

人工湿地污水处理技术

尹 军 崔玉波 编著



Chemical Industry Press



化学工业出版社
环境·能源出版中心

人工湿地污水处理技术

尹 军 崔玉波 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

人工湿地污水处理技术/尹军,崔玉波编著. —北京:
化学工业出版社, 2006.3
ISBN 7-5025-8384-X

I. 人… II. ①尹…②崔… III. 沼泽化地-污水
处理 IV. ①P941.78②X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 020645 号

人工湿地污水处理技术

尹 军 崔玉波 编著

责任编辑:董 琳 徐 娟

责任校对:宋 玮

封面设计:关 飞

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 375 千字

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8384-X

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前言

湿地与人类的生存、繁衍和发展息息相关,是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一,它不仅为人类的生产和生活提供多种资源,而且具有巨大的环境功能和效益,在抵御洪水、调节径流、蓄洪防旱、控制污染、调节气候、控制土壤侵蚀、促淤造陆、美化环境等方面有其他系统不可替代的作用,被誉为“地球之肾”,受到全世界范围的广泛关注。但随着人口的急剧增加,为解决农业用地的扩张和发展经济,对湿地的不合理开发利用导致我国天然湿地日益减少,功能和效益下降;捕捞、狩猎、砍伐、采挖等过量获取湿地生物资源,造成了湿地生物多样性逐渐丧失;湿地水资源过度开采利用,导致湿地水质碱化,湖泊萎缩;长期承泄工农业废水、生活污水,导致湿地水污染,严重危及湿地生物的生存环境;森林资源的过度砍伐,植被破坏,导致水土流失加剧,江河湖泊泥沙淤积等,使我国湿地资源已经遭受了严重破坏,其生态功能也严重受损。

不合理利用湿地资源已经造成了天然湿地功能衰退,但天然湿地的水质净化功能在历史上就已经广为应用,在一些地方至少存在100年以上。基于天然湿地的净化机理,也是出于保护天然湿地的目的,人工湿地污水处理技术在20世纪50年代诞生于德国。进入60年代,该技术开始用于处理工业废水、江河水、地面径流和生活污水,目前已经在世界范围内得到广泛研究和应用。

与传统的污水二级生化处理工艺比较,人工湿地污水处理技术具有净化效果好、去除氮磷能力强、工艺设备简单、运行维护管理方便、能耗低、系统配置可塑性强、工程基建和运行费用低、出水具有一定的生物安全性、生态环境效益显著并美化环境、可实现废水的资源化等特点。虽然占地面积较大,但所占用的土地基本上仍可发挥其自然属性的作用,并可因地制宜地加以开发利用。因此,该技术适用于远离城市污水管网的居民小区、别墅区、旅游景区、中小城镇、厂矿企业、农村生活污水和生产废水,以及微污染水源水等的处理。同时,借助其显著的生态环境效益和观赏性,可以将污水处理集观赏、娱乐、科教和水质净化于一体。

人工湿地是一项较新的污水处理技术,应用历史较短,在进行工程化时也存在认识上的缺陷。本书提供了较为全面的相关背景知识,从机理、设计到维护和管理,从研究成果到应用实践,详尽地进行了归纳、总结和提高,以期对应用该技术的人士起到借鉴作用,也希望进一步扩大人们对该技术的认识和认同。

在本书的资料整理、编写和有关部分章节内容的研究中,得到了多位同仁和研究生的积极参与和支持。具体编写人员为:赵可、刘志生、宋铁红、林英姿、刘文、董婵、朱宝英、赵立辉、李相猛、部占友。

由于编写时间紧张,编著者水平有限,书中不妥之处在所难免,欢迎读者和有关专家批评指正。

编著者
2006年1月

目 录

第 1 章 湿地概述	1
1.1 湿地的概念	1
1.2 湿地的主要类型及分布	2
1.2.1 沼泽湿地	2
1.2.2 湖泊湿地	2
1.2.3 河流湿地	3
1.2.4 浅海、滩涂湿地	3
1.3 湿地的功能	4
1.4 我国湿地的特点	4
1.5 人工湿地	5
1.5.1 人工湿地的概念	5
1.5.2 人工湿地的分类	6
1.5.3 人工湿地的构造	7
1.5.4 人工湿地处理系统的特点	7
1.5.5 人工湿地去除污染物机理	8
1.5.6 人工湿地发展简史	10
1.6 国际《湿地公约》及我国的国际重要湿地	12
1.6.1 国际《湿地公约》	12
1.6.2 我国的国际重要湿地	13
第 2 章 湿地土壤	14
2.1 湿地土壤的概念	14
2.2 湿地土壤的物理性质	15
2.2.1 湿地矿物土壤	15
2.2.2 湿地有机土壤	15
2.3 湿地土壤的化学性质	16
2.3.1 阳离子交换	16
2.3.2 氧化还原反应	17
2.4 生物对含氢土壤的影响	18
2.4.1 微生物过程	19
2.4.2 湿地植物的影响	19
2.4.3 动物对湿地土壤的影响	20
2.5 人工湿地土壤	20
2.5.1 表面流湿地	20
2.5.2 潜流湿地	20
2.6 人工湿地充填材料	21
第 3 章 湿地水力学和水质	22
3.1 湿地水力学	22
3.2 水量平衡及其对污染物的影响	24
3.3 湿地水质	24
3.4 湿地中的生物化学循环	26

