

人工湿地污水处理 理论与技术

◎ 王世和 著

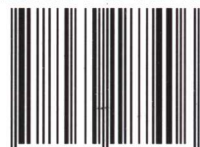


科学出版社
www.sciencep.com

(X-0224.0101)



ISBN 978-7-03-018740-6



9 787030 187406 >

销售分类建议：资源环境

定 价：45.00 元

人工湿地污水处理理论与技术

王世和 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是迄今为止国内仅有的较全面系统地介绍人工湿地污水处理理论、技术及最新研究成果的专著。全书注重体系的完整性和系统性,兼顾理论与实用,紧密结合国内外最新研究进展与观点,其中众多的内容为作者研究的最新成果。

全书共分八章,内容包括:人工湿地污水处理技术与发展概况,人工湿地的植物与功能,人工湿地的微生物与功能,人工湿地的基质条件与功能,人工湿地中污染物的迁移与转化,人工湿地的处理原理,人工湿地的强化处理技术,人工湿地的设计、建造与管理。同时附有近百种常用湿地植物图谱及介绍。

本书可作为相关科研院所、工程设计单位及其他各类从事水处理、生态修复等工程技术人员的参考书,也可作为高等院校市政工程、环境工程、生态工程等与水处理相关专业的研究生、本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

人工湿地污水处理理论与技术/王世和 著. —北京:科学出版社,2007
ISBN 978-7-03-018740-6

I. 人… II. 王… III. 人工湿地-污水处理 IV. P941.78X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 035636 号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:刘士平 / 封面设计:高海英

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 5 月第一次印刷 印张:16 彩插:12

印数:1—2 500

字数:340 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

人工湿地污水处理技术的发展最早可追溯到 1903 年,英国约克郡 Earby 州建立了世界上第一个用于处理污水的人工湿地。

作为一种新型生态污水处理技术,近一个多世纪以来,在欧洲、美国、亚洲,从研究开发到工程应用,不断取得成功的范例。特别是 20 世纪 60 年代初德国 Kathe Seidel 博士具有开创意义的一系列发现及其与 Kichuth 博士合作并由 Kichuth 于 1972 年开发的“根区法”(the root zone-method),有力地推动了人工湿地污水处理技术的试验研究,也为其在全球的深入发展和广泛应用播下了富有生命力的种子。20 世纪 80 年代末和 90 年代初,美国相继召开了人工湿地研讨会,国际上也曾就此先后召开过四次专题研讨会。这标志着人工湿地作为一项独具特色的污水处理技术正式进入水污染控制领域。

作为一种生态污水处理方法,污染物的净化主要是通过植物根区的吸收、吸附,微生物(膜)及微小动物的同化、异化及其与基质的协同作用完成的,通过植物的光合作用及根系的输氧,使之形成好氧、缺氧、厌氧的多生态复合体系,从而有效地保证了 COD、SS、N、P 等的高效综合处理效果。由于具有经济投入少、运行成本低、工艺简捷、运行稳定、处理效果好等诸多优点,日益受到了国内外学者及工程技术界的广泛关注。特别是在脱磷、脱氮方面的卓越成就,更使其成为当今最具开发、应用前景的污水处理工艺之一。目前,除在城市生活污水处理中得到较广泛应用外,在垃圾渗滤液、奶酪加工及畜牧养殖场排水、多种工业废水的处理及污染尾水的深度净化、湖泊周边面源防护与生态修复等方面,均显示出广阔的应用前景。目前,研究正方兴未艾,应用领域正不断拓展。

作者在研究中发现,尽管人工湿地处理技术具有诸多优势和潜力,而且其发展已有近一个世纪的历史,但相对于其他处理工艺而言,人工湿地仍然是一项年轻、粗放和有待成熟的技术,其构造和工作环境更接近于自然,运行除受植物、基质、微生物等构成要素影响外,还受天候、季节、气温等自然因素影响,显现其技术的复杂性和非可控性。也许正是由于这一原因,到目前为止,除发表于国内外杂志的众多探索性论文外,很难找寻到几本较系统全面地介绍人工湿地处理理论、技术与设计方法的专著,尤其是在国内。正是基于这一认识,本书作者下定决心,藉完成国家自然科学基金资助项目之契机,大量阅读国内外可查询的资料,并将我们研究中的体会和已发表的相关成果一并予以整理,编撰成此书,希望对国内同行们正在进行的研究和工程实践能有所裨益,若能如此,作者将感到无比欣慰。

