55(2): 1-6.
- MO J, HUANG Y L, LUO H H, et al. Research progress of substrates in constructed wetland [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2024, 55(2): 1-6.
- [32] 孙健, 李卿, 蔡世颜, 等. 两种不同基质的垂直潜流人工湿地对尾水的处理效果研究[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(4): 484-489.
- SUN J, LI Q, CAI S Y, et al. Study on treatment effect of vertical subsurface constructed wetland with two different substrates on sewage treatment plant effluent [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(4): 484-489.
- [33] 张瑞斌, 陈露莹, 潘卓兮, 等. 铝污泥人工湿地对含氟水体主要污染物的去除效果及分布特征[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(9): 2874-2882.
- ZHANG R B, CHEN L Y, PAN Z X, et al. Removal effect and distribution characteristics of main pollutants in fluoride-containing water by aluminum sludge constructed wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(9): 2874-2882.
- [34] 彭先春, 郑丽丽, 鹿浩然, 等. 硫/钢渣复合基质去除低碳源地地表水中硝酸盐[J]. *工业水处理*, 2025, 45(1): 41-48.
- PENG X C, ZHENG L L, LU H R, et al. Performance of sulfur/steel slag composite matrix in removing nitrate from surface water with low-carbon content [J]. *Industrial Water Treatment*, 2025, 45(1): 41-48.
- [35] 吴浩, 江成, 曹文平, 等. 垂直流动态强化下基质对污染物的吸附活性及机理[J]. *环境工程*, 2022, 40(7): 52-60, 115.
- WU H, JIANG C, CAO W P, et al. Adsorption activity and mechanism of pollutants removal by substrates under the dynamic strengthening of vertical flow [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(7): 52-60, 115.
- [36] 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.
- LI Q, ZHANG J S, LIANG R H, et al. Novel ceramsite substrate of constructed wetland: Preparation and study on phosphorus removal [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(12): 13-22.
- [37] 凌慧兰, 高柏, 许丹, 等. 不同基质人工湿地处理含氮氮地下水过程中氮素形态转化的时空特征[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(3): 324-329.
- LIN H L, GAO B, XU D, et al. Temporal and spatial characteristics of nitrogen form transformation during the treatment of ammonia-containing groundwater by constructed wetlands with different substrates [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(3): 324-329.
- [38] 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. DOI: 10.1007/s11356-018-3637-z.
- [39] 王晗阳, 刘月敏, 杨阳. 废砖与碎石人工湿地系统中微生物分布特征及其脱氮效果的比较研究[J]. *天津城建大学学报*, 2021, 27(1): 54-60.
- WANG H Y, LIU Y M, YANG Y. Comparative study of microbial distribution feature and nitrogen removal effect of waste brick and gravel constructed wetland system [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2021, 27(1): 54-60.
- [40] 黄峻楠, 李青, 张琼华, 等. 高负荷复合式人工湿地对污水处理厂尾水低温期的净化效果[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3561-3571.
- HUANG J N, LI Q, ZHANG Q H, et al. Performance of a high loading hybrid constructed wetland on wastewater treatment plant effluent purification in low temperature period [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3561-3571.
- [41] 孔令为, 邵卫伟, 梅荣武, 等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2): 39-43.
- KONG L W, SHAO W W, MEI R W, et al. Study on

- constructed wetland for advanced treatment of terminal effluent of wastewater treatment plant in Zhejiang province [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(2): 39-43.
- [42] 狄文亮, 任丹, 冯军坡, 等. 生态砾石床+碎石湿地在城市劣五类水体治理中的应用[J]. *湿地科学与管理*, 2024, 20(2): 61-65.
- DI W L, REN D, FENG J P, et al. Practical application of constructed wetland with ecological gravel bed + broken stones in the treatment of poor urban water bodies[J]. *Wetland Science & Management*, 2024, 20(2): 61-65.
- [43] 曹大伟, 沙玥, 金秋, 等. 多级复合型人工湿地工艺对污水厂尾水处理净化效果的试验研究[J]. *环境科技*, 2019, 32(3): 12-16.
- CAO D W, SHA Y, JIN Q, et al. Study on purification efficiency of multistage composite constructed wetland process on tail water treatment of wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 32(3): 12-16.
- [44] 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]. *中国给水排水*, 2022, 38(13): 111-116.