第4章 湿地微生物和植物	30
4.1 湿地微生物	30
4.1.1 细菌和真菌	30
4.1.2 微生物的代谢	31
4.1.3 微生物生长	31
4.2 湿地藻类	32
4.2.1 概述	32
4.2.2 藻类分类	33
4.2.3 生态学	33
4.3 湿地大型植物	34
4.3.1 分类	34
4.3.2 植物在淹没性土壤中的适应性	35
4.3.3 植物的繁殖	35
4.3.4 植物在处理污水中的作用	36
4.3.5 植物残体的分解	37
第5章 湿地水力学和化学设计基础	38
5.1 表面流湿地水力学	38
5.1.1 蒸发蒸腾量的确定	38
5.1.2 湿地中的漫流	41
5.2 潜流湿地水力学	42
5.2.1 蒸发蒸腾量的确定	42
5.2.2 水力学背景知识	43
5.2.3 湿地中的水流运动及水力传导率	43
5.2.4 堵塞问题	44
5.2.5 潜流湿地的水力学设计	45
5.2.6 设计标准	46
5.3 化学设计基础	47
5.3.1 理论基础	47
5.3.2 化学反应计算	48
5.3.3 湿地混合反应模型	48
5.3.4 串联模型	49
5.3.5 生物膜传质模型	50
第6章 人工湿地去除污染物的机理和模型	53
6.1 温度、溶解氧和pH值的影响	53
6.1.1 温度	53
6.1.2 溶解氧	54
6.1.3 pH值	56
6.2 悬浮固体的去除	57
6.2.1 表面流湿地中的悬浮固体	57
6.2.2 潜流湿地中的悬浮固体	59
6.3 有机物的去除	61
6.3.1 一般性概念	61
6.3.2 有机物输入和输出之间的关系	62
6.3.3 有机物去除动力学模型	62
6.4 湿地处理系统的除氮性能	67
6.4.1 湿地中氮的类型	67
6.4.2 湿地中氮的转化	69
6.4.3 湿地中的总氮去除	79
6.4.4 湿地除氮的设计方法	82
6.5 除磷	86

6.5.1	湿地中磷的水化学	87
6.5.2	湿地中磷的植物化学	88
6.5.3	生物对磷的吸收和储存	89
6.5.4	土壤和填充材料对除磷的作用	90
6.5.5	除磷模型	93
6.6	其他物质	97
6.6.1	综合参数	97
6.6.2	其他常规营养元素	99
6.7	人工湿地去除重金属	100
6.7.1	湿地系统中主要的金属	101
6.7.2	湿地去除重金属的性能	101
6.8	病原菌在人工湿地中的去除	110
6.8.1	污水中的病原菌	110
6.8.2	病原菌去除效能	111
6.8.3	病毒的迁移	114
第7章	人工湿地处理垃圾渗滤液	115
7.1	渗滤液水量和水质特点	115
7.2	湿地处理负荷和对污染物质的去除	118
7.2.1	湿地处理负荷	118
7.2.2	湿地对污染物质的去除	119
7.3	湿地植物	120
7.4	设计模型	120
7.5	生物毒害与积累	121
7.6	工程实例	122
7.6.1	利用天然湿地系统处理垃圾渗滤液	122
7.6.2	利用人工湿地系统处理垃圾渗滤液	124
第8章	人工湿地技术在水源保护和废水处理中的应用	131
8.1	水源保护	131
8.1.1	净化官厅水库入库水	131
8.1.2	保护石岩水库水质	133
8.1.3	净化滇池入湖河道污水	135
8.1.4	人工湿地预处理富营养化水源水	137
8.2	净化景观水体	139
8.2.1	潜流式人工湿地净化富营养化景观水体	139
8.2.2	循环净化杭州植物园玉泉观鱼池水	141
8.3	处理造纸废水	143
8.3.1	江苏射阳双灯造纸厂人工湿地工程	143
8.3.2	宝鸡陇县东南造纸厂人工湿地工程	144
8.3.3	漳州市天宝造纸厂人工湿地工程	145
8.4	处理含油废水	146
8.4.1	人工湿地净化炼油废水	146
8.4.2	处理采油废水	148
8.5	处理采矿废水	150
8.5.1	宽叶香蒲人工湿地处理铅/锌矿废水	150
8.5.2	人工湿地处理铁矿酸性排水	152
8.6	处理纺织废水	154
8.7	处理矿山炸药污水	156
8.8	控制暴雨径流污染	157
8.8.1	潜流人工湿地处理暴雨径流	157
8.8.2	暴雨径流污染控制中人工湿地的有效面积确定	159

8.8.3 暴雨径流人工湿地处理系统设计中的几个问题	159
8.9 处理农村污水	161
8.9.1 人工复合生态床处理低浓度农村污水	161
8.9.2 滇池流域农村污水生态处理系统	164
8.10 控制农业面源污染	165
8.10.1 人工湿地控制面源污染工程	165
8.10.2 农业面源污水复合生态床处理系统工艺设计	168
第9章 人工湿地处理系统设计	171
9.1 表面流人工湿地	171
9.1.1 初步设计	171
9.1.2 详细概念设计	172
9.1.3 最终设计	173
9.2 潜流人工湿地	176
9.2.1 初步确定湿地面积	176
9.2.2 长宽比和水头损失	177
9.2.3 水力设计举例	177
9.2.4 进、出水口设计以及床体设计	178
9.2.5 湿地植物的选择与作用	179
9.3 天然湿地处理系统	180
9.3.1 概况	180
9.3.2 天然湿地的选择	181
9.3.3 天然湿地系统结构设计	183
第10章 湿地处理系统的建设和运行管理	185
10.1 湿地处理系统的建设	185
10.1.1 湿地处理系统建设的前期准备	185
10.1.2 湿地土建	185
10.2 湿地植物建设	186
10.2.1 植物栽种方式选择	186
10.2.2 湿地植物生长	188
10.3 人工湿地的运行和维护	192
10.3.1 人工湿地的监测与控制	192
10.3.2 污染物负荷及水位和流量控制	193
10.3.3 植物管理	194
10.3.4 人工湿地诱发环境问题的控制	194
第11章 人工湿地污水处理系统工程	197
11.1 潜流人工湿地污水处理系统	197
11.1.1 美国肯塔基州 Benton 人工湿地工程	197
11.1.2 深圳白泥坑人工湿地污水处理系统	198
11.2 表面流人工湿地污水处理系统	199
11.2.1 美国密西根 Vermontville 湿地处理系统	199
11.2.2 赤峰市平庄人工湿地处理系统	200
11.3 天然湿地污水处理系统	202
11.4 寒冷地区人工湿地处理系统	204
11.4.1 简介	204
11.4.2 选址和系统描述	205
11.4.3 气象条件	206
11.4.4 流量变化	208
11.4.5 分层现象	209
11.4.6 污染物质的去除性能	210
参考文献	216