基于上述初衷,本书编写中注意了体系的完整性和系统性,并力求兼顾理论与实用性,紧密结合国内外最新研究进展与观点。全书共分八章,其中第一章由王世和负责编写,在概要介绍人工湿地的类型、工艺组合、技术特点的基础上,较全面地回顾了该技术的发展历程与研究现状,并指出了目前人工湿地应用中有待进一步研究的问题;第二、三、四章分别由黄娟、雒维国负责编写,分别介绍了作为人工湿地组成要素的植物、微生物及基质在湿地净化中的作用、功能特性及对处理效果的影响,在有关植物的论述中,作者结合对湿地植物蒸发蒸腾与光合作用特性的测定和分析,介绍了植物在湿地供氧、强化脱氮和提高综合处理效果中的作用;第五章由丁成负责编写,较系统地介绍了污染物在湿地水环境及土壤(基质)环境中的迁移转化过程与规律;第六章由鄢璐负责编写,从氧平衡与氧传递、有机物及氮、磷转移与去除等方面介绍了湿地处理的基本原理及对处理效果的影响;第七章由钟秋爽负责编写,对作为热点话题的湿地强化除磷脱氮及有机物去除的原理与方法进行了介绍;第八章由鄢璐负责编写,从工程实用出发,介绍了目前国内外常用的设计理论与方法及湿地的运行与管理,并提供了运行中的多个工程实例。为便于广大科研及工程技术人员查找、识别、参考和选用,书中附录列举了作者收集到的近百种常用湿地植物的图谱及特性介绍。参与本书部分章节编写的还有王薇、王峰、刘洋、钱卫一。全书由王世和统稿。编写过程中,承蒙不少水处理界前辈和同行的热诚鼓励与支持,使本书得以顺利成稿。同时,还要感谢东南大学出版基金为本书出版提供了经费上的支持。

人工湿地作为一项快速发展中的工艺技术,涉及内容广泛,影响因素复杂,故书中疏漏和不切之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第一章 人工湿地污水处理技术与发展概况	1
1.1 人工湿地概述	1
1.1.1 人工湿地的分类	2
1.1.2 人工湿地的工艺组合	3
1.1.3 人工湿地的运行方式	4
1.2 人工湿地的技术特点	4
1.3 人工湿地的发展历史与研究现状	6
1.3.1 人工湿地处理效果的研究	8
1.3.2 人工湿地的净化机理	8
1.3.3 人工湿地数学模型	11
1.3.4 强化措施的提出	12
1.4 目前人工湿地技术发展方面存在的问题	12
参考文献	13
第二章 人工湿地的植物与功能	16
2.1 人工湿地的植物与功能特性	16
2.2 人工湿地植物的光合、蒸腾特性	18
2.2.1 试验的分析测试方法	18
2.2.2 光合及蒸腾作用的日变化特性	19
2.2.3 湿地植物净光合速率的比较	20
2.2.4 湿地水深对光合及蒸腾作用的影响	20
2.2.5 湿地植物的蒸腾特性	22
2.3 植物光合作用及蒸发蒸腾对处理效果的影响	26
2.3.1 对湿地 DO 分布的影响	26
2.3.2 P_n 对各类污染物净化效果的影响	29
2.3.3 光合和蒸腾特性对湿地脱氮效果的影响	30
2.3.4 植物蒸发蒸腾量日变化对净化效果的影响	32
2.3.5 蒸发蒸腾量的季节变化及对湿地处理效果的影响	34
2.4 人工湿地植物对处理效果的影响	35
2.4.1 植物类型对湿地净化效果的影响	35

