

曾琳, 袁悦, 王盼, 等. 人工湿地堵塞机制与防治措施研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(11):18-26.

ZENG L, YUAN Y, WANG P, et al. Research progress on clogging mechanism and prevention measures for constructed wetland[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11):18-26.

人工湿地堵塞机制与防治措施研究进展

曾琳, 袁悦*, 王盼, 谭学军

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要 人工湿地为污水处理提供了一种土地密集型、低能耗、操作要求较低绿色技术。然而, 堵塞被认为是影响人工湿地可持续运行的主要影响因素之一。因此, 文章从物理、生物和化学3个维度总结了人工湿地堵塞机制, 探讨了人工湿地堵塞评估技术, 包括水力传导率测量、示踪试验、分析堵塞物性质、现场监测、数学模型模拟等, 以期为准确选择人工湿地防治措施提供参考; 从预处理、操作负荷、基质优化和停床轮休探讨了堵塞的预防措施, 旨在延迟或最小化堵塞相关的负面影响; 从基质、植物和原位修复总结了堵塞的治理措施, 以期为解决人工湿地堵塞问题提供技术支撑。

关键词 人工湿地 污水处理 堵塞机制 评估技术 预防措施 治理措施

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)11-0018-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.11.003

Research Progress on Clogging Mechanism and Prevention Measures for Constructed Wetland

ZENG Lin, YUAN Yue*, WANG Pan, TAN Xuejun

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract Constructed wetlands provide a land-intensive, low-energy, and less-operational-requirements for wastewater treatment. However, clogging is considered as one of the main factors affecting the sustainable operation of constructed wetlands. Therefore, this paper summarizes the clogging mechanism of constructed wetlands from the three dimensions of physics, biology and chemistry. In order to select prevention and control measures reasonably, evaluation techniques for clogging constructed wetlands are studied, including hydraulic conductivity measurement, tracer test, blockages properties analysis, field monitoring, and mathematical model. Clogging prevention measures from pretreatment, operating load, substrate optimization, and bed rotation are investigated, aiming at delaying or minimizing clogging-related negative effects. Moreover, clogging control measures from substrates, plants, and in situ remediation are also discussed in order to provide technical support for solving the clogging problem of constructed wetlands.

Keywords constructed wetland wastewater treatment clogging mechanism evaluation technology prevention measure control measure

近年来, 人工湿地因其成熟的工艺及生态友好型特点, 在污水处理领域中得到了广泛应用。与传统污水处理厂相比, 人工湿地在建设和运营成本方面具有运行能耗低、工艺设备简单、运转维护方便等

明显优势。污水通过人工湿地系统中基质、植物和微生物的协同作用得到净化。基质是人工湿地不可或缺的重要组成部分, 大多数物理、化学和生物反应都在基质中进行。基质不仅支持人工湿地植物的生长, 为生物膜提供附着物, 而且在污染物去除中发挥重要作用^[1]。研究^[2]表明, 多种材料可以用作人工湿地的基质, 包括天然材料(如砾石和沙子)、农业/工业废物(如牡蛎壳和粉煤灰)和人工材料(如活性炭和陶粒)。植物是污水处理的核心, 在吸收、降解和去除污水中的污染物方面发挥着关键作用, 全世界已有150多种植物在人工湿地中生长, 植物对氮、磷

[收稿日期] 2022-09-13

[基金项目] 国家重点研发计划(2019YFC0408202); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(20dz1207703)

[作者简介] 曾琳, 女, 硕士, 研究方向为水污染控制工程, E-mail: 15129940450@163.com。

[通信作者] 袁悦, 女, 博士, 研究方向为固废处理处置及资源化, E-mail: yuanyue@smedi.com。

污染物去除贡献率占比较大,其中 15%~80% 的氮和 24%~80% 的磷是通过植物去除的^[3]。植物还可在污水中积累有毒元素,如重金属和抗生素^[4]。微生物的代谢直接影响人工湿地有机物的降解与转化,微生物群落是人工湿地物质循环和高效脱氮的重要保障,微生物参与的硝化反硝化作用是去除污水中氮的主要途径,可占 66.9%~80.5%^[5]。

然而,人工湿地在实际应用中也存在许多问题,如所需面积大、冬季处理效率低,其中堵塞问题严重影响了人工湿地的可持续运行^[6]。堵塞涉及物理、化学和生物过程,无机和有机颗粒的滞留、化学沉淀物的沉积和积累以及生物膜和植物生物量的发展和衰变,均能导致基质逐渐堵塞。随着人工湿地出现堵塞现象,基质的渗透系数急剧下降,会导致污水积聚在湿地表面,引发恶臭和环境长期恶化,阻隔氧气向基质层的扩散并降低污染物的去除效率,使出水水质达不到设计标准,同时缩短人工湿地的使用寿命。最初对人工湿地使用寿命的预测在 50~100 年^[7],这一预测已逐渐缩短至 10~15 年。Hua 等^[8]研究发现,基质堵塞还会降低微生物群落的丰富性和多样性,对湿地生态系统的生物降解过程产生负面影响。因此,系统阐述人工湿地堵塞机制、堵塞评估技术以及防治措施的研究进展,有助于人工湿地的可持续性运行。

