

Constructed Wetlands for Wastewater Treatment



人工湿地 处理污水技术

◎ 李文奇 曾 平 孙东亚 编译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

人工湿地 处理污水技术

◎ 李文奇 曾 平 孙东亚 编译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

人工湿地已被广泛用于处理城市暴雨径流、生活污水、工业废水、农业排水和矿山酸性排水等,本书仅涉及处理生活污水的人工湿地系统。本书详细讨论了表流人工湿地和潜流人工湿地的处理能力、功能、设计方法和达到设计要求所需的管理措施等内容,并提出人工湿地正确使用方法。此外,对美国环保署已建设的一些湿地进行总结。

全书共包括引言, 人工湿地介绍, 去除原理及人工湿地模型, 表流人工湿地系统, 潜流人工湿地系统, 系统施工、启动、运行和管理, 案例介绍等 7 个部分。

本书可作为湿地处理、环境保护、水利工程、城市规划、水景设计等专业的设计、施工人员参考使用,亦可作为相关专业院校师生教学辅助资料使用。

图书在版编目(CIP)数据

人工湿地处理污水技术 / 李文奇, 曾平, 孙东亚编
译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 12
ISBN 978-7-5084-7053-5

I. ①人… II. ①李… ②曾… ③孙… III. ①沼泽化地—污水处理 IV. ①P941.78②X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第226792号

书 作 出 版 发 行	名 者 	人工湿地处理污水技术 李文奇 曾平 孙东亚 编译 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 印 规 版 次 数 定	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京市兴怀印刷厂 184mm×260mm 16 开本 10.5 印张 249 千字 2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷 0001—2000 册 28.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前言



工农业和生活污水排放量的日益增加，给水环境造成了空前的压力。地表水富营养化、地下水污染严重制约了社会、经济的可持续发展。

随着国家经济力量的增强及人民生活水平的提高，百姓对环境质量，特别是水环境质量改善的要求日益强烈。控制水环境污染已成为各级政府的重要工作，并纳入了政府考核目标。选用效果好、成本低的污水净化技术就成为了水环境治理规划的重要内容。

人工湿地污水净化技术，具有施工、运行和维护简单，建设、运行费用低的特点。近年来受到各级政府和专业部门的重视。国家在“863”和“科技支撑计划”等科技计划中均有关于人工湿地污染净化的研究和示范项目。实际工程中有水源地净化人工湿地，如抚仙湖、滇池和太湖周边的人工湿地等；城市污水净化的人工湿地，如北京翠湖人工湿地、温榆河人工湿地等；村落、小区生活污水净化的人工湿地，如靖江市季市镇利民村人工湿地、北京市上庄镇前章村大排水河道人工湿地等。

由于人工湿地污染净化机理复杂、外界不确定影响因子众多，加之我国疆域辽阔，南北环境条件迥异，使得人工湿地研究工作仍处于初级探索和尝试阶段。相互矛盾的数据多见之于杂志、报章。其主要原因：①湿地机理过程量化难度大；②湿地自然条件难以掌控；③数据条件欠周详；④缺乏对人工湿地示范工程的第三方评价等。因此，给人工湿地研究成果的引用、参考带来了困难。而目前又很难找到关于人工湿地技术的系统性指导技术文献。各地在人工湿地规划、设计、施工基本上是“摸着石头过河”和“各自为战”。鉴于此，编译者主要参考美国环保局“Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters”技术手册，编译了此书。以期为国内的人工湿地研究、设计、施工、运行和维护人员提供较为系统的技术资料。

