



当代
杰出青年
科学文库

复合垂直流人工湿地

吴振斌 等 著

当代杰出青年科学文库

复合垂直流人工湿地

吴振斌 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

复合垂直流人工湿地是中国科学院水生生物研究所等单位承担欧盟重大国际科技合作项目“热带与亚热带区域水质改善、回用与水生态系重建的生物工艺学对策研究”研发的生态工程技术。本书首次系统总结了有关该类人工湿地的研究成果。全书共分为8章,分别介绍了人工湿地的概念、发展概况及应用前景,复合垂直流人工湿地的工艺设计,净化效果,净化机理,系统运转管理及费用效益分析,与其他处理工艺复合净化效果等,并分类举例介绍了人工湿地应用工程。

本书可作为相关科研院所、工程设计单位及其他从事水环境工程、水体生态修复等方面研究和工程技术人员的参考书,也可供高等院校环境科学与工程、市政工程、生态工程、水产学等相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合垂直流人工湿地/樊振斌等著. —北京:科学出版社, 2008

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 978-7-03-017251-8

I. 复… II. 樊… III. 生态环境-环境工程-污水处理-研究
IV. P941.78X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第050242号

责任编辑:韩学哲 沈晓晶/责任校对:陈丽珠

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年10月第一次印刷 印张:25 3/4

印数:1—1 800 字数:495 000

定价:110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序 1

湿地是地球上非常重要的、独特的、多功能的生态系统，被称为“地球之肾”。它在全球生态平衡中扮演着极其重要的角色，蕴藏着巨大的生态、经济和社会效益的潜能。在许多重要方面，湿地的作用是不可替代的，与人类息息相关。

人工湿地是一种人工模仿自然湿地功能而构建的水处理生态系统。由于该工艺具有建设运行成本低、管理简便、净化效果比较稳定等优点而受到广泛的重视，已在欧洲、南北美洲以及亚洲等世界各地推广应用。

中国科学院水生生物研究所是国内最早开展湿地研究的科研单位之一，从 20 世纪 50 年代起就在武汉建成了我国第一座氧化塘，开展了一系列生态工程研究。1994~1995 年，中国科学院水生生物研究所的吴振斌博士作为高级访问学者到欧洲从事合作研究，期间发起并成功组织了有关欧洲联盟重大国际科技合作项目的申请。1996 年，中国科学院水生生物研究所、德国科隆大学、德国波恩湖沼学研究所、奥地利维也纳农业大学以及中国深圳市环境科学研究所、杭州大学（现浙江大学）等单位共同承担的欧洲联盟重大国际科技合作项目“热带与亚热带区域水质改善、回用与水生态系重建的生物工艺学对策研究”启动。经过科研人员多年的开拓创新和辛勤耕耘，创造性地研发出以复合垂直流人工湿地系统为核心的生态工程技术，并在人工湿地的工艺设计、结构与流程选择、净化功能与效果、净化机制、运行管理等方面开展了系统的研究，发表论文 100 多篇，先后获得了湖北省科技进步奖（2002 年、2007 年）和国家环境保护科学技术奖（2004 年）等奖励。同时复合垂直流人工湿地技术获得国家发明专利，其知识产权主要归中国科学院水生生物研究所所有。

该项目相关研究成果受到国内外的高度重视，并先后成功地应用于生活污水、城镇综合污水、受污染地表水、景观用水的净化以及小流域综合治理、高农业示范区建设等工程实践中，取得了良好的社会、经济和环境效益。该技术在立足当地的同时也向全国许多地方扩展，并辐射到国外。先后在“十五”国家重大科技专项课题“受污染城市水体修复技术与示范工程”、北京奥林匹克森林公园及武汉、深圳、上海、天津、广州、湖北、广东、浙江、海南、福建等许多地区推广应用。中国台湾高雄等地对该技术也表现出了很大的兴趣，并已达成合作意向。德国、奥地利的复合垂直流人工湿地已建成运行，澳大利亚、韩国等国家也对该项目研究成果表示出浓厚兴趣，并计划利用该技术处理污水。