1 人工湿地堵塞机制

人工湿地堵塞主要由物理、生物和化学因素引起。物理因素是指悬浮物质(SS)进入人工湿地降低其孔隙度;生物因素是人工湿地中微生物细胞及其相关代谢产物,如胞外聚合物(EPS)累积造成堵塞;化学因素是指基质和进入人工湿地的不同组分之间,形成了不溶性无机盐沉淀造成孔隙堵塞^[9]。

1.1 物理堵塞

在实际工程应用中,物理堵塞占主导地位,是由沉积在人工湿地表面、基质内部的有机和无机 SS 以

及难降解有机物引起的。图 1 显示了人工湿地物理堵塞形成过程。堵塞机理主要为表面堵塞、内部堵塞和桥接,粒径较大的 SS 无法进入基质孔隙,因此,SS 会积聚在表面,并通过形成毯状沉积层导致表面堵塞,随后细颗粒的流入会将其压实;粒径较小的 SS 通过孔隙深入基质,会被过滤并困在孔喉中,累积的固体作为“筛子”形成“桥接”,从而进一步限制较大的 SS 流过,导致内部堵塞^[10]。人工湿地物理堵塞一开始发生在表层以下 15~30 cm 处,最终在整个基质中形成不同程度的堵塞^[11]。人工湿地基质过滤的物质由有机物和无机物组成,无机物更容易造成堵塞^[12]。Ye 等^[13]使用 5 种物质定量描述人工湿地堵塞,发现堵塞物中蛋白质、多糖、腐植酸、核酸、无机物的比例分别为 9.86%、1.90%、5.68%、3.95%、49.87%。而 Nguyen^[14]发现湿地的多孔介质被有机物堵塞,90% 以上为难降解有机化合物,其中 63%~96% 为腐植酸和黄腐酸。

人工湿地中物理堵塞按来源可分为外源性和内源性物理堵塞,外源性物理堵塞物为进水中的 SS,内源性物理堵塞物包括基质磨损和植物产生的无机碎屑。植物根茎和根系的生长以及残留物的形成和积累是人工湿地有机物的重要来源之一。Pedescoll 等^[15]发现,在湿地中种植芦苇,运行 3 年后发生堵塞,湿地中积累的根系占总积累固体的 35%~70%。Tanner 等^[16]发现,未种植植物的人工湿地有机物平均积累量为 0.40~2.30 kg/m²,而种植植物的人工湿地接近 4.00 kg/m²,美国肯塔基州人工湿地表层植物残留物的积累量可达 2.41 kg/m²。陈晓艺等^[17]认为木质素是影响人工湿地渗透系数的重要因素,相比于香蒲和芦苇,种植木质素含量低的美人蕉的湿地渗透系数高,因为,木质素含量低的物质分解速率高。然而,其他研究^[18]表明植物可通过根系和根茎生长引起的孔隙空间扩张使基质更具多孔性,进而减轻堵塞,植物的存在可丰富微生物群落结构以提高累积固体的降解速率。



图 1 人工湿地物理堵塞形成过程^[19]

Fig. 1 Physical Clogging Formation Process in Constructed Wetland^[19]

1.2 生物堵塞

人工湿地中大部分微生物以生物膜的形式附着在基质表面,尽管生物膜只占据孔隙空间的一小部分,Xia等^[20]发现曝气区微生物的体积小于基质孔隙的2%,但其可以显著降低湿地的水力传导率,导致生物堵塞。图2显示了人工湿地生物堵塞形成过程。大量的生物膜和微生物分泌的EPS积聚在基质表面形成致密的黏性层,同时EPS吸附污水中的有机物和无机物,形成紧密的堵塞层。此外,胶状污泥中大量有机物(腐殖质和多糖)也积聚在基质表面。虽然EPS高吸附性可以增强氨氮、 NO_3^- -N和 NO_2^- -N的去除效率^[21],但高EPS产量也可能形成致密的堵塞层,导致人工湿地处理性能较差。相关研究^[22]也表明,人工湿地堵塞程度与EPS积累呈正相关性。根据EPS状态,林莉莉等^[23]将生物堵塞分为3个阶段:EPS诱导期、堵塞期和堵塞发展期。进水有机负荷较高,会加剧生物堵塞。多数学者^[10]认为温度升高,酶活性增强,有机物的降解速率加快,会导致生物堵塞程度加剧。与物理堵塞不同,生物堵塞主要体现在人工湿地长期运行后期。

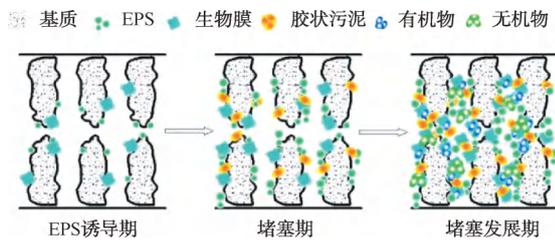


图2 人工湿地生物堵塞形成过程^[19]

Fig. 2 Bioclogging Formation Process in Constructed Wetland^[19]

1.3 化学堵塞

化学堵塞是由于污水中存在 PO_4^{3-} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等离子和一些大分子络合物,与基质中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 等离子形成胶体、沉淀或气体,图3显示了人工湿地化学堵塞形成过程。人工湿地化学堵塞主要发

