

模块化人工湿地防堵塞结构设计研究

靳晓颖¹, 苏俊叶², 潘晓丹³

(1.黄河水利职业技术学院,河南 开封 475004;2.开封市祥符区水利局柳园口灌区管理处,河南 开封 475004;

3.豫西黄河河务局济源黄河河务局,河南 济源 459000)

摘要:潜流人工湿地在国家全域推进海绵城市建设进程中具有较高的推广应用价值,但该湿地在运行过程中易出现堵塞问题。在分析人工湿地防堵塞结构设计要点的基础上,设计了一种填料可替换的双层种植套简活水式模块化人工湿地,探讨了该类湿地的结构组成、运行方式,分析了其优势和应用前景。

关键词:模块化人工湿地;潜流人工湿地;堵塞问题;双层种植套简;填料替换;植物收割;停床休作

中图分类号: TU992.02

文献标识码: B

doi: 10.13681/j.cnki.cn41-1282/tv.2023.03.003

0 引言

人工湿地利用土壤、人工介质、植物、微生物的物理、化学、生物三重协同作用,对污水进行净化。其中,潜流人工湿地通过布水、集水管道引导,充分延长了水在湿地中的径流时间和径流空间,使水与湿地基质、植物、微生物充分接触,其净化能力明显高于表流人工湿地,且占地面积相对较小,有很高的推广应用价值。但是,相对于表流人工湿地,潜流人工湿地易出现堵塞问题,导致湿地污染物去除效率降低、运行寿命缩短,不仅造成土地和资源的极大浪费,还制约了该湿地工艺的推广。在解决潜流湿地堵塞问题时,常采用清洗或更换基质的方法。这不仅会破坏湿地植物,且对大规模人工湿地而言,工程量大,施工困难。湿地停床休作的处理方法虽受推崇,但在实际工程项目中,难以空出较长时间用于停床休作,故通常不易实现。为了提升湿地去污效率、延长湿地运行寿命、降低湿地堵塞维护难度、扩大人工湿地的推广应用范围,笔者开展了模块化人工湿地结构设计研究。

1 现有技术方案及其不足

1.1 现有技术方案

湿地堵塞后,水流渗透速度减缓,水力负荷减小,来不及排出的污水会壅积在湿地表面,阻隔基质内外的氧气交换,致使系统内的好氧微生物活性衰退,污染物去除率降低,出水水质无法达到设计标

准,且易引发恶臭,蚊虫滋生。目前,解决人工湿地填料堵塞问题的技术方法有以下5种:(1)翻洗或更换填料^[1]。该方法需要先将水生植物拔除,待填料处理完成后再复植。因其成本较高、周期较长且填料不易回收利用,通常难以被接受。(2)收割植物、停床修整^[2]。该方法需要将湿地床体放空,经过几个星期的蒸发晾晒后,基质可以恢复部分渗透性,但由于不能彻底清除填料内部的堵塞物,只能获得短期、有限的效果,且需重新配置湿地植物。(3)布设反冲洗管道^[3]。该方法需要利用高压水流将堵塞物质带出湿地床体,由于水流易被填料消能,故而只能在极有限的范围内使用。该方法还存在前期投资较大,不易维护等问题。(4)利用土壤动物(如蚯蚓)的生物活动来解决湿地堵塞问题。该方法面临着动物投放量大、适应性差,工作效率低等问题^[4]。(5)设置沉淀区^[5]。该方法需要在湿地填料层底部设置沉淀区,将填料上脱落的生物膜或经沉淀区沉淀的固体物质排入湿地填料外的集水井,并通过集水井内的潜污泵将污泥送出。该方法只能解决湿地填料自然脱落的少量堵塞物,对于固结在填料内部的堵塞物质的清除效果十分有限,而且,该方法需要在填料层底部设置沉淀区,工程造价大幅增加且不易管理。此外,也有使用改变布水方式、改变填料配比、曝气充氧等方式减缓人工湿地堵塞带来的不利影响的做法,但实际效果并不理想。

