

修复受污染水体 人工湿地系统的开发与管理

*闻岳¹ 董宁² 周琪¹

(1. 同济大学 污染控制与资源化国家重点实验室, 上海, 200092; 2. 杭州市萧山区城市河道管理处, 杭州, 311200)

摘要:人工湿地作为一种新型的处理技术, 在水环境保护中具有重要的意义和广阔的应用前景。随着人工湿地处理工程数量的增多, 迫切需要建立科学的开发与运行管理体系, 以充分发挥其净化水环境和美化人文环境的双重作用。本文通过实例研究系统论述了修复受污染水体人工湿地处理系统在开发与管理中需要考虑的主要事项。对将来建立完善的人工湿地处理系统的科学开发与管理体系具有一定的借鉴意义。

关键词:人工湿地; 生态修复; 开发; 管理

0 引言

人工湿地是根据自然湿地净化污水的原理, 通过人工建造和监督控制来强化其净化能力的处理技术。在设计和建造人工湿地过程中, 可以在进出水方式、填料及植物等方面进行选择和搭配, 以优化人工湿地生态系统中的物理、化学和生物作用, 通过三个方面的协同作用来降低污水中的污染物浓度, 使水质得到净化^[1]。与传统的处理技术相比, 人工湿地处理系统具有低成本、少能耗、运行维护简单的特点, 同时湿地设计可以同城市景观相结合, 代替传统水处理设施的钢筋混凝土外观, 充分发挥湿地美学、景观、生物多样性等多方面环境价值。

1 修复受污染水体人工湿地的开发

水环境保护成效显著的流域都是以流域湿地生态系统发育良好, 湿地功能作用发挥正常为特征。湿地处理污染河道河水研究是国际湿地科学与河道生态整治研究前沿领域的热点之一, 受到国外学术界高度重视。人工湿地不仅具有降解污染物, 净化水质的功能, 在维护城市生态平衡, 保护城市生态安全中也起到了重要作用。近年来, 国内外许多学者与工程技术人员已对人工湿地进行工艺改进或与自然湿地等其他系统联合后用于河流污染水体治理, 其中日本与欧洲有关国家处于领先地位。国内大多数河流水环境发生恶化, 主要原因是人为修筑驳岸, 使河岸湿地发生全面退化, 甚至消失, 河岸湿地截留污染物与净化河水的功能大大减弱或消失, 因此河流水环境发生恶化。进行污染

河流生态恢复的关键是重建与构建河岸湿地系统。

本文以黄浦江支流进木港生态修复示范工程为例探讨了修复受污染水体人工湿地的开发与利用。着重就示范河道生态退化特征、人工湿地异位修复功能设计、原位生态修复技术和以人工湿地为核心的景观设计四个方面进行了分析与讨论。

1.1 示范工程河段水体生态退化特征分析及其生态修复的基本思路

Hobbs 和 Norton 于 1996 年提出, 对大多数生态系统来说都具有若干不同的状态, 可大致分为未退化状态、轻度退化状态和高度退化状态^[2]。在对高度退化的生态系统进行恢复时, 可能存在恢复阈值。高度退化生态系统很难越过该阈值而恢复到先前的轻度退化状态, 若需越过该恢复阈值, 则必须有大量的外界投入。鉴于此理论, 对进木港河道生态系统分析如图 1 所示:

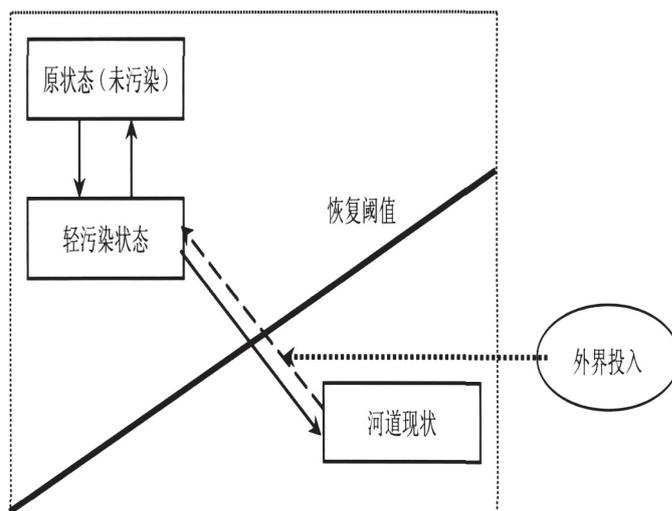


图1 示范河道生态系统状态分析图

作者简介: 闻岳, (1974—), 男, 博士, 同济大学环境科学与工程学院讲师。

收稿日期: 2008年7月5日

在进木港地区开发早期，河道逐渐呈现出轻污染状态，如果在这个阶段能够及时地去除这些外界因素构成的胁迫，这种轻污染状态就可以自然恢复到原未污染状态，河道生态系统仍能较正常地发挥其多种功能，随着从经济活动过程中不断的排出越来越多的各类污染物，在示范工程建设前，示范河段的水质为劣V类水体，其中，COD为100~150mg/L，SS约为100mg/L，TN近5mg/L，以NO₃-N和有机氮为主，TP近0.5mg/L，水体污染状态明显超出了河道生态系统的恢复阈值时，表现出不可自然恢复性，此时不仅需要截污清淤，还需采取相应的工程措施对河道进行生态修复与建设，方可使进木港示范河段的生态系统恢复到轻污染状态或原状态，实现其生态修复。

生态修复技术可分为两类：原位修复和异位修复。原位修复是将污染物质在其所在位置进行处理，无需将被污染的介质进行转移。异位修复是将污染物所在介质进行转移处理，处理完毕后又将其返回原位。基于对进木港生态退化特征分析，对示范河道受污染水体采用原位与异位生态修复相结合的策略。其中，鉴于尚有空地可利用，选择人工湿地异位修复，原位修复选择生态护岸、人工浮床、水生生境恢复和底泥生态处置等技术措施。

1.2 人工湿地异位修复功能设计

该示范工程位于上海市徐汇区，示范段西至进木港龙吴路桥，东至进木港入黄浦江口，总长近400m，河道河底标高1m，常水位2.8m，最高水位3.9m，最低水位2m，河宽18米。示范段东端尚有闲置空地，其中有近800m²可供工程使用，其平面示意图2。示范河道北岸为混凝土硬质直立驳岸，南岸为土质缓坡（坡度约为1:2.5~3.0）河岸。

异位修复人工湿地系统构筑在示范河道的东端南岸。系统从进木港河道轴线距龙吴路40m处取水，蘑菇头取水头部，取水管道长8m。潜水式排污泵提供动力将河水从送至南岸管道系统，通过管道分配系统，

将河水向东送至人工湿地，向西送至龙吴路桥旁的水景观，形成了大小两个循环：净化水循环和景观水循环，平面布置见图2。

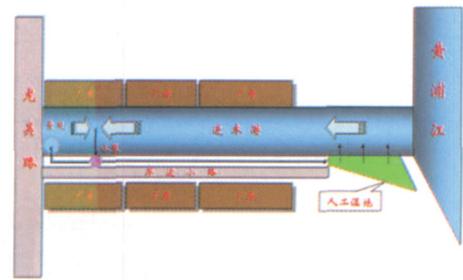


图2 示范工程人工湿地系统工程平面示意图

本课题实验室研究结果表明：以同济大学三好坞受污染水体为研究对象，多填料组合潜流人工湿地对受污染水体中颗粒物、有机物和营养元素均具有较好去除效果。当水力停留时间（HRT）不短于4d条件下，可稳定将劣V类地表水体净化至IV类水体，见表1。

依据实验研究结果，异位修复人工湿地选择潜流人工湿地，湿地填料床的有效面积约700m²，深0.6m，上覆0.2m的土壤层，底坡7.5%。将东端的河水通过配水槽进行流量分配，配至由东至西3个可独立运行的处理单元。每个单元均采用花墙和大径卵石（粒径50~100mm）布水，考虑堵塞、脱氮除磷和季节性等因素，沿水流方向设置4级填料，分别为：20~30mm的砾石；10~20mm的砾石与沸石（体积比为1:1）；10~20mm的砾石与钢渣（体积比为1:1）；6~13mm的砾石，经大径卵石和收水管收集至出水槽，流至出水跌阶复氧后回至河道。

1.3 示范工程中原位生态修复措施

如前所述，示范工程中原位修复选择生态护岸、人工浮床和水生生境恢复等技术措施。其中，生态护岸从岸顶至岸底选择柳枝、挺水植物和沉水植物。人工浮床选用具有高净化功能和美学景观价值的浮床植物如旱伞草（又称水竹，*Cyperus alternifolius ssp.*

