

崔玉波 尹 军 著

剩余污泥人工湿地 处理技术

SHENGYU

WUNI RENGONG SHIDI

CHULI JISHU



化学工业出版社

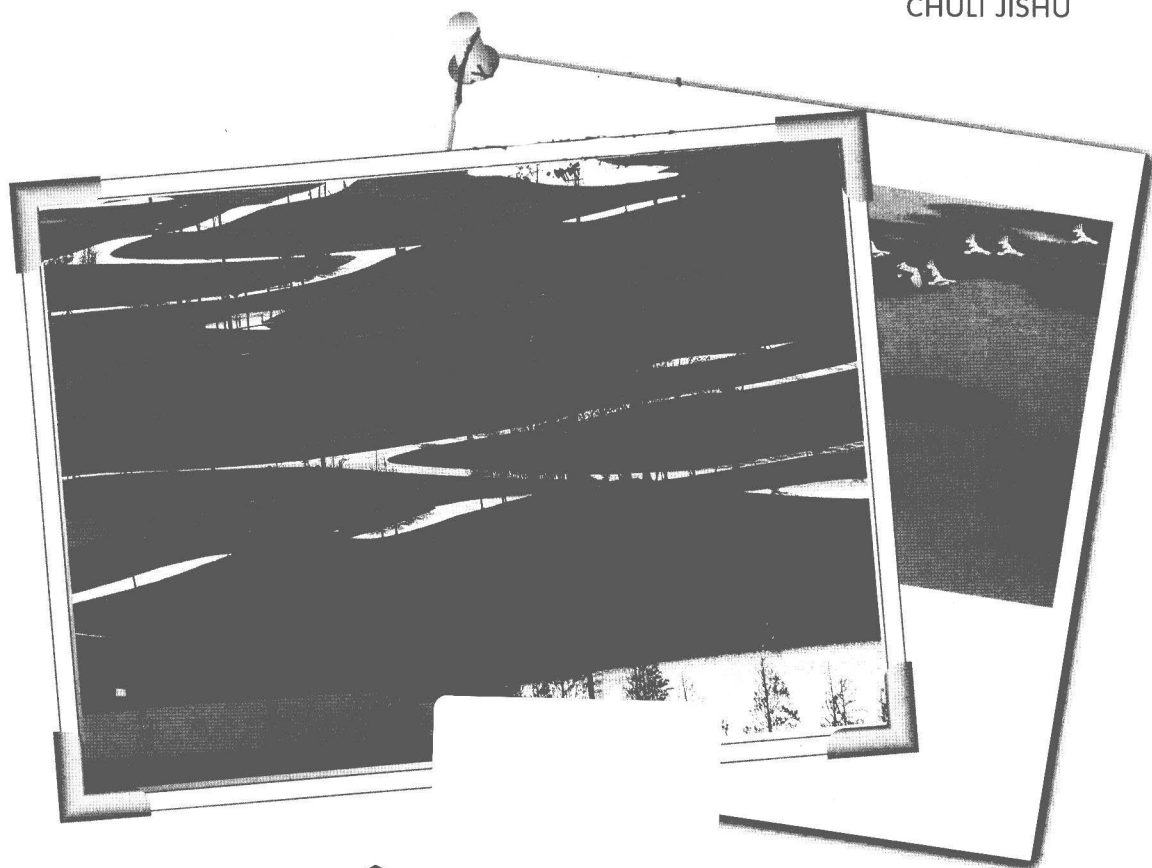
崔玉波 尹 军 著

剩余污泥人工湿地 处理技术

SHENGYU

WUNI RENGONG SHIDI

CHULI JISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

人工湿地技术处理剩余污泥兼具污泥稳定和污水处理功能。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,详尽地对人工湿地处理剩余污泥技术进行了归纳、总结和提高,以期达到对应用该技术人士的借鉴作用,也希望进一步扩大人们对该技术的认识和认同。本书可供污水处理科研、技术人员参考,也可供环境工程、给排水工程研究人员和学习人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