收稿日期:2023-02-05

基金项目:河南省高等学校重点科研项目:基于可替代污水处理技术的引黄灌区人工湿地构建关键技术研究(21B570003);2019年度河南省水利科技攻关项目:基于“四水同治”视域的开封市海绵城市建设关键技术(GG201939)。

作者简介:靳晓颖(1982—),女,河南新郑人,讲师,硕士,主要从事高校城市水利专业的教学与研究,研究方向为海绵城市建设、人工湿地建设。

1.2 现有方案的不足

建设潜流人工湿地是解决现代城市发展过程中水资源、水环境、水生态、水污染等问题的有效路径。现有技术方案由于存在以下几个方面的不足,使其推广应用效果大多不够理想。(1)填料方面。更换填料时工程量大,且不宜使用大型机械操作,否则会造成填料碾压,加剧堵塞。在进行前期营造时,潜流湿地多为复合床体,填料铺设方式复杂,大多为混合铺设或多种类型层状铺设,所以挖出后,不易进行区分处理,造成无法回收利用。因大面积挖除填料,湿地整体需要停止运行,影响整体效益。(2)湿地植物方面。收割植物不彻底,不能真正有效解决因植物因素造成的堵塞问题。对于运行时间较短的湿地,需要根据季节变化和植物生长状态,只收割填料层以上的茎叶部分。对于运行时间较长的湿地,填料层以下的根系生长、腐败及其分泌物是造成湿地堵塞的重要因素,但植株整体收割比较困难,且无法满足局部堵塞时更换、收割部分植株的需求,对湿地正常运行部分及正常生长的植株影响较大。(3)设备方面。冲洗设备构造复杂,需要在湿地建设初期进行布水、集水管道铺设工作,投资较大。管道铺设在填料层以下,遇到问题时,难以维修。管道铺设在填料层以上,影响湿地美观,且无法应对北方的寒冷气候,易出现冻裂现象。

2 模块化人工湿地防堵塞结构设计要点

湿地堵塞问题直接影响着潜流人工湿地在现代海绵城市建设、生态城市建设中的推广应用,导致人工湿地前期投入大、后期维护难、使用寿命短、污水处理效果差等问题发生。更换填料、收割植物、管道反冲洗等方法存在着工程量大、操作困难、投资大、不易进行局部维修、填料无法回用等问题,不能满足当前人工湿地建设过程中,填料循环利用、多种填料混合分离、植被快速收割、湿地堵塞局部维修、湿地水位便宜调节、尺寸灵活、便于组合安装等多样化需求。因此,模块化人工湿地防堵塞结构设计应重点考虑以下要点。

2.1 快速更换填料,提升填料回用率

潜流人工湿地发生堵塞后,填料内部水力负荷降低,水流在湿地内停留时间延长,厌氧反应持续的时间也会延长,好氧微生物无法快速分解有机物。而在基质过滤作用下,无机物也会进一步沉淀,堵塞情况加剧,需要尽快更换填料。因此,防堵塞结构设计需要重点解决的问题是:如何在破坏湿地整体结构和湿地植物的前提下,快速更换填料,降低施工难度,减少工程量,同时提升填料回用率。

2.2 局部收割植物,提升净污效率

潜流人工湿地系统内部的堵塞物质可分为有机

物和无机物两类,其中,有机物主要源于污水和植物根系腐败物^[6-7]。污水中难以被生物降解的部分有机物在湿地内部不断积累;植物根系生长、腐败也会侵占基质空隙;根系及附着其表面的微生物产生的分泌物更难以随水流输出湿地。因此,防堵塞结构设计需要重点解决的问题是:如何将进入湿地的污水中难以降解的有机物及时排出、避免积累;当植物根系生长、腐败或其分泌物大量侵占基质空隙,造成局部严重堵塞时,如何快速对目标位置的植物进行完全收割、替换,但不影响湿地的整体景观效果。