全书共分7章，第1章、第2章由李文奇编译，第3章、第4章、第5章由曾平编译，第6章、第7章由孙东亚和高季军编译。全书由李文奇负责

统稿。赵建勇负责本书的校对和编辑工作。本书的编译得到了水利部的资助。

由于编译人员的水平所限，书中存在谬误和遗漏之处在所难免，肯请读者批评指正。

编译者 薛

目 录

前言

第1章 引言	1
1.1 概述	1
1.2 术语介绍	2
1.3 常见的错误概念	2
1.4 人工湿地的适用条件	3
第2章 人工湿地介绍	7
2.1 人工湿地	7
2.2 人工湿地生态学	8
2.3 人工湿地植物学	9
2.4 人工湿地动物群落	13
2.5 人工湿地设计者需考虑的生态学问题	14
2.6 对人类健康的影响	16
2.7 小区人工湿地系统	17
2.8 相关水处理系统	17
2.9 常见问题	18
2.10 参考文献	22
第3章 去除原理及人工湿地模型	26
3.1 引言	26
3.2 悬浮物分离、转化机理	27
3.3 有机物分离、转化机理	32
3.4 氮分离、转化机理	40
3.5 磷分离、转化机理	44
3.6 病菌分离、转化机理	46
3.7 其他污染物的分离和转化机理	47
3.8 人工湿地模型	48
3.9 参考文献	50
第4章 表流人工湿地系统	54
4.1 预期性能	54

4.2	湿地水文条件	62
4.3	湿地水力学	64
4.4	湿地系统设计及尺寸	68
4.5	设计	69
4.6	设计要点	80
4.7	施工/土木工程	84
4.8	设计建议概要	86
4.9	参考文献	87
第5章	潜流人工湿地系统	90
5.1	引言	90
5.2	相关理论	90
5.3	水文	96
5.4	设计原理	99
5.5	设计时需考虑的因素	107
5.6	潜流人工湿地系统处理化粪池或初沉池出水设计实例	109
5.7	实际应用	113
5.8	间歇式潜流人工湿地系统	114
5.9	参考文献	115
第6章	系统施工、启动、运行和管理	119
6.1	简介	119
6.2	施工	119
6.3	启动	124
6.4	运行维护	125
6.5	监测	127
6.6	参考文献	127
第7章	案例介绍	129
7.1	表流人工湿地系统	129
7.2	潜流人工湿地系统	144
7.3	经验总结	157

第 1 章 引 言

1.1 概述

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（如芦苇、香蒲等）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地去除污染物的能力。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。美国在 20 世纪 70~80 年代间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 80~90 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、砂砾或细沙等材料，形成多孔性基质。

人工湿地已被广泛用于处理城市暴雨径流、生活污水、工业废水、农业排水和矿山酸性排水等，本书仅涉及处理生活污水的人工湿地系统。为满足排水和回用要求，以人工湿地为主要处理单元，同时还需要结合预处理或后续处理工艺对污水进行预处理和深度处理。

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）。这几种型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，生长有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，湿地床包含有埋深适当、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仅呈垂直向流动，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力停留时间，提高出水水质。

本书将讨论表流人工湿地和潜流人工湿地的处理能力、功能、设计方法和达到设计要求所需的管理措施等内容，并提出人工湿地正确的使用方法。此外，对美国环保署建设的一部分湿地进行总结。



1.2 术语介绍

简要术语介绍有助于读者区别本书所涉及的人工湿地和其他类型湿地的异同点。美国联邦条例对湿地的定义为“经常或长期性被地表水和地下水淹没或饱和的区域，该区域可支持适于水分饱和和土壤的植物大量生长。湿地一般由林泽、草泽、泥炭沼泽等相同区域组成”。与自然湿地相对应，人工湿地是由人工建造或改造的湿地。自然湿地一般没有人工填充基质、安装排水系统、改变流态或物理特性等人为调控措施。不鼓励改造或直接利用自然湿地进行污水处理，自然湿地不在本书讨论范围。

人工湿地作为污水处理设施，一般深度均一、形状规则，建设在污染源附近地势较高、原来不存在自然湿地的地方。人工湿地的建设需遵循污水处理设施建造规范，不能将其用作生态补偿性设施。美国环保署的相关文件称人工湿地为人工处理湿地，以免混淆其作为污水处理设施的用途（USEPA, 1999）。对经二级处理的污水进行深度处理的人工湿地，可为野生动植物提供生境，还可提供研究场所和观光娱乐。有时将这样的湿地称为强化处理湿地。