表1 组合填料潜流湿地净化受污染水体效果（秋季；HRT=4d；n=7）

项目	pH	浊度 (NTU)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)
进水	7.6±0.2	36±18	71±19	13.8±2.5	8.9±0.7	5.9±1.3	0.88±0.12
出水	8.0±0.1	1.4±1.0	19±3	6.7±0.5	0.9±0.5	0.3±0.1	0.14±0.05

flabelliformis); 沉水植物的马来眼子菜(又称竹叶眼子菜, *Potamogeton malainus* Miq.)、苦草(*Vallisneria natans*(Lour.) Hara)、黑藻(*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle)。水生生境恢复主要是构建水生植被, 恢复土著种为主的底栖动物(如软体动物等)和鱼类。经修复后的河道断面如图3所示。

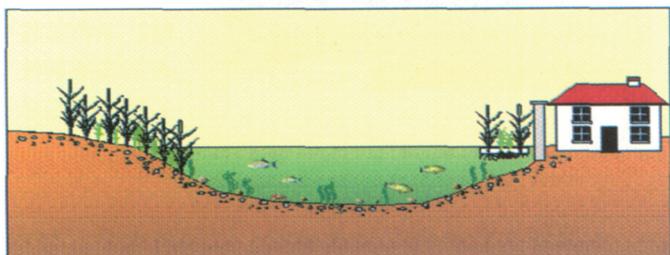


图3 生态修复后示范河道断面图

1.4 示范工程中以人工湿地为核心的景观设计

为了充分发挥人工湿地的美学、景观功能, 示范工程在河道东、西两端进行了景观再建设。其中, 东端景观区通过强烈的视觉感受和舒适的环境氛围, 试图营造人工湿地水体治理的示范展示舞台和学习交流平台, 吸引更多的人前来参观学习。通过运用了跌水、花坛、小径、木亭、花架、植物等多种元素来完善景观功能。重点突出潜流人工湿地区域范围内的水生植物的种植展示, 通过富有层次和色彩的各种植物搭配, 形成优美的植物图案, 并满足解读湿地植物的功能要求。同时, 方案从人的景观感受出发, 创造生动的景观界面, 用高大乔木阻挡外部恶劣环境的影响, 用灌木、花坛等弱化防护墙和人工湿地带来的硬质线条, 并在基地内用小径、汀步、台阶等增加基地的感受度, 其平面布置见图4。

示范区西端水景观不仅在功能上要满足人工湿地生态修复水循环中使受污染水体复氧的要求, 同时在艺术上也需考虑龙吴路过往人群的景观感受要求。遵循这两大需求, 设计三层跌水台阶, 充分增加水体复氧机会; 同时通过形态的收放、材质的处理和景观小品的叠至, 达到景观艺术的效果。

2 运行管理需考虑的主要事项

近年来, 人工湿地处理工程的数量日渐增多, 应用的领域也不断扩大。然而对人工湿地运行管理方面的研究较少。虽然与传统的污水处理技术相比, 人工湿地系统的运行管理要简单得多, 但不能因此忽视运行管理给人工湿地处理系统带来的影响。科学的运行管理不仅可以保持人工湿地处理系统对污染物稳定、高效的去除效果, 减少危害人工湿地使用寿命的情况发生, 同时通过适当的管理维护, 可以解决人工湿地可能带来的负面生态问题, 充分发挥其美化环境、丰富物种的生态效应。

2.1 水位的控制

对于一个设计良好的人工湿地来说, 水位控制和流量调整是影响其处理性能的最重要的因素。水位的改变不仅会影响人工湿地处理系统的水力停留时间, 还会对大气中的氧向水相扩散造成影响。当水位发生重大变化时, 要立即对人工湿地处理系统进行详细的检查, 因为这可能是渗漏、出水管的堵塞或护堤损坏等情况造成的。

而对于潜流型人工湿地来说, 植物生长时, 保持



图4 示范工程东端景观区平面图

湿地的水位及其重要。据有关研究表明,在人工湿地建立初期,当植物成活后,可以通过降低水位来刺激其地下根的伸展。这种技术在欧洲已经很成熟,当水位降低后,迫使植物根系向下发展以满足生长对水的需求,从而刺激了植物根系向下的生长。同时,很多技术人员也发现,在植物的生长季节每个月将湿地排干一次,然后马上升高水位,可以将氧气带入湿地。这不仅有助于氧化沉淀在湿地里的有机碳化物、硫化铁和其他缺氧化合物,并且可能抑制细菌的活性^[3]。Aleksandra Drizo 等研究发现,采用钢渣为填料的潜流型人工湿地,放空并停用4星期可恢复填料74%的滞磷能力^[5]。