- PAN C R, CHEN J, PENG S C, et al. Advanced treatment efficiency of effluent from wastewater treatment plant by composite constructed cetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(13): 111-116.
- [45] 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.
- WANG X, ZHU Z J, YIN M M, et al. Application of hybrid constructed wetland in tail water treatment of municipal sewage plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(6): 97-101.
- [46] 管凛, 陶梦妮, 荆肇乾. 人工湿地—微生物燃料电池强化尾水脱氮产电效能[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(13): 7-13.
- GUAN L, TAO M N, JING Z Q. Enhanced nitrogen removal and electricity generation efficiency of constructed wetland-microbial fuel cells for purification of tail water from wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(13): 7-13.
- [47] 徐凤英. 硫氮比对污水厂尾水电解—人工湿地系统脱氮效能及路径的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- XU F Y. Effect of S/N ratio on nitrogen removal and pathways of electrolysis-constructed wetland for secondary effluent of municipal wastewater treatment plants [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [48] 于元超, 郑天宇, 王振, 等. 生物电化学措施下潜流人工湿地反硝化性能的强化及微生物学特征[J]. *安徽农业大学学报*, 2023, 50(1): 145-151.
- YU Y C, ZHENG T Y, WANG Z, et al. Enhancement of denitrification performance and microbiological characteristics of subsurface constructed wetland under bioelectrochemical measures [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(1): 145-151.
- [49] FAN X, LI J, HE L, et al. Co-occurrence of autotrophic and heterotrophic denitrification in electrolysis assisted constructed wetland packing with coconut fiber as solid carbon source[J]. *Chemosphere*, 2022, 301: 134762. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134762.
- [50] 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 等. 低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试[J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5509-5517.
- LIAO X K, YAN H L, WANG Z Y, et al. Advanced treatment of tail water using pilot-scale horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands in low-temperature seasons [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5509-5517.
- [51] SHEN Z Q, ZHOU Y X, LIU J, et al. Enhanced removal of nitrate using starch/PCL blends as solid carbon source in a constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 239-244. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.006.
- [52] 何强, 胡书山, 向泽毅, 等. 垂直流人工湿地系统净化污水厂尾水脱氮效果研究[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(8): 3956-3965.
- HE Q, HU S S, XIANG Z Y, et al. Study on the nitrogen removal ability of vertical flow constructed wetland treating tailwater of sewage plant [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(8): 3956-3965.
- [53] 中国环境科学学会. 污水处理厂尾水人工湿地深度净化技术指南: T/CSES 30—2021[S/OL]. (2021-07-15) [2024-06-14]. <http://down.foodmate.net/standard/yulan.php?itemid=105342>.
- Chinese Society for Environmental Sciences. Technical guide for constructed watland treatment of effluent from wastewater treatment plant: T/CSES 30—2021[S/OL]. (2021-07-15) [2024-06-14]. <http://down.foodmate.net/standard/yulan.php?itemid=105342>.
- [54] 郝晓地, 魏洪禹, 于文波, 等. 硫自养反硝化技术优劣辨析[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(4): 1-10.
- HAO X D, WEI H Y, YU W B et al. Analysis of the pros and cons for sulfur autotrophic denitrification technology [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(4): 1-10.
- [55] 熊江磊, 罗嘉豪, 严群. 改性蓝藻生物炭促进生物电化学系统阴极氢自养反硝化过程研究[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5): 1640-1646.
- XIONG J L, LUO J H, YAN Q. Research on modified cyanobacterial biochar promoting cathodic hydrogen autotrophic denitrification in bioelectrochemical system [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5): 1640-1646.
- [56] WANG H C, LIU Y, YANG Y M, et al. Element sulfur-based autotrophic denitrification constructed wetland as an efficient approach for nitrogen removal from low C/N wastewater[J]. *Water Research*, 2022, 226(1): 119258. DOI:10.1016/j.watres.2022.119258.

- [57] 王翔, 陈涛, 孔德芳, 等. 温度对硫自养水平潜流人工湿地脱氮效果的影响[J]. 中国给水排水, 2020, 36(23): 75–80.
WANG X, CHEN T, KONG D F, et al. Effect of temperature on denitrification of sulfur autotrophic horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(23): 75–80.
- (上接第 26 页)
- [40] BARISCI S, SURI R. Electrooxidation of short- and long-chain perfluoroalkyl substances (PFASs) under different process conditions[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105323. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105323.