我很高兴有机会参与了该项目的申请、计划制定、组织实施、成果鉴定等过程，从中受到了许多启发。看到项目取得的成绩以及该技术在全国的推广应用，感到由衷的高兴和欣慰。

《复合垂直流人工湿地》一书概括了中国科学院水生生物研究所等单位对复合垂直流人工湿地系统研究的成果。该书的出版必将极大地推动我国湿地及其生态功能等方面的研究，促进人工湿地等生态工程的推广应用，对于相关的研究与应用具有重要的借鉴和示范作用，对于我国水环境质量的改善以及环境友好型和谐社会的构建也必将产生积极而深远的影响。

陈宜瑜

中国科学院院士

国家自然科学基金委员会主任

2008年2月

序 2

我国水体污染、水质恶化及水环境破坏非常严重，水生态系统严重退化。如何净化各类污水和受污染水域水质、恢复和重建受损水生态系统是水环境研究的热点和难点。中国科学院水生生物研究所是我国较早开展环境科学研究的单位之一。从 20 世纪 50 年代起就开始了水污染的治理和水环境监测等工作，一直在探索水污染控制与水环境治理的技术，取得了丰硕的成果，积累了丰富的经验与教训。20 世纪 90 年代初中期，时任中国科学院水生生物研究所水污染生物学研究室副主任的吴振斌博士作为高级访问学者到英国赫尔大学从事合作研究，期间发起并成功组织了欧洲联盟重大国际科技合作项目的申请。1996 年，中国科学院水生生物研究所与中欧多家单位共同承担的欧盟项目“热带与亚热带区域水质改善、回用与水生态系重建的生物工艺学对策研究”（ERB1C18CT960059）启动。复合垂直流人工湿地是该项目研发的核心技术。

《复合垂直流人工湿地》概括了中国科学院水生生物研究所等单位对复合垂直流人工湿地这种新型生态工程的系列研究成果，其中主要是水环境工程研究中心净化与恢复生态学学科组（包括数十位硕士、博士研究生和博士后研究人员）及其前身十多年的辛勤创新研究，已在国内外重要刊物上发表 100 多篇学术论文。复合垂直流人工湿地技术申请并获得了国家发明专利（ZL00114693.9），中国科学院水生生物研究所为第一研发单位，吴振斌为第一发明人。该书对复合垂直流人工湿地的工艺设计、净化功能、净化机制、运行和管理进行了系统介绍。在“十五”国家重大科技专项课题“受污染城市水体修复技术与示范工程”（2002AA60121）等项目和在武汉、深圳、上海、北京、天津、海口等城市的数十个应用中均取得了良好的社会、经济和生态环境效益，充分显示这一工艺的强大生命力。它所具有的净化效果稳定、建设运行费用低、管理简便、与景观建设相结合等优点受到广泛重视，必将在全国得到愈来愈广泛的推广和应用。复合垂直流人工湿地的发明、系统研究及推广应用，将为环境科学理论、技术的发展与实践提供借鉴和示范。复合垂直流人工湿地技术还辐射到国外，2004 年，吴振斌等成功地主办了科学技术部首届“水环境保护与水污染治理”国际培训班，中国科学院水生生物研究所专家向来自欧洲、亚洲、非洲的科研技术人员和水环境管理官员介绍和讲授了复合垂直流人工湿地等生态工程技术。

该书的出版将为我国人工湿地的研究和利用提供理论和实践依据。适宜作为

环保管理部门、科研人员、工程技术人员以及高校相关专业师生的参考用书。

王德铭

中国科学院水生生物研究所水污染生物化学研究室首任主任

中国环境科学学会环境生物化学专业委员会首任主任

2008 年春节

目 录

序 1

序 2

第 1 章 绪论	1
1.1 湿地概念	1
1.2 人工湿地处理技术的发展概况	6
1.3 人工湿地的应用前景	9
第 2 章 人工湿地系统工艺设计	13
2.1 基本原则	14
2.2 主要设计参数	24
2.3 基本流程	30
2.4 人工湿地施工规范及质量验收标准	57
2.5 复合垂直流人工湿地系统设计	62
第 3 章 IVCW 系统的净化功能	83
3.1 去除常规污染物的效果	83
3.2 对重金属的去除	92
3.3 对藻类和藻毒素的净化	94
3.4 对酞酸酯的净化	102
3.5 不同水力负荷和运行阶段下净化效果的比较	109
第 4 章 IVCW 系统的净化机制	118
4.1 去除污染物的一般途径	118
4.2 基质生物膜	137
4.3 微生物	158
4.4 植物气体输导	183
4.5 水力特性	190
第 5 章 人工湿地系统管理及费用效益分析	209
5.1 运行管理	209
5.2 堵塞机制与对策	211
5.3 费用效益分析	222
5.4 基质选择	227