2.3 提高床体含氧量,减少管道铺设

潜流人工湿地系统内部充氧主要依靠大气复氧和植物根系传输,部分结构复杂的湿地设计有辅助曝气装置,但投资和运行维护费用较高。复氧能力较好的湿地植物大多为浮水或沉水植物,在潜流人工湿地中使用受限。因此,防堵塞结构设计需要重点解决的问题是:如何通过布水、集水路径设计,增强水流活性,使其与大气充分接触,从而提高水流含氧量,激发湿地内部好氧微生物的活性,以提高湿地去污效率,同时降低布水、集水、曝气管道系统的投资数额和维护难度。

2.4 多种填料组合灵活、拆分方便

潜流人工湿地通常会使用不同类型或不同级配的填料,组成复合床体,以达到更高的去污效率,但填料铺设程序复杂、要求较高,需严格遵循施工程序和标准,且费用高昂。湿地发生堵塞时,按照传统处理方法用机械挖出的多种填料为混合状态,难以分离,无法重复利用。因此,防堵塞结构设计需要重点解决的问题是:如何将便宜、易取且性质稳定的砾石等填料与去污效果较好的陶粒、沸石等填料组合搭配起来,降低铺设难度,且不同填料便于组合、拆分,同时保证较强的去污效率。

2.5 尺寸灵活,扩大推广应用范围

与表流人工湿地相比,潜流人工湿地虽然占地面积较小,但对建设空间的要求仍然较高,在城市建成区推广应用有一定难度。因此,防堵塞结构设计需要重点解决的问题是:如何将这种高效的污水净化系统引入城市建成区,如住宅小区、城市道路旁等空间狭小区域,灵活应对各种尺寸组合安装的需求。

3 结构设计方案

针对上述人工湿地防堵塞结构设计需要重点解决的问题,我们提出一种填料可替换双层种植套筒活水式模块化人工湿地的设计方案。在该方案中,所谓“活水”是指通过水流路径设计,使水流与空气充分接触,从而增加水中溶解氧的含量,提高湿地填料

层的复氧能力,促进硝化反应,提升湿地的污染物去除能力。该方案适用于住宅小区、城市道路绿化带、休闲空间园路绿化带等便于雨水汇集、有雨水调蓄净化需求或有污水净化需求,但没有较大空间进行普通人工湿地建设的区域。雨水(或污水)经绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地、植草沟等常见海绵设施或简易格栅式过滤设施初步处理后,可通过该湿地结构的水流路径引导,在填料内部营造较好的富氧环境;双层种植套筒外部填充粗粒砾石填料,可有效避免结构堵塞,双层种植套筒内部填充吸附效果较好的净水材料,可提升湿地净化效果,同时为植被生长提供载体;双层种植套筒设计便于核心填料替换和植被收割,能够满足雨水(或污水)调蓄、净化、植

被生长、景观营造等需求。

3.1 结构组成

该湿地结构由 3 部分组成:第 I 部分为双层悬挂式过滤加氧装置,对雨水(或污水)进行初步过滤,并增加含氧量,拦截的大尺寸污染物可经常清理,填料更换便捷;第 II 部分为填料可替换的双层种植套筒装置,外层固定,内层可活动,便于替换填料,同时为植物提供生长载体;第 III 部分为多箱组合式水流引导箱装置,用来引导水流在重力作用下形成上行流、下行流,充分延长水流路径,提升水流含氧量,营造多种湿地类型。3 个部分装配在一起,构成了填料可替换双层种植套筒活水式人工湿地。整体结构如图 1 所示。

