

双碳战略下人工湿地污水处理技术创新及实践

徐立君

天津临港胜科水务有限公司 天津 300452

摘要: 双碳战略在全面落地,水环境治理也在往低碳化转型。传统污水处理工艺能耗高、碳排放也高,这个短板越来越明显。生态低碳型的污水治理技术,成了当前水环境治理领域重点发展的方向。本文以双碳发展理念为指导,聚焦人工湿地污水处理技术的创新升级和工程实践应用。先梳理了传统湿地工艺的运行短板,然后从系统结构优化、基质材料改良、植被配置升级、耦合工艺创新几个方面,搭建起低碳型人工湿地的技术创新体系。同时还结合工程布设逻辑、预处理匹配设计、污染物净化实践流程,做了系统性的应用研究,探索适合双碳目标的人工湿地污水处理实施路径。

关键词: 双碳战略;人工湿地;污水处理技术创新;实践

引言

人工湿地污水处理技术,靠的是水、土、植物、微生物凑在一起形成的生态体系来净化污水。它用自然动力完成治理,不需要大量能耗,天生就带着低碳属性,跟双碳发展要求挺对路。不过,现在的传统人工湿地技术体系还比较粗放,工艺设计、材料配置、群落搭建都只盯着水质净化这一个目标,忽略了系统低碳运行和碳汇能力的挖掘,所以存在治理稳定性差、碳收支失衡、长效运行能力不足等问题。

1 双碳目标下人工湿地污水处理技术创新体系

1.1 低碳湿地污水处理系统优化设计思路

(1) 按照双碳发展理念来优化低碳人工湿地污水处理系统,得打破过去那种只盯着治理的设计思维,把水质净化和低碳固碳放在一起通盘考虑。整体思路以生态低碳为主方向,在保证污水稳定处理、出水水质达标的前提下,尽可能把系统全生命周期的碳排放压到最低,同时把湿地生态系统的碳汇潜力充分挖出来,实现污水治理和碳减排两头都受益。(2) 系统优化设计要丢掉以前那种粗放的结构布局模式,根据污水水质特性和水力负荷条件做精细化的结构调整。通过优化湿地水流路径、水力停留时间、系统分区布局这些核心参数,提高污水跟湿地基质、微生物、水生植物的接触反应效率^[1]。在不增加设备能耗和运维投入的前提下,强化系统对氮磷污染物和有机污染物的净化降解能力,用高效的治污减少污染物分解带来的间接碳排放,从工艺源头上实现低碳治理。(3) 设计过程中还要兼顾系统的节能化和生态化升级,尽量减少人工干预带来的能源消

耗和资源损耗。优先靠自然动力完成污水输送和循环净化,少用机电设备,大幅降低系统运行中的电能消耗和机械运维碳排放。同时结合生态适配原则优化系统的生态结构,完善湿地生物群落的配比,提升植物光合作用固碳、基质吸附固碳、微生物固碳的综合效能,构建一个能自主固碳、低碳运行的生态污水处理体系。

1.2 湿地污水处理基质改良技术创新

(1) 基质改良技术创新,瞄准的是污水净化效能提升和碳汇能力强化这两个目标。不再像以前那样用单一材料乱填一气,而是通过材料改性、配比优化、结构重构等多种技术手段,对传统湿地基质体系做系统性改造,把基质的物理结构、化学特性和生物附着条件全面优化,从根上改善湿地污水处理的运行短板和低碳发展局限。(2) 在污水净化功能优化方面,改良后的基质孔隙结构更好,表面活性也更强。孔隙分布更均匀、更通透,能有效延缓长期污水渗透带来的板结堵塞问题,保证水流输送稳定。同时,基质表面的吸附位点大幅增加,可以高效捕捉水体里的悬浮污染物、有机杂质和氮磷营养盐^[2]。再加上基质自身的化学反应特性,能持续促进污水中各种污染物的分解转化,提升整体污水净化效率和出水稳定性。(3) 在生物降解能力提升方面,改良基质能营造出更适合微生物定植和代谢的生存环境。好的基质结构可以富集更多功能性的微生物群落,强化微生物对污水污染物的生物降解作用。靠微生物代谢完成污染物的无害化转化,进一步提升湿地系统的自主净化能力,减少外部运维干预带来的能源消耗。