第 6 章 IVCW 复合系统	240
6.1 IVCW 组合工艺系统的比较	240
6.2 SMBR 和 IVCW 复合系统	258
6.3 IVCW-池塘复合生态水产养殖系统	278
第 7 章 人工湿地应用实例	293
7.1 湖泊水体生态修复	296
7.2 小流域综合治理	311
7.3 面源污染控制	314
7.4 城镇综合污水处理和景观用水补给	317
7.5 生活污水处理	321
7.6 湿地公园建设	324
7.7 新农村建设污水处理	328
7.8 制药废水处理	332
7.9 热带气候地区污水处理	336
7.10 无公害农业灌溉用水水质改善	339
7.11 城市生活小区水体水质改善	342
7.12 奥林匹克公园水质改善工程	345
第 8 章 结语	355
主要参考文献	360
若干相关文件资料目录	389
后记	390

第 1 章 绪 论

1.1 湿地概念

1.1.1 湿地的定义

湿地是地球上具有多种功能的独特生态系统,它不仅为人类提供大量食物、原料和资源,而且在维持生态平衡、保持生物多样性以及调节气候、涵养水源、蓄洪防旱、降解污染物等方面均有重要作用,被称为“地球之肾”(黄进良和蔡述明,1995;刘厚田,1995;刘红玉和赵志春,1999)。

湿地是一种复杂的自然综合体。由于认识上的差异和看问题角度的不同,不同的研究者对湿地定义有不同的表述。Mitsch 等(2000)对此进行了总结:Smith 认为湿地是陆地和水生态系统之间的过渡带,并兼有两种系统的某些特征。Mitsch 将湿地概括为有水的存在和独特的土壤,并生长着适应多水环境的水生植物的区域。Lloyd 将湿地定义为一个地面受水浸润的地区,具有自由水面,通常是四季存水,但也可以在有限的时间内没有积水,自然湿地的主要控制因子是气候、地形和地质,人工湿地还有其他控制因子。Tsujii 认为,湿地的主要特征首先是潮湿;第二是地下水位高;第三是至少在一年的某一段时间内,土壤处于水饱和状态。加拿大湿地工作组对湿地的定义是:湿地系统是水淹或地下水位接近地表,或浸润时间足够长,从而促进湿成和水成的过程,并以水成土壤、水生植被和适应潮湿环境的生物活动为标志的土地(Mitsch and Gosselink, 2000)。北美湿地协会的定义为:湿地是指被浅水和有时为暂时性或间歇性积水所覆盖的低地。美国鱼类和野生动物保护协会的定义为:湿地是陆地和水生态系统之间的转换区,通常其地下水位达到或接近地表,或者处于浅水淹没状态,具有以下特征,至少是周期性以水生植物生长为优势,底层以下排水不良的水成土为主,土层为非土壤,并且在每年生长季节的部分时间被水浸或水淹。美国军人工程师协会认为,湿地是指那些地表水和地面积水浸淹的频度和持续时间很充分,能够供养那些适应于潮湿土壤的植被区域,通常包括灌丛沼泽、腐泥沼泽、苔藓泥炭沼泽以及其他类似区域(Shaw and Fredine, 1956)。佟凤勤等(1995)认为,湿地是指由陆地上常年或季节性积水(水深 2m 以内,积水期达 4 个月以上)和过湿的土地,与其生长、栖息的生物种群,构成的独特生态系统。王宪礼等(1997)认为,湿地是指那些地表水和地面积水浸淹的频度和持续时间很充分,在正常环境条件下能够供养那些适应潮湿土壤的植被的区域,通常包括灌丛

沼泽、腐泥沼泽、苔藓泥炭沼泽以及其他类似的区域。朱彤等(1991)认为,湿地是由水、永久性或间歇性处于水饱和状态下的基质以及水生植物和其他水生生物所组成的,是一类具有较高生产力和较大活性、处于水陆交接相的复杂生态系统。

虽然上述定义各有侧重,但也存在着共同点。目前,人们采用较多的表述是1987年 Ramsar 会议上的定义:湿地是指带有或静止或流动,或为淡水、半咸水水体的生态系统,包括沼泽、苔原、泥炭地或水域地带,也包括低潮时不超过6m深的沿海水域。