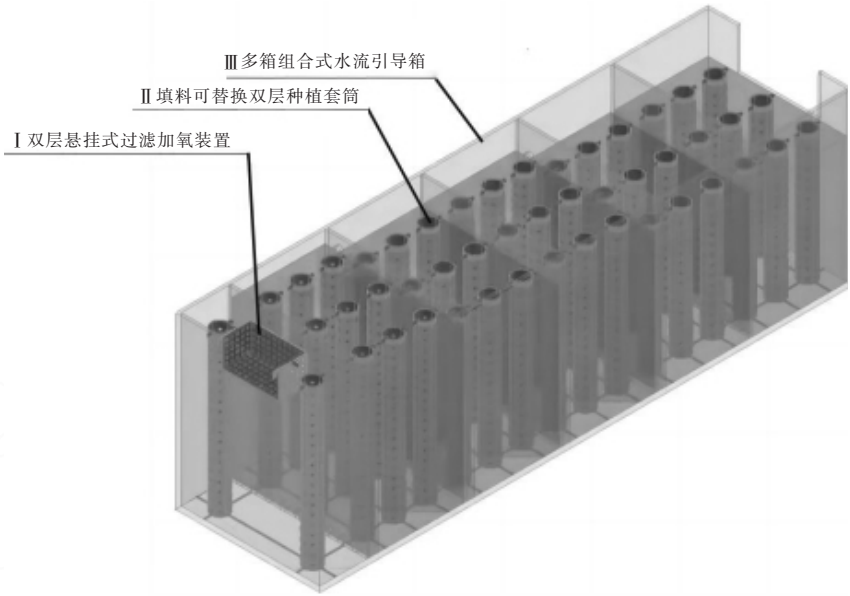
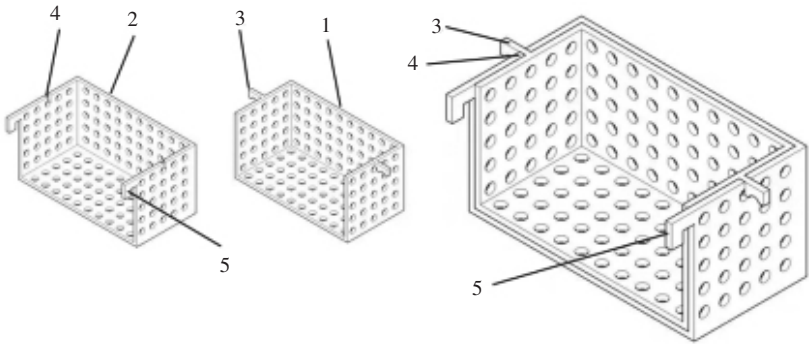


图 1 整体结构

Fig.1 Overall structure

第 I 部分双层悬挂式过滤加氧装置由可替换砾石槽和悬挂式底座构成(如图 2 所示);第 II 部分填料可替换双层种植套筒由卡槽式外层集水管、活动

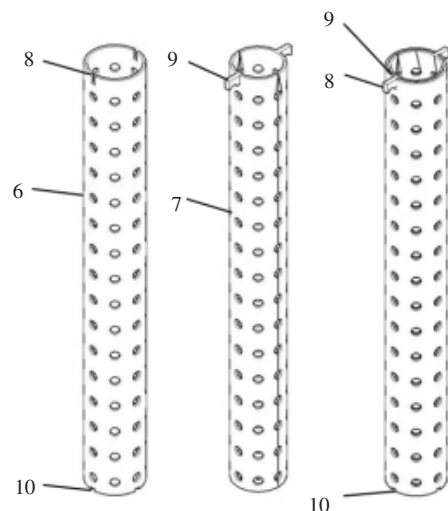
式内层穿孔种植桶构成(如图 3 所示);第 III 部分多箱组合式水流引导箱,由箱体、穿孔式溢流隔板构成(如图 4 所示)。



1.可替换砾石槽;2.悬挂式底座;3.双侧耳柄;4.双侧卡槽;5.单侧耳柄

图 2 双层悬挂式过滤加氧装置细节图

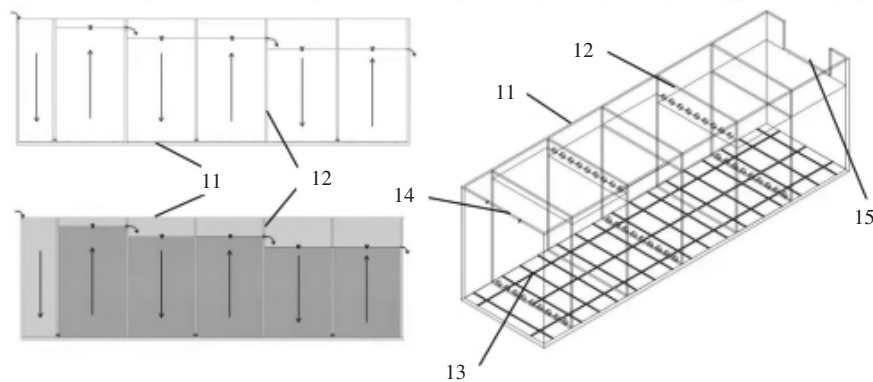
Fig.2 Detail drawing of double-layer suspended filter oxygenator