第 1 章 湿地概述

1.1 湿地的概念

湿地是重要的自然资源,如同森林、耕地、海洋一样具有多种功能。湿地系指天然的或人工的,长久的或暂时的沼泽地、泥炭地或水域地带,带有或静止或流动、或为淡水、半咸水或咸水水体者,包括低潮时水深不超过 6m 的水域。此外,湿地可以包括邻接湿地的河湖沿岸、沿海区域以及湿地范围的岛屿或低潮时水深超过 6m 的水域。所有季节性或常年积水地段,包括沼泽、泥炭地、湿草甸、湖泊、河流及泛洪平原、河口三角洲、滩涂、珊瑚礁、红树林、水库、池塘、水稻田以及低潮时水深浅于 6m 的海岸带等,均属湿地范畴。

湿地与人类的生存、繁衍、发展息息相关,是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一,它不仅为人类的生存、生活提供多种资源,而且具有巨大的环境功能和效益,在抵御洪水、调节径流、蓄洪防旱、控制污染、调节气候、控制土壤侵蚀、促淤造陆、美化环境等方面有其他系统不可替代的作用,被誉为“地球之肾”,受到全世界范围的广泛关注。在世界自然资源保护联盟(IUCN)、联合国环境规划署(UNEP)和世界自然基金会(WWF)世界自然保护大纲中,湿地与森林、海洋一起并称为全球三大生态系统。我国幅员辽阔,地理环境复杂,气候多样,造就了包括《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》(简称《湿地公约》)列出的全部湿地类型,提供了巨大的经济效益、生态效益和社会效益。保护好我国的湿地具有特殊重要的意义。然而,随着人口的急剧增加,为解决农业用地的扩张和发展经济,对湿地的不合理开发利用导致我国天然湿地日益减少,功能和效益下降;捕捞、狩猎、砍伐、采挖等过量获取湿地生物资源,造成了湿地生物多样性逐渐丧失;湿地水资源过度开采利用,导致湿地水质碱化,湖泊萎缩;长期承泄工农业废水、生活污水,导致湿地水污染,严重危及湿地生物的生存环境;森林资源的过度砍伐,植被破坏,导致水土流失加剧,江河湖泊泥沙淤积等,使我国湿地资源已经遭受了严重破坏,其生态功能也严重受损。据统计,近 40 年来,全国湖泊围垦面积已超过五大淡水湖面积之和,失去调蓄容积 325 亿立方米,每年损失淡水资源约 350 亿立方米;沿海湿地围垦近 1/2;我国最大的沼泽集中分布区——三江平原,已有 300 万公顷湿地变为农田,目前仅有沼泽 104 万公顷,如果不加以控制,这些沼泽湿地将丧失殆尽。因水资源利用不合理,我国西部玛纳斯湖、罗布泊、居延海已变成盐碱荒漠。水污染更加重了湿地的破坏,全国 1/3 以上的河段受到污染,在全国有监测的 1200 多条河流中已有 850 条受到污染,鱼虾绝迹的河道长达 5322km,90%以上城市水域污染严重,50%重点城镇水源地不符合饮用水标准,我国富营养化湖泊已占 50%,不仅加重水资源紧张,而且对渔业、农业及人民的生活健康带来危害。

保护湿地就是保护人类自己。保护湿地是全人类的共同责任。世界各国为加强湿地保护,自 1971 年《湿地公约》诞生,截至 2000 年 1 月已有 117 个国家加入了这个公约,有

1011 处湿地被列入《国际重要湿地名录》，总面积近 8000 万公顷。保护和合理利用湿地愈来愈引起世界各国的高度重视，成为国际社会普遍关注的热点。我国政府 1992 年 7 月 31 日正式加入《湿地公约》，将黑龙江扎龙、吉林向海、湖南东洞庭湖、江西鄱阳湖、青海鸟岛、海南东寨岗和香港米埔自然保护区列入《国际重要湿地名录》，并将我国湿地保护与合理利用列入《中国 21 世纪议程》和《中国生物多样性保护行动计划》优先发展领域，在一定程度上推动了我国的湿地保护和管理的工作。特别是 1998 年夏季，我国长江、松花江、嫩江等地发生的特大洪水，强化了政府和公众的湿地保护意识，为全面、科学和深入地开展湿地保护和合理利用事业打下了基础。因此，保护和合理利用湿地，制定一个既符合我国社会经济发展实际，又符合国际规范的《中国湿地保护行动计划》既是当务之急，更是我国政府认真履行《湿地公约》势在必行的重大举措。

1.2 湿地的主要类型及分布

1.2.1 沼泽湿地

我国的沼泽约 1197 万公顷，主要分布于东北的三江平原、大小兴安岭、若尔盖高原及海滨、湖滨、河流沿岸等，山区多木本沼泽，平原为草本沼泽。三江平原位于黑龙江省东北部，是由黑龙江、松花江和乌苏里江冲积形成的低平原，是我国面积最大的淡水沼泽分布区，1990 年尚存沼泽约 113 万公顷。三江平原无泥炭积累的潜育沼泽居多，泥炭沼泽较少。沼泽普遍有明显的草根层，呈海绵状，孔隙度大，保持水分能力强。本区资源利用以农业开垦，商品粮产出为主。大、小兴安岭沼泽分布广而集中，大兴安岭北段沼泽率为 9%，小兴安岭沼泽率为 6%，该区沼泽类型复杂，泥炭沼泽发育，以森林沼泽化、草甸沼泽化为主，是我国泥炭资源丰富地区之一。若尔盖高原位于青藏高原东北边缘，是我国面积最大、分布集中的泥炭沼泽区。特别是黑河中、下游闭流和伏流宽谷，沼泽布满整个谷底，泥炭层深厚，沼泽率达 20%~30%。本区以富营养草本泥炭沼泽为主，复合沼泽体发育。若尔盖高原是我国重要的草场。海滨、湖滨、河流沿岸主要为芦苇沼泽分布区。滨海地区的芦苇沼泽，主要分布在长江以北至鸭绿江口的淤泥质海岸，集中分布在河流入海的冲积三角洲地区。我国较大湖泊周围，一般都有宽窄不等的芦苇沼泽分布。另外，无论是外流河还是内流河，在中下游河段往往有芦苇沼泽分布。