1.1.2 人工湿地的定义

人工湿地是在自然湿地降解污水的基础上发展起来的污水处理生态工程技术,是一种由人工建造和监督控制的,与沼泽地类似的地面,利用自然生态系统中的物理、化学和生物的三重协同作用来实现对污水的净化(Tilton *et al.*, 1976; Gersberg *et al.*, 1984a; Reed and Bastian, 1984; 国家环境保护局科技标准司, 1997)。

人工湿地也叫构筑湿地、构建湿地,其英文名称也有多种说法,常见的有 constructed wetland、artificial wetland、manmade wetland、treatment wetland、engineered wetland 等。因为芦苇(*Phragmites australis*)是人工湿地中广泛栽培的植物,因此也称为芦苇床系统(reed bed system),其他类似称呼还有根区法(root zone method, RZM)、植被滤床(vegetated filter bed)等(Kickuth, 1970; Spangler *et al.*, 1976; Dale, 1983; Nichols, 1983; Kadlec, 1994; Reed and Brown, 1995)。一般认为,人工湿地是从生态学原理出发,模仿自然生态系统,人为地将土壤、沙、石等材料按一定比例组合成基质,并栽种经过选择的耐污植物,培育多种微生物,组成类似于自然湿地的新型污水净化系统。

人工湿地不仅能有效去除污水中的悬浮物、有机污染物、氮、磷等;而且能有效去除病原微生物、重金属、藻毒素等外源生物活性物质;城镇综合污水经处理后可达到二级乃至一级排放标准;受污染地表水劣V类经处理后可达到Ⅲ~Ⅳ类,有时可以达到饮用水源水质标准;适用面广,除处理城镇生活污水外,也能广泛应用于农业、畜牧业、食品、矿山等工农业废水的处理(程树培, 1989; 黄淦泉等, 1993; 刘文祥, 1997; 胡焕和王桂珍, 1997; Harremoes, 1998; Vymazal *et al.*, 1998; Simi and Mitchell, 1999; 毕慈芬等, 2001; 籍国东等, 2001; 许春华等, 2001)。该工艺与传统的污水处理工艺相比,不仅具有建造、运行、管理费用低(投资和日常运行费用仅为常规二级污水处理厂的1/5~2/3和1/10~1/3),还具有操作简便、管理简单等特点(Gopal, 1990; 郑雅杰, 1995; Kang *et al.*, 1998; Sakadevan and Bavor, 1998, 1999),因此越来越受到

人们的重视。

基质、高等植物、微生物是人工湿地发挥净化作用的三个主要因素 (Chan *et al.*, 1982; 吴晓磊, 1994, 1995; 沈耀良和王宝贞, 1997; 丁疆华和舒强, 2000; 王宜明, 2000)。在污水通过人工湿地的过程中, 基质的吸附、过滤, 植物的吸收、固定、转化、代谢及湿地微生物的分解、利用、异化等过程综合作用, 互相关联影响着最终的净化效果。

1.1.3 人工湿地的类型和特点

人工湿地的类型按照湿地中主要高等植物的类别可分为浮水植物系统、挺水植物系统和沉水植物系统。沉水植物系统还处于研究阶段, 其主要应用领域在于初级处理和二级处理后的深度处理, 更多应用于水体生态修复和受污染地表水的净化。浮水植物系统主要用于去除氮、磷和提高传统稳定塘效率。目前, 一般所说的人工湿地植物系统都是指挺水植物系统。

以水流方式分, 人工湿地处理系统可主要分为以下两类。

1. 表面流湿地

表面流湿地 (surface flow wetland, SFW), 又称自由表面流湿地 (free water surface wetland, FWSW), 通常由一个或者几个池体或渠道组成, 池体或渠道间设隔墙分隔, 有时底部亦铺设防水材料 (如高密度聚乙烯膜等) 以防止污水下渗, 保护地下水。池中一般填有土壤、砂或者其他合适的介质材料供水生植物固定根系。水流缓慢, 通常以水平流的流态流经各个处理单元。这种人工湿地在美国采用较多, 它与自然湿地较为接近, 绝大部分有机物的去除由长在植物水下茎、杆上的生物膜来完成。水位较浅, 一般为 0.1~0.6m, 水面处于土面之上, 暴露于空气中。这种湿地的优点是设计简单、投资少, 缺点是负荷过小、水面冬季易结冰、夏季易滋生蚊蝇且散发臭气。表面流湿地不能充分利用填料及丰富的植物根系, 有时卫生条件也不好, 故现在设计中较少采用。其基本结构如图 1.1 所示。