剩余污泥人工湿地处理技术/崔玉波,尹军著. —北京:
化学工业出版社, 2012. 6
ISBN 978-7-122-13362-5

I. 剩… II. ①崔…②尹… III. 人工湿地系统-剩余
污泥-污泥处理 IV. X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 017229 号

责任编辑:董琳
责任校对:宋玮

文字编辑:汲永臻
装帧设计:杨北

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司
装 订:三河万龙印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张12¼ 字数250千字 2012年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着我国社会主义新农村建设和对分散式污水处理要求的提高,针对村镇的污水生物处理不断普及。污水处理伴随着剩余污泥的产生,而剩余污泥的处理与处置水平又直接影响到污水处理的实施效果。视污水处理工艺不同,一般剩余污泥的含水率在 97% 以上。尽管污泥产量只占处理污水体积的 1%~2%,而其管理复杂,运行费用占污水处理厂总运行费用的 20%~60%。无论哪种污泥处理与处置工艺,由于污泥的高含水率,首要任务是对污泥进行减容,即污泥脱水。现行传统的污泥脱水技术如压滤、低温干燥等存在费用高、能耗大等缺点,尤其不适用于小型污水处理厂。同时,传统的污泥消化和堆肥技术因其投资和运行费用高、技术含量大,也不适合经济相对落后的广大中小城镇地区。

自 20 世纪 80 年代末期以来,起源于欧美、针对中小型污水处理厂的污泥干化芦苇床 (sludge drying reed bed) 技术得到了广泛的研究和应用。污泥干化芦苇床源自于人工湿地 (constructed wetland) 污水处理技术,由浅层床体中的填料和湿地植物芦苇构成。在污泥干化芦苇床中,污泥均布在床体表面,污泥中的水分部分靠蒸发蒸腾损失,大部分靠重力作用经填料层过滤后排除,而浓缩的污泥被截留在床体表面;污泥渗滤液经湿地填料层处理后回流或排放,积存污泥在床体内进一步做稳定化处理。芦苇具有向根系传递氧的能力,在根系附近可以形成局部的微氧环境;连同芦苇发达的根茎系统所形成的与大气连通的细微通道,激发了污泥的脱水、腐殖化和矿化进程,是一种将污泥转化为有价值的、类似土壤的生态友好和经济的污泥处理方法。

湿地植物芦苇生存于污泥环境中,污泥中含有丰富的有机质和氮磷钾等营养元素以及植物生长所必需的各种微量元素如钙、镁、铜、铁等,可以促进芦苇的生长,芦苇在生长过程中又可以促发污泥的稳定和无害化。污泥脱水过程和污染物质的降解转化导致污泥组分随时间发生变化。因此,除了脱水,积存于芦苇床中的污泥也在发生着矿化过程,最终的产品将适合于土地利用,弥补了土地填埋和污泥焚烧的一些缺点。

我国关于污泥干化芦苇床的研究起步较晚。1999 年以来,作者带领课题组从事人工湿地污水和污泥处理技术的研究工作,在此基础上完成了本书的撰写工作。

人工湿地是一项较新的污泥处理技术,应用历史较短,在进行工程化时也存在认识上的缺陷。实际上利用人工湿地技术处理剩余污泥兼具污泥稳定和污水处理功能。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,详尽地对人工湿地处理污泥及污水(渗滤液)技术进行了归纳、总结和提高,以期达到对应用该技术人士的借鉴作用,也希望进一步扩大人们对该技

术的认识和认同。

借此本书出版之际，感谢国家自然科学基金委、国家水体污染控制与治理重大科技专项、中央高校基本科研业务费专项、辽宁省科技厅、吉林省环保厅等对相关课题的立项资助，正是有了这些课题的立项和进行，使得污泥生态稳定化研究能够较好地完成，也使本书得以顺利成稿。特别要感谢孙铁珩院士的指导和课题组的参加人员以及研究生赵立辉、姜廷亮、余丹、张丽萍、郭智倩、赵金宝、刘宇、程宁、马强和赵美玉等，大家的共同努力才取得了本书的研究成果。崔玉波参与全书的写作并统稿，尹军审定。参与本书部分内容写作的其他人员有赵可、李小静（第4章）、杨少华（第5章）、孙红杰（第6章）。