1.2.2 湖泊湿地

我国的湖泊具有多种多样的类型并显示出不同的区域特点。据统计，全国有大于 1km² 的天然湖泊 2711 个，总面积约 90864km²。根据自然条件差异和资源利用、生态治理的区域特点，我国湖泊划分为五个自然区域。①东部平原地区湖泊。主要指分布于长江及淮河中下游、黄河及海河下游和大运河沿岸的大小湖泊。该区有面积 1km² 以上的湖泊有 696 个，面积 21171.6km²，约占全国湖泊总面积的 23.3%。著名的五大淡水湖——鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖和巢湖即位于该区。该区湖泊水情变化显著，生物生产力较高，人类活动影响强烈。资源利用以调蓄滞洪、供水、水产业、围垦种植和航运为主。②蒙新高原地区湖泊。该区有面积 1km² 以上的湖泊 724 个，面积 19544.6km²，约占全国湖泊总面积的 21.5%。该区气候干旱，湖泊蒸发超过湖水补给量，多为咸水湖和盐湖。资源利用以盐湖矿产为主。③云贵高原地区湖泊。该区有面积 1km² 以上的湖泊 60 个，面积 1199.4km²，约占全国湖泊总面积的 1.3%，全系淡水湖。该区湖泊换水周期长，生态系统较脆弱。资源利用以灌溉、供水、航运、水产养殖、水电能源和旅游景观为主。④青藏高原地区湖泊。该区有面积 1km² 以上的湖泊 1091 个，面积 44993.3km²，约占全国湖泊总面积的 49.5%。该区为黄

河、长江水系和雅鲁藏布江的河源区，湖泊补水以冰雪融水为主，湖水入不敷出，干化现象显著，近期多处于萎缩状态。该区以咸水湖和盐湖为主，资源利用以湖泊的盐、碱等矿产开发为主。⑤东北平原地区与山区湖泊。面积 1km^2 以上的湖泊 140 个，面积 3955.3km^2 ，约占全国湖泊总面积的 4.4%。该区湖泊汛期（6~9 月）入湖水量为全年水量的 70%~80%，水位高涨；冬季水位低枯，封冻期长。资源利用以灌溉、水产为主，并兼有航运发电和观光旅游之用。

1.2.3 河流湿地

我国流域面积在 100km^2 以上的河流有 50000 多条，流域面积在 1000km^2 以上的河流约 1500 条。因受地形、气候影响，河流在地域上的分布很不均匀。绝大多数河流分布在东部气候湿润多雨的季风区，西北内陆气候干旱少雨，河流较少，并有大面积的无流区。从大兴安岭西麓起，沿东北、西南向，经阴山、贺兰山、祁连山、巴颜喀拉山、念青唐古拉山、冈底斯山，直到我国西端的国境，为我国外流河与内陆河的分界线。分界线以东以南，都是外流河，面积约占全国总面积的 65.2%，其中流入太平洋的面积占全国总面积的 58.2%，流入印度洋的占 6.4%，流入北冰洋的占 0.6%。分界线以西以北，除额尔齐斯河流入北冰洋外，均属内陆河，面积占全国总面积的 34.8%。在外流河中，发源于青藏高原的河流，都是源远流长、水量很大、蕴藏巨大水力资源的大江大河，主要有长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等；发源于内蒙古高原、黄土高原、豫西山地、云贵高原的河流，主要有黑龙江、辽河、滦海河、淮河、珠江、元江等；发源于东部沿海山地的河流，主要有图们江、鸭绿江、钱塘江、瓯江、闽江、赣江等，这些河流逼近海岸，流程短、落差大，水量和水力资源比较丰富。我国的内陆河划分为新疆内陆诸河、青海内陆诸河、河西内陆诸河、羌塘内陆诸河和内蒙古内陆诸河五大区域。内陆河的共同特点是径流产生于山区，消失于山前平原或流入内陆湖泊。在内陆河区内有大片的无流区，面积共约 160 万平方千米。我国的跨国境河流有：额尔古纳河、黑龙江干流、乌苏里江流经中俄边境；图们江、鸭绿江流经中朝边境；黑龙江下游经俄罗斯流入鄂毕次克海；额尔齐斯河汇入俄罗斯境内的鄂毕河；伊犁河下游流入哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖；绥芬河下游流入俄罗斯境内经海参崴入海；西南地区的元江、李仙江和盘龙江等为越南红河的上源，澜沧江出境后称湄公河，怒江流入缅甸后称萨尔温江，雅鲁藏布江流入印度称布拉马普特拉河，藏西的朗钦藏布、森格藏布和新疆的奇普恰普河都是印度河的上源，流经印度、巴基斯坦入印度洋。还有上游不在我国境内的如克鲁伦河自蒙古境内流入我国的呼伦湖等。

1.2.4 浅海、滩涂湿地

我国滨海湿地主要分布于沿海的 11 个省区和港澳台地区。海域沿岸约有 1500 多条大中河流入海，形成浅海滩涂生态系统、河口湾生态系统、海岸湿地生态系统、红树林生态系统、珊瑚礁生态系统、海岛生态系统六大类、30 多个类型。滨海湿地以杭州湾为界，分成杭州湾以北和杭州湾以南两个部分。杭州湾以北的滨海湿地除山东半岛、辽东半岛的部分地区为岩石性海滩外，多为沙质和淤泥质型海滩，由环渤海滨海和江苏滨海湿地组成。黄河三角洲和辽河三角洲是环渤海的重要滨海湿地区域，其中辽河三角洲有集中分布的世界第二大苇田——盘锦苇田，面积约 7 万公顷。环渤海滨海尚有莱州湾湿地、马棚口湿地、北大港湿地和北塘湿地，环渤海湿地总面积约 600 万公顷。江苏滨海湿地主要由长江三角洲和黄河三角洲的一部分构成，仅海滩面积就达 55 万公顷，主要有盐城地区湿地、南通地区湿地和连云港地区湿地。杭州湾以南的滨海湿地以岩石性海滩为主。其主要河口及海湾有钱塘江口—杭州湾、晋江口—泉州湾、珠江口河口湾和北部湾等。在海湾、河口的淤泥质海滩上分布有红树林，在海南至福建北部沿海滩涂及我国台湾岛西海岸都有天然红树林分布区。热带珊瑚礁主要分布在西沙和南沙群岛及我国台湾、海南沿海，其北缘可达北回归线附近。