2. 潜流湿地

水在填料表面下渗流, 因而可充分利用填料表面及植物根系上的生物膜及其他各种作用来处理废水, 而且卫生条件较好, 故被广泛采用, 欧洲等地区的人工湿地就以潜流型为主 (Cooper *et al.*, 1989)。潜流湿地 (subsurface flow wetland, SS-FW) 同样由一个或者几个池体或渠道组成, 池体或渠道间设隔墙, 有时需要在底部铺设防水材料以防止污水下渗。池中往往填有大量的碎石、卵石、砂或者土壤等多孔介质材料; 基质表面栽种植物。污水在介质间渗流, 水面低于介质表面, 因此呈潜流状态; 由于水流一直在湿地内部流动, 避免了表面流湿地中的蚊、蝇、臭气等; 潜流型人工湿地的作用位点多、微生物丰富、温度波动小、负荷较大、

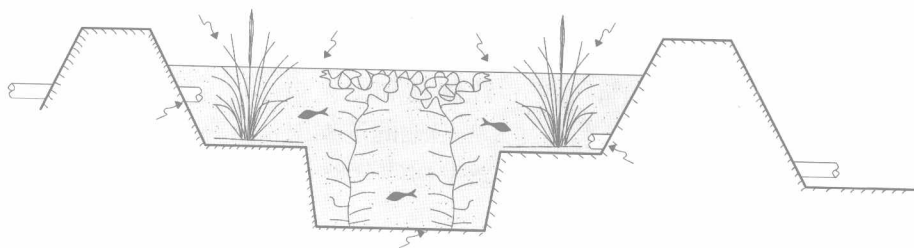


图 1.1 典型的表面流人工湿地污水处理系统

(引自 Bhamidimarri *et al.*, 1991)

Fig. 1.1 Typical surface flow constructed wetland for wastewater treatment

(Cited from Bhamidimarri *et al.*, 1991)

耐冲击、占地面积小、处理污水效率高 (Reed and Brown, 1995)。其缺点主要是建造费用比表面流湿地高，而且其维护和管理费用也较高。

潜流型人工湿地又分为两种，水平流 (horizontal flow) 和垂直流 (vertical flow)。所谓水平流就是污水从一端进入湿地，以水平流动的方式经过湿地中的基质孔隙，从另一端流出。污水在基质间流动的过程中，污染物质在植物、微生物以及基质的共同作用下，通过一系列复杂的物理、化学以及生物作用得以去除。典型的水平流人工湿地如图 1.2 所示。

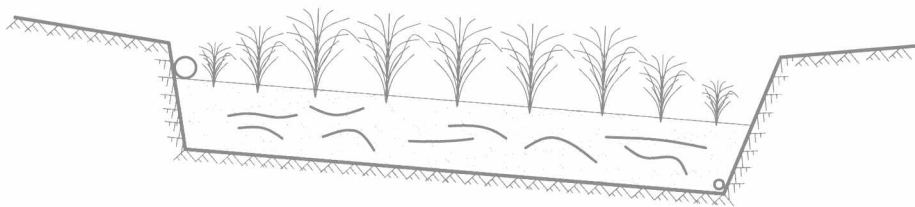


图 1.2 典型的水平流人工湿地污水处理系统

(引自 Bhamidimarri *et al.*, 1991)

Fig. 1.2 Typical horizontal subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment

(Cited from Bhamidimarri *et al.*, 1991)

垂直流人工湿地是在水平流湿地之后发展起来的，由于其系统内部的充氧更充分，有利于好氧微生物的生长和硝化反应的进行，因此对氮、磷的去除率较高。

垂直流人工湿地又可分为下行流人工湿地 (down flow constructed wetland) 和上行流人工湿地 (up flow constructed wetland) 两类。其中常见的是下行流湿地，污水从湿地表面流入，从上到下流经湿地基质层，从湿地底部流出。上行流人工湿地则与之相反，污水从湿地底部流入，从顶部流出。典型的下行流人工湿地如图 1.3 所示。