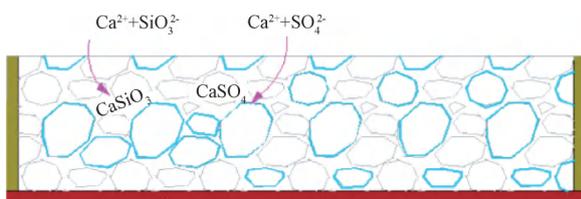


图3 人工湿地化学堵塞形成过程^[19]

Fig. 3 Chemical Clogging Formation Process in Constructed Wetland^[19]

生在磷和重金属的去除过程中,尤其是通过基质吸附去除磷,湿地中50%~70%的永久性磷是通过非生物过程截留^[24]。磷去除能力取决于基质中钙、铁、铝或氧化物、氢氧化物含量,钢渣含36.7%~44.3%的 CaO 、1.5%~16.9%的 Al_2O_3 和1.1%~24.2%的 Fe_2O_3 ^[25],赤泥含46.02%的 CaO 、6.93%的 Al_2O_3 和12.76%的 Fe_2O_3 ^[26],是去除磷的有效基质,也更容易导致化学堵塞。Hua等^[27]报道人工湿地孔隙中的截留气体,如 H_2S 和 CH_4 也会降低湿地渗透系数。相比物理和生物堵塞,化学堵塞对人工湿地基质的影响有限^[19]。

2 人工湿地堵塞评估

大多数堵塞物积累发生在地下,并且堵塞程度在空间和时间上都有所不同,堵塞的可视化是复杂的。因此,为准确选择防治措施并解决人工湿地的堵塞问题,可先评估堵塞物的分布及堵塞程度。

2.1 常用堵塞评估技术

目前,水力传导率测量、示踪试验和分析堵塞物性质等是评估人工湿地堵塞程度常用的技术方法。水力传导率法是通过测量不同点位的水力梯度,再使用达西定律计算测量点位间的平均水力传导率,但其反映的是测量点间的平均渗透系数,并不能反映湿地具体位置的渗透系数^[28]。示踪试验是将示踪剂注入人工湿地,并连续监测出水浓度,通过绘制示踪剂浓度随时间的响应曲线(RTD)研究系统水力停留时间、内部流体动力学,以及判断短流、死区比例,常用的示踪剂包括荧光素、罗丹明、氯离子和溴化物离子,但由于其高持久性,可能会给下游带来环境风险,且单个示踪剂试验的结果并不具代表性^[29]。堵塞物表征方法包括累积固体分析及床层孔隙率测定。

2.2 现场监测堵塞技术

现场监测堵塞技术,如电阻率法、探地雷达(GPR)和微生物燃料电池(MFC)也已被用于量化堵塞物,其在人工湿地系统内造成的干扰较小,可以快速、有效反映湿地堵塞程度。Liu等^[30]研究发现,湿地电阻率通常与堵塞物的体积分数呈负相关性,电阻率法为评估堵塞程度提供了一种有效的方法,但其横向定位较为准确,纵向探测效果不佳。Matos等^[28]发现,GPR可通过分析孔隙中的图像和波响应

间接估算孔隙率,得到人工湿地内部的能量衰减图像,是表征湿地堵塞程度合适的非侵入性方法。MFC 是一种生物电化学装置,可定量评估基质中保留的有机颗粒总量。Corbella 等^[31]研究表明,MFC 中积聚的污泥对其产电性能有直接影响,随着人工湿地堵塞程度的增加,MFC 中污泥量增多而转移的电子量减少,导致电压减小。但这些监测方法专业性较强,通常操作复杂且成本较高,其实用性需进一步讨论。

2.3 数学模型模拟技术

数学模型也越来越多地应用于研究人工湿地的水力特性,预测湿地内部水和溶质的传输过程,应用最广泛的数学模型主要包括 Ryszard-Blazejewski 模型、Langergraber 模型和 Kozeny-Gaman 模型^[19]。

Samsø 等^[32]使用 COMSOL Multiphysics 和 MATLAB 开发数学模型,模拟了人工湿地中的生物堵塞。Hua 等^[33]提出的模型综合考虑人工湿地中累积的 SS、生物膜和植物根系来研究堵塞,该复合模型能够定量评估人工湿地系统的堵塞行为和运行特性。目前研究还未全面了解湿地堵塞的机理,而现有模型仅反映了当前已知的堵塞场景,因此,单一模型或复合模型并不能完全揭示堵塞过程。

3 人工湿地堵塞防治措施

基于人工湿地堵塞机制并结合堵塞评估结果,总结了应对人工湿地堵塞的常用措施,包括预防措施和治理措施,如表 1 所示。预防措施旨在延迟或最小化堵塞相关的负面影响,而治理措施是通过采用相应修复措施实现原位修复。

表 1 人工湿地堵塞控制技术

Tab. 1 Clogging Control Technology in Constructed Wetland

策略	具体措施	缓解效果	评价	文献	
预防措施	预处理	沉淀池、化粪池 生物处理	去除 50%~70% 总悬浮固体(TSS) 去除 > 90% SS 和 > 33% COD	推迟堵塞发生时间,增加运行成本及维护难度	[34] [10]
	优化操作负荷	有机负荷设计小于 25 g/(m ² ·d) /		示范项目连续多年成功运行,未发生堵塞现象	[35]
	基质优化	基质材料、粒径 基质填配方式	EPS 降低约 30% 有机物减少约 70%	选择合适的基质有利于湿地稳定运行	[36] [37]
	停床轮休	湿地轮休	渗透率恢复超过 70%	无法满足连续处理污水的要求	[38]
治理措施	基质修复	基质更换、反冲洗	出水速率提高 2. 10 L/min	最直接和常用,但工程量大	[39]
	植物修复	根际复氧能力强、分泌难的植物	增加 39% 孔隙率	为微生物生长繁殖提供载体,并通过制造“管道”延缓堵塞	[40]
		强氧化剂	恢复 15%~23% 孔隙率	不易控制,会造成不可修复损害	[41]
	原位修复	酶、生物表面活性剂 湿地动物	恢复 83% 有效孔隙率 增加 11%~13% 孔隙率	环境友好性,实际工程有待进一步验证	[42] [43]

