

人工湿地污水处理工艺及除污机理

蒋斌¹, 白永刚²

(1. 张家港市环境监测站, 江苏 张家港 215600; 2. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036)

摘要: 对人工湿地污水处理工艺及其对水中污染物的去除机理进行了综述, 并对人工湿地处理污水的技术进行了展望。

关键词: 人工湿地; 人工基质; 水生植物; 微生物

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2012)-02-0050-04

A Review on the Wastewater Treatment and the Contamination Removal Mechanisms of Constructed Wetland

JIANG Bin¹, BAI Yong-gang²

(1. Zhangjiagang Environmental Monitoring Station, Zhangjiagang, Jiangsu 215600, China; 2. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

ABSTRACT: A review on wastewater treatment process and the contamination removal mechanisms of constructed wetland is introduced, and the prospects of the constructed wetlands technology treating sewage are also discussed.

KEY WORDS: constructed wetlands; artificial substrate; aquatic plant; microorganisms

1 概述

20世纪70年代, 由于德国学者 KICHUTH 的根区法(Root-Zone-Method)理论的提出, 人工湿地作为一种简单有效的污水处理工艺才得以在世界各地逐渐受到重视并被广泛运用^[1]。人工湿地由填充基质及在其中生长的水生、湿生植物组成并通过人工基质、湿地植物以及微生物的物理、化学和生物的协同作用共同完成污水净化, 是一种人为建造的独特生态系统。该工艺具有投资低、维护简单、运行费用低及处理效果稳定等优点, 较适用于小城镇和农村地区的农业以及生活污水的处理。

根据污水在湿地中流动方式的不同, 人工湿地污水处理工艺可以分为3种类型: 表面流(Surface Flow)工艺、地下潜流(Subsurface Flow)工艺以及垂直流(Vertical Flow)工艺。表面流工艺中污水在湿地基质表层上流动, 水位较浅, 其优点是投资少, 缺点是负荷小, 易滋生蚊蝇, 产生臭味。地下潜流工艺中污水在湿地基质表层下流动, 具有保温效果好、负荷高、处理效果受气候的影响小等优点, 缺点是投资大, 容易发生堵塞。目前国内研究和应用较多的是这种工艺。垂直流工艺中的水流综合了

表面流湿地系统和潜流湿地系统的特性, 水流在基质中基本呈由上向下的垂直流, 但该系统的基建要求较高, 也较易滋生蚊蝇。

2 人工湿地的构造

运行正常的人工湿地包括以下几个部分: ①具有各类透水性的人工基质, 如土壤、砾石、砂粒等; ②适于在饱和水以及厌氧基质中生长的植物, 如芦苇、香蒲等; ③复杂的好氧或厌氧的微生物种群; ④基质表面下或上的流动水体^[2]。

人工基质中流动的污水可以为湿地动植物以及微生物提供营养物质, 使人工湿地形成一个完整的“基质—植物—微生物”共存共生的独特水生生态系统。

2.1 人工基质

人工湿地中的基质通常也被称为填料、滤料。目前广泛应用的人工湿地主要以土壤、砾石、砂粒、沙土等为基质, 这些基质一方面为微生物的生长提供稳定的依附表面, 同时也为水生植物提供载体和

收稿日期: 2011-08-01

作者简介: 蒋斌(1979—), 男, 工程师, 本科, 从事环境监测工作。

营养物质。当污水流经人工湿地时,基质通过一些物理的和化学的途径(如吸收、吸附、滤过、离子交换、络合反应等)来净化除去污水中的氮、磷等营养盐。

2.2 湿地植物

现有大部分研究都证实了湿地植物是人工湿地系统中的重要组成部分,在污水净化过程中发挥了重要作用^[2-5]:①显著增加微生物的附着面积;②湿地中的植物可将大气中的氧传输到植物根部,使根区或根际形成好氧环境,可为湿地中好氧和兼氧微生物提供良好的生长环境;③增加或稳定基质的透水性;④湿地植物具有吸附、富集某些有毒有害物质,如重金属 Pb、Cd 等的功效;⑤水生植物及其枯枝落叶层形成的自然生物滤器,有助于控制臭味,且阻碍杂草、昆虫的繁殖与生长。