2.4.2 植物生长特性对湿地净化效果的影响	39
参考文献	43
第三章 人工湿地的微生物与功能	45
3.1 湿地生物处理的微生物学基础	45
3.1.1 微生物对有机物的降解	45
3.1.2 微生物对氮的降解	46
3.1.3 微生物对磷的降解	48
3.1.4 微生物对硫的降解	49
3.2 湿地微生物数量及其分布	49
3.2.1 人工湿地与天然湿地的微生物分布	50
3.2.2 人工湿地微生物的空间分布	50
3.2.3 不同植物根区的微生物分布	52
3.2.4 季节变化对人工湿地微生物分布的影响	53
3.3 微生物对污染物的降解作用	55
3.4 人工湿地植物根区酶活性与净化效果的关系	57
参考文献	59
第四章 人工湿地的基质条件与功能	62
4.1 人工湿地的基质种类与性能	62
4.1.1 基质填料的几何特性与性能评价	62
4.1.2 基质填料的选择原则	63
4.1.3 基质填料的工程应用	64
4.2 人工湿地基质的吸附过程与特性	67
4.2.1 基质填料对污染物的截留机理	67
4.2.2 基质填料的吸附过程	68
4.3 人工湿地基质的研究现状及发展趋势	69
4.3.1 湿地基质脱氮除磷研究现状	69
4.3.2 湿地基质填料的发展趋势	71
4.4 人工湿地基质的功能及对处理效果的影响	71
4.4.1 基质对氮的去除	71
4.4.2 基质对磷的去除	78
4.5 基质填料的堵塞问题	84
4.5.1 人工湿地的堵塞问题	84
4.5.2 湿地堵塞机理	86
4.5.3 堵塞的解决方法	90
参考文献	92

第五章 人工湿地中污染物的迁移与转化	94
5.1 污染物在湿地水环境中的迁移转化	94
5.1.1 人工湿地的水环境特征及功能	94
5.1.2 污染物在湿地水体中的迁移转化	95
5.2 污染物在湿地土壤中的迁移转化	97
5.2.1 有机污染物在土壤中的迁移转化	97
5.2.2 重金属在土壤中的迁移转化	103
5.3 湿地植物对污染物的吸收	105
参考文献	106
第六章 人工湿地的处理原理	109
6.1 人工湿地的氧平衡与氧传递	109
6.1.1 人工湿地中氧的区域性分布规律	109
6.1.2 人工湿地中氧的时间变化规律	111
6.1.3 人工湿地氧环境的影响因素	112
6.1.4 人工湿地中的氧平衡	115
6.2 人工湿地中有机物的去除与分布特性	119
6.2.1 人工湿地中有机物的去除机理	119
6.2.2 人工湿地中有机物的分布特性	120
6.2.3 人工湿地有机物去除效率的季节性变化及日变化	120
6.2.4 植物对有机物去除效率的影响	122
6.2.5 填料对有机物去除效率的影响	123
6.3 人工湿地中氮的转移与去除	123
6.3.1 人工湿地系统中植物的脱氮作用	123
6.3.2 基质条件对湿地脱氮效果的影响	124
6.3.3 人工湿地系统中的氨氮挥发	125
6.3.4 人工湿地中微生物的脱氮作用	126
6.3.5 人工湿地氮转移途径的探讨	127
6.4 人工湿地中磷的转移与去除	130
6.4.1 人工湿地中磷的存在形态	130
6.4.2 人工湿地中磷的转化	131
6.4.3 人工湿地内各要素对磷的去除	132
6.4.4 外界因素对人工湿地除磷的影响	138
6.4.5 湿地除磷的动态模型	140
6.5 人工湿地对其他污染物的去除机理	141
6.5.1 悬浮物(SS)的去除	141