3.1 预防措施

3.1.1 预处理

人工湿地预处理可以最大程度地减少进入湿地的 SS,降低有机负荷,并有效恢复基质的渗透性,常用的预处理方法包括格栅、水解酸化、混凝沉淀、化粪池和上流式厌氧污泥床等。世界卫生组织报道,目前人工湿地前通常采用沉淀池或化粪池,能有效去除 SS、有机物以及病原体,实现 50%~70% 的 TSS 去除率^[34]。Caselles-Osorio 等^[44]研究表明,与沉淀池相比,物化预处理可以将人工湿地的寿命延长约 10 年。周兴伟等^[45]采用“生物预处理+人工湿地”组合工艺处理城镇污水,生物预处理对 COD、氨氮和 PO₄³⁻-P 可实现 93.5%、67.6% 和 79.6% 的去除

率。此外,人工湿地是土地密集型处理工艺,在湿地前设置适当的厌氧预处理可以减少 36%~40% 的施工成本^[34]。

3.1.2 优化操作负荷

在高水力负荷、高有机负荷和高 SS 负荷条件下,人工湿地发生堵塞的可能性更高。Winter 等^[46]在对德国 21 个人工湿地的调查中发现,TSS 和 COD 的负荷率与堵塞的严重程度呈正相关性;Platzer 等^[35]建议将湿地的有机负荷控制在 25 g BOD₅/(m²·d) 内。我国制定的人工湿地技术标准中,如生态环境部发布的《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010),也对 COD 负荷、BOD₅ 负荷、水力负荷等指标作出规定,各标准中建议的 BOD₅ 负荷设计

值大多在 $12 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 以下^[47], 生态环境部规范对进水 SS 限值为 $80 \text{ mg}/\text{L}$, 水平潜流人工湿地的最高水力负荷为 $500 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 而垂直潜流人工湿地最高为 $1000 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。Li 等^[48]调查研究 1988 年—2016 年中国 168 个人工湿地工程案例, 发现垂直潜流人工湿地的 BOD_5 负荷多为 $10.6 \sim 55.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 而西方国家多为 $6 \sim 10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

3.1.3 基质优化

基质的吸附、粒径、孔隙率和级配与基质渗透性密切相关, 直接影响人工湿地的堵塞程度。具有小尺寸和不均匀级配的基底有利于过滤 SS, 然而基质尺寸越小, 孔隙率降低速率越高, 更容易发生堵塞。在满足出水水质的条件下, 尽量选择粒径大、孔隙率高的基质, 增大渗透性。使用具有较大孔隙率和渗透率的陶瓷砂、蛋壳、粉煤灰陶粒和水泥砖作为湿地基质有助于缓解堵塞^[49]。Yang 等^[50]研究表明, 当沸石基质的粒径为 $3 \sim 4 \text{ mm}$ 时, 在保证净化效果的同时可以防止堵塞, 《人工湿地污水处理技术规程》(DG/TJ 08-2100—2012) 中建议基质粒径为 $2 \sim 6 \text{ mm}$, 《农村生活污水人工湿地处理工程技术规范》(DB 11/T 1376—2016) 建议粒径为 $0.2 \sim 5 \text{ mm}$ ^[47]。

单一基质填配方式容易造成堵塞, 堵塞一般发生在人工湿地表层, 使进水不能深入底层, 填料得不到充分利用, 且表层溶解氧不能深入底层, 微生物的有氧活动只能部分进行, 造成人工湿地整体处理效果下降, 因此, 可以采取在人工湿地不同深度设置不同类型的基质, 以防止堵塞。Zhao 等^[51]使用正级配 (即上部小粒径基质, 下部大粒径基质) 和反级配 (即上部大粒径基质, 下部小粒径基质) 模式, 发现反级配人工湿地不仅能取得很好的去除效果, 而且在延缓基质堵塞方面有着明显的优势。詹德昊等^[37]通过使用反级配模式, 最大有机物累积量可减少约 70%。王国强等^[52]采用沸石/砾石填料组合优化潜流人工湿地的填料基质, 延长了基质运行寿命。

对于物理堵塞, 具有高孔隙率和低磨损的基质 (如塑料、橡胶、膨胀黏土和复合基材) 优于耐磨基材 (如砾石和高炉矿渣), 低磨损基质可减少物理堵塞物质^[49]; 化学堵塞主要发生在去除磷和金属的过程中, 导致胶体或沉淀物的积聚, 一些基质, 如砾石、土壤、锰砂、沸石和椰子壳, 具有良好的金属去除性能, 容易导致金属堵塞, 而除磷效率高、易产生含磷沉淀物的基质材料有贝壳、钢渣、高炉渣、沸石和土