在冬季进行适当的水位调整可以阻止湿地冰冻。在深秋气候寒冷时,可以将水面提升0.5m左右,直到形成一层冰面。当水面完全冰冻后,通过调低水位在冰冻层下形成一个空气隔离层,由于上面冰雪的覆盖,可以保持湿地系统中具有较高的水温。表面流型及潜流型人工湿地均可以采用这种方法来提高其在冬季的处理效果^[4]。

2.2 进、出水装置的维护

为了获得人工湿地处理系统预期的处理效果,保持进、出水流量的均衡性是非常必要的,这就要求管理者对进出水装置进行定期维护。对进出水装置要进行周期性的检查并对流量进行校正。同时要定期去除容易堵塞进出水管道的残渣。对于使用格栅的人工湿地处理系统,必须定期清洗以防止细菌过量生长,这些细菌在低流量的情况下可能影响水的流量分布^[4]。可以采用高压水枪或机械方法对浸没在水中或埋在填料中的进出水管道进行定期的冲洗。

入流污水中的悬浮固体会在潜流型人工湿地系统的进水段慢慢积累。这些积累物减少了湿地系统中填料间的空隙,从而减少了系统的水力停留时间,使水力传导性下降,严重时会使水面升高而导致漫流。对于调节装置设计合理的湿地系统,可将水位降低几英寸,这相当于增大了湿地系统的坡度,使水的流速加快,从而克服堵塞增加的水流阻力。当湿地系统的漫流情况非常糟糕时,需要将系统前端1/3部分的植物挖走,并挖出填料,更换上新的填料并重新种植植物。为了避免发生类似的情况,对于那些悬浮固体负荷较高的污水,如具有较高浓度藻类的稳定塘出水,并不推荐采用潜流型人工湿地。

2.3 护堤的维护

要经常对护堤进行检查,防止水面以下护堤的外

部斜坡面出现渗水现象,过多的或颜色异常暗绿的植被生长都是出现渗漏的症状。定期清除护堤和堤面上的杂草,以免杂草蔓延到人工湿地处理系统中与湿地植物形成强有力的竞争。对于较浅的潜流型人工湿地处理系统,定期去除湿地床中的树苗也是非常必要的。因为随着树木的生长,其根系可能会穿透防渗膜垫层,同时成熟的树木会遮挡阳光,抑制湿地水生植物的生长^[3]。

2.4 植物的管理

对于设计合理并投入运行的人工湿地处理系统来说,常规的植物管理维护并不是必需的。因为植物群落具有良好的自我维护性。它们生长、死亡,在下一年又会继续生长。在环境条件合适的情况下,植物会自然的蔓延到未播种的地方,也会从那些环境压力较大的地方迁移。管理者可以通过收割的方式,控制植物向开阔水域的蔓延。

植物管理主要是维护那些预先种在人工湿地处理系统中的植物种群。如前所述,可以通过调节水位来促进植物的生长,对于那些植物量不足的湿地系统,还可能采用降低进水负荷、施用杀虫剂或重新种植的方式来改善这一情况。对于潜流型湿地系统产生的杂草,从废水处理的角度来说,这并非完全是坏事,然而杂草会影响系统的美观,有些杂草还会对湿地植物形成强有力的竞争,因此也要看情况进行清除,可以通过春季淹水或手工去除的方法来控制杂草的生长及蔓延。

对于一个设计及管理良好的潜流型人工湿地处理系统来说,收割植物并不是一定要做的。清除死的植物能够使来年春天新的植物生长的更旺盛。冬天燃烧植物可以用来控制害虫,而留一些落叶可以增加砂砾表面的绝热性,使湿地系统内维持较高的温度^[6]。在植物生长高峰期收割植物有利于去除系统中的氮含量,对系统中磷的去除非常有限,而这与收割成本相比可能并不合算。不过从审美的观点来看,在每年秋天收割植物后会使得来年春天植物生长地更加旺盛和美观。

2.5 蚊蝇和气味的控制

由于蚊子能够传染疾病,影响人类的健康,尤其当人工湿地处理系统离人类居住区较近时,这个问题如果得不到解决,会引起附近居民的反感。按照产卵和孵化特性不同,人工湿地中可孳生的蚊虫可分为两类。第一类蚊虫将卵产于水面或水生植物的叶片上,当环境条件适宜时,无需外界刺激,数天内就可自行

孵化；第二类蚊虫将卵生于岸区附近湿润的土壤上或残屑上，当水淹没后孵化^[7,8]。虽然无法做到根除湿地系统中产生的蚊蝇，但通过大量研究，已经形成了一些比较成熟的控制蚊蝇的方法。

