

★自然科学学术文库

潜流型人工湿地深度处理污水厂 二级出水的研究



王 昊 曹伟宏 钟卉元 薄国柱 ◆ 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

自然科学学术文库

潜流型人工湿地深度处理 污水厂二级出水的研究

王 昊 曹伟宏 钟卉元 薄国柱 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是作者多年来对潜流型人工湿地深度处理污水厂二级出水研究成果的总结。本书根据人工湿地特点,在不同水力负荷条件下,对其去除污水处理厂二级出水中主要污染物的规律进行了实验研究;对人工湿地不同基质深度及过水面积对污染物的去除效果进行了分析研究;对人工湿地底部曝气前后污染物去除效果进行了比较研究,探讨人工湿地冬季运行效果不佳的解决方法;对人工湿地的堵塞状况及堵塞机理进行了初步研究;应用电化学法对人工湿地出水进行深度处理,探讨使最终出水达到地表水环境质量标准的复合工艺。另外,对人工湿地的植物、微生物及基质的特性进行了研究,同时对人工湿地进出水的生物毒性进行了研究,并建立了人工湿地对各种污染物降解效果的数学模型。

本书可供从事市政工程、环境工程的科技工作者以及相关专业的大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

潜流型人工湿地深度处理污水厂二级出水的研究/
王昊等著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017. 12
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1786 - 1

I. ①潜… II. ①王… III. ①沼泽化地 - 污水处理厂 -
污水处理 - 研究 IV. ①X505

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 001039 号

选题策划 夏飞洋

责任编辑 夏飞洋

封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京中石油彩色印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 11
字 数 228 千字
版 次 2017 年 12 月第 1 版
印 次 2017 年 12 月第 1 次印刷
定 价 39.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

人工湿地是一种由人工建造和调控的湿地系统,通过其生态系统中物理、化学和生物作用的优化组合来进行污水处理。人工湿地一般由人工基质和生长在其上的水生植物(如香蒲、芦苇、鸢尾等)组成,形成基质-植物-微生物生态系统。当污水通过该系统时,污染物质和营养物质被系统吸收、转化或分解,从而使水体得到净化。早期人们利用人工湿地净化污水,是因为观察到自然湿地具有明显的去除污染物的能力。1904年,澳大利亚的 Brain Mackney 建造了世界上第一座人工湿地。20世纪60年代中期,德国人 Kickuth 首次提出了“根区法”,使得70年代成为人工湿地大规模研究和应用的阶段,然而在当时,人工湿地的研究并未脱离天然湿地,且为了提高氧化塘的处理效果,常将湿地系统与氧化塘结合使用。直至80年代后,人工湿地才真正发展到由人工建造、填入不同的基质及种植有一定去污能力的植物处理系统,从此进入了规模性的应用阶段。

本书源于作者多年来在人工湿地处理污水厂二级出水方面的研究探索,共分6章。第1章介绍了人工湿地的概念及研究进展;第2章选择和建立了主要试验研究方法;第3章介绍了潜流型人工湿地系统在不同运行条件下对 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 和 TP 等污染物的去除效果;第4章介绍了潜流型人工湿地系统中植物、微生物和基质的特性变化;第5章介绍了潜流型人工湿地系统中主要污染物去除时的反应动力学模型;第6章为结论与展望。

本书旨在通过人工湿地处理污水厂二级出水的研究来初步了解潜流型人工湿地对于微污染水中主要污染物的去除规律,为潜流型人工湿地在北方的大规模应用提供经验和借鉴。

受专业水平和写作能力的限制,加之时间仓促,书中不完善之处还请有关专家和广大读者批评指正。

著 者

2017年8月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 人工湿地的研究概述	1
1.2 研究内容、目标及方案	20
1.3 拟解决的关键问题及创新	23
1.4 本章小结	23
第2章 人工湿地系统的构建研究	24
2.1 湿地床基质的筛选	24
2.2 湿地床植物的选择	30
2.3 实验装置的设计及其构建	31
2.4 实验所用原水的性质	35
2.5 检测方法	35
2.6 本章小结	36
第3章 人工湿地系统的运行效果研究	37
3.1 水力负荷对各污染物的去除效果影响分析	37
3.2 不同基质深度及过水面积时对各污染物的去除效果分析	80
3.3 曝气对湿地去除效果的影响分析	102
3.4 人工湿地堵塞状况的分析研究	110
3.5 湿地出水深度处理的研究探讨	114
3.6 本章小结	119
第4章 人工湿地植物、微生物及基质特性研究	121
4.1 实验湿地植物特性研究	121
4.2 实验湿地酶及微生物特性研究	125
4.3 实验湿地基质特性研究	132
4.4 本章小结	137
第5章 人工湿地中反应动力学模型的应用及研究	138
5.1 人工湿地反应动力学模型简介	138
5.2 人工潜流湿地各主要污染物降解效果对反应动力学模型的模拟	140