壤等^[1]; 对于生物堵塞, 生物炭具有多种官能团, 可以改变胞外蛋白的结构、可溶性微生物产物含量和微生物群落结构, 以缓解生物堵塞。Deng 等^[36]研究在人工湿地中添加 0、10%、20% 和 30% 的生物炭, 总 EPS 含量分别为 1182.65 、 1113.50 、 $994.04 \text{ g}/\text{m}^3$ 和 $741.28 \text{ g}/\text{m}^3$, 生物炭添加使 EPS 含量降低 $5.85\% \sim 37.32\%$ 。

3.1.4 停床轮休

停床轮休是指基质运行一段时间后闲置, 一方面使氧气进入湿地系统, 增加好氧微生物的活性, 加快降解有机物速率; 另一方面轮休时系统停止进水, 营养物得不到持续补充, 微生物进入内源呼吸期, 消耗自身 EPS 并逐渐老化死亡, 避免了湿地中 EPS 积累, 有效缓解湿地生物堵塞。Hua 等^[53]在垂直潜流人工湿地中应用静息操作, 结果表明人工湿地休息 3、7、10 d 后, 导水率分别增加了 2.0、2.6、3.5 倍, EPS 减少、生物膜衰变以及生物膜结构变化是静息操作缓解堵塞的主要原因。唐平等^[38]研究发现, 可溶性有机物堵塞、不溶性有机物堵塞装置分别轮休至第 9 d、第 20 d, 人工湿地基质的渗透率恢复超过 70%。然而, 由于轮休后 EPS 和生物量减少, 人工湿地的处理性能降低, TN、TP 和 COD 的去除率都比轮休前低。因此, 应结合人工湿地实际运行情况、基质渗透系数恢复目标等因素, 合理确定轮休时间。

3.2 堵塞治理措施

3.2.1 基质更换与反洗

Platzer 等^[35]研究发现, 在湿地运行期间, 积累的有机物大部分集中在表层, 堵塞主要发生在上层 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 处, 定期更换湿地系统基质, 特别是表层填料, 可以有效治理湿地表层堵塞, 保证人工湿地的持续稳定运行。马飞等^[39]使用反冲洗方法, 通过气泵将空气泵入反冲洗进水管形成气液两相流, 对湿地进行大强度反冲洗, 可以将堵塞在孔隙中的有机物和无机物冲洗脱落, 随水流流出达到缓解堵塞的目的。但据统计^[19], 反冲洗操作经济成本约为 $0.2 \text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{次})$, 且会对湿地内部微生物膜造成破坏, 后续挂膜需要较长时间。为减少对人工湿地中植物的影响, 反冲洗宜在植物枯萎的秋冬季进行。

3.2.2 植物修复

湿地中大型植物的根系为微生物生长繁殖和生物膜形成提供了载体, 反过来又促进了根际修复过程, 如根际过滤、根际降解, 生长的根系有助于降解

有机污染物,并通过制造管道避免人工湿地堵塞^[54]。湿地植物具有吸收、转化和分泌氧气能力,这有助于延缓堵塞。芦苇、狭叶香蒲、睡莲和美人蕉等植物的根系表现出很强的富氧能力,且很少分泌难降解物质^[55],在缓解基质堵塞和显著提高水力效率方面发挥了积极作用。王为东等^[56]通过白洋淀自然湿地现场研究,发现大型水生植物组成了庞大的湿地根孔网络,其水分入渗率是基质土壤的20倍左右。宋志鑫等^[57]研究发现,美人蕉根系对人工湿地水力特性有较明显的改善作用,水力效率由64%提高到83%。Teixeira等^[40]发现植物根系仅占基质孔隙的3%~4%,对堵塞过程影响不大,根系在基质中形成许多微小的气室和间隙,提高了人工湿地的导水性,使水流更加均匀。此外,植物根部的通气组织会从根部释放氧气。文献^[58]报道,芦苇属植物的氧释放速率为 $0.02 \sim 12 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,沉水植物为 $0.5 \sim 5.2 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,漂浮植物为 $0.25 \sim 9.6 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。但是,植物叶片和根系的死亡和腐烂会积累大量有机物,加剧基质堵塞。Nguyen等^[14]建议人工湿地选择分泌难降解物质少的植物,并定期收割植物地上部分。

3.2.3 原位修复

原位修复指通过向人工湿地投加强氧化剂、表面活性剂等化学药剂或者湿地动物(如蚯蚓和泥鳅),破坏堵塞物的絮凝结构,溶解部分有机物质,从而恢复基质渗透性。由于对环境影响较小、能最大程度地缓解堵塞、避免损害人工湿地、节约成本,原位修正被广泛使用。Hua等^[41]向人工湿地中添加HCl、NaOH和NaClO可分别恢复15%、18%和23%的有效孔隙率,NaOH和NaClO溶解了有机物中的蛋白质、多糖成分,而HCl释放了被有机物包裹的气体。但化学药剂会对湿地植物造成不可修复损害,因此,实际应用的工程案例较少,多停留在试验阶段。具有良好溶解效果和环境友好性的枯草杆菌、酶与生物表面活性剂等成为原位修复首选。Tang等^[59]研究采用添加枯草杆菌来减少垂直流人工湿地的生物堵塞,发现其可以降解堵塞物中的多糖,从而增加基质孔隙率。Tang等^[60]向人工湿地添加 α -糖化酶和 β -葡聚糖酶,发现酶处理大大减少了生物堵塞,处理后的峰值导水率增加了16倍。酶能有效催化水解大分子聚合物,且易于分解,但其成