在春、夏蚊虫易孳生的季节，应考虑适当投加噬蚊菌或专效控制蚊虫得化学药剂。其中，在一定规模的稳定塘和人工湿地中，投加化学药剂的方法是有效且经济的，但投加的药剂对动、植物和人类必须无生物毒性。目前，工程使用中成熟、有效的药剂有蚊油，如：Golden Bear 或 Bonide Mosquito Larvicide。其年度运行费用为 400~600 元 / 公顷。目前，蚊虫的控制正在从应用常规的化学杀虫剂向环境友好的方法发展。近来，有采用 Bacillus 属的两种菌类控制蚊虫的方法，其中 Bacillus sphaericus 更适合用于污水处理。同化学药剂相比，该方法不仅同样有效且年度费用更低。

对于潜流型人工湿地来说，气味基本上不会成为人工湿地处理系统令人厌恶的问题。但如果人工湿地由于厌氧情况使出水中含有较多的硫化氢，那些本来用于向出水中传输氧气并作为景观的小瀑布和跌水等结构，会将水中的硫化氢解吸出来，使这种难闻的气味弥漫到附近的空气中。

2.6 野生生物的控制

人工湿地处理系统运行起来后，会慢慢出现一些野生生物，如鸟类、哺乳动物、爬行动物和昆虫等。这些野生生物形成湿地系统特有的食物链，丰富了湿地系统的生物多样性。野生生物通常被视为有益于维护湿地的处理功能，因为它们从湿地植物中获取营养物质，随后将这些营养物质带走，分布到整体的环境中。然而，针对某些对湿地系统及周围环境带来不良影响的野生生物，则必须加以控制。

麝鼠等啮齿类动物会严重损坏湿地系统中的植物，它们用香蒲和芦苇等植物作为食物，并用其枝叶做窝。同时麝鼠也喜欢在护堤和湿地中打洞，有关研究表明，将堤面坡度设置成 5:1 或更小，可以有效地防止护堤上出现洞口。临时提升运行水位可以有效阻止这些动物，同时采用捕鼠夹来诱捕也是行之有效的控制手段^[9]。

昆虫也会造成危害，人工湿地处理系统中种植的植物会像农作物一样感染病虫害。虽然植物表现的损坏不会影响处理效果，但会影响人工湿地的美观。因此，病虫害的防治也非常重要。农药等化学药剂并不是防止病虫害的好方法，因为施用农药会向人工湿地处理系统中引入新的污染物。可以在湿地附近营造一些鸟

巢，吸引麻雀或燕子等鸟类入住，这些天然的捕食者可以在控制昆虫中发挥积极的作用。

3 结语

人工湿地不仅具有降解污染物，净化水质的功能，还可以美化环境，在维护城市生态平衡，保护城市生态安全中起到重要作用。然而，缺乏合理的开发与运行管理手段，城市人工湿地处理系统往往难以收到预期效果。在人工湿地处理系统的开发和运行管理研究这一新的研究领域内，尚有大量的科学问题需要进行深入研究。相信只有通过科学开发和管理的人工湿地处理系统才能真正发挥其美化和提升水环境和人文环境的双重作用，更好地体现人工湿地处理技术应有的价值。

参考文献：

- [1] Jan Vymazal. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment [J]. Ecological Engineering, 2005, 25 (7): 478~490.
- [2] 黄铭洪. 环境污染与生态修复. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 克雷格·S·坎贝尔, 迈克尔·H·奥格登 著, 吴晓英译. 湿地与景观[M]. 北京:中国林业出版社, 2005.
- [4] U.S.EPA. 2000. Manual: Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters [M]. Cincinnati, Ohio. EPA/625/R-99/010.
- [5] Aleksandra Drizo, Yves Comeau, Christiane Forget, et al. Phosphorus saturation potential: a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems [J]. Environmental Science Technology, 2002, 36(21), 4642~4648.
- [6] Joan S. Thullen, James J. Sartoris, S. Mark Nelson. Managing vegetation in surface-flow wastewater treatment wetlands for optimal treatment performance [J]. Ecological Engineering, 2005, 25(7): 583~593.
- [7] Richard C. Russell. Constructed wetlands and mosquitoes: Health hazards and management options—An Australian perspective [J]. Ecological Engineering, 1999, 12: 107~124.
- [8] Robert L. Knight, William E. Walton, George F. O' Meara. Strategies for effective mosquito control in constructed treatment wetlands [J]. Ecological Engineering. 2003, 21 (11): 211~232.
- [9] U.S.EPA. 1993. Constructed wetlands for wastewater treatment and wildlife habitat [M], ellin spenser. EPA832-R-93-005.