作者

2012年6月

目 录

第 1 章 湿地概述	1
1.1 湿地的概念	1
1.2 人工湿地	2
1.2.1 人工湿地的基本概念	2
1.2.2 人工湿地的分类与构造	4
1.2.3 人工湿地处理系统特点	7
1.2.4 人工湿地去除污染物机理	7
1.3 湿地微生物和植物	12
1.3.1 湿地微生物	12
1.3.2 湿地大型植物	15
1.4 人工湿地发展简史	19
1.5 人工湿地稳定污泥研究进展	20
1.5.1 人工湿地稳定污泥的概念与原理	20
1.5.2 人工湿地稳定污泥发展概况	23
1.5.3 污泥有机质含量高低的界定	24
第 2 章 湿地水力学和化学设计基础	25
2.1 表面流湿地水力学	25
2.1.1 蒸发蒸腾 (ET) 量的确定	25
2.1.2 湿地中的漫流	29
2.2 潜流湿地水力学	31
2.2.1 蒸发蒸腾量的确定	31
2.2.2 水力学背景知识	31
2.2.3 湿地中的水流运动及水力传导率	32
2.2.4 潜流湿地的水力学设计	34
2.2.5 设计标准	36
2.3 化学设计基础	37
2.3.1 理论基础	37
2.3.2 化学反应计算	38
2.3.3 湿地混合反应模型	39
2.3.4 串联模型	40
2.3.5 生物膜传质模型	41
第 3 章 人工湿地去除污染物模型	44

3.1	溶解氧模型	44
3.2	悬浮固体去除模型	46
3.2.1	表面流湿地中的悬浮固体去除模型	46
3.2.2	潜流湿地中的悬浮固体去除模型	50
3.3	有机物去除模型	51
3.3.1	一般性概念	51
3.3.2	有机物输入和输出之间的关系	53
3.3.3	有机物去除动力学模型	53
3.4	湿地处理系统的脱氮模型	56
3.4.1	一级氨氮去除模型	57
3.4.2	反硝化模型	58
3.4.3	湿地中的总氮去除	62
3.5	除磷模型	65
3.5.1	湿地中磷的水化学	65
3.5.2	磷的植物化学	67
3.5.3	生物对磷的吸收和储存	68
3.5.4	土壤和填充材料对除磷的作用	70
3.5.5	除磷模型	73
第4章	污泥性质及其处理与处置	78
4.1	污泥的来源与分类	78
4.1.1	污泥的来源	78
4.1.2	污泥的分类	79
4.2	污泥的性质	81
4.2.1	污泥的物理性质	81
4.2.2	污泥的化学性质	82
4.2.3	污泥的微生物学特性	88
4.3	国内外污泥处理处置现状	91
4.3.1	我国污泥处理处置的状况	91
4.3.2	我国污泥处理处置中存在的问题	92
4.3.3	我国污泥处理处置对策	94
4.3.4	国外污泥处理处置状况	94
第5章	人工湿地处理低有机质含量剩余污泥	97
5.1	运行概况及植物生长	97
5.1.1	试验设计	97
5.1.2	试验运行概况	98
5.1.3	植物生长	98
5.2	污泥脱水及渗滤液处理	102

5.2.1	污泥的脱水性能及挥发性固体变化	102
5.2.2	污泥渗滤液的处理效果	104
5.2.3	污染物空间变化规律	110
5.3	稳定化污泥理化及生物特性	113
5.3.1	积存污泥的渗透性能	113
5.3.2	积存污泥厚度增长模型	114
5.3.3	积存污泥结构变化	116
5.3.4	积存污泥活性	118
5.4	污泥稳定化程度	123
5.4.1	流态稳定	123
5.4.2	有机质稳定	124
5.4.3	污泥中的氮磷营养成分	124
5.4.4	微生物稳定	125
5.4.5	重金属稳定	126
第6章	人工湿地处理高有机质含量剩余污泥	128
6.1	运行概况及植物生长	128
6.1.1	试验设计	128
6.1.2	试验运行概况	129
6.1.3	湿地植物的生长情况	129
6.2	污泥脱水及渗滤液处理	130
6.2.1	污泥的脱水性能	130
6.2.2	污泥渗滤液的处理效果	131
6.3	污泥碳氮磷营养成分变化	135
6.3.1	有机质稳定	135
6.3.2	氮磷营养元素含量变化	137
6.3.3	积存污泥腐殖化	141
6.3.4	污泥胞外聚合物	144
6.4	污泥稳定化中多环芳烃的变化特征	147
6.4.1	多环芳烃概述及研究现状	147
6.4.2	检测方法	150
6.4.3	芦苇对多环芳烃的吸收和转化	153
6.4.4	污泥中多环芳烃的去除	159
第7章	人工湿地污泥处理系统设计和运行	163
7.1	污泥处理系统设计	163
7.1.1	运行周期	163
7.1.2	面积负荷率	164
7.1.3	床体数量	164