目前对浅海滩涂湿地开发利用的主要方式有滩涂湿地围垦、海水养殖、盐业生产和油气资源开发等。

1.3 湿地的功能

湿地具有神奇的特征,使之成为地球上具有独自特性的主要生态系统。充足的水分对生物的产物多样化起到了重要作用,湿地植物在适应了水分富足的优势同时,又在克服必要化学元素同其相对短缺的不足。因此,湿地是地球上生物产量最丰富的系统。也正因为这个原因,类似于热带丛林一样的植物生长在这里,并有大量哺乳动物、鸟类、爬行动物、两栖动物和鱼类生存在此地。

除此之外,因为湿地较其他生态系统具有较高的生物活动率,因此可以将传统水中常见的污染物转换成元素的副产品或转换成更多生物产物的营养物。这些转换是由湿地陆地区域及其固有的如太阳、风、土壤、生物和动物等自然环境能源完成。这些污染物的转换可以通过较低的费用挖掘、泵提和一些混凝土结构获得。湿地是运行和维护费用最低的方案之一。由于湿地处理系统中具有环境能量,所以不需要化石燃料能和化学能。

在历史上,湿地一直是城市、工业发展、耕地、采矿等传统陆地使用的最后开发地。因为湿地便于排水,而有效的排水和成功的防洪是相当昂贵的。在过去 20 年里,随着人类环境意识的发展和扩大,湿地和其他生态系统在文化和环境方面的价值被人们所发现。与其他生态系统相比,因为湿地对人类改变的程度较小,所以留下的湿地已经成为恢复和保护的重中之重。

环保人士呼吁要保护湿地的美学价值和野生价值。除此之外,“湿地功能没有损失”目标正在实现,因为社会已经认识到对湿地的适度使用可以扩大其价值和进一步得到保护。湿地可以被小城镇和大城市用作廉价的天然水处理技术和农业区水污染的管理方法。这些有助于利用湿地在不同气候和地理环境下进行污水处理,也有利于在一些地区形成更多的湿地资源。

湿地保护是明智地、可持续地利用湿地的一个或多个功能而不产生副作用,或在实际上加强了湿地的其他功能(如生物生长率、地下水排泄或洪水控制)。通过科学设计,将湿地用于水质改善,同时也对保护湿地具有重要意义。

农业、城市和工业的发展产生大量废物,影响传统水体运动和净化污染物的功能。在废物排放之前,社会已开发了很多技术来处理这些废物。许多传统污水处理技术需要大量投入混凝土、钢、能源和化学药品。相对而言,依靠大自然能源,利用大自然或人工湿地进行处理,这是利用土地的天然处理技术之一。

1.4 我国湿地的特点

我国湿地类型多、面积大、分布广、区域差异显著、生物多样性丰富。

(1) 类型多。按照湿地公约对湿地类型的划分,31 类天然湿地和 9 类人工湿地在我国均有分布。我国湿地的主要类型包括沼泽湿地、湖泊湿地、河流湿地、河口湿地、海岸滩涂、浅海水域、水库、池塘、稻田等天然湿地和人工湿地。

(2) 面积大。我国湿地面积约 6594 万公顷(其中还不包括江河、池塘等),占世界湿地的 10%,位居亚洲第一位,世界第四位。其中天然湿地约为 2594 万公顷,包括沼泽约 1197

万公顷，天然湖泊约 910 万公顷，潮间带滩涂约 217 万公顷，浅海水域 270 万公顷；人工湿地约 4000 万公顷，包括水库水面约 200 万公顷，稻田约 3800 万公顷。

(3) 分布广。在我国境内，从寒温带到热带、从沿海到内陆、从平原到高原山区都有湿地分布，而且还表现为一个地区内有多种湿地类型和一种湿地类型分布于多个地区的特点，构成了丰富多样的组合类型。

(4) 区域差异显著。我国东部地区河流湿地多，东北部地区沼泽湿地多，而西部干旱地区湿地明显偏少；长江中下游地区和青藏高原湖泊湿地多，青藏高原和西北部干旱地区又多为咸水湖和盐湖；海南岛到福建北部的沿海地区分布着独特的红树林和亚热带、热带地区人工湿地。青藏高原具有世界海拔最高的大面积高原沼泽和湖群，形成了独特的生态环境。

(5) 生物多样性丰富。我国的湿地生境类型众多，其间生长着多种多样的生物物种，不仅物种数量多，而且有很多是我国所特有，具有重大的科研价值和经济价值。据初步统计，我国湿地植被约有 101 科，其中维管束植物约有 94 科，我国湿地的高等植物中属濒危种类的有 100 多种。我国海岸带湿地生物约有 8200 种，其中植物 5000 种，动物 3200 种。我国的内陆湿地高等植物有 1548 种、高等动物 1500 多种。我国有淡水鱼类 770 多种或亚种，其中包括许多洄游鱼类，它们借助湿地系统提供的特殊环境产卵繁殖。我国湿地的鸟类种类繁多，在亚洲 57 种濒危鸟类中，我国湿地内就有 31 种，占 54%；全世界雁鸭类有 166 种，我国湿地就有 50 种，占 30%；全世界鹤类有 15 种，我国仅记录到的就有 9 种；此外，还有许多是属于跨国迁徙的鸟类。在我国湿地中，有的是世界某些鸟类唯一的越冬地或迁徙的必经之地，如在鄱阳湖越冬的白鹤 (*Grus Leucogeranus*) 占世界总数的 95% 以上。