5.3 本章小结	154
第6章 结论与展望	155
6.1 结论	155
6.2 创新点	157
6.3 展望	157
参考文献	158

第 1 章 绪 论

1.1 人工湿地的研究概述

1.1.1 人工湿地的起源与发展

湿地(wetlands)是指天然或人工、长久或暂时的沼泽地、泥炭地、水域地带,静止或流动的淡水、半咸水、咸水,包括低潮时水深不超过 6 m 的海水水域。它是地球上重要的生存环境,是水陆相互作用形成的独特的生态系统,是自然界最富生物多样性的生态景观之一。湿地的不可替代的作用表现在:调节径流、抵御洪水、控制污染、改善气候、美化环境和维护区域生态平衡等。因此,湿地被誉为“地球之肾”“生命的摇篮”“文明的发源地”和“物种的基因库”。

人工湿地是一种由人工建造和调控的湿地系统,通过其生态系统中物理、化学和生物作用的优化组合来进行污水处理。人工湿地一般由人工基质和生长在其上的水生植物(如香蒲、芦苇、鸢尾等)组成,形成基质-植物-微生物生态系统。当污水通过该系统时,污染物质和营养物质被系统吸收、转化或分解,从而使水体得到净化。人工湿地是一种开放、动态、自我设计的生态系统,涉及多级食物链,形成良好的内部物质循环和能量传递功能。

早期人们利用人工湿地净化污水,是因为观察到自然湿地具有明显的去除污染物的能力。欧洲和美国分别于 20 世纪 50 年代和 60 年代末开始研究利用人工湿地处理污水的方法。美国在 20 世纪七八十年代进行了大量的相关研究,田纳西州流域管理部门和美国农业部在 20 世纪八九十年代相继开展了人工湿地处理污水的研究。虽然人类利用自然沼泽等自然湿地处理污水已有很长的历史,但作为一种人工生态工程,人工湿地是近 30 年发展起来的技术。通常人工湿地具有黏土防渗层或土工膜防渗层,并通过工程构筑物控制水体流向、水力停留时间和水位。某些类型湿地中可填充碎石、沙砾或细沙等材料,形成多孔性基质。

1904 年,澳大利亚的 Brain Mackney 建造了世界上第一座人工湿地。20 世纪 60 年代中期,德国人 Kickuth 首次提出了“根区法”,使得 20 世纪 70 年代成为人工湿地大规模研究和应用的阶段,然而在当时,人工湿地的研究并未脱离天然湿地,且为了提高氧化塘的处理效果,常将湿地系统与氧化塘结合使用。直至 20 世纪 80 年代后,人工湿地才真正发展到由人工建造、填入不同的基质及种植有一定去

污能力的植物,从此进入了规模性的应用阶段。

1.1.2 人工湿地的分类

人工湿地按水流形态可分为3种基本类型,即表流人工湿地(FWS)、潜流人工湿地(SF)和复合流人工湿地(CF)。这几种形式的人工湿地一般都种植挺水植物,与沼泽自然湿地相似。表流人工湿地在外观上接近于自然湿地,生长扎根于底部土壤层的水生植物,水流从植物茎叶间流过;通常包括一块洼地或渠道、防渗设施以及用来支持挺水植被根系的土壤。流经湿地的水位通常较浅,水面与大气接触,水体多为水平流动。潜流人工湿地同样包括洼地或渠道以及相应的防渗设施,湿地床包含埋深适当、长有水生植物的孔隙基质(如碎石、小石块、砾石、砂或土)。设计中,潜流人工湿地在湿地床中的水位一般在砂砾石基质的顶面以下,污水在基质表面以下流动,与植物根系充分接触,基本看不到水流,野生动物也接触不到水体。复合流人工湿地系统中水流不但呈垂直向流动,而且在水平方向上流动,此类湿地可延长污水在土壤中的水停留时间,提高出水水质。

1.1.3 人工湿地的国内外研究现状及存在问题

截至目前,人工湿地的规模化研究和应用已经走过了30多年的历程。在这30多年当中,人工湿地污水处理技术无论是在理论研究,还是工程实际应用,都得到了极为广泛的发展。1982年开始为湿地科学的蓬勃发展期,其标志是在印度召开的第一届国际湿地会议。1988年,国际水协会召开了第一次国际人工湿地专题会议(以后每两年一次),从而促进了世界各国在人工湿地领域的交流和发展;而美国环境保护局(EPA)则建立了北美地区基于Internet的人工湿地描述与运行数据库以促进交流,同时避免重复劳动;同时,美国、英国、德国等人工湿地发展得较为成熟的国家也先后出台了一系列人工湿地的设计导则,为人工湿地的发展和应用提供指导借鉴作用。