6.5.2 重金属的去除	141
6.5.3 硫化物的去除	145
6.5.4 难降解有机物的去除	145
6.5.5 藻毒素的去除	146
6.6 水力条件对处理效果的影响	147
6.6.1 水力负荷对处理效果的影响	147
6.6.2 容积负荷对处理效果的影响	148
6.6.3 水力停留时间对处理效果的影响	149
6.6.4 水深变化对处理效果的影响	150
6.7 人工湿地的杀菌消毒	152
参考文献	152
第七章 人工湿地的强化处理技术	158
7.1 强化脱氮原理与方法	158
7.2 强化除磷原理与方法	159
7.3 强化处理工艺与效果	161
7.3.1 垂直流与水平流	161
7.3.2 强化曝气	163
7.3.3 湿地的串联	166
7.3.4 多点进水	168
7.3.5 出水回流	169
参考文献	171
第八章 人工湿地的设计、建造与管理	174
8.1 设计概述	174
8.2 设计基本理论及参数选择	175
8.2.1 设计选型	175
8.2.2 设计基本理论	177
8.2.3 设计参数	180
8.3 其他设计要素的确定	182
8.3.1 地址选择	182
8.3.2 进出水系统布置	183
8.3.3 植物选择	184
8.3.4 填料选择	185
8.4 运行维护与管理	186
8.4.1 启动期运行维护措施	186
8.4.2 植物系统管理	186

8.4.3 低温环境运行维护措施	187
8.5 典型实例	188
8.5.1 国外湿地设计实例	188
8.5.2 国内湿地设计实例	200
参考文献	212
附录 常见湿地植物介绍	214
(一) 挺水型花卉植物(包括湿生、沼生)	214
(二) 浮叶型花卉植物	243
(三) 漂浮型花卉植物	245
(四) 沉水型花卉植物	246
彩图	247

第一章 人工湿地污水处理技术与发展概况

当前,水污染及水资源短缺已成为世界各国所面临的共同问题,对于发展中国家尤其如此。以我国为例^[1],近年来,由于社会经济的快速发展及人民生活水平的提高,工业废水和生活污水量与日俱增,年排放总量已突破 520 亿吨,而城市生活污水的年处理率目前仅为 37.4%。大量未经处理的污水排入各类水体(包括地面水和地下水),引起水环境极度恶化,水生生态系统遭到破坏,人民的健康受到严重威胁,可以说,我国绝大部分城镇已处于污水的包围之中,此种触目惊心的状况正受到政府及全社会的广泛关注。

实践证明,解决水污染及水资源短缺问题是一项耗资巨大而又十分复杂的系统工程,需要多方面、多目标、多学科配合,综合分析才能制定出最佳方案。就我国的经济实力而言,多数情况下,污水处理的技术经济指标往往是选择方案时首先必须考虑的问题。传统的污水处理技术已有上百年的发展历史,以活性污泥法为代表的生物处理工艺目前已发展到较高水平,技术上日臻成熟,对水污染控制起到了积极的作用。但目前的活性污泥工艺仍存在着基建投资大,运行费用高,且主要以去除碳源污染物为目的,对氮(N)、磷(P)等营养物质的去除率则较低(只有30%~50%),经处理后的出水排入水体后仍将引起“富营养化”等环境问题。三级处理虽可解决上述问题,但因投资和运行费用昂贵而难以大面积推广。同时事实也说明,单纯依靠传统的人工处理方法,在我国当前的情况下难以从根本上解决水污染问题,只能延缓水污染的发展势头。

历史的经验值得注意,对于广大发展中国家,在学习和借鉴发达国家污水处理经验的同时,需要开阔思路,兼容并蓄,根据各国国情,探索解决水污染和水资源不足问题的有效途径。在此情况下,人工湿地处理技术的提出和发展为综合解决上述问题提供了新的选择。

1.1 人工湿地概述

从生态学上说,湿地是由水、永久性或间歇性处于水饱和状态下的基质及水生植物和微生物等所组成的、具有较高生产力和较大活性、处于水陆交界相的复杂的生态系统。而人工湿地是为处理污水而人为设计建造的、工程化的湿地系统。这种湿地系统是在一定长、宽比及地面坡度的洼地中,由土壤和基质填料(如砾石等)混合组成填料床,污水在床体的填料缝隙或床体的表面流动,并在床的表面种植具

有处理性能好、成活率高、抗水性强、成长周期长、美观及具有经济价值的水生植物(如芦苇、荇菜等),形成一个具有污水处理功能的独特的生态系统,故人工湿地也称为构筑湿地,国外更有人称之为生态滤池。