本较高。Cao等^[42]研究添加生物表面活性剂鼠李糖脂(RL)减少人工湿地的生物堵塞,发现其能有效溶解和分散EPS,使人工湿地有效孔隙率恢复到初始值的83%。RL可生物降解,具有低毒性和成本低的优点,但其对湿地的长期影响未知。

研究预测蚯蚓可以在人工湿地中运输转化或分解代谢堵塞物,且其钻土等生命活动会在湿地内部形成微小孔道,从而减轻湿地的堵塞状况。Wang等^[43]将蚯蚓引入人工湿地后,上部基质(0~20 cm)的有效孔隙率增加了11%~13%,渗透率增加了 $0.015 \sim 0.026 \text{ cm/s}$ 。Ye等^[61]发现蚯蚓的代谢和吸收可有效降低堵塞物含量,蛋白质和多糖减少,堵塞物黏度降低了 $0.0082 \text{ mPa} \cdot \text{s}/(\text{g} \cdot \text{d})$,蚯蚓能以 $0.33 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 的速率增加基质孔隙度,但蚯蚓生物技术使用受到其适应性的限制。

4 结论

人工湿地因其处理效果好、管理简便和环境友好等特点,具有经济、社会、环境三重效应,在污水处理领域得到广泛应用。然而,堵塞成为影响人工湿地工程应用的主要因素。虽然相关研究已对人工湿地堵塞机理、影响因素、评估技术和缓解措施做了探讨,但是人工湿地堵塞问题仍然日益突出。因此,人工湿地堵塞相关研究仍需从以下几个方面进一步开展。

(1)水力传导率测量、示踪测试和堵塞物的物理化学特性等方法可对人工湿地堵塞进行评估,每种方法都提供了其他方法无法提供的信息,目前现场监测技术和数学模型方法也取得了进展,将数值模拟与多种现场监测方法相结合进行堵塞预测和预警,可以更准确描述和理解人工湿地的堵塞动力学。

(2)预处理、优化操作负荷和选择合适的基质来可以使堵塞的负面影响最小化。其中,开发具有适当粒度、高孔隙度、高导水性的基质研究有待进一步加强。一方面,利用工业副产品作为基质实现资源利用;另一方面,探索新型材料,更可控且易更换,针对性地解决湿地堵塞,如生物炭基质可降低EPS含量缓解生物堵塞。

参考文献

- [1] WANG Y, CAI Z, SHENG S, et al. Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2020, 701:

134736. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134736.
- [2] CHENG G, LI Q, SU Z, et al. Preparation, optimization, and application of sustainable ceramsite substrate from coal fly ash/waterworks sludge/oyster shell for phosphorus immobilization in constructed wetlands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 572–581. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.102.
- [3] GREENWAY M, WOOLLEY A. Changes in plant biomass and nutrient removal over 3 years in a constructed wetland in Cairns, Australia[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44:303–310. DOI:10.2166/wst.2001.0844.
- [4] LIU L, LIU Y H, LIU C X, et al. Potential effect and accumulation of veterinary antibiotics in *Phragmites australis* under hydroponic conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 53: 138–143. DOI:10.1016/j.ecoleng.2012.12.033.
- [5] ZHANG S, XIAO R, LIU F, et al. Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 363–369. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.10.021.
- [6] NIVALA J, KNOWLES P, DOTRO G, et al. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Measurement, modeling and management[J]. *Water Research*, 2012, 46: 1625–1640. DOI:10.1016/j.watres.2011.12.051.
- [7] CONLEY L M, DICK R I, LION L W. An assessment of the root zone method of waste-water treatment[J]. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1991, 63(3): 239–247.
- [8] HUA G, KONG J, JI Y, et al. Influence of clogging and resting processes on flow patterns in vertical flow constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1142–1150. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.113.
- [9] FANG Y, KONG L, ZHANG P, et al. Fifteen-year analysis of constructed wetland clogging: A critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132755. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132755.
- [10] LI Y H, PENG L L, LI H B, et al. Clogging in subsurface wastewater infiltration beds: Genesis, influencing factors, identification methods and remediation strategies[J]. *Water Science and Technology*, 2021, 83: 2309–2326. DOI: 10.2166/wst.2021.155.
- [11] 付贵萍, 吴振斌, 张晟, 等. 构建湿地堵塞问题的研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(3): 144–149.
- FU G P, WU Z B, ZHANG S, et al. Studies on clogging of the constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 144–149.
- [12] 王振, 张彬彬, 向衡, 等. 垂直潜流人工湿地堵塞及其运行效果影响研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(8): 2494–2502.
- WANG Z, ZHANG B B, XIANG H, et al. Clogging of vertical subsurface flow constructed wetland and its effects on purifying efficiency[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8): 2494–2502.
- [13] YE J, LI H, ZHANG C, et al. Classification and extraction methods of the clog components of constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 70: 327–331. DOI:10.1016/j.ecoleng.2014.06.028.
- [14] NGUYEN L M. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 16: 199–221. DOI:10.1016/S0925-8574(00)00044-6.
- [15] PEDESCOLL A, CORZO A, ALVAREZ E, et al. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation[J]. *Water Research*, 2011, 45: 3579–3589. DOI: 10.1016/j.watres.2011.03.049.
- [16] TANNER C C, SUKIAS J P. Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32: 229–239. DOI:10.1016/0273-1223(95)00624-9.
- [17] 陈晓艺, 徐德福, 李映雪, 等. 三种水生植物枯落物分解特征与人工湿地渗透系数[J]. *湿地科学*, 2017, 15(5): 740–746.
- CHEN X Y, XU D F, LI Y X, et al. Characteristics of litter decomposition of 3 kinds of aquatic plants and permeability coefficient of constructed wetland[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(5): 740–746.
- [18] HUA G F, ZHAO Z W, KONG J, et al. Effects of plant roots on the hydraulic performance during the clogging process in mesocosm vertical flow constructed wetlands[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21: 13017–13026. DOI:10.1007/s11356-014-3249-1.
- [19] WANG H, SHENG L, XU J. Clogging mechanisms of constructed wetlands: A critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126455. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126455.
- [20] XIA L, GAO Z, XU H, et al. Variations in bacterial community during bioclogging in managed aquifer recharge (MAR): A laboratory study[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 147: 104843. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.104843.
- [21] ZHOU X, CHEN Z, LI Z, et al. Impacts of aeration and biochar addition on extracellular polymeric substances and microbial communities in constructed wetlands for low C/N wastewater treatment: Implications for clogging[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 396: 125349. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125349.
- [22] ZHOU Y, LUO S, YU B, et al. A comparative analysis for the development and recovery processes of different types of clogging in lab-scale vertical flow constructed wetlands[J]. *Environmental*