1.5 人工湿地

1.5.1 人工湿地的概念

有目的地建立人工湿地生态系统是一种相对较新的技术。尽管在历史上人类也偶然利用和改造湿地，但有目的地建设湿地用以生物的栖息地或进行水质净化始于 20 世纪 70 年代的环境保护运动。

湿地工程化或人工建造主要目的有四个：①弥补或减小因农业和城市发展造成的天然湿地的影响；②构建水生系统，生产食物和纤维；③防洪；④进行污水处理，改善水质。

由于天然湿地在不断萎缩，采取人工措施构建和保护湿地，以提供生物栖息地的行为正在加速进行着，也有着越来越多的这种湿地处于计划或设计中，这种技术在环境和政治概念上也在走向成熟。

水产养殖是在水生系统中生产有机食物的一种形式。越来越多的人工或天然湿地正在起到水产养殖的作用，例如用于虾、鱼养殖的浅池塘具有很多人工湿地的特征，还有用于水稻生产的水田，亦属于人工湿地的范畴。此外，污水经湿地处理后含有鱼类等生长必需的营养物质，也可以增加鱼类和野生生物的产量。

湿地具有蓄水功能，可以防洪。包括一定面积湿地及其植物的防洪系统称为人工防洪湿地。人工防洪湿地一般建于低洼处，以便于接受来自周围区域的径流。为了最大程度地储存水量，人工防洪湿地不但需要植物区，还需和具有一定容积的水域相连。湿地中的水位波动不仅可以增强湿地的野生生物栖息地功能，还可以提供水质净化功能。

主要用于水质改善功能的工程化湿地称为人工湿地，本书主要介绍的就是这种湿地，也称为湿地处理系统。人工湿地与天然湿地的主要区别在于其陆源不同，人工湿地可建于高地或需要的地方，而天然湿地一般位于低洼区域。因此，只要有外加水源，如城市污水、工业

废水、农业排水和雨水等，人工湿地可以建于地上或地下，如图 1-1 所示。如人工湿地建于地上，主要的工程为取土构筑围堰；如建于地下，工程包括开挖、构筑围堰、充填填料等。如果地下水位位于地下，人工湿地需要进行周边和地面防水，防水材料可以是黏土、黏土和膨润土混合物，也可以是人工材料如 PVC 和 HDPE 等。这样可以防止间歇进水或进水量较小造成对植物生长的影响。而如果原位土质条件是低渗透性的（如黏土、细的淤泥土），或由于天然地形原因造成地下水位位于或接近地表，则无需进行防水处理，基本可保证植物生长所需水分。

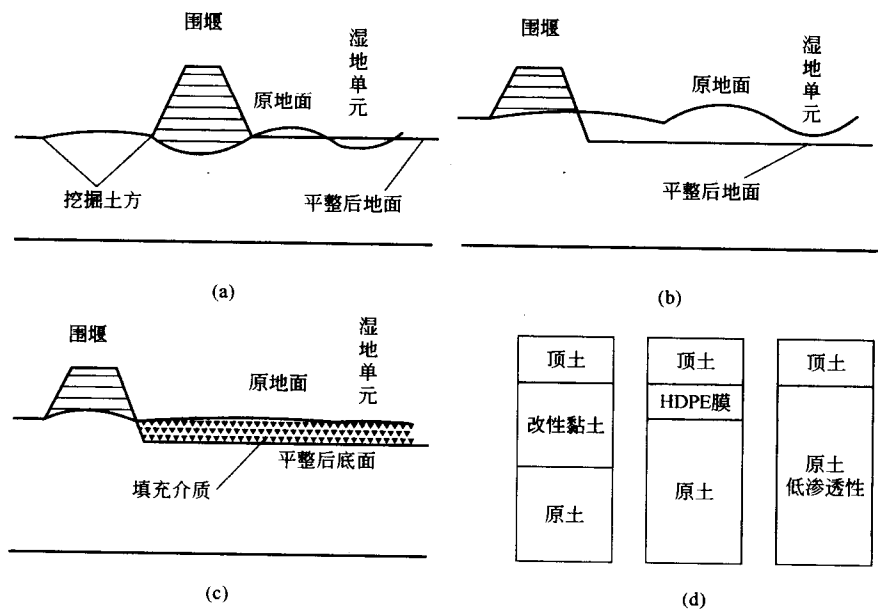


图 1-1 构建人工湿地的几种地形情况

人工湿地的关键技术还包括植物的生长，植物正常生长需要良好的土壤和营养条件。多数湿地植物在密实的泥土或尖锐的砾石中生长缓慢或可能死亡。而砂质土壤对多数湿地植物的繁殖和生长是非常有利的，因此在种植湿地植物时，在根系区常填充砂质土壤。

1.5.2 人工湿地的分类

根据植物的存在状态，人工湿地主要分为三种类型：浮水植物系统；沉水植物系统；挺水植物系统。为了更好的水质，不同类型人工湿地可以结合使用，也可以和传统污水处理方法（如氧化塘、砂滤等）联合使用。

(1) 浮水植物系统 此系统中水生植物漂浮于水面；根系呈淹没状态；水萍、叶子较小，根系较少或无根系。

一些池塘系统可以通过有效地接种浮游水生植物达到处理污水的目的。常见的已被大规模应用的植物有风信子和浮萍。浮水植物系统的自净功能不同于兼氧塘，因为该系统光合作用放出的氧气都在水面上（它不同于生长在水面下的浮游藻类），这有效地减少了空气中氧气的扩散。因而浮水植物系统是缺氧的，它的有氧活动主要局限于根部。大多数生长水域内，水生植物通常处于缺氧状态，耗氧程度取决于有机负荷率。

浮水植物系统的自净功能是通过三种主要途径实现的：①通过寄居在悬浮在水体中植物根系上的和池底泥沙中的混合兼氧微生物的新陈代谢；②对污水中固体和内部产生大量生物的沉积截留；③现存植物对营养的吸收及后期的收割。浮游水生植物系统对于减少 BOD 和悬浮固体总量尤其有效。通过反硝化作用能有效地去除硝酸盐中的氮。如果这些植物能定期