本书内有时使用“潜流湿地床”术语，它更准确表达了潜流湿地的结构特征。一些潜流湿地床可以满足湿地的严格定义，但由于潜流湿地中水位在基质表面以下，不能维持野生水生动物生存活动，与表流湿地相比，污染物在水体和沉积物之间的生物和化学迁移转换作用较弱。

人工湿地不同于创建或修复湿地。后者以为野生动物提供栖息地为目标，建设鸟岛以及修建不规则的岸线等，要尽量模拟自然湿地，使其具有水深多样性、敞水区及植物密集区的综合特征。植物包括沉水植物、灌木和树木等。为生态补偿创建或恢复人工湿地，一般在原有湿地或附近区域上进行，本书不讨论该类湿地。

1.3 常见的错误概念

自从1988年美国环保署出版《湿地设计手册》以来，除美国环保署各部门所编的文件外，还有大量关于人工湿地的文献及设计导则陆续出版。同时，各大洲召开的国际会议上也展示了大量有关人工湿地的科研成果（Hammer, 1989; Cooper and Findlater, 1990; Moshiri, 1993; IAWQ, 1994, 1995, 1997）。尽管如此，在人工湿地的应用、设计和运行上仍存在着错误的认识，本节简要分析4个常见错误，并在其他章节中将进一步讨论。

错误认识1：利用已发表的设计模型可以很好地描述湿地设计特性。人工湿地涉及生物学、水力学和水化学学科，它是一个复杂的系统。此外，在时间、空间上缺乏全尺度的详细准确数据，使得设计者不得不从多种已建湿地中搜集设计参数用于湿地的设计，从而导致设计参数的可靠性降低。进行了详细研究工作并且做到了严格质量控制的湿地数据可能会与随机收集的质量控制较差的湿地数据混合使用；用作简单预处理的小规模湿地的数据可能与进行二级污水深度处理的大型湿地数据结合使用。人工湿地数据中存在的另外问题是：缺乏相对应的进出水数据样本；随机获取样本而不是综合样本；缺乏准确的流量和滞留时间数据；缺乏温度、降水量等重要相关参数。利用这些数据建立的回归方程，在设



计中的使用价值就会受到置疑。设计者有时依据处理较高浓度污水人工湿地数据来设计处理浓度更高的生活污水人工湿地,因此可靠性难以保证。

错误认识 2: 人工湿地中存在好氧区和厌氧区。该错误认识可能与挺水植物向根区传输氧能力有关。挺水植物能够从大气中向根区输送氧气,所以它是唯一能够适应厌氧环境的植物。研究表明一些氧气可以从植物根系向周围土壤中释放 (Brix, 1997), 这种现象及过去处理污水的自然湿地和人工湿地能在较低氧供给量条件下的运行经验,使人们认为在所有的湿地系统中都存在微观好氧区。一些人工湿地文献认为,在长满植物的湿地中,好氧生物降解是主要净化机理,这种说法使人们相信长有植物或存在释放氧气的来源的湿地是好氧系统。然而,由于无法抵抗污染负荷冲击,三级或强化处理湿地不能直接用于处理高浓度污水。使用适于低负荷的湿地处理高污染负荷的生活污水时,由于需要大量的氧,会削弱湿地的处理机能。实践经验和研究表明,植物根系渗出的氧量与生活污水需要的氧量相比可以忽略不计。

错误认识 3: 人工湿地可以大量去除氮污染物。这一错误认识和湿地供氧能力方面的误区有关。在一般负荷率条件下通过植物收割可以去除输入氮量的 20% 以下 (Reed, et al., 1995), 主要通过硝化和反硝化过程来实现氮的去除。如果假定湿地中有好氧区存在,在该区将实现氨氮的硝化反应。但是,在根区外围的厌氧区将实现反硝化反应,硝态氮转化成氮气。一些为去除硝态氮而建造的人工湿地运行失败与这种对氮转化的错误认识有关。在潜流湿地和长满植物的表流湿地中以厌氧过程为主,前者没有发生硝化反应,而在后者的敞水区则发生硝化反应。因此,需要保证充分的好氧区(敞水区)和厌氧区(植物区),人工湿地才可以去除氮;或者,采用人工湿地与其他好氧处理过程相结合的方法,来实现硝化过程并去除氮。