1. 表面流人工湿地污水处理技术研究现状

表流人工湿地在外观和功能上都接近于自然湿地,具有滴水区、挺水植物、变化的水深以及其他湿地特征。典型的表流人工湿地包括几个组成部分,它们在不同的应用场合可能会有所变化,但其基本特征是一致的。主要包括环绕各处理单元的围堰、可调节及均匀布水的进水装置、滴水区和植物生长区的不同组合形式、可进一步均匀布水及调节处理单元水位的出水装置。湿地设计的形状、尺寸以及复杂程度主要取决于场地条件,而不是采用的设计准则。影响表流人工湿地系统出水水质的因素众多,重视这些因素可以明显地减小出水水质不稳定情况的发生概率。设计湿地时应考虑的现场因素包括地形、气候(生长季节、温度变化、蒸发和沉淀)、污水特性、流量和负荷以及野生生物的活动情况。设计参数包括总面积、湿

地单元数量、深度、大小、水力停留时间、湿地单元形状、植物种类及其覆盖度、进出口的类型和位置,以及内部水流类型等。

表流人工湿地在湿地应用初期得到了各国环保专家的青睐,北美地区(如美国和加拿大)利用自然湿地生态系统的原理,建立了大量的人工湿地处理系统,主要用来沼泽表面流型废水处理系统。我国对人工湿地的研究起步较晚,直到20世纪90年代,人工湿地对于治理点源和非点源污染的能力才逐渐引起了人们的兴趣。1987年,我国首例采用人工湿地的示范工程由天津市环境保护研究所建成,其占地面积为 6 hm^2 ,处理规模为 $1\ 400\text{ m}^3/\text{d}$ 。1989年,北京昌平建成了处理水量为 $500\text{ m}^3/\text{d}$ 的表面流人工湿地,其主要是处理生活污水和工业废水,且处理效果好,优于传统的二级处理工艺。1990年,在深圳的白泥坑,国家环保局华南环保所建造了又一座表面流人工湿地示范工程,处理规模为 $3\ 100\text{ m}^3/\text{d}$,并对该湿地处理污水规律进行了比较系统的研究。

2. 潜流人工湿地污水处理技术研究现状

作为人工湿地的一大类型,潜流型人工湿地起源于德国,其后在欧洲各国得到广泛应用。潜流人工湿地主要分为垂直流和水平流两种类型,垂直潜流人工湿地起源于德国的 Seidel 系统,随后,由于著名的“根区理论”的发展,芦苇床处理系统(RBTS)等水平潜流湿地得到了更为广泛的研究和应用。在国外,潜流湿地的应用范围广泛:在美国,通常用潜流人工湿地系统去除化粪池和水塘出水中的 BOD 和 TSS;在欧洲一些国家,潜流人工湿地系统通常用于化粪池出水的处理;而在英国,潜流人工湿地系统广泛用于处理活性污泥池和 RBC 出水,以及溢流污水的处理。

20世纪90年代,潜流型人工湿地引入我国,其主要是应用于微污染地表水及农村面源污染方面,而对生活污水方面的研究和应用则相对较少。此外,我国对潜流湿地技术的研究一直以机理研究和除污效能为主要任务,其相关研究成果对于潜流湿地技术的认识和推广起到了很大的作用,但在设计理论和方法方面还不太成熟。2001年,中国科学院沈阳应用生态研究所利用潜流人工湿地深度处理以 COD 为特征污染指标的稠油采出水实验表明,潜流湿地的耐冲击负荷强,出水水质稳定;2004年,扬州大学利用波形潜流湿地处理生活污水,其对各种污染物的去除效果明显,出水能够达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 B 标准;2008年,同济大学对水平潜流湿地处理溶解性有机物进行了研究,研究表明,基质和植物对处理效果影响显著;2009年,中国农业大学对潜流湿地进行了一定的研究,研究表明,当降低水力负荷时,潜流湿地对模拟生活污水的处理效果有一定程度的提高;2010年,中国科学院武汉水生所对水平潜流人工湿地进行了比较系统的研究,研究表明,种植植物且采用人工曝气的湿地对生活污水的处理效果良好。

3. 存在问题

在人工湿地技术发明初期,表流人工湿地是主要的应用类型,但经过一段时间的应用,表流型人工湿地表现出很多缺点:系统占地面积比较大;处理负荷较小;处理能力有限等。另外,表流型人工湿地由于水流在湿地表面流动,容易受到二次污染,运行一段时间后容易产生异味;在冬季容易发生结冰现象,影响其处理效果,且其受病虫害影响明显等。

现今,潜流型人工湿地是世界上应用范围最广泛的人工湿地。其优于表流型人工湿地的方面包括:污染负荷和水力负荷承受能力强;不易产生异味;冬季保温效果较好等。但经过近十多年来的运行,潜流型人工湿地也暴露出了一些缺点:存在氧转移速率低的缺陷,其硝化效果不是十分理想;生物和水力特性较复杂,从而加大了对其处理机制、工艺动力学和影响因素的理解难度;由于缺乏长期运行系统的详细资料,其设计运行参数不够精确;运行一段时间后,出现堵塞现象等。

综上所述,无论是人工湿地的布水方式、堵塞问题,还是冬季运行效果等,都在处理污水时出现了一定的问题,因此,需要对人工湿地进行深入探讨研究,不断优化人工湿地各种参数,找出解决上述问题的一些办法,从而开发出一种适合地域特点、去除效率高、运行稳定的人工湿地。

1.1.4 人工湿地的生态景观价值

人工湿地是一个将物理、化学和生物过程与工程管理体系相结合的生态系统。自然湿地生态系统是人工湿地处理系统的基础。人工湿地和自然湿地的主要区别在于对自然过程的人工控制程度。例如,人工湿地可以在相对稳定的水流条件下运行,而自然湿地由于降水的多变性,水流变得不稳定。影响人工湿地生态系统的因素有持续的洪水、生化需氧量(BOD)、总悬浮物(TSS)浓度和其他浓度高于自然湿地的污染物。

在人工湿地中,大部分通过下水道排入湿地的污水量都是可预知的,少量的雨水和地表径流存在季节性和年度变化。系统的水量损失可以通过测量出口流量和估算水分蒸发损失总量及在设有防渗层的系统中的渗漏量来计算。但是,即便已知进水流量,要建立人工湿地水平衡模型,也必须考虑周和月的降水量及径流变化,以及这些变化对于湿地水力学的影响,特别是对于所需要的水力停留时间的影响。

温度变化虽然不会对所有的污水成分产生永久的影响,但会影响人工湿地的处理性能。温度较低时会降低对一些污染物成分的去除效果。但是通过絮凝、沉淀和其他物理过程去除 BOD 和 TSS 的效果受温度的影响较小。在寒冷的月份,由于没有植物覆盖,人工湿地会产生复氧和被太阳光曝晒。结冰季节,湿地水力学特性的改变、光照的限制、供氧量及生物活动的降低,会影响人工湿地的运行特性。

但是,冰层可以降低水温下降的速度并使水温保持在一定范围内,不会影响沉淀、过滤、絮凝等物理过程。在冰层下面植物的老化和腐烂速度也会减慢,因此出水中的 BOD 相应地减少。

1. 人工湿地微生物生态学

湿地生态系统食物网中的微生物在能量转换中发挥着重要作用。在人工湿地中,进入湿地的污水给食物网提供养料,供给的能量储存在有机分子中。氮可通过微生物的活动转化成生物能够利用的各种形态氮。例如,在氮循环的不同阶段,氮被转化为植物新陈代谢所需的不同形式,同时可以释放或消耗氧。植物对磷的吸收也部分地依靠微生物的活动来完成。微生物将非溶解形态的磷转化成可溶且能被植物利用的形态。微生物也可以作用于有机(含碳)化合物,在人工湿地的好氧区产生二氧化碳,在厌氧区产生各种气体(二氧化碳、硫化氢和甲烷)。植物、植物碎屑和沉积物为微生物提供较为集中的附着场所。寒冷地区微生物活性会随季节变化,在较冷的月份活性比较低。但在对比实验中,规模较大的湿地在温度和寒冷季节运行特性变化幅度要比小规模湿地小。这是由于在较大的连续区域中,会同时发生物理、化学、生化等反应过程。

2. 人工湿地植物学

人工湿地的成功运行,依赖于类似自然湿地的生态功能。这些功能主要以植物群落内部交互作用为基础。研究证实,在表流人工湿地中,有植物生长的单元对常规污染物(TSS 和 BOD)的去除效果要比没有植物生长的对照单元好。但是,何种植物种群可增强湿地处理性能的机理还不十分清楚。一些学者认为植物表面积与附着微生物群落密度和功能之间存在某种关系,但是这种关系还未得到证实。

人工湿地中的植物群落在初始栽培之后会发生很大变化,人工湿地很少能保持设计者预想的植物种类和密度分布。这些变化大多数是可以预测的,而且大部分对处理性能没有明显的影响。但不可预测的变化可能会引起人工湿地性能下降,因此要加强管理。

(1) 藻类

藻类在潮湿的环境中普遍存在,它们不可避免地成为表流人工湿地系统的组成部分。当藻类成为某个处理系统(例如氧化塘)中的主要成分时,藻类对表流人工湿地处理性能会产生严重影响,因此,在设计时必须预先考虑藻类的影响。

在敞水区中的藻类,尤其是在沉水植物区,将形成遮光层,导致溶解氧(DO)水平降低。人工湿地出水口附近的敞水区会促进蓝藻水华的季节性暴发,导致出水口的悬浮物浓度和颗粒性营养物浓度提高。一些浮水植物,尤其是浮萍,其初级生产速度快、生物量高,可吸收积存于表流人工湿地和池塘系统中。植物特性见表 1.1。水葫芦在热带区域的池塘系统中能很好地去除总悬浮物和藻类,但是这两种植物会阻断阳光对水面的照射及大气在水/气界面的复氧作用,降低 DO 水平。这

些快速生长的植物能吸收污水中的营养物质,通过收获这些植物可把它们从污水中去除。其缺点是,由于植物含水量一般高达 95%,需进行干燥处理,会引起二次水污染和异味问题。具有高蛋白成分的浮萍与农田土壤混合可作为有机肥料来使用,对干燥到一定程度的水葫芦可进行填埋或进行沼气发酵,回收沼气加以利用。

表 1.1 各种植物类型及其特性

植物类型	一般特性 及举例	处理过程中的 作用或重要性	生境作用或 重要性	设计及运行中 需考虑的事项
浮水植物	根系或类根结构悬挂于浮叶之下,随水流移动,不直立出水面。如普通浮萍(<i>Lemna</i>)和大叶浮萍(<i>Spirodela</i>)等	主要作用是吸收水体中的营养及遮挡阳光,阻止藻类生长。过密时会限制氧气向水体的扩散。浮萍在美国被视为外来入侵物种	过密会限制氧气向水体的扩散,并且阻碍沉水植物获得光照。为动物提供庇护场所和食物	浮萍在北美是一种自然的外来物种,不需要特别设计
浮叶植物	叶片一般漂浮于水面,也可能沉在水下。其根直达底部,不能挺立出水面。如水百合(<i>Nymphaea</i>)、石莲花(<i>Hydrocotyle</i>)等	为微生物提供附着表面,白天向水体释放氧气。过密时会限制氧气向水体的扩散	过密时会限制氧气向水体的扩散,并阻碍沉水植物获得光照。为动物提供庇护所和食物	设计水深应能促进这类期望植物的生长(如浮水、沉水、挺水)而阻碍其他类型植物的生长
沉水植物	一般全部淹没在水中,叶片可能漂浮在水面。根扎在底部,不能在空中挺立。如菹草(<i>Potamogeton</i>)、伊乐藻(<i>Elodea</i>)等	为微生物提供附着表面,白天为水体提供氧气	为动物提供庇护所和食物(特别是鱼类)	藻类可以遮断阳光从而阻碍沉水植物的生长,因此敞水区的设计滞留时间要比藻类生长需要的时间短
挺水植物	草本植物,根扎于底部,直立出水面,能忍耐洪涝或水分饱和和土壤状态。如香蒲(<i>Typha</i>)、芦苇(<i>Scirpus</i>)等	提供增强絮凝和沉淀的表面;遮光,阻碍藻类生长;挡风、消浪、促淤;冬季覆盖保温	植物为动物提供庇护所和食物,为人类提供景观	水深设计要适合所选特定种类植物的要求

表 1.1 (续)

植物类型	一般特性 及举例	处理过程中的 作用或重要性	生境作用或 重要性	设计及运行中 需考虑的事项
灌木	木本, 低于 6 m。耐 洪涝或水分饱和土壤 条件。如山茱萸 (<i>Cornus</i>)、冬青树 (<i>Ilex</i>)等	处理功能不明确: 丘陵地区不饱和 或偶尔饱和的植物 修复区的处理 数据, 对持续饱和 的湿地是否适用 尚不清楚	为动物提供庇护 所和食物(尤其是 鸟类), 为人类提 供景观	防渗层有可能被 灌木根戳穿
树林	木本, 高于 6 m。耐洪 涝或水分饱和土壤条 件。如枫木(<i>Acer</i>)、柳 树(<i>Salix</i>)等	处理功能不明确: 丘陵地区不饱和 或偶尔饱和的植物 修复区的处理 数据, 对持续饱和 的湿地是否适用 尚不清楚	为动物提供庇护 所和食物(尤其是 鸟类), 为人类提 供景观	防渗层有可能被 灌木根戳穿

(2) 湿地大型植物

在大多数湿地系统中, 大型植物是湿地的主要构成部分, 对湿地处理系统的设计和运行非常重要。湿地中的维管类植物主要分为草本植物、木本植物、一年生植物、多年生植物、浮水植物、挺水植物、沉水植物。其中, 木本植物具有茎和枝, 不含叶绿素, 成活多年, 结构属木质; 而草本植物具有地上组织, 多叶, 含叶绿素, 季节性生长; 再有, 一年生植物只能生长一个生长季节, 每年需要重新种植。多年生植物生存期超过一年, 每年通过多年生长的根系或地上茎枝繁殖。几乎所有的木本植物都是多年生的, 但草本类的可能多年生或一年生。

挺水植物是湿地植物群落中非常重要的植物种类, 它们能够适应多种环境, 甚至在饱和及洪泛区土壤中都可以生长。它们具备下列一种或几种特性以适应环境: 有让空气进入植物的皮孔(穿过茎叶的小孔); 维管束组织可以把气体输送到植物根部及其他部位; 植物形态特殊的生长结构, 如板状根、呼吸根或根膝等可以增加植物根系的通气量; 不定根可直接从水体中吸收营养物和氧气; 能抵御厌氧土壤环境产生的代谢物的侵害。

挺水植物、沉水植物和浮水植物是根据其主要生长形式分类的。挺水植物大部分地上部分位于水面以上, 可以自然挺立或靠蔓藤类植物挺立。这类植物对湿地处理系统非常重要, 它们为微生物提供附着表面, 而微生物是湿地中生物化学作

用的关键。而浮水植物和沉水植物常生长在较深的水域环境中,但具有一定水深的湿地系统中也可以生长。浮水植物具有叶和茎,漂浮在水表面。沉水植物具有叶和茎,悬浮在沉积物和水面之间。

(3) 植物营养及生长周期

湿地植物在各个生长阶段,包括发芽及初始栽培阶段都需要适宜的环境条件、适当的营养、正常季节栽培模式,湿地植物还要衰败和腐烂。许多资料中都论述了植物生长周期、越冬能力、种子成熟时间、能量循环以及其他在自然生境中有竞争优势的湿地植物特性和作用。

生长季节初期种植的草本挺水植物在适当的气候条件下通过自身繁殖,到夏末或初秋,经过一个生长季节,生物量会达到一个最大值。因植物种类而异,个别植物在生长季节中要经过多个生长和死亡周期而达到最大生物量,或者植物组织的单独出现而达到最大生物量。对于多数物种,种子在达到最大稳定产量的过程中产生,为了来年春天的萌芽在秋天成熟时释放。

对于木质素含量很高的种类,如芦苇、香蒲等,已经死亡的生物量部分仍立在湿地中,待冬季慢慢腐烂。湿地植物和所有植物一样,为了能够健康成长,也需要比例适当的营养元素和微量营养元素。城市污水能够提供充足的微量营养元素,而其他类型的污水,包括酸性矿山污水、工业废水以及雨水就可能缺乏这些营养元素。

在湿地植物的生命周期中,氮和磷是关键的营养元素。然而,在接收城市污水的大部分湿地中,植物对氮、磷的吸收对去除这些污染物并不起关键作用,主要是因为植物在生长和死亡周期中,氮和磷被吸收后还会被释放。尽管如此,死亡、未分解的植物残体可以储存磷、金属及其他相关元素。虽然植物的氮、磷吸收速度较高,但通过收割植物去除氮、磷营养成分只限于浮水植物,系统性能只在收割过程中有短暂的改变。

1.1.5 人工湿地的组成及净化机理

人工湿地主要由湿地基质、植物、微生物等组成,其中,有些大型自由表面流湿地还包括一些动物等。基质、植物、微生物对人工湿地处理水中污染物的贡献及机理各不相同。多年的研究表明,在人工湿地污水净化过程中,基质、植物和微生物三者相互联系且互为因果,形成了一个共生系统,利用基质-微生物-植物的物理、化学和生物的三重协同作用,通过过滤、吸附、共沉、离子交换、植物吸收和微生物降解等来实现对废水的净化。

1. 人工湿地中基质的研究现状及其去污作用

(1) 人工湿地中基质的研究现状

土壤、砂和砾石等是以往人们经常使用的人工湿地基质。近年来,随着人工湿

地处理技术的发展,人们开始研究并挑选具有更优秀性能的材料作为湿地的基质。基质除作为湿地的填料骨架和为微生物提供附着表面外,其吸附、离子交换等功能,也在人工湿地的污染物净化中发挥着重要作用。不同的基质材料对不同污染物的吸附性能及微生物附着性能不同。目前,国内外正在研究和应用的基质填料包括塑料、沸石等,特别是沸石,其铝硅酸盐骨架结构的孔道和孔穴具有可供交换的阳离子,应用中表现出良好的离子交换性能,同时,孔穴和孔道有很大的比表面积,允许一定大小的分子自由移动,决定了沸石对气体、液体均具有良好的吸附性能。另外,石灰石、页岩、煤渣、石英砂、草炭、高炉钢渣、粉煤灰(FA)、陶瓷、活性炭、蛭石等,也均在实际应用中表现出了良好的工作性能。

徐国兴等研究了利用天然沸石作为填料用于过滤蒸馏水生产中的 $\text{NH}_3 - \text{N}$, 研究发现其对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除效果较好。同济大学徐丽花等利用沸石、沸石-石灰混合物以及石灰作为人工湿地填料处理污水,并比较了不同基质填料的去除效果。实验结果表明,两种填料对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果较好。姚凤云对天然沸石去除自来水中的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 进行了研究,实验结果表明,其对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果较好。孙家寿等利用天然沸石复合剂吸附处理含磷废水,实验表明,吸附剂对磷的去除率达到 98%。另外,吉林大学的权新军等利用改性天然沸石作为填料处理富营养化水体,实验结果表明,该材料对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除率可达到 82% 以上。蒋建国等利用沸石吸附去除垃圾渗滤液中的 $\text{NH}_3 - \text{N}$, 小试结果表明,当沸石粒径为 16 ~ 30 目时, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除率达到了 78.5%。Cinambeli 等研究了利用斜发沸石从城市废水中去除 $\text{NH}_3 - \text{N}$, 实验结果表明,出水中的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度低于相关排放标准。此外,他们还发现,斜发沸石吸附的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 完全可以被 NaCl 洗脱下来,使沸石重新得以再利用。Koon 等利用斜发沸石作为填料去除生活污水中的 $\text{NH}_3 - \text{N}$, 研究了污水处理厂利用沸石进行脱氮除磷的离子交换能力,实验结果表明,沸石能有效地去除生活污水中的氮,但对磷酸盐的去除效果较差,去除率低于 60%。

王宜明的研究表明,在利用碎石床和碎石土壤床作为人工湿地的基质填料时,碎石土壤床对磷的去除效果较好,但 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效率较低。成水平利用花岗岩、砂和土壤按照一定比例组成混合介质人工湿地,用于处理城镇污水,出水水质达到国家地表水质量 I、II 类标准,但 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度高于 III 类水质标准。赵小蓉等对累托石处理 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 废水进行了一定的实验研究,实验结果表明,累托石作为一种新型基质填料,对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 有一定的离子交换作用。崔理华等利用粉煤灰-土壤介质构建垂直流人工湿地处理化粪池污水,TP 的吸附去除率可以达到 75% ~ 92%。尹连庆等研究了粉煤灰基质人工湿地对生活污水的去除效果,并与欧洲砾石床湿地去污效果进行了比较。实验结果表明,粉煤灰人工湿地对 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP、SS 均具有良好的去除效果,其中 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果要明显好于砾石床的。

(2) 人工湿地基质的去污机理

① 基质填料对污染物的截留机理

一些研究表明,基质填料对污染物的截留过程包括物理过滤、离子交换、专性与非专性吸附、螯合作用、沉降反应等,而且已有相关学者的研究证明:土壤质填料对污水中磷和重金属的净化就是通过上述反应实现的,其反应产物最终吸附或沉降在填料土体内,从而使填料土体内这些元素的含量急剧升高,几年之后,甚至可高达进水浓度的 $10 \sim 10\,000$ 倍。另外,有一些学者认为:植物根系的吸收、滞留与腐烂,填料土体内有机与无机成分对金属的强烈吸附等,很有可能是填料具有强大聚积能力的原因。还有一些学者认为,填料土体吸附金属的量在表层深 10 cm 的范围内不会随深度增加而有明显的下降,也就是说,从地表往下至少深 10 cm 范围的土层,其吸附能力相差不大。在成熟的人工湿地中,还存在着各种沉积物和植物残枝等,其对污染物的净化起着重要作用。总体来说,基质填料对污染物的截留作用主要体现在以下三个方面:

A. 提供吸附表面

基质填料除了土壤、砾石外,还包括一些沉积物和植物残枝等,其可为微生物附着生长提供适宜的附着面;与此同时,植物残枝在人工湿地介质中积累,增加了介质中的碳源,从而为微生物的正常生命活动提供一定的物质基础。作为填料存在的沉积物和植物残枝,不仅为水生植物提供了生长环境,而且作为生物化学反应过程的场所。此外,填料间隙还可容纳许多污染物。

B. 渗透性影响水力条件

沉积物和植物残枝的透水性和孔隙度影响人工湿地中水的流动、水力停留时间和处理效果。一般来说,填料孔隙度越高,则水力停留时间延长,处理效果提高,但处理效率下降;填料孔隙度越低,水力停留时间缩短,处理效果下降,但处理效率提高。因此,基质的透水性对人工湿地处理效果和效率发挥着重要作用。

C. 除磷作用

此类物质构成的填料可促进废水中悬浮物质的吸附和沉淀,一些含钙、铁、铝的介质还可以固定磷。据有关资料推论,人工湿地中的磷主要通过介质的吸附、沉积及化学反应去除。还有一些资料表明:在碱性条件下,磷主要与土壤及钙发生反应;而在酸性或中性条件下,其与铁离子和铝离子发生反应。与此同时,大量的研究还发现,废水中的磷只是被吸附停留在土壤表面,且这种吸附沉淀反应也不是永久沉积在土壤中,至少有一部分是可逆的,土壤的作用类似于一个“磷缓冲器”,在污水的磷浓度较低时,一部分磷会被重新释放到水中。

② 基质填料的吸附过程

A. 模型方程的建立

一般情况下,由于缺乏对吸附过程的充分了解,实际工程中的吸附装置的设计

往往是基于花费很大的中试实验数据。为了更为有效地采用吸附剂,从而需要一个理论预测模型来促进吸附装置的设计。当前,固定床吸附器的吸附模型有很多,但对于液、固吸附体系,为了方便地解决问题,大多对模型做了很多的简化,如假定吸附为线性吸附、孔扩散或膜外扩散为速率控制步骤等,且很少与实验数据相关联,模型预测所需传质扩散系数也只能由间歇反应实验获得。近些年来,随着计算机和数值计算技术的高速发展,人们对液、固吸附体系复杂的偏微分方程进行快速数值运算成为可能。目前,国内对于这方面的研究还较少。

B. 扩散机理

在基质填充床中,液、固体系吸附过程主要包括以下几个步骤:

- a. 吸附质在吸附剂的轴向扩散;
- b. 由液相主体扩散至吸附剂表面的液膜扩散;
- c. 由吸附剂孔内液相扩散至吸附剂中心的内扩散;
- d. 表面吸附反应。

溶质在基质填料内的吸附情况如图 1.1 所示。

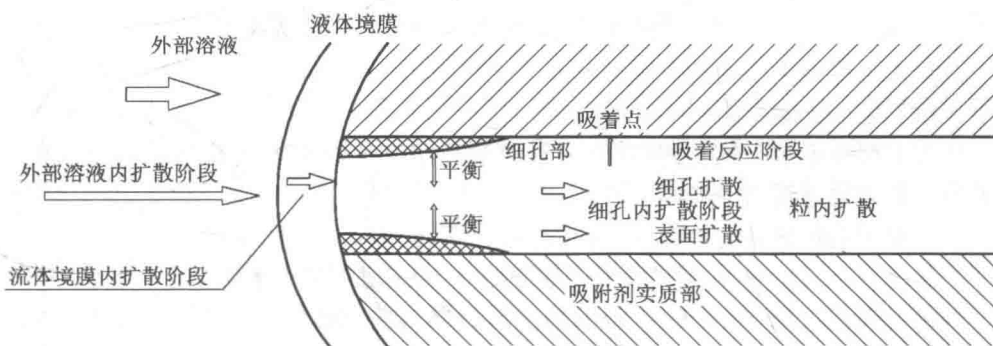


图 1.1 溶质在基质填料内的吸附

假定吸附剂是一种均匀的物质,其所对应的扩散系统为有效扩散系统。从理论上讲,吸附质在吸附剂内的扩散可分为孔扩散和表面扩散两种。孔扩散是吸附质通过细孔内部溶质进行扩散而移动的现象,其推动力是孔内溶液的浓度梯度。在湿地中,污染物吸附过程的描述主要取决于对分配函数的定义。由于湿地吸附是多孔介质的固体颗粒从流体中获取污染物,吸附相和湿地溶液的关系可由以下函数表示:

$$\bar{c} = f(c)$$

式中, $\bar{c}$ 为固体颗粒吸附的污染物浓度。由上式有

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = k_f \frac{\partial c}{\partial t}$$