收割，总氮和总磷就连续去除。

浮水植物系统的深度，如风信子的深度在 0.4~1.2m 之间，浮萍深度在 1.2~1.8m 之间。在用此系统进行二次净化处理时，BOD 负荷应小于 $100\text{kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ 。系统在用于污水深度处理和营养物去除时，有机负荷应保持在 $35\text{kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ 以下。一般水力负荷率在 $2 \sim 15\text{cm}/\text{d}$ [$0.7 \sim 5\text{ha}/(1000\text{m}^3/\text{d})$] 的范围内。

浮水植物系统有一些潜在的缺点，这些缺点制约了它的广泛应用。由于这些系统的植物为一种或少数几种，易受到如在一个短时期内部分或全部植物死亡这样灾害性事件的损害。例如，风信子易因低温或大量害虫的袭击而死亡；浮萍虽对低温和害虫不敏感，但在冬季也易死亡。如果浮水植物系统中水面上的植物消失了，那么在新植物长成前的前几周以至几个月内它的自净功能都将受到严重的损害。

浮水植物系统的第二个潜在问题来自因去除营养物和维持植物最佳生长率而进行的收割。这些植物含水量超过 95%，收割后需要干化，干化后的植物仍需处理。

(2) 沉水植物系统 此系统水生植物完全淹没于水中。系统中水的浊度不能太高，否则会影响植物的光合作用。因此，该系统适于处理二级出水。

(3) 挺水植物系统 根据水的流动状态，该系统分为如下类型：自由水面系统 (FWS, free water system)，又称表面流湿地；潜流系统 (SSF, subsurface flow)，又称潜流湿地，又分为水平流潜流系统 (HSF, horizontal subsurface flow) 和垂直流潜流系统 (VSF, vertical subsurface flow)。

① 自由水面系统。污水从系统表面流过，氧通过水面扩散补给。进水中所含的溶解性和颗粒性污染物与系统介质和植物根系接触。常用的植物包括香蒲、芦苇、慈菇、莎草等。

② 水平流潜流系统。污水从进口经由砂石等系统介质，以近水平流方式在系统表面以下流向出口。在此过程中，污染物得到降解。介质通常选用水力传导性良好的材料。氧主要通过植物根系释放。在欧洲主要应用芦苇，因此又称芦苇床处理系统。香蒲也是常用的湿地植物。

③ 垂直流潜流系统。该系统通常在整个表面设置配水系统，并周期性进水。系统下部排水，水流处于系统表面以下。目的是系统可以排空水，以最大程度地进行氧补给。

1.5.3 人工湿地的构造

绝大多数人工湿地由五部分组成：①具有各种透水性的基质，如土壤、砂、砾石；②适于在饱和水和厌氧基质中生长的植物，如芦苇；③水体（在基质表面下或上流动的水）；④无脊椎或脊椎动物；⑤好氧或厌氧微生物种群。

湿地系统正是在这种有一定长宽比和底面坡度的洼地中，由土壤和填料（如砾石等）混合组成填料床，污水在床体的填料缝隙中流动或在床体表面流动，并在床体表面种植具有性能好、成活率高、抗水性强、生长周期长、美观及具有经济价值的水生植物（如芦苇、蒲草等），从而形成一个独特的动植物生态系统，对污水进行处理。其中湿地植物具有三个间接的重要作用：①显著增加微生物的附着（植物的根茎叶）；②湿地中植物可将大气氧传输至根部，使根在厌氧环境中生长；③增加或稳定土壤的透水性。植物通气系统可向地下部分输氧，根和根状茎向基质中输氧，因此可向根际中好氧和兼氧微生物提供良好环境。植物的数量对土壤导水性有很大影响，芦苇的根可松动土壤，死后可留下相互连通的孔道和有机物。不管土壤最初的孔隙率如何，大型植物可稳定根际的导水性相当于粗砂 2~5 倍。而土壤、砂、砾石基质可为植物提供物理支持，为各种复杂离子、化合物提供反应界面，为微生物提供附着。水体可为动植物、微生物提供营养物质。

1.5.4 人工湿地处理系统的特点

人工湿地污水处理系统由预处理单元和人工湿地单元组成。通过合理设计可将 BOD_5 、

SS、营养盐、原生动物、金属离子和其他物质处理达到二级和高级处理水平。预处理主要去除粗颗粒和降低有机负荷。构筑物包括双层沉淀池、化粪池、稳定塘或初沉池。人工湿地中的流态采用推流式、回流式、阶梯进水式或综合式，见图 1-2。

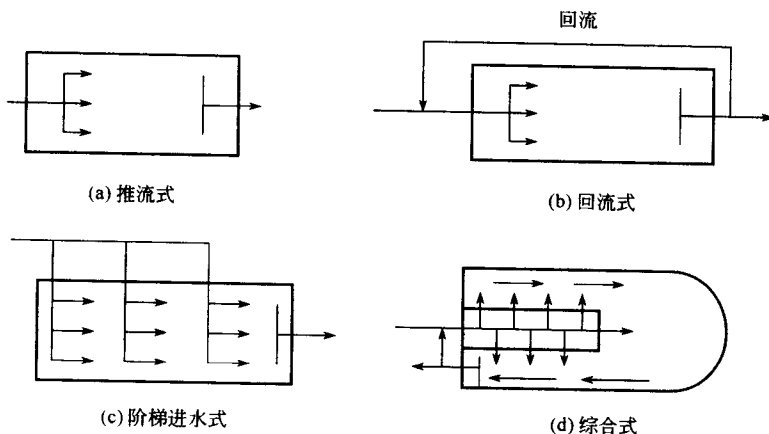


图 1-2 人工湿地中的基本流态

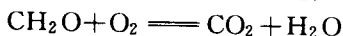
人工湿地系统具有如下特点：①建造和运行费用便宜；②易于维护，技术含量低；③可进行有效可靠的污水处理；④可缓冲对水力和污染负荷的冲击；⑤可直接和间接提供效益，如水产、畜产、造纸原料、建材、绿化、野生动物栖息、娱乐和教育。但也有不足：①占地面积大；②设计、运行参数不精确；③生物和水力复杂性及对重要工艺动力学理解的缺乏；④易受病虫害影响。人工湿地系统在达到其最优效率时，需 2~3 个生长周期。