- Science and Pollution Research, 2018, 25: 24073 - 24083. DOI: 10.1007/s11356-018-2418-z.
- [23] 林莉莉, 鲁纳, 肖恩荣, 等. 人工湿地生物堵塞研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 207-214.
LIN L L, LU R, XIAO E R, et al. Bioclogging in constructed wetlands; State-of-the-art [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42(6): 207-214.
- [24] JI Z, TANG W, PEI Y. Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal[J]. Chemosphere, 2022, 286: 131564. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.131564.
- [25] PARK J H, KIM S H, DELAUNE R D, et al. Enhancement of phosphorus removal with near-neutral pH utilizing steel and ferronickel slags for application of constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 612-621. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.06.052.
- [26] LI Y, LIU C, LUAN Z, et al. Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137: 374-383. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.011.
- [27] HUA G F, ZHU W, ZHAO L F, et al. Applying solubilization treatment to reverse clogging in laboratory-scale vertical flow constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 2010, 61: 1479-1487. DOI:10.2166/wst.2010.038.
- [28] MATOS M P, VON SPERLING M, MATOS A T, et al. Clogging in constructed wetlands; Indirect estimation of medium porosity by analysis of ground-penetrating radar images [J]. Science of the Total Environment, 2019, 676: 333-342. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.168.
- [29] 张明珍, 徐栋, 武俊梅, 等. 人工湿地堵塞监测方法的研究进展[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(3): 121-126.
ZHANG M Z, XU D, WU J M, et al. Review of methods for monitoring clogging of constructed wetlands [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(3): 121-126.
- [30] LIU H Q, HU Z, SONG S Y, et al. Quantitative detection of clogging in horizontal subsurface flow constructed wetland using the resistivity method [J]. Water, 2018, 10(10): 1334. DOI: 10.3390/w10101334.
- [31] CORBELLA C, GARCIA J, PUIGAGUT J. Microbial fuel cells for clogging assessment in constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 1060-1063. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.06.163.
- [32] SAMSO R, GARCIA J, MOLLE P, et al. Modelling bioclogging in variably saturated porous media and the interactions between surface/subsurface flows: Application to constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 165: 271-279. DOI:10.1016/j.jenvman.2015.09.045.
- [33] HUA G F, LI L, ZHAO Y Q, et al. An integrated model of substrate clogging in vertical flow constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 119: 67-75. DOI:10.1016/j.jenvman.2013.01.023.
- [34] ALVAREZ J A, RUIZ I, SOTO M. Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2008, 33: 54-67. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.02.001.
- [35] PLATZER C, MAUCH K. Soil clogging in vertical flow reed beds-mechanisms, parameters, consequences and solutions [J]. Water Science and Technology, 1997, 35: 175-181. DOI: 10.1016/S0273-1223(97)00066-8.
- [36] DENG C, HUANG L, LIANG Y, et al. Response of microbes to biochar strengthen nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands; Microbial community structure and metabolite characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133687. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.133687.
- [37] 詹德昊, 吴振斌, 徐光来. 复合垂直流构建湿地中有机质积累与基质堵塞 [J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 457-461.
ZHAN D H, WU Z B, XU G L. Organic matter accumulation and substrate clogging in integrated vertical flow constructed wetland [J]. China Environmental Science, 2003, 23(5): 457-461.
- [38] 唐平, 项泽顺, 于博海, 等. 轮休对垂直流人工湿地堵塞恢复的影响及其动力学特性 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 234-240.
TANG P, XIANG Z S, YU B H, et al. Effect of resting operation on recovery of clogging and its dynamics for virtual flow constructed wetlands [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 234-240.
- [39] 马飞, 蒋莉, 熊洁羽, 等. 反冲洗措施改善垂直潜流人工湿地水力特性的研究 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 46-49.
MA F, JIANG L, XIONG J Y, et al. Changes of hydraulics of constructed wetlands after backwashing [J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(7): 46-49.
- [40] TEIXEIRA D L, DE MATOS A T, DE MATOS M P, et al. Evaluation of the effects of drainage and different rest periods as techniques for unclogging the porous medium in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 104-108. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.042.
- [41] HUA G F, ZHU W, ZHANG Y H. A conceptual approach based on suspended solids to estimate clogging time in constructed wetlands [J]. Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2010, 45: 1519-1525. DOI: 10.1080/10934529.2010.506105.
- [42] CAO Y, LI Y, REN L, et al. Bio-clogging mitigation in vertical subsurface flow constructed wetlands using rhamnolipids-citric acid compound [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 426: 131278. DOI:10.1016/j.cej.2021.131278.