人工湿地依靠物理、化学、生物的协同作用完成污水的净化过程,强化了自然湿地生态系统的去污能力。从自然调节作用看,人工湿地还具有强大的生态修复功能,不仅在提供水资源、调节气候、降解污染物等方面发挥着重要作用,还能吸收二氧化硫、氮氧化物、二氧化碳等气体,增加氧气、净化空气,消除城市热岛效应、光污染和吸收噪声等。

1.1.1 人工湿地的分类

国内外学者对人工湿地系统的分类多种多样^[2]。不同类型的人工湿地对特征污染物的去除效果不同,具有各自的优、缺点。从工程实用的角度出发,按照系统布水方式的不同或水流方式差异一般分为自由表面流人工湿地(surface flow wetland, FWS)和潜流型人工湿地(subsurface flow wetland, SFS)。潜流型人工湿地又包括水平潜流人工湿地、垂直潜流人工湿地和潮汐潜流人工湿地。

1. 自由表面流人工湿地

如图 1.1 所示,典型的 FWS 系统是由水池或槽沟组成,并设有地下隔水层以防止地下渗漏。污水在人工湿地的土壤表层流动,水位较浅,一般为 0.1~0.6m。与后面介绍的 SFS 系统相比,其优点在于投资省、操作简便、运行费用低;缺点是负荷低,去污能力有限。氧主要来自于水体表面扩散、植物根系的传输,但传输能力十分有限。该湿地系统运行受自然气候条件影响较大,夏季易滋生蚊蝇,并有臭味。

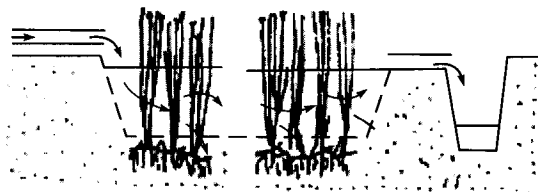


图 1.1 自由表面流人工湿地示意图

2. 水平潜流人工湿地

潜流型湿地系统又称渗滤湿地系统(infiltration wetland),如图 1.2 所示。在 SFS 系统中,污水在湿地床表面下流动,一方面可以充分利用填料表面生长的生物膜、丰富的植物根系及表层土和填料截留等作用,以提高处理效果和处理能力;另

一方面,由于水流在地表下流动,故保温性好,处理效果受气温影响小,卫生条件较好,是目前国际上研究和应用较多的一种湿地处理系统,但这种系统的投资要比FWS系统略高。

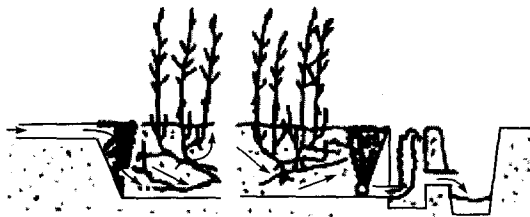


图 1.2 潜流人工湿地示意图

水平潜流人工湿地因污水从一端水平流过填料床而得名。与自由表面流人工湿地相比,水平潜流人工湿地的水力负荷高,对 BOD、COD、SS、重金属等污染物的去除效果好,且很少有恶臭和孳生蚊蝇现象。但其脱氮除磷效果不及下述的垂直潜流人工湿地。

3. 垂直潜流人工湿地

污水从湿地表面垂向流过填料床的底部或从底部垂直向上流进表面,床体处于不饱和状态,氧可通过大气扩散和植物传输进入人工湿地。垂直潜流人工湿地的硝化能力高于水平潜流人工湿地,用于处理含氨氮(NH_4^+-N)浓度较高的污水更具优势。

4. 潮汐潜流人工湿地

潮汐潜流人工湿地是近年来由伯明翰大学研究并提出,芦苇床按时间序列交替地被充满水和排干,床体充水过程中空气被挤出,排水过程中新鲜的空气被带入床内。伯明翰大学最新研究结果表明,当水被排出芦苇床,有机污染物留在基质内时是氧消耗量最大的时刻。因此,排水过程中进入的新鲜空气可看作是去除污染物的氧源。通过这种交替的进水和空气运动,氧的传输速率和消耗量大大提高,极大地提高了芦苇床的处理效果。但潮汐流湿地运行一段时间后,床体可能会被大量的生物所堵塞,限制了水和空气在床体内的流动,降低了处理效果。因此,设计中可考虑采用备用床交替运行,以便利用闲置期进行生物降解。