1.3 湿地植物配置优化创新

(1) 湿地植物配置优化, 瞄准的是水质净化强化和生物固碳提升这两个目标。根据乡土植被的特性和生态互补原则, 把湿地植被群落体系重新搭一搭。优化工作不光是种点绿植那么简单, 而是结合污水处理机制和植物生理特征来做科学搭配, 建起多层次的复合型植被生态体系, 让不同植物的净水优势和固碳特性互相补充、效果叠加。(2) 在污水净化能力提升方面, 优化后的植物群落能把根系的吸附、吸收和降解作用充分发挥出来。植物发达的根系能深入到水体和基质内部, 持续吸收水里过量的氮磷营养物质和有机污染物, 有效降低水体富营养化风险。多层次的植被结构可以挡住和过滤悬浮杂质, 减弱水流冲刷作用, 稳定湿地基质结构, 减少污泥堆积和堵塞问题, 持续维持湿地系统的污水处理稳定性。不同品类植物的功能互补, 能全面改善水质状况, 提升整体污水净化质量。(3) 在生物固碳创新层面, 科学搭配的植被群落光合作用效率更高, 生物量积累能力也更强。复合型植被体系的生长周期相互衔接, 可以大幅延长湿地生态系统的有效固碳时间, 持续通过光合作用固定大气中的二氧化碳, 把碳元素转化成生物有机质储存在植株根系和基质里。跟传统的单一种植模式比起来, 优化后的植物群落生物量更足, 碳封存效率也明显更高。

1.4 复合式人工湿地污水处理耦合技术创新

(1) 复合式人工湿地耦合创新, 把传统单一流态、单一结构湿地的技术局限给打破了。它把不同类型人工湿地的功能优势整合起来, 实现多结构、多净化机制的深度耦合协同。不再单靠物理吸附或生物降解来净化污水, 而是结合表面流、潜流、垂直流这些不同湿地结构的技术特点, 做科学组合和系统重构, 搭出一个功能互补、层级递进的复合型污水处理体系。(2) 耦合技术的核心创新, 在于污水净化机制的多维叠加。不同湿地单元的水力运行模式和污染物去除路径不一样, 多级耦合布局可以让污水依次经过物理过滤、化学吸附、微生物降解、植物吸收等多重净化流程, 逐步把水里各种难降解的污染物分解掉。这样能弥补单一湿地处理维度不足的短板, 大幅提升对复杂污水水质的适配能力和整体净化精度, 把传统工艺出水水质不稳定、污染物去除不全面的老问题解决好。(3) 从双碳低碳运行的角度看, 复合耦合结构能优化湿地系统的整体运行机制, 降低全过程的碳排放^[3]。多级梯度处理模式可以降低单一湿地单元的运行负荷, 减少系统堵塞概率和后期维护频次, 从运维环节上减少人工能耗和物资消耗带来的碳排放。同时复合型湿地能构建出结构更丰富的水—土—植物—微

生物生态体系, 扩大生物群落覆盖范围, 提升系统整体生物量, 持续强化生态固碳和碳封存能力。

2 双碳导向下人工湿地污水处理实践应用

2.1 人工湿地污水处理工程总体布设思路

(1) 工程前期布设, 要因地制宜做系统性规划。根据污水来源特性和水质波动规律, 确定湿地的建设规模和结构形式。把日常污水排放量、污染物组分差异、水力负荷变化这些基础条件综合研判一下, 合理划分预处理区域、核心净化区域和生态稳化区域, 形成层级有序、衔接顺畅的污水处理空间布局。科学的空间分区设计, 能让污水治理流程更平缓有序, 降低瞬时处理负荷带来的运行波动, 减少运维过程中的额外能耗和资源损耗, 从工程布局源头就把低碳建设理念落下去。(2) 湿地主体结构布设, 要按低碳化、生态化、集约化的逻辑来走。合理搭配不同流态的湿地结构单元, 靠复合式湿地耦合布局的思路, 优化水体流动路径和水力停留时间, 提高污水与基质、微生物、植被的接触反应效率。布局设计尽量利用自然地形条件来施工, 减少土方开挖、场地平整这些工程的体量, 有效降低建设阶段的资源消耗和施工碳排放, 实现工程建设的低碳化管控。(3) 生态配套布设方面, 整体方案要注重修复性生态构建和碳汇能力培育。结合本土生态特征, 做好湿地植被群落搭配和基质层级铺设, 建起结构稳定、自我修复能力强的湿地生态系统。少用人工设备干预, 最大限度靠自然水力条件和自然生态净化能力来完成污水治理, 降低后期的机电运行能耗和常态化运维投入。