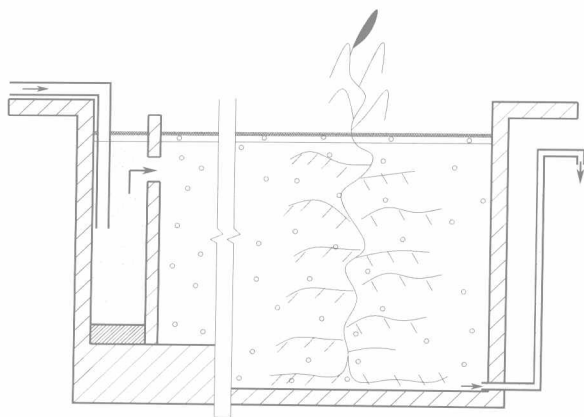


图 1.3 典型的下行流人工湿地污水处理系统

(引自 Bhamidimarri *et al.*, 1991)

Fig. 1.3 Typical down flow constructed wetland for wastewater treatment

(Cited from Bhamidimarri *et al.*, 1991)

水平流湿地与垂直流湿地的区别在于后者应用管道、斜度等特殊设计使水流在湿地内部垂直分布,布水更均匀。水平流湿地的 COD_{Cr} 、 BOD_5 、TSS 等指标的去除效果较好,但对氮、磷等营养物质的去除率不佳,主要原因是湿地基质的水力输导差,氧气不足,不能满足去除营养物质所需要的富氧环境。如 Green 等 (1996) 所做的实验,其水平流和表面流湿地出水的 BOD_5 、TSS 同时低于 20mg/L ,甚至 10mg/L 时,氮、磷的去除率却起伏剧烈, $0\sim 95\%$ 不等。在水平流湿地之后,研究者又发展了垂直流湿地,如 Seidel (1964) 建立的两级湿地处理系统,每一级由几个床体组成,第一级采用串联,以垂直流为主,第二级并联,水平流为主。在这种 Seidel 类系统中,又进一步设计了以卵石代替土壤作为基质的湿地 (Kadlec, 1994)。与水平流相比,垂直流湿地系统内的充氧更充分,有利于好氧微生物的生长和硝化反应的进行,并在氮、磷等营养物质的去除过程中起重要作用。因此垂直流湿地在保持 COD_{Cr} 、 BOD_5 及 TSS 去除率的同时,对氮、磷的去除率有了很大提高。为了更好地使系统充氧,又出现了间歇进水的垂直流,间歇时间通常为 6h ,进水负荷单位面积为 $30\sim 40\text{mm}^2$ 。为了防止系统阻塞,利于排水,许多研究者还在湿地设计中加上 2% 左右的倾斜度。

在实际应用中,水平流湿地仍然占主要地位。美国国家环境保护局 (US EPA, 1993) 对 150 多个用于处理城市污水和工业废水人工湿地的调查表明,大部分采用潜流式系统。其他国家也有类似结论,以欧洲为例,水平流和垂直流湿地二者的比例是 $4\sim 5:1$ (Reed *et al.*, 1995)。在这些潜流型人工湿地系统中,绝大部分是水平流人工湿地,垂直流人工湿地所占比例很小。然而垂直流系统对

于有机物和氮具有更好的净化效果,因此 1990 年以后垂直流人工湿地发展极为迅速,并曾经被认为是“最好的技术”(Platzer, 2000)。

1.2 人工湿地处理技术的发展概况

采用湿地改善水质并非是一个新发明。当人们开始排放污水时,湿地就开始用于净化污水。污水通常直接或间接流入洼地,若当时没有湿地,污水的排放也会很快导致湿地的形成 (Cooper and Boon, 1987)。人工湿地 (constructed wetland) 这个词出现较晚,但此概念却很古老,我们知道古代中国和埃及就已会使用此法,但最早公开的报道见诸于澳大利亚 Brian Mackey 于 1904 年发表的一篇文章 (Cooper and Boon, 1987)。

1.2.1 国外发展概况

1953 年,德国的 Seidel 在其研究工作中发现芦苇能去除大量有机物和无机物。Seidel (1964, 1966) 通过进一步实验发现,一些污水中的细菌 (大肠菌、肠球菌、沙门氏菌等) 在通过种植的芦苇时消失,且芦苇及其他高大植物能在水中吸收重金属和碳水化合物。进入 20 世纪 60 年代,这些实验室观察被推广至许多大规模实验,用以处理工业废水、江河水、地面径流和生活污水 (Seidel *et al.*, 1978), 并由 Seidel 开发出 “Max-Planck Institute-Process”, 该系统由四级或五级组成,每级由几个并联并栽有挺水植物的池子组成,但该系统存在堵塞和积水问题 (Seidel, 1964, 1996; Seidel *et al.*, 1978)。