6.卡槽式外层集水筒;7.活动式内层穿孔种植桶;8.上部卡槽;9.上部耳柄;10.底部卡槽

图3 填料可替换的双层种植套筒细节图

Fig.3 Detail drawing of replaceable padding of double-layer planting sleeve



11.箱体;12.穿孔式溢流隔板;13.“十”字形凸起;14.入水口;15.出水口

图4 多箱组合式水流引导箱细节图

Fig.4 Detail drawing of multi-boxed water-flow guide box

3.2 运行方式

为加强预处理效果,避免杂物进入湿地模块,同时增加进入湿地结构的雨水(或污水)含氧量,设置了第Ⅰ部分双层悬挂式过滤加氧装置。该装置可有效阻隔杂物,使经其他海绵设施预处理后的雨水(或污水)在通过该装置后,以下行流的方式进入湿地填料层内部,枝叶等杂物被阻隔在可替换砾石槽中;砾石槽可随时被提出、处理或更换;在砾石槽中不规则摆放的砾石可扰动来水流态,有效掺气,增加水体含氧量。可替换砾石槽的双侧耳柄与悬挂式底座的双侧卡槽尺寸相契合,以使砾石槽稳定;悬挂式底座的单侧耳柄与图4中箱体入水口处的箱壁厚度相契合,以使底座稳定。砾石槽和悬挂式底座的四壁及底面均有穿孔,穿孔尺寸小于砾石直径,双层结构穿孔位置重合,便于水流顺利进入湿地结构。

为使混合填料易分离、植物易收割、堵塞位置填

料易替换,设置了第Ⅱ部分填料可替换双层种植套筒。该装置可实现桶内种植、整株收割、快速更换填料。卡槽式外层集水筒无盖、无底,其底部4个卡槽呈“十”字形分布,与图4中组合式水流引导箱底部的“十”字形凸起尺寸相契合,以使集水桶稳定,不会随意晃动。集水桶外可铺设粗粒、单一类型填料,对水流进行过滤、为微生物提供生长载体,且因粒径较大、类型单一,较长时间内不易造成堵塞。活动式内层穿孔种植桶无盖、有底,上部2个耳柄与外层集水桶上部的2个卡槽尺寸相契合,以使内层种植桶稳定。内层活动式穿孔种植桶内可进行单棵、单株、单簇植物种植,植物根系只在内筒范围发育;内筒可填充细粒、吸附性强、净化能力好的填料。长时间运行后,因植物根系生长或水质原因造成局部堵塞时,可使用人力或小型机械,通过上部耳柄将内筒取出,对植物进行整株收割或对桶内填料进行更换,或冲洗

晾晒后回用。这样可以有效解决湿地内部局部堵塞或个别植株枯黄、生长状态不良时更换填料和整株收割的问题,而不会影响其他正常植株或正常运行的湿地。双层套筒壁及内筒底部均穿孔,孔位重合,穿孔尺寸小于内部填料尺寸,套筒内、外不同类型的填料不易混合,同时还能达到多种填料混合床体的净化效果。

为避免使用复杂的布水、集水管道系统,减少管道布设投资,降低维护难度,设置了第Ⅲ部分多箱组合式水流引导箱。该装置利用穿孔溢流隔板引导水流在重力作用下流动,形成下行流、上行流交替行进的复合垂直水流状态,在有限的湿地箱体范围内尽量延长水流路径;同时,增加水流与空气的接触机会,提升水流含氧量,为填料层底部营造好氧环境,激发好氧微生物活性,提高污染物去除率。箱体被穿孔式溢流隔板分隔成多个种植单元,从入水口开始,沿水流方向,依次在底部和顶部交错穿孔,底部穿孔位置相同,顶部穿孔位置依次降低,以使水流每经过两个种植单元形成一次跌水,一方面可增加水体含氧量,另一方面,可通过调整双层套筒内外填料层的厚度,使种植单元内的水位高于填料层表面或低于填料层表面,形成表流湿地或潜流湿地。这样不仅能满足不同类型水生植物根系生长的需求,也可以营造多种类型水生植物分单元混种的景观效果^[8]。