7.1.4	床体储泥能力	164
7.1.5	填料设计	164
7.1.6	植物选择	165
7.1.7	布泥系统	166
7.1.8	排水和复氧系统	167
7.1.9	芦苇床污泥稳定系统布置	167
7.2	污泥处理系统运行与管理	167
7.2.1	调试	167
7.2.2	进泥和间歇	169
7.2.3	运行中存在的问题	169
第8章	稳定化污泥农用研究	172
8.1	污泥农用中存在的问题	172
8.2	试验设计和植株生长情况	174
8.3	产品品质	174
8.4	土壤理化和微生物指标	178
8.4.1	污泥肥料理化和微生物学指标	178
8.4.2	施用污泥肥料的土壤理化和微生物学指标	178
参考文献.....		184

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。湿地是位于陆生生态系统和水生生态系统之间的过渡性地带，广泛地分布于世界各地，拥有众多野生动植物资源。由于湿地分布广泛、种类繁多、相互之间差异显著，给湿地下一个统一的定义是十分困难的。目前一般采用《国际湿地公约》中对湿地的定义，即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。湿地具有如下3个基本特征。

(1) 地表水多，有季节性或常年性积水、淡水、半咸水或咸水。水是导致湿地形成、发展、演替、消亡与再生的关键。水的来源（如降水、地下水、潮汐、河流、湖泊等）、水深、水流方式，以及淹水的持续期和频率决定了湿地的多样性。

(2) 底层土潜育化，有明显的潜育层，有的可以形成泥炭层，为湿土或水成土。

(3) 至少周期性地以水生植物为植物优势种。受水的影响，湿地优势植物多为湿生植物、沼生植物或喜湿的盐生植物。

从系统论观点来看，湿地是一个半开放的系统，一方面它是一个较独立的生态系统，有其自身的形成、发展和演替过程，如独特的土壤形成过程（潜育化或泥炭化）和植被演替过程；另一方面它在许多地方又要依赖与之相邻的地质地貌和生态系统，和它们进行物质和能量的交换，同时也影响相邻生态系统的活动。

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它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。

中国幅员辽阔，地理环境复杂，气候多样，造就了包括国际《湿地公约》列出的全部湿地类型，提供了多种和巨大的经济效益、生态效益和社会效益。保护好中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中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，使中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。因水资源不合理利用我国西部玛纳斯湖、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 5322 公里，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。

保护湿地就是保护我们人类自己。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《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）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。中国政府 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》，并将中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工作的。特别是 1998 年夏季，中国长江、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，制定一个既符合中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，更是中国政府认真履行《湿地公约》势在必行的重大举措。

1.2 人工湿地

1.2.1 人工湿地的基本概念

人工湿地（constructed wetland）是模拟自然湿地的人工生态系统，它是一种

由人工建造和监督控制的类似沼泽的地面，利用生态系统中的物理、化学和生物的重三重协同作用，通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的高效净化。与自然界湿地系统相比，人工湿地生态系统无论在地点的选择、负荷量的承载上，还是在可控制性、对污水的处理能力上，都大大超过自然湿地生态系统。

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：(a) 弥补或减小因农业和城市发展造成的天然湿地的影响；(b) 构建水生系统，生产食物和纤维；(c) 防洪；(d) 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，在本书中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水性的（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，则无须进行防水处理，基本可以保证植物生长所需水分。