人工湿地中的植物一般应选择具有处理性能好、成活率高、抗水能力强且具有一定美学和经济价值的水生植物,常用的湿地植物主要有芦苇、香蒲、灯心草等。

2.3 湿地微生物

人工湿地中的微生物活动是湿地净化污水的最主要因素。众多研究发现,在有机物以及氮的降解过程中,微生物发挥了显著作用。人工湿地在处理污水之前,各类微生物的数量与自然湿地基本相同。但随着污水不断进入人工湿地系统,某些微生物的数量将逐渐增加,并在一定时间内达到最大值而趋于稳定^[6]。李科德等比较了芦苇床系统与天然芦苇场中根面和根际土的细菌、真菌、放线菌等的数量,结果发现人工芦苇床系统中各类微生物的数量明显高于天然芦苇场,芦苇床系统的根表面、根际土的细菌数量可达 108 个/g(干重),且趋于稳定,随季节变化不大^[7]。

人工湿地中的优势菌属主要有假单胞杆菌属、产碱杆菌属和黄杆菌属。这些优势菌属均为快速生长的微生物,其内大多含有降解质粒,是分解有机污染物的主体微生物种群。人工湿地系统中的微生物主要去除污水中的有机质和氮,某些难降解的有机物质和有毒物质需要运用微生物的诱发变异特性,培育驯化适宜吸收和消化这些有机物质和有毒物质的优势细菌来进行降解^[8]。

3 人工湿地除污染机理

人工湿地对污水的净化是物理、化学及生物共

同作用的结果。当污水流经湿地时,固体物质被人工基质及植物根系阻拦截留,有机质通过生物膜的吸附,经同化及异化作用而得以去除。因湿地植物根系对氧的传递释放,湿地床层及其周围会形成许多个串连和并联的好氧、缺氧和厌氧的微环境,从而达到脱氮除磷的效果,最后通过湿地基质的定期更换或植物收割使污染物质最终从系统中去除^[9]。

3.1 有机物的去除

人工湿地的显著特点之一就是其对有机污染物有较强的降解能力。污水中的不溶性有机物通过湿地的沉淀、过滤作用,可以很快被截留而被微生物利用;污水中的可溶性有机物则通过植物根系生物膜的吸附、吸收及生物代谢过程而被分解去除^[10]。

植物根系将氧气输送到根区,形成了根表面的氧化状态,废水中大部分的有机物质在这一区域被好氧微生物分解成为 CO₂ 和水;在根区的还原状态区域,经过厌氧细菌的发酵作用将有机物分解成 CO₂ 和甲烷释放到大气中。资料表明,在进水浓度较低条件下,人工湿地对 BOD₅ 的去除率可达 85%~95%,对 COD 的去除率可达 80%以上^[6]。

3.2 氮的去除

人工湿地中的氮主要通过水生植物吸收、微生物的硝化和反硝化以及氮的挥发等途径被去除。污水中的氮基本以有机氮和氨氮两种形式存在。一般情况下,有机氮被微生物分解与转化,所以人们更关心氨氮的去除。污水中氨氮作为植物生长过程中不可缺少的物质可以被植物直接摄取,并合成植物蛋白质等有机氮,通过植物的收割可使之从废水和湿地系统中去除。但这一部分仅占总氮量的 8%~16%,因而不是主要的脱氮过程。在人工湿地系统中,植物根茎下部形成有利于微生物实现硝化作用的好氧微区,同时在远离根系周围的厌氧区,枯枝、碎屑及底质层中可利用的碳源又提供了反硝化条件,所以人工湿地的脱氮主要是靠微生物的硝化、反硝化来实现的^[10,11]。

张鸿等研究发现,水芹、凤眼莲湿地中的硝化、反硝化细菌数量均高于对照组,说明植物的存在有利于硝化、反硝化细菌的生存^[12]。吴振斌等通过 4 组植物生长较好的湿地系统和无植物的对照系统来研究湿地对污水中氮的净化效果,研究显示系

统出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度高于进水,且植物系统中又高于对照组,表明该系统硝化作用较强,且植物的存在更有利于系统硝化作用的发生^[13]。