1.1.2 人工湿地的工艺组合

人工湿地的工艺组合有多种形式,其中常用的有推流式、回流式、阶梯进水式和综合式四种,如图 1.3 所示。

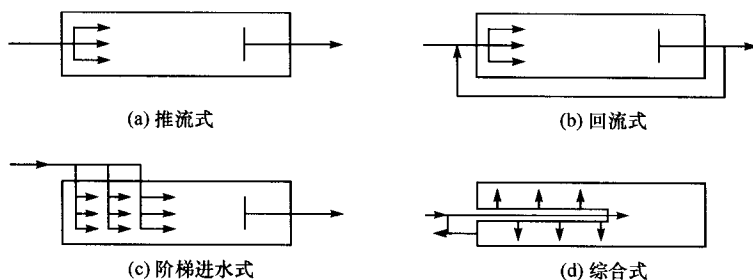


图 1.3 人工湿地的工艺组合

回流式可稀释进水的有机物和悬浮物浓度,增加水中的溶解氧,并减少处理出水中可能出现的臭味问题。出水回流还可促进床内的硝化和反硝化脱氮作用,采用低扬程水泵,通过水力喷射或跌水等方式进行充氧。阶梯进水式可避免处理床前部堵塞,使植物长势均匀,有利于床体后部的硝化脱氮作用;综合式则一方面设置了出水回流,另一方面又将进水分布至填料床的中部,以减轻填料床前端的负荷。

1.1.3 人工湿地的运行方式

人工湿地的运行可根据处理规模的大小进行多种不同方式的组合,一般有单一式、并联式、串联式和综合式等,如图 1.4 所示。此外,人工湿地还可与氧化塘等系统串联组合。

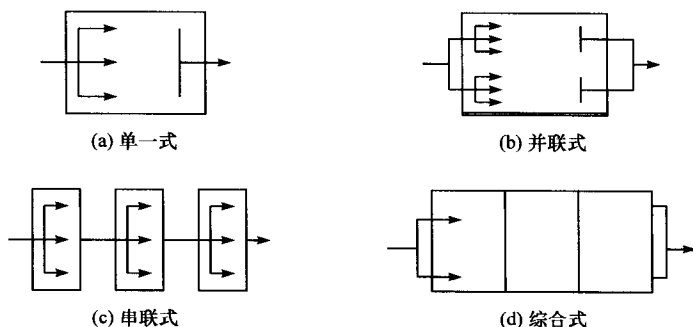


图 1.4 人工湿地的运行方式

1.2 人工湿地的技术特点

与其他污水处理工艺相比,人工湿地具有诸多明显的优点,如对负荷变化适应能力强、出水水质好、工程基建和运行费用低、操作管理简单、维护方便等。

人工湿地的显著特点之一是良好的污水净化能力。国内外有关处理城市污水的研究表明,人工湿地对 BOD_5 去除率可达 85%~95%,SS 去除率达 90%以上,除磷脱氮效果也很好,去除率可分别达到 90%和 60%以上,而城市二级污水处理厂对 N、P 的去除率仅为 20%~40%。人工湿地不仅可处理以耗氧有机物和 N、P 等营养物为主的生活污水,对含重金属、酸性有机物及无机矿物等工业废水也具有良好的去除效果。几个中试规模人工湿地系统的处理效果如表 1.1 所示。

表 1.1 几个中试规模人工湿地的处理效果

地 名	湿地类型	出水浓度/(mg/L)						备 注
		BOD_5	SS	NH_4^+-N	NO_3^--N	TN	TP	
加拿大安大略 Listowel	开阔沟垄	10	8	6	0.2	8.9	0.6	加铝盐 处理
美国加州 Arcata	开阔沟垄	<20	<8	<10	<0.7	11.6	6.1	
美国加州 Santee	砾石填沟	<30	<8	<5	<0.2			
美国密执安州 Nermontville	渗透滤床湿地			2	1.2	6.2	2.1	
天津市	具有自由水面,沟垄	<30	<20	<15	<0.2	<20	<1.5	
天津市	自由水面、暗管集水	<20	<10	<10	<0.3	<10.3	0.5	
天津市	渗滤床湿地	<20	<10	3~10		6~11	0.5	