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。

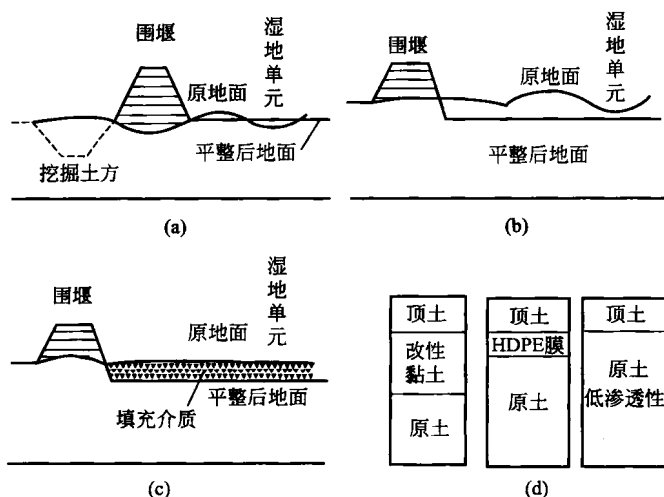


图 1-1 构建人工湿地的几种地形情况

1.2.2 人工湿地的分类与构造

1.2.2.1 人工湿地的分类

(1) 按植物分类 人工湿地根据湿地中的主要植物形式可分为三种类型：浮水植物系统、沉水植物系统、挺水植物系统。沉水植物系统主要应用于污水二级处理后的深度处理。浮水植物主要用于 N、P 去除和提高传统稳定塘的效率。目前一般所指人工湿地都是挺水植物系统。为了获得更好的水质，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。在浮水植物系统中，水生植物漂浮于水面；根系呈淹没状态；水萍，叶子较小，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。常见的以被大规模应用的植物有风信子和浮萍。浮游水生植物处理系统的自净功能不同于兼氧塘，因为浮游水生植物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。因而浮游水生植物系统是缺氧的，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：(a) 通过寄居在悬浮于水体中的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；(b) 对污水中固体和内部产生大量生物的沉积截留；(c) 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 $100\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。

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 $35\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 以下。一般水力负荷率在 $2\sim 15\text{cm}/\text{d}$ 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。如果浮游水生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。在沉水植物系统中,水生植物完全淹没于水中。此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,挺水植物系统分为如下类型:

a. 自由水面系统 (FWS, free water system), 又称表面流湿地。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型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。

b. 潜流系统 (SSF, subsurface flow), 又称潜流湿地。水平流潜流系统 (HSF, horizontal subsurface flow) 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放氧。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。

垂直流潜流系统 (VSF, vertical subsurface flow) 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。

(2) 按水流分类。人工湿地可按污水在湿地床体中流动的方式不同而分为三种类型:表面流人工湿地 (surface flow constructed wetland)、潜流人工湿地 (sub-surface flow constructed wetland) 和潮汐流人工湿地 (tidal flow constructed wetland)。潜流型人工湿地又包括水平潜流人工湿地 (horizontal subsurface flow constructed wetlands) 和垂直潜流人工湿地 (VFW, vertical flow wetland)。

① 表面流人工湿地。表面流人工湿地是污水在湿地的表面流动,水位较浅,多在 $0.1\sim 0.6\text{m}$,它与自然湿地较接近,污水中大部分有机物的去除是由生长在植物水下茎秆上的生物膜来完成。这种湿地不能充分利用填料及丰富的植物根系,易孳生蚊蝇。在冬季或北方地区则易发生表面结冰问题,处理效果受温差变化影响。但这种处理系统具有投资低的优点。

② 潜流人工湿地。在潜流人工湿地中,污水在湿地床体内部流动,利用填料表面的生物膜、丰富的植物根系及表层土和填料的截留作用,提高其处理能力和效果,可以处理较高负荷的废水。但是如果有机负荷太重,往往会堵塞。因此常常采

用多个进口，尽可能均匀地分散悬浮固体。进入湿地处理系统前，废水需要经过沉淀，去除悬浮固体以避免堵塞。这种系统的投资要比表面流系统高，一般是表面流湿地建造费用的4~8倍。

潜流人工湿地可设计成水平流或垂直流。水平流系统包括一个种有植物的黏土或碎石矩形床，黏土床还常常添加钙和铝补充物来改善土壤结构，增加土壤沉淀磷酸盐的能力。废水在该系统中水平地流过植物的根系。该系统能有效降低生化耗氧量，减少悬浮固体，但由于黏土床缺氧，所以这类系统还需要改进。

a. 水平潜流人工湿地。水平潜流人工湿地因污水水平流过填料层而得名。它由一个或几个填料床组成，床体充填基质。与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，是目前国际上较多研究和应用的一种湿地处理系统。它的缺点是控制相对复杂，脱氮、除磷的效果不如垂直流人工湿地。

b. 垂直潜流人工湿地。垂直潜流人工湿地综合了表面流人工湿地和潜流人工湿地的特性。在垂直流人工湿地中，污水从湿地表面纵向流向填料床的底部，床体大多处于饱气状态，氧可通过大气扩散和植物传输进入人工湿地系统。该系统的硝化能力高于水平潜流湿地，可用于处理氨氮含量较高的废水。其缺点是对有机物的去除能力不如水平潜流人工湿地系统。落干/淹水时间较长，控制相对复杂。