微生物的硝化和反硝化作用在氮的去除过程中起着重要作用,硝化所需氧或直接从大气扩散至水中,或由植物根系释放。人工湿地中复氧的限制使得氮的硝化常是脱氮的限制步骤。为了提高处理效果,可以对进入湿地的污水进行曝气,以增加污水中的溶解氧;或使污水中的氮素物质在进入人工湿地前作预处理,转化成硝态氮;也可以增加湿地植物的密度;或采用间歇进水方法,提高系统中的氧浓度^[14]。

GREEN 等研究了湿地系统中氧气的分布随时间和空间的变化,并通过给人工湿地增设输气管,利用慢灌快排使系统充分进气,以增加内部溶解氧的含量来提高系统的硝化反应能力,结果大大提高了氨氮的去除能力。该实验也从化学计量上证明了氨氮的去除机理主要是硝化反应,其他作用(如挥发)是可以忽略的^[15]。此外,人工湿地采取间歇进水的方式,在此间歇期间湿地系统不饱和水层可以进行复氧,加之湿地植物根系的输氧作用,从而保证微生物能获得充足的氧气,使湿地中的硝化作用增强,实现氮的有效去除。

3.3 磷的去除

磷的去除一直以来都是污水处理工艺中的关键,因为磷是引起水体富营养化的限制性因素。多数研究表明,磷在人工湿地系统中的去除主要有3个方面:微生物正常的同化或植物的吸收作用;聚磷菌的过量摄磷作用;基质的物理化学作用。其中最主要的是基质对磷的吸附作用及其纳磷容量,而植物吸收对磷的去除效率影响不大^[16]。无机磷是植物生长所必需的营养物质。污水中的无机磷一方面在植物的吸收和同化作用下,被合成 ATP、DNA 和 RNA 等有机成分,通过植物的收割而将磷从系统中去除;另一方面,通过微生物对磷的正常同化吸收(将磷作为微生物必需的成分,而供微生物生长之需),聚磷菌对磷的过量积累,并通过对湿地床的定期更换而将其从系统中去除。由于人工湿地中植物的光合作用及呼吸作用(即所谓的光反应和暗反应)的交替进行,植物根系输氧量的多少随光照强度的交替变化而相应地发生变化,加之湿地床不同区域内耗氧速率的不同,致使系统中出现好氧和厌氧状态,从而有利于微生物对磷的释

放和过量积累作用的发生^[6]。

崔理华等对垂直流人工湿地系统处理污水的研究表明,化学吸附和沉淀以及微生物同化作用所引起的总磷去除贡献率在 50% ~ 65% 之间。因此,垂直流人工湿地系统对磷的主要去除作用是化学吸附和沉淀以及微生物同化作用^[17]。朱夕珍等通过不同基质、不同配比、不同深度组合的填料运行试验发现,有机质的增加并不会改善湿地除磷效果,总磷的去除主要与水力负荷及基质深度有较大关系,去除效果随负荷的减小及基质深度的增加而增大^[18]。高红武通过模拟人工湿地盆栽实验处理城市污水的研究表明,盆栽实验中总磷的去除归功于盆中的基质,开始主要靠盆中基质的过滤作用,之后的长时间内还要依靠土壤、植物根系的复合体作用。试验系统的高除磷效果与土壤对磷的吸附有关,因土壤中含有较多的铁、铝氧化物,有利于生成溶度积很低的磷酸铁或磷酸铝,使土壤固磷能力大大增加^[19]。

利用湿地植物本身的吸收作用是湿地系统除磷的机理之一,不同的植物种类以及植物体不同的部位对磷的吸收能力都不相同。缪绅裕等研究发现,人工湿地经过一段时间运行以后,植物体各器官含磷量各不相同,它们依次为叶 > 根 > 茎 > 胚轴,且都随污水浓度升高而升高^[20]。

然而由于植物本身的吸收作用或微生物的作用,在除磷方面似乎都起不到较为有效的去除功效,所以追求人工基质方面的改进(包括开发新型填料或改进填料性能等),以增强其对磷的吸附作用及纳磷容量来达到对磷的有效去除已经成为当前正在研究并寻求突破的关键性课题。成水平等研究表明,花岗石和黏性土壤为主要介质的人工湿地对污水中磷的去除率可达 90% 以上^[21]。