错误认识 4: 人工湿地可以大量去除磷污染物。人工湿地磷的去除量受植物季节性生长特性的制约。植物对磷的吸收量与生活污水中磷的负荷量相比非常小,同时在植物的衰败期还会释放磷。沉积颗粒物、土壤、植物碎屑等也会对磷产生吸附作用,但其能力都非常有限。文献中关于磷去除数据存在两方面的问题。首先,一些磷去除数据只是去除率。然而,早期关于湿地去除磷的研究中,待处理污水中的磷浓度很低,每去除 1mg/L 的磷可达到较高的去除率。其次,评价新建人工湿地性能时,磷去除数据不能说明湿地的长期运行特性。新种植植物的湿地比多年运行湿地对磷的吸收能力大,多年运行的湿地在植物衰败期要释放磷,在植物生长期将吸收磷。同时,湿地中新放置的土壤和基质对磷的吸附能力比多年运行几乎饱和的湿地吸附能力要大。

1.4 人工湿地的适用条件

1.4.1 小型社区的适宜技术

满足以下关键条件为适宜技术:

- (1) 经济性。投资、运行、维修和折旧等总费用在使用者负担能力范围以内。
- (2) 可操作性。当地人员可以进行运行和维护。
- (3) 可靠性。出水水质可稳定达标。

但是,美国农村地区的一些小型处理厂(通常规模小于 3800m³/d)因采用不恰当的



技术,如活性污泥法等,不符合上述条件而失败。1980年,小型活性污泥法处理系统占小型公用处理设施的39%。最新的数据显示,处理能力小于 $3800\text{m}^3/\text{d}$ 的处理设施中有73%的设施采用的是活性污泥法。然而,全美和国际的专家认为,在各种污水处理方法中,活性污泥法是运行、维护最困难的工艺。目前有90%的小型处理厂的出水违反美国排水水质标准的规定。在美国的田纳西州,小型污水处理厂采用活性污泥法时需要作专门论证。

小型社区的预算受污水收集和处理设施成本的限制。预算不足、不良的进货渠道使得供货和维护费用挤占运行和管理经费。过大的投资和不稳定的出水水质说明采用的技术不满足上述的条件。但是,迄今为止,除非在缺水的一些州,一般情况下都没有考虑到水的重复利用、地下水回灌、排水入河等。

现在已有一些适用于小型社区的水处理技术,如稳定塘、氧化塘、慢速砂滤、土地处理系统和人工湿地等。这些技术能满足不同运行标准和规模的要求,设施建设成本低、性能稳定。为满足特定的出水水质要求,这些技术对前处理或后处理也有特定的要求,因此,根据处理目标,上述技术可以单独使用,也可以与其他技术组合应用。例如,设计者可以通过添加三级处理系统强化稳定塘的处理效果,以稳定达到再利用或排放标准。适当的稳定塘强化技术可以保证出水水质,其中表流人工湿地可以增强沉积作用,进一步减少粪大肠杆菌和稳定塘系统出水中特有的藻类数量。表流人工湿地一般布置在稳定塘后面以控制塘中产生的过量藻类。虽然潜流人工湿地也可在稳定塘后使用,但是在一些地区过量增长的藻类使系统运行困难,不能达到技术要求。潜流人工湿地更适于在悬浮物少的处理工艺后使用,如在化粪池、双层沉淀池和厌氧池后边。