③ 潮汐流人工湿地。潮汐流人工湿地中，芦苇床交替地被充满和排干。在向床内充水的过程中空气被挤出，填料逐渐被淹没。当芦苇床完全被水所饱和后，再逐渐排水。在排水过程中，新鲜的空气被带入填料空隙。在排水过程中进入的新鲜空气可以看做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。但是，潮汐流人工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，设计中考虑有备用床交替运行，以便利用闲置期进行生物降解。

1.2.2.2 人工湿地的构造

人工湿地一般由五部分组成：(a) 具有各种透水性的基质，如土壤、砂、砾石；(b) 适于在饱和水和厌氧基质中生长的植物，如芦苇；(c) 水体（在基质表面下或表面上流动的水）；(d) 无脊椎或脊椎动物；(e) 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），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：(a) 显著增加微生物的附着（植物的根茎叶）；(b) 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；(c) 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，大型植物稳定根际的导水性相当于粗砂的 2~5 倍。而土壤、砂、砾石基质的作用有：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。水体为动植物、微生物提供营养物质。

1.2.3 人工湿地处理系统特点

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 BOD₅、SS、营养盐、原生动动物、金属离子和其它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。人工湿地单元中的流态采用推流式、阶梯进水式、回流式或综合式，见图 1-2。

回流式人工湿地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。出水回流还可以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。

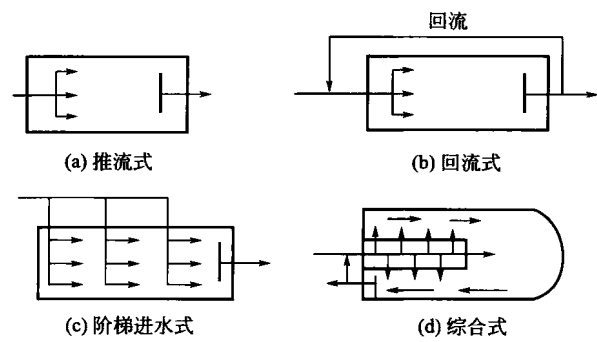


图 1-2 人工湿地中的基本流态

人工湿地系统具有如下特点：(a) 建造和运行费用便宜；(b) 易于维护，技术含量低；(c) 可进行有效可靠的污水处理；(d) 可缓冲对水力和污染负荷的冲击；(e) 可提供和间接提供效益，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：(a) 占地面积大；(b) 不精确的设计运行参数；(c) 生物和水力复杂性及对重要工艺动力学理解的缺乏；(d) 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。

1.2.4 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

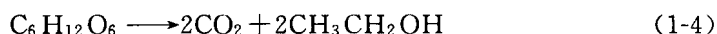
层中的微生物（细菌和真菌）在有机物的去除中起主要作用，湿地植物的根系将氧气带入周围的土壤，但远离根部的环境处于厌氧，形成处理环境的变化带，这就加强了人工湿地去除复杂污染物和难处理污染物的能力。大部分有机物的去除是靠土壤微生物，但某些污染物如重金属、硫、磷等可通过土壤、植物作用降低浓度。

(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。人工湿地填料表面吸附了许多微生物形成的大量的生物膜，植物根系广布于池中，当污水流经人工湿地时，可沉降性污染物被快速截留去除。污水中的悬浮物被填充料及植物根系阻挡截留而沉淀在基质中去除。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，设置沉淀池即可。一般而言，填料的粒径越小对SS去除效果越好，但粒径太小的填料容易导致湿地床的堵塞，实践中应综合考虑增强SS的去除效果和解决堵塞的问题，选用粒径合适的填料。

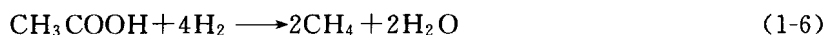
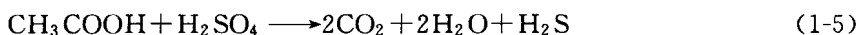
(2) 有机物的去除 污水中的有机物包括颗粒性有机物和溶解性有机物。前者通过沉淀和过滤而被截留在湿地中；而溶解性有机物则通过植物根系生物膜的吸附、吸收及生物降解过程而被分解去除；生物降解过程主要是通过好氧代谢和厌氧代谢得到降解。由好氧异氧菌控制的好氧降解可以表述如下：



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（如醋酸、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。由于湿地的特有的环境，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（ NH_4^+ ）、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。人工湿地污水中氮的去除主要包括植物吸收、氮的挥发、介质的吸附及微生物转化（硝化/反硝化）。但研究表明，除氮主要通过微生物硝化反硝化作用完成。氮的去除效率