低投资、低运行费用、低维护技术是人工湿地的又一优点。由于人工湿地的土建施工比较简单且基本不需耗能,其造价和运行费用均远比传统的二级生物处理工艺节省。据国外统计,一般湿地系统的投资和运行费用仅为传统二级污水处理厂的 1/10~1/2。我国深圳白泥坑工程的运行费用仅为传统二级活性污泥法的 10%左右(表 1.2)。

表 1.2 深圳白泥坑人工湿地与有关污水处理厂的经济比较

工程名称	处理方式	总投资 /万元	吨水投资额 /(元/m ³)	年运行费 /万元	吨水处理成本 /(元/m ³)	吨水占地面积 /(m ² /m ³)
深圳某污水厂	鼓风曝气	3300	660	>100	>0.20	2.67
蛇口某污水厂	鼓风曝气			>100	>0.20	
珠海某污水厂	鼓风曝气	1500	830	>100	>0.20	1.20
海南某污水厂	氧化沟	547	574	36.5	0.20	1.20
白泥坑工程	人工湿地	42.9	138	=2.0	0.02	2.79

由于人工湿地基本上不需要机电设备,故维护上只需清理进、出水渠道及管理作物,对运行人员的技术要求不高。

与传统的二级处理厂相比,占地面积较大是其主要缺点。一般人工湿地占地面积相当于生化处理厂的2~5倍,但相对于其他土地处理及天然处理方法,还是省地的。

人工湿地具有的诸多特点决定了它特别适合于地理条件比较宽裕的广大农村、中小城镇的污水处理,尤其适合于经济发展水平不高、能源短缺、技术力量相对缺乏的地区,这在我国当前的现实条件下更具有特别重要的意义。

1.3 人工湿地的发展历史与研究现状

人工湿地污水处理技术的发展最早可追溯到1903年,英国约克郡 Earby 州建立了世界上第一个用于处理污水的人工湿地,并连续运行至1992年,而人工湿地污水处理工艺在世界各地受到重视并被较广泛应用则始于20世纪60年代。1953年,德国 Kathe Seidel 博士在研究中发现,芦苇能去除大量有机物和无机物。Seidel在进一步试验后发现,一些污水中的细菌(大肠菌、肠球菌、沙门氏菌)在种植芦苇后消失了(Seidel,1964、1966)。试验结果表明,芦苇及其他高大植物能从污水中去除重金属和碳水化合物。其后,这些实验室观察开始推广至许多大规模试验,并用以处理工业废水、江河水、地面径流和生活污水(Seidel,1978)^[3],在此同时,Seidel 开发出“Max-Planck institute-process”系统。该系统由四或五级组成,每级由几个并联并栽有挺水植物的池子组成^[4]。

根据 Seidel 的思路,荷兰于1967年开发了一种现称之为“Lelystad Process”的大规模处理系统,该系统是一个占地一公顷的星形自由水面流湿地,水深0.4m,由于运行问题,该系统后接一个长400m的浅沟,随后这种湿地在荷兰大量建成。

Seidel 的工作刺激了德国在这方面的研究。20世纪60年代中期,Seidel 与 Kichuth 合作并由 Kichuth 于1972年开发出“根区法”(the root zone-method),进一步推动了对湿地污水处理技术的试验研究。根区法由一种栽有芦苇的矩形池子组成。土壤经选择含有钙、铁、铝添加剂,以改善土壤结构和提高对磷(P)的沉淀性能。水以地下潜流水平流过芦苇根,有机物被降解,N被硝化、反硝化,P与Ca、Fe、Al共沉积累于土壤中。水面与地面齐平,在池子进、出口处分别进行布水和收集。该理论的提出掀起了人工湿地研究与应用的热潮。此法的问题在于土壤渗透能力并非像 Kichuth 预测的那样随时间而增大,且芦苇传氧至根部的能力通常比 Kichuth 所说的要少得多(1990)^[5]。

欧洲的早期工作对美国人工湿地处理技术的发展产生了较大的影响。20世