2.2 污水进水预处理与湿地系统匹配设计

(1) 预处理设计主要干三件事: 均衡水质水量、拦截粗大污染物、缓冲进水波动。用前置净化体系帮主体湿地分担处理压力, 避免高负荷污水直接冲击湿地生态结构。整套预处理环节不用传统那种高强度机电工艺, 而是采用低能耗、无二次污染的生态预处理模式, 尽量控制前置工序的能源消耗, 维持工程整体的低碳运行属性。靠物理沉降、杂质拦截、均质调节这些温和工艺, 逐步降低水体里的悬浮污染物浓度, 平衡水质波动带来的处理负荷差异。(2) 水力匹配设计上, 预处理系统重点优化进水水力状态, 把瞬时进水峰值压力降下来。通过调蓄结构稳定水体流速和水力停留时间, 避免快速水流冲刷湿地基质结构, 防止表层基质松散流失和孔隙挤压堵塞^[4]。稳定均衡的进水条件, 能让湿地内部的微生物群落和植被根系一直处于平稳的净化环境里, 保证污染物降解过程持续高效推进, 减少系统故障频次和维护成本, 从运行层面降低全周期碳排放量。(3) 工艺匹配

层面,预处理体系的建设标准要跟后面复合湿地的结构特性和处理容量对得上。根据湿地基质的吸附阈值、生物降解承载能力以及植被净化负荷,精准调控预处理出水的污染物浓度区间,让进水水质和湿地净化能力精准适配。适当削减高负荷污染物,同时保留适合微生物代谢和植物吸收的基础营养组分,保证湿地生态系统的活力和稳定性。(4)科学完善的预处理和湿地匹配设计,能有效规避人工湿地常见的堵塞失效、净化不稳、生态退化这些运行难题。在不增加能耗和碳排放负担的前提下,延长湿地系统的有效运行年限,持续保障污水净化效果,同时维护湿地生态系统的固碳能力稳定输出,实现污水治理高效化、系统运行低碳化、生态效能长效化这几个建设目标。

2.3 湿地系统对各类污水污染物的净化实践过程

(1)针对水体里的悬浮类污染物,湿地主要靠物理拦截和孔隙吸附来去除。水流经过多层改良基质和密集的植被根系层时,流速慢慢降下来,水中的悬浮颗粒和胶体杂质被一层层截留吸附。大颗粒杂质在表层沉降过滤掉,细小微粒则通过基质微观孔隙被长期滞留下来,水体浑浊度逐步降低。这样从源头上减少了固态污染物堆积带来的湿地负荷升高问题,保证后面的生化净化过程能稳定开展。(2)对于水体里含量较高的有机污染物,净化主要靠微生物降解。湿地内部常年维持湿润、恒温、氧环境分层的稳定条件,能养出大量异养型功能性微生物群落。微生物把水体里的有机物质当成代谢底物,把复杂的有机污染物逐步分解成无害的无机小分子物质,实现有机污染成分的无害化消解^[5]。植被根系的输氧作用能持续优化根区微环境,强化微生物代谢活性,大幅提升有机污染物的降解效率。(3)针对引起水体富营养化的氮磷营养盐,湿地采用生物吸收和基质

固化相结合的方式处理。水体里的氮元素通过微生物的硝化和反硝化作用,转化成气态物质脱离水体。剩下的氮素和磷元素可以被水生植被根系主动吸收,转化成植株的生物有机质固定存储起来。改良基质还能通过化学吸附和沉淀反应,把水体里的游离磷成分锁定住,避免营养盐再次释放回流,实现长效净化效果。

结语

综上所述,人工湿地低碳污水处理技术的发展,是一个需要持续优化的过程,技术体系和应用模式还有很多可以提升的地方。接下来可以结合不同的水质条件和场地环境,不断调整工艺参数和生态配置,把低碳运行管控体系和碳核算机制完善起来。持续提升人工湿地污水处理的智能化、低碳化、标准化水平,推动生态低碳污水治理技术在水环境修复领域更广泛地应用,为生态环境保护 and 双碳目标落地提供实实在在的技术支撑。

参考文献

- [1] 董畔.“双碳”战略下人工湿地污水处理技术创新及实践[J].中国资源综合利用,2026,44(2):137-140.
- [2] 宋瑞平,陶如钧,李智行,等.双碳目标下城镇污水处理厂的绿色市政理念应用实践[J].中国给水排水,2022,38(16):61-65.
- [3] 徐兆桀,吴佳,许将炫,等.低冲击开发理念下污水处理工程绿色建造技术研究[J].建筑施工,2025,47(3):406-408.
- [4] 汪银梅,张猛,曹文平.双碳背景下人工湿地研究现状与发展趋势研究[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2023,38(4):81-87.
- [5] 谭云飞,张艳,曹鑫莉,等.城镇污水处理绿色低碳发展路径与郑州实践[J].给水排水,2025,51(12):1-5.