- [41] 顾玉蓉, 陈鑫烨, 董紫君, 等. 碱性条件下的高频超声降解全氟辛酸[J]. 净水技术, 2021, 40(12): 116–121.
GU Y R, CHEN X Y, DONG Z J, et al. High frequency ultrasonic degradation of perfluorooctanoic acid under alkaline condition[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(12): 116–121.
- [42] LEI Y J, TIAN Y, SOBHANI Z, et al. Synergistic degradation of PFAS in water and soil by dual-frequency ultrasonic activated persulfate [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 388: 124215. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124215.
- [43] ILIĆ N, ANDALIB A, LIPPERT T, et al. Ultrasonic degradation of GenX (HFPO-DA)-Performance comparison to PFOA and PFOS at high frequencies[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 472: 144630. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144630.
- [44] ZHAN J, ZHANG A, HEROUX P, et al. Remediation of perfluorooctanoic acid (PFOA) polluted soil using pulsed corona discharge plasma [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 387: 121688. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121688.
- [45] MAHYAR A, MIESSNER H, MUELLER S, et al. Development and application of different non-thermal plasma reactors for the removal of perfluorosurfactants in water; A comparative study [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2019, 39(3): 531–544.
- [46] MALATJI N, MPUPA A, NOMNGONGO P N. Poly- and perfluoroalkyl substances in water: Occurrence, analytical methodologies, and remediations strategies; A comprehensive review[J]. Reviews in Analytical Chemistry, 2023, 42(1). DOI: 10.1515/revac-2023-0064.
- [47] BRILLAS E, SIRE S, OTURAN M A J C R. Electro-fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry[J]. Chemical Reviews, 2009, 109(12): 6570–6631.
- [48] YANG Q, YAN Y, YANG X, et al. The effect of complexation with metal ions on tetracycline degradation by $\text{Fe}^{2+/3+}$ and Ru^{3+} activated peroxymonosulfate[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132178. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132178.
- [49] MITCHELL S M, AHMAD M, TEEL A L, et al. Degradation of perfluorooctanoic acid by reactive species generated through catalyzed H_2O_2 propagation reactions [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2013, 1(1): 117–121.
- [50] YE Y, STEIGERWALD J M, BANG H, et al. H_2O_2 -catalyzed defluorination of perfluorooctanesulfonate (PFOS) by oxidized vanadium carbide MXene nanosheets [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(31): 16803–16814.
- [51] MEI Y, ZENG J, SUN M, et al. A novel Fenton-like system of Fe_2O_3 and NaHSO_3 for Orange II degradation [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 230: 115866. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.115866.
- [52] GOMEZ-RUIZ B, RIBAO P, DIBAN N, et al. Photocatalytic degradation and mineralization of perfluorooctanoic acid (PFOA) using a composite TiO_2 -rGO catalyst [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 950–957. DOI: 10.1016/j.cej.2017.07.076.
- [53] LI Z, ZHANG P, SHAO T, et al. Different nanostructured In_2O_3 for photocatalytic decomposition of perfluorooctanoic acid (PFOA) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 40–46. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.04.042.
- [54] CHEN M J, LO S L, LEE Y C, et al. Photocatalytic decomposition of perfluorooctanoic acid by transition-metal modified titanium dioxide [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 288: 168–175. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.02.004.
- [55] QIN W, LIU Z, LIN Z, et al. Unraveling the multiple roles of VUV mediated hydroxyl radical in VUV/UV/chlorine process: Kinetic simulation, mechanistic consideration and byproducts formation [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 137066. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137066.
- [56] 杨世迎, 张宜涛, 郑迪. 高级还原技术: 一种水处理新技术 [J]. 化学进展, 2016, 28(6): 8–8.
YANG S Y, ZHANG Y T, ZHENG D. Advanced reduction processes: A new technology for water treatment [J]. Progress in Chemistry, 2016, 28(6): 8–8.
- [57] SONG Z, TANG H, WANG N, et al. Reductive defluorination of perfluorooctanoic acid by hydrated electrons in a sulfite-mediated UV photochemical system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 262: 332–338. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.08.059.
- [58] GUO C, ZHANG C, SUN Z, et al. Synergistic impact of humic acid on the photo-reductive decomposition of perfluorooctanoic acid [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 360: 1101–1110. DOI: 10.1016/j.cej.2018.10.204.