3.4 其他物质的去除

此外,由于人工湿地中的基质以及水生植物根系的阻拦及截留作用,人工湿地对悬浮物的去除也具有明显的效果。同时人工湿地通过过滤、沉降、吸附等过程可使污水中的病菌及藻类数量经湿地处理后显著降低,从而使污水得到有效净化。

4 结语

人工湿地作为一种简单可行的污水处理技术,由于其在能耗和维护管理方面的优势,在未来的水处理中应具有较大的发展空间。但人工湿地内部

的“黑箱效应”,使得人工湿地的除污机理还不甚明了,工艺设计方面也需要进一步改进。国内外人工湿地技术的应用与实践表明,将来人工湿地污水处理工艺的研究和发展趋势包括以下几个方面^[22]:

(1) 开发建立人工湿地数据库,以减少重复劳动并改良传统的设计方法;

(2) 进行机理方面的研究,建立各种污染物去除的反应动力学模型,并应用到实际中;

(3) 改良人工湿地技术,如将传统污水处理技术引入人工湿地,以强化人工湿地的除污能力和提高区域适应性;

(4) 应用范围将不断扩大,如从早期处理城市生活污水或二级污水厂出水到目前治理农业面源污染、城市或公路径流等面源污染,甚至还可以将其推广应用于处理小城镇的污水和垃圾渗滤液。

[参考文献]

- [1] COOPER P F, HOBSON J A. The use of reed bed treatment systems in the UK[J]. *Water Science & Technology*, 1990, 22(3-4):57-64.
- [2] 白晓慧, 王宝贞, 余敏, 等. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, 32(6):88-92.
- [3] 梁威, 胡洪营. 人工湿地净化污水过程中的生物作用[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(10):28-31.
- [4] 戴全裕. 水生高等植物对太湖重金属的监测及其评价[J]. *环境科学学报*, 1983, 3(3):213-223.
- [5] GREENWAY M. Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(5):135-142.
- [6] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术—理论与实践[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1999.
- [7] 李科德, 胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. *环境科学*, 1995, 15(2):140-144.
- [8] 籍国东, 孙铁珩, 李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(2):224-228.
- [9] 吴献花, 侯长定, 王林, 等. 人工湿地处理污水的机理[J]. *玉溪师范学院学报*, 2002, 18(1):103-105.
- [10] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. *环境科学*, 1995, 16(3):83-86.
- [11] COMIN F A, ROMERO J A, ASTORGA V, et al. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(5):255-261.
- [12] 张鸿, 陈光荣, 吴振斌, 等. 两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. *华中师范大学学报:自然科学版*, 1999, 33(4):575-578.
- [13] 吴振斌, 成水平, 贺锋, 等. 垂直流人工湿地的设计及净化功能初探[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(6):715-718.
- [14] 张甲耀, 夏盛林, 邱克明, 等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(3):323-327.
- [15] GREEN M. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetlands utilizing a passive air[J]. *Water Science & Technology*, 1998, 32(12):3513-3520.
- [16] DRIZO A, FROST C A. Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow using shale as a substrate[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(5):19-25.
- [17] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 垂直流人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(7):13-17.
- [18] 朱夕珍, 崔理华, 温晓露, 等. 不同基质垂直流人工湿地对城市污水的净化效果[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(4):454-457.
- [19] 高红武. 模拟人工湿地盆栽实验对城市污水除磷研究[J]. *昆明理工大学学报*, 1998, 23(6):71-74.
- [20] 缪裕, 陈桂珠, 黄玉山, 等. 人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. *生态学报*, 1999, 19(2):236-241.
- [21] 成水平, 况琪军, 夏宜璋, 等. 香蒲、灯心草人工湿地的研究—I. 净化污水的效果[J]. *湖泊科学*, 1997, 9(4):351-358.
- [22] 陈长太, 王雪, 祁继英, 等. 国外人工湿地技术的应用及研究进展[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(12):105-106.

(本栏目编辑 周立平)

投稿须知

为提高编辑部工作效率,缩短稿件审改周期,《环境监控与预警》编辑部在线采编系统现已启用,投稿时,请作者进入《环境监控与预警》编辑部网站(<http://www.hjjkyyj.com>)。首先注册用户名,填写相关信息后登陆,按页面提示要求进行投稿及查询。谢谢合作!

《环境监控与预警》编辑部