1.5.5 人工湿地去除污染物机理

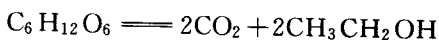
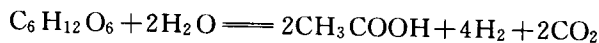
人工湿地是三个相互依存要素的组合物，即土壤、植物和微生物。生殖在土壤层中的微生物（细菌和真菌）在有机物的去除中起主要作用，湿地植物的根系将氧气带入周围的土壤，但远离根部的环境处于厌氧，形成处理环境的变化带，这就加强了人工湿地去除复杂污染物和难处理污染物的能力。大部分有机物的去除是靠土壤微生物，但某些污染物如重金属、硫、磷等可通过土壤、植物作用降低浓度。

(1) 悬浮物 污水中的悬浮物含有大量污染物质，例如有机物、氮磷、重金属和病原菌等，因此去除悬浮物可以提高污水的去除效率。通过过滤和沉淀，污水中可沉降性污染物被快速截留去除，而悬浮性固体则通过微生物生长、湿地介质表面吸附等机理去除。湿地对悬浮物的去除非常有效，悬浮固体出水值一般低于 10mg/L。为防止在进水口附近发生堵塞，进水前必须设置预处理以降低总固体浓度，一般设置沉淀池即可。

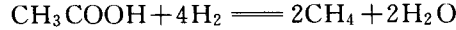
(2) 有机物的去除 污水中的有机物包括颗粒性有机物和溶解性有机物。前者通过沉淀和过滤可迅速去除，而溶解性有机物则通过微生物作用降解。微生物降解有机物又分为好氧降解和厌氧降解。由好氧异养菌控制的好氧降解可以表述如下。



由兼性厌氧菌和专性厌氧菌控制的厌氧过程分步进行。第一步主要产物为脂肪酸，如乙酸、乳酸、乙醇、 CO_2 和 H_2 。



硫酸盐还原菌和产甲烷菌利用上述脂肪酸进行代谢活动。



BOD 的去除包括几个生物化学过程：好氧呼吸，厌氧消减和硫酸盐还原。约 50% 的进水 BOD 在处理床体前几米内即可除去，一般出水 BOD 浓度约为 10mg/L。由于湿地特有的环境，形成了系统中好氧菌、兼性菌及厌氧菌的良好生存状态。尤其是土壤表层，微生物活性较高，对有机物的去除能力较强，但当表层土壤被淹没，就会阻止好氧循环，进而加强并平衡了好氧-厌氧循环，为微生物充分发挥作用提供了条件。

(3) 脱氮 污水中的氮包括无机氮和有机氮。无机氮包括氨、亚硝酸盐 (NO_2^-) 和硝酸盐 (NO_3^-)。有机氮包括尿素、氨基酸、嘌呤和嘧啶。除氮机理包括挥发、微生物转化 (氨化、硝化/反硝化)、植物吸收、介质吸附和沉淀过滤等。但研究表明，除氮主要通过微生物硝化/反硝化作用完成。

① 挥发 氨以离子态 (NH_4^+) 和气态 (NH_3) 存在，不同状态的比例取决于 pH 值。根据下面平衡式

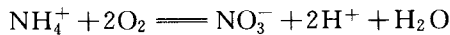
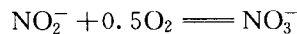
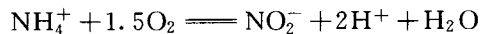


pH 值大于 9.3，平衡左移；小于 9.3， NH_4^+ 占优。例如，pH 值为 8.3 时，可挥发性气态氨占 10%；而 pH 值为 7.3 时仅占 1%。

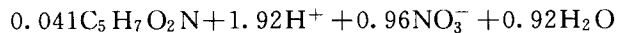
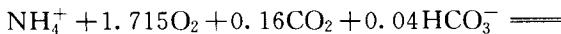
除了 pH 值的影响，气态氨挥发率也受水中 NH_4^+ 、温度、风速、太阳辐射、水生植物和系统调节 pH 值的能力等因素影响。

② 微生物转化 湿地系统中的氮主要通过微生物机理去除。氨化指在微生物作用下，将有机氮转化为氨氮。好氧和厌氧环境皆可产生氨化作用，但由于厌氧环境中异养菌分解效率较低，因此氨化作用较慢。但无论是好氧环境还是厌氧环境，氨化较硝化快。因此，湿地中沿水流方向会产生氨的积累。氨化的适宜 pH 值范围为 6.5~8.5，其他因素如温度、C/N 比、营养物、土壤条件等也会产生不同影响。

硝化作用分为两步：亚硝化和硝化。表述如下。

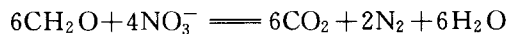


硝化细菌利用氧气，通过氧化 NH_4^+ 和亚硝酸盐获得能量，并利用 CO_2 合成新细胞。McCarty 将合成微生物纳入硝化方程中：



硝化作用受许多因素影响，如温度、溶解氧、pH 值、碱度、碳源、微生物和氨氮浓度等。一般温度低于 4℃，硝化作用基本停止。将 1gNH_4^+ 氧化为 NO_3^- 需 4.3mg O_2 和 7.14mg 碱度 (以 CaCO_3 计)。

反硝化作用发生在缺氧环境，反硝化菌将硝酸盐还原为 NO、 N_2O 和 N_2 。一般情况下，终极产物为 N_2 。反硝化过程表述如下。



土壤中的反硝化菌多为杆菌、球菌和假单胞菌。影响反硝化的因素有 DO、ORP、土壤湿度、温度、pH 值、土壤类型、有机物等。反硝化所需最小 C/N 比为 $1\text{gC/gNO}_3^- - \text{N}$ ，产生碱度为 $3.0\text{gCaCO}_3/\text{gNO}_3^- - \text{N}$ 。

与传统的污水处理厂不同，人工湿地可以同时发生硝化和反硝化作用。污水流过植物的