根据处理系统的最终目标,人工湿地也可能需要后续处理工艺。出水水质要求越高,就需要更多的处理环节或需要与其他工艺进行组合。人们往往过高估计人工湿地去除氮磷的能力。事实上,能有效地将氨氮氧化的两种技术是间歇砂滤器或循环式砂滤器。潜流人工湿地与循环砂砾过滤器组合处理工艺能高效地将氨态氮转化成硝态氮。表流人工湿地通过改变密集植物区和敞水区的比例,可同时实现硝化和反硝化过程,有效地去除污水中氮污染物。如果生活污水处理设施对磷的去除率要求高(如从典型生活污水进水浓度 $6\sim 7\text{mg/L}$ 降到 1mg/L),人工湿地就需与其他能去除磷的工艺联合使用。

因此,人工湿地适用于土地价格低、缺乏熟练操作人员的区域。根据污水处理目标,人工湿地可以单独使用,也可以与其他工艺组合使用。另外,如果当地政府提倡并允许采用传统的化粪池——土壤吸附系统以外的原位处理技术,人工湿地处理系统可以说是一个合适的处理技术。

1.4.2 单位政策和许可问题

美国各州相关部门正联手组织编写《人工湿地导则:保护水质和野生生物生境》,以下为该导则草案的基本内容:

- (1) 非生态补偿型湿地。
- (2) 防渗层设计遵循稳定塘要求。
- (3) 监测方法遵循稳定塘要求。
- (4) 不能在水域或已有自然湿地的区域再建人工湿地。



(5) 满足第(1)和第(4)时,也不是要放弃水资源。

该导则建议使用本地植物物种并要关注湿地的启动期间的行政许可、病菌传播和控制措施。

为避免额外行政许可申请和有关规定要求,应把人工湿地设计成具有处理功能的结构并建在相对于自然湿地或洪泛区地势较高的区域,即建在水域之外。依据该导则应考虑以下问题:

如果把处理湿地建在现有水域范围内,必须获得满足清洁水法 CWA 条款 404 许可证,该许可证明确批准人工湿地为满足 CWA 要求的污水处理系统……如果处理湿地建在水域范围内,其污染物排放需获得 NPDES 许可……如计划用退化的湿地作为处理湿地并计划修筑隔堤或围堤时,工程必须满足 404 条款许可的要求。后续的维护也需获得许可。

导则还提到:

如果要放弃人工湿地或不再作为处理湿地使用,并符合以下条件,可恢复成自然湿地:系统具有湿地的水文、土壤、植物等特性,或①为跨洲湿地;②与其他水域(除作为湿地的水域外)联通;③属于州行政区域内的水体,但与州际间的联通有关系(如作为迁徙鸟栖息地)。

前面的讨论不排除为水的再利用、生境改善或污水处理以外的公共利益而建造的湿地的设计和建设。用于污水处理的人工湿地一般对生态补偿性湿地的恢复不起作用。然而,在一些情况下,部分人工湿地系统,特别是面积超过处理目的需要的人工湿地可以部分起到生态补偿性湿地的作用。现行政策也鼓励利用适当的处理后污水恢复退化的湿地。例如,满足以下条件,可以进行恢复。

(1) 水源满足水质标准要求。

(2) 湿地的运用能改善水生态系统的自然功能和价值。

(3) 湿地的运用能使水生态系统恢复到历史状态。

(4) 湿地恢复主要选取对象应包括供水改善造成退化或破坏的湿地。如美国西部干旱地区,过去的一些湿地由于上游水资源分配和地下水下降等原因,供水水源得不到保证,预处理出水成为这类地区和相应生态系统的唯一水源。美国环保署制定了区域性湿地建设导则,帮助排污者和管理者评价污水排放到水体对生态系统所产生的净生态效益。

关于政策和许可问题的讨论是很概括性的,管理者关于这些问题的决策是在逐个案例研究的基础上制定的。规划和设计部门应依据地区行政部门关于处理湿地导则,包括选址、排水和长期监测要求,进行湿地的规划和设计。