- [43] WANG D B, ZHANG Z Y, LI X M, et al. Effects of earthworms on surface clogging characteristics of intermittent sand filters[J]. Water Science and Technology, 2010, 61: 2881–2888. DOI: 10.2166/wst.2010.180.
- [44] CASELLES-OSORIO A, GARCIA J. Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. Environmental Pollution, 2007, 146: 55–63. DOI:10.1016/j.envpol.2006.06.022.
- [45] 周兴伟,张勤.“生物絮凝+三级人工湿地”组合工艺处理小城镇高质量浓度生活污水[J].市政技术,2008,26(6):517–519.
ZHOU X W, ZHANG Q. A combined process with bioflocculation and three-stage artificial wetland for high concentration domestic sewage treatment in small town[J]. Municipal Engineering Technology, 2008, 26(6): 517–519.
- [46] WINTER K J, GOETZ D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands[J]. Water Science and Technology, 2003, 48: 9–14. DOI: 10.2166/wst.2003.0268.
- [47] 张翔,李子富,周晓琴,等.我国人工湿地标准中潜流湿地设计分析[J].中国给水排水,2020,36(18):24–31.
ZHANG X, LI Z F, ZHOU X Q, et al. Design analysis of subsurface flow wetland in constructed wetland standards in China[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18):24–31.
- [48] LI X, DING A, ZHENG L, et al. Relationship between design parameters and removal efficiency for constructed wetlands in China[J]. Ecological Engineering, 2018, 123: 135–140. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.08.005.
- [49] ZHONG H, HU N, WANG Q, et al. How to select substrate for alleviating clogging in the subsurface flow constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154529. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154529.
- [50] YANG M, LU M, BIAN H, et al. Effects of physical clogging on the performance of a lab-scale vertical subsurface flow constructed wetland system and simulation research[J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 11–17. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.05.058.
- [51] ZHAO Y Q, SUN G, ALLEN S J. Anti-sized reed bed system for animal wastewater treatment: A comparative study[J]. Water Research, 2004, 38: 2907–2917. DOI: 10.1016/j.watres.2004.03.038.
- [52] 王国强,张荣新,傅金祥,等.人工湿地自改性基质用于污水深度处理技术研究[J].工业水处理,2016,36(1):73–78.
WANG G Q, ZHANG R X, FU J X, et al. Research on the constructed wetland modified substrates for the advanced treatment of sewage[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(1):73–78.
- [53] HUA G, ZENG Y, ZHAO Z, et al. Applying a resting operation to alleviate bioclogging in vertical flow constructed wetlands: An experimental lab evaluation[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 136: 47–53. DOI:10.1016/j.jenvman.2014.01.030.
- [54] CHANDANSHIVE V V, RANE N R, GHOLAVE A R, et al. Efficient decolorization and detoxification of textile industry effluent by *Salvinia molesta* in lagoon treatment[J]. Environmental Research, 2016, 150: 88–96. DOI:10.1016/j.envres.2016.05.047.
- [55] MIRANDA S T, DE M A T, DE M M P, et al. Influence of the substrate type and position of plant species on clogging and the hydrodynamics of constructed wetland systems[J]. Journal of Water Process Engineering, 2019, 31:100871. DOI:10.1016/j.jwpe.2019.100871.
- [56] 王为东,汪仲琼,李静,等.人工湿地生态根孔技术及其应用[J].环境科学学报,2012,32(1):43–50.
WANG W D, WANG Z Q, LI J, et al. The constructed root channel technology and its application in constructed wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1): 43–50.
- [57] 宋志鑫,白少元,解庆林,等.美人蕉根系对不同基质结构水平潜流人工湿地水力特性的影响[J].环境科学学报,2014,34(6):1505–1509.
SONG Z X, BAI S Y, XIE Q L, et al. Effect of canna roots on the hydraulic characteristics of the horizontal subsurface flow constructed wetlands with different matrix structures[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(6): 1505–1509.
- [58] 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.
- [59] TANG P, XIANG Z, MA P, et al. Laboratory investigation on *Bacillus subtilis* addition to alleviate bio-clogging for constructed wetlands[J]. Environmental Research, 2021, 194: 110642. DOI:10.1016/j.envres.2020.110642.
- [60] TANG P, XIANG Z, ZHOU Y, et al. Enzyme treatment improves the performance of laboratory-scale vertical flow constructed wetland[J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 665–671. DOI:10.1016/j.biortech.2018.08.048.
- [61] YE J, XU Z, CHEN H, et al. Reduction of clog matter in constructed wetlands by metabolism of *Eisenia foetida*: Process and modeling[J]. Environmental Pollution, 2018, 238: 803–811. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.03.062.