根据 Seidel 的思路,荷兰于 1967 年还开发了一种称为 Lelystad Process 的大规模处理系统。该系统是一个占地 1hm^2 的星形自由水面流湿地,水深 0.4m, 由于运行问题,该系统后有一长 400m 的浅沟,随后在荷兰建成了大量的这种类型湿地。

Seidel 的工作也刺激了德国在这方面的研究。20 世纪 60 年代中期,Seidel 与 Kickuth 合作并由 Kickuth 在 20 世纪 60 年代中期开发了“根区法”(root zone method)。此根区法由一种有芦苇的矩形池子组成。土壤经选择含有钙、铁、铝添加剂,以改善土壤结构和对磷的沉淀性能。水以地下潜流水平流过芦苇根区。污水流过芦苇床时,有机物降解, N 被硝化、反硝化, P 与 Ca、Fe、Al 共沉淀积累于土壤中。水面保持在地面水平,在池子进口、出口进行布水和收集。此法的问题在于土壤渗透能力并非如 Kickuth 预测的那样随时间而增大,且芦苇传氧至根的能力也通常被认为比 Kickuth 声称的要少 (Seidel, 1996)。

在北美,由于观察到自然湿地的同化能力,在 20 世纪 70 年代开始对不同设计的人工湿地进行实验。大部分初期工作都使用自然湿地处理污水,不久就表现出生物种类组成、生物种群结构、功能及湿地总体价值的显著变化,预示了人工

湿地具有应用的巨大潜力。

欧洲的早期工作对美国人工湿地技术产生了影响。在 20 世纪 60 年代末,美国 NASA 的国家空间技术实验室研究开发了一种“采用厌氧微生物和芦苇处理污水的复合系统”。1976 年,美国 NASA 出版了一本题为《充分利用水生植物》的书,在其中描述了欧洲系统及早期 NASA 系统。NASA 的砾石床系统在去除 BOD_5 、SS、N 及大肠菌方面非常有效。北美洲的其他国家也进行了一些开拓性工作。

自德国 1974 年首先建造人工湿地以来,该工艺已在欧洲得到推广应用,在美国和加拿大等国也得到迅速发展。目前欧洲已有数以百计的人工湿地投入废水处理运行,这种人工湿地的规模差别很大,最小的仅为一家一户排放的废水处理,大的可以处理千人以上村镇排放的污水。随着研究的深入和工艺的改进,人工湿地系统独特的净化效果已不断为人们所认识,目前已成为一种较为完备和独立的污水处理技术,并在世界范围内被广泛应用,处理的对象也扩大到生活污水、矿山废水、农场废水等 (Haberl and Perfler, 1991; Gearheart, 1992; Bouchard *et al.*, 1995; Green *et al.*, 1996; Goodrich, 1996; Hoeppepner *et al.*, 1997; Manyln *et al.*, 1997; Gschlößl *et al.*, 1998; Kivaisi, 2001)。在欧洲、美国、加拿大等地,人工湿地的应用已达到相当规模。在北美已经建成 650 个自然的或者人工的湿地,欧洲现在已有超过 5000 个潜流型人工湿地用于污水处理 (Kadlec and Knight, 1996; Vymazal *et al.*, 1998)。

1.2.2 国内发展概况

我国对于污水生物处理的研究从 20 世纪五六十年代就已经开始。“七五”期间对人工湿地开展了多方面的研究。1990 年在北京昌平建成人工湿地污水处理系统 (国家环境保护局科技标准司, 1997)。该系统采用自由水面人工湿地,处理 500t/d 的生活污水和工业废水,占地面积为 2hm^2 ,水力负荷 4.7cm/d , BOD_5 负荷为 $59\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,取得了较好的效果。1990 年 7 月,国家环境保护总局华南环境科学研究所与深圳东深供水局在深圳白泥坑建造了处理规模为 $3100\text{m}^3/\text{d}$ 的人工湿地示范工程,采用潜流湿地与稳定塘相结合的形式 (胡康萍, 1991; 朱彤等, 1991; 国家环境保护局科技标准司, 1997)。