1.4.3 其他因素

湿地对公众的美学魅力,可能是影响湿地特征的最重要因素。当日益增长的污水处理需求成为公众关注的话题时,人们渴望使用这样一种有迷人景观的强化系统来处理污水,并成为社区的有效附加功能设施,这成为设计争论的重点。而人工湿地的这种魅力使得精确评估该技术可行性的需要变得如此重要而艰巨。工程部门往往不能意识到这种内在的吸引力,而社区居民又往往缺乏对处理机理的了解而意识不到处理技术的局限性。人工湿地



的自然魅力和其他潜在的美学价值,有时可抵偿其他处理方案在处理性能或建设成本方面的劣势,公众会把人工湿地作为首选方案。另外,由于人工湿地建设成本过高或会出现不能满足出水水质要求等情况,故设计者必须使公众认识到,尽管湿地具有内在美学吸引力,但湿地并不是万能的方案。

首先,使用人工湿地进行污水处理,会存在一定程度的风险。正如 Cole (1998) 在人工湿地处理污水的一篇综述文章中所指出的那样,并不是所有州的管理部门和环保管理区域都允许建设人工湿地。一些部门认为湿地技术是一项成熟的处理技术,鼓励利用,部分原因是受 1.3 节所指出的错误概念影响。还有一些其他部门将湿地处理技术看作新技术,如同任何新处理技术一样,人们对其接受尚需时日。其他已被人们接受的自然处理技术,如土地处理技术等都经历了相似的逐渐被接受的过程。

其次,虽然没有证据显示使用人工湿地会对野生生物造成伤害,还是有一些管理部门担心处理污水的湿地系统会吸引野生生物。事实上,目前还没有比较有意义的关于人工湿地对野生生物风险的研究。虽然人工湿地与氧化塘相比属于明显不同的生境类型,但是多年来应用氧化塘处理技术给野生生物造成的风险方面的证据缺乏,暗示湿地处理生活污水对野生生物风险并不严重。当然,如果湿地处理高浓度有毒污水,设计者应考虑使用潜流湿地或使用表流湿地时采取措施防止野生生物接近。

第三,如前面所述,由于缺乏翔实的科学数据,湿地的设计目前主要是经验性的,采用观测数据确定其参数,缺乏科学理论依据。由于气候、污水特性、设计构造、施工技术、运行管理实践等因素的变化,在一定时期内,研究人员还会存在关于湿地设计、性能等方面不一致的认识。

第2章 人工湿地介绍

2.1 人工湿地

人工湿地指在给定环境条件下为实现污水处理目的而建设的该系统可以包括一个或多个单元的污水处理系统。虽然人工湿地已被用来处理多种类型的污水，可用于不同的处理水平，但在本书中讨论的人工湿地，只适用于市政污水二级处理。这些处理系统接收初级处理污水，将其处理至二级排放标准或更高，而深度处理系统或深度处理湿地则是接收二级处理污水，对其进行进一步处理，然后排入水体。

本书中所讨论的人工湿地接收污水的污染物负荷，比最近 20 年广泛用于污水深度处理湿地所接收污水负荷高。因此，以上所讲的二级处理与深度处理之间的这种差别强调的是污水处理程度，而不是污水处理方法。

本书中讨论的人工湿地用于社区的二级污水处理，它也可以与其他二级处理工艺结合使用。例如，人工湿地可以设置在过滤系统之前，优化二级处理的成本。另外，经过人工湿地处理的二级出水还可排放到强化湿地中进行深度处理。本书不推荐使用人工湿地系统处理原污水。图 2.1 为人工湿地处理污水的工艺流程示意图。

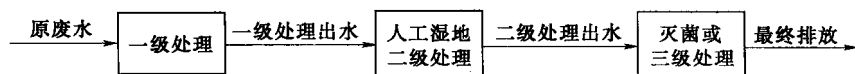


图 2.1 污水处理工艺中的人工湿地

区分用于二级处理的人工湿地和用于三级处理的强化人工湿地，对于认识早期基于湿地污水处理系统的适用条件及理解其性能的数据库是十分重要的。大部分有关人工湿地处理系统的信息来源于规模较大的强化处理湿地以及相对较少的小型二级处理人工湿地。过去，大量未经证