第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ部分组合后,箱体可置于建筑与小区、城市机动车道绿化带、休闲空间园路绿化带等便于雨水汇集、有雨水调蓄净化需求或有污水净化需求,但没有较大空间进行普通人工湿地建设的区域。进水口与其他海绵设施或污水预处理设施衔接,确保污水的预处理效果;出水口可与储水设施衔接,提高净化后水的回收利用率。湿地箱体内部也可储存一部分水量,供给箱体内植物生长,保障景观营造效果。另外,该方案所述第Ⅰ、Ⅱ部分的双层结构的耳柄和卡槽,可以使用钩、环或其他能使双层结构相对位置稳定的构件替代,第Ⅱ部分的出水口卡槽可以使用集水管代替。

3.3 方案优势

(1) 该方案可根据场地空间,灵活确定箱体长度、溢流隔板位置、种植单元数量和种植套筒数量,装置易组装、拆卸、维护,无复杂的管道设计,且通过溢流隔板引导后,有效延长了水流路径,能达到较好的复合垂直流人工湿地水质净化效果,提高湿地工艺的推广应用价值。

(2) 该方案中的双层种植套筒内外可设不同类型的填料,在达到复合床体净化效果的同时,使不同

类型的填料易分离。当湿地因局部堵塞需要挖除填料时,填料可以处理、回用。这样既可避免浪费,又可减小工程量。

(3) 该方案中的双层种植套筒可将发生局部堵塞的填料和造成堵塞的植株整体移除、收割,不需要动用大型机械,且不影响湿地整体运行和景观效果。

(4) 该方案中的穿孔溢流隔板能够形成多级跌水,营造局部表流湿地,使水流与空气充分接触,增加水体含氧量;悬挂式加氧过滤装置也能增加湿地入水口处水体的初始含氧量,从而激发湿地内部好氧微生物的活性,有效应对湿地因缺氧造成的恶臭问题。

4 结语

综上所述,笔者认为,针对潜流人工湿地经常出现的局部堵塞问题所提出的填料可替换双层种植套筒活水式模块化人工湿地的设计方案,有望将湿地工艺引入住宅小区、城市道路绿化带、休闲空间园路绿化带等便于雨水汇集、有雨水调蓄净化需求或有污水净化需求,但没有较大空间进行普通人工湿地建设的区域,对于提升城市雨水控制管理利用效率、推进海绵城市建设等有所助益。但影响湿地运行效率的因素有很多,如填料类型、植物类型、水力负荷、污染负荷等。因此,可依据该方案制作湿地模型,开展不同填料组合或配比、不同水生植物配置及不同污水类型、不同水力负荷等条件下的湿地净污效果试验,从而确定最优组合方案,优化湿地建设工艺。

参考文献:

- [1] 赵慧敏,赵剑强.潜流人工湿地基质堵塞的研究进展[J].安全与环境学报,2015,15(1):235-239.
- [2] 高泉祀,骆慧敏,陈细良,等.潜流人工湿地堵塞及轮休解除机理[J].给水排水,2015,51(S1):146-151.
- [3] 孙文章.曝气对潜流人工湿地堵塞过程的控制效果研究[J].环境保护科学,2021,47(5):140-144.
- [4] 刘华清.人工湿地基质堵塞形成机制、作用效能及防治技术研究[D].济南:山东大学,2019.
- [5] 冯嵩.潜流人工湿地堵塞原因与对策[J].市政技术,2018,36(1):181-184.
- [6] 陈细良.双向垂直流人工湿地堵塞解除机制研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [7] 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.
- [8] 靳晓颖,冯峰,刘翠.复合垂直流模块化人工湿地关键技术研究[J].黄河水利职业技术学院学报,2022,34(4):15-19.

[责任编辑 杨明庆]