自 20 世纪 90 年代起,深圳雁田、四川成都活水公园、天津等地也先后建立了人工湿地系统,对人工湿地处理污水规律及其机制进行了比较系统的研究;中国环境科学研究院研究了人工湿地控制农业区径流污染的效果;中国科学院沈阳应用生态研究所研究了人工湿地系统处理石油废水的效果,目前湿地处理的对象已经扩大到生活污水、农业面源污染、矿山废水、农场废水等 (李辉华和朱学宝, 2000; 李亚治, 2000; 彭超英等, 2000; 高素勤, 2000; 王庆安等, 2000a; 陈耀元, 1994; 程树培, 1989; 胡康萍, 1991; 丁廷华, 1992; 唐运平, 1992;

黄淦泉等, 1993; 刘文祥, 1997; 胡焕和王桂珍, 1997; 白晓慧等, 1999; 许春华等, 2001; 毕慈芬等, 2001; 籍国东等, 2001; 王薇等, 2001; 张毅敏和张永春, 1998; 廖新弟和梁敏, 1997)。国内人工湿地的研究逐步从理论研究走向大规模推广应用, 2003 年在山东胶南市建成一座日处理量达 6 万 t 的城市污水人工湿地处理系统, 占地 1000 亩 (注: 1 亩 = 666.7 m²), 具体工艺为: 格栅—沉砂池—调节池—人工湿地—排海 (迟延智和陈风伦, 2003)。

1.2.3 相关前期研究工作概况

中国科学院水生生物研究所是我国最早开展水污染调查监测和污水生物处理等研究的单位之一, 也是国内最早开展湿地等生态工程研究的单位之一。早在 20 世纪 50 年代, 黎尚豪院士等就在武汉马房山建成了我国第一座氧化塘, 并就其污水处理功能进行了初步探索。自 70 年代初开始, 王德铭先生组织多项全国或流域规模的重大污染调查和生态工程研究。70 年代中期, 张甬元等通过系统研究, 设计和主持建造了我国第一座大规模氧化塘——鸭儿湖氧化塘, 面积达 3000 多亩, 处理武汉葛店化工厂有机磷农药生产废水, 日处理废水 7 万 t, 取得了良好的环境和社会效益, 为我国污水生物处理提供了科学依据、设计参数以及工程示范 (张甬元等, 1981, 1982, 1983)。“六五”期间, 丘昌强、夏宜琤、谭渝云、……、吴振斌等对北京燕山石化废水生物处理进行了可行性研究, 应用生物方法处理较难降解的石化废水, 取得了较好的效果 (吴振斌等, 1987a, 1987b, 1988, 1990)。“七五”期间, 夏宜琤、张甬元、邓家齐、陈锡涛、吴振斌等开展了国家科技攻关项目“湖北省黄州城区污水综合生物塘处理研究”, 利用不同层次的生物处理单元组合系统净化污水, 同时进行资源回收, 这是一种低投入、高效率的城镇污水净化生态工程技术 (夏宜琤等, 1994; 吴振斌等, 1987a, 1987b, 1988, 1990; Wu and Xia, 1994; Wu *et al.*, 1991a, 1991b, 1993a, 1993b); 同时, 丘昌强等还开展了“常德城市污水净化与资源化生态工程系统研究”, 提出了与生态农业相结合的、以“基塘系统”和“垄沟系统”为核心的城市污水净化及资源化复合生态工程系统 (刘剑彤等, 1998, 1999)。“八五”期间, 夏宜琤、徐小清、吴振斌等开展了“武汉东湖污染综合治理技术研究”, 吴振斌、邱东茹等开展了“湖泊水生植被恢复重建、结构优化及合理利用研究”等国家科技攻关项目研究 (邱东茹等, 1995; 邱东茹和吴振斌, 1996, 1997a, 1997b, 1998a, 1998b; Qiu *et al.*, 1997, 2001); 1994 年, 成水平、夏宜琤等开展了小规模人工湿地处理污水效果及其净化机制的初步研究 (成水平等, 1997, 1999; 成水平和夏宜琤, 1998a, 1998b)。几十年来, 中国科学院水生生物研究所 (以下简称水生所) 几代科研人员在水污染治理和生态工程技术方面进行了艰苦的探索, 取得了突出成绩和丰硕的科研成果, 先后获全国科学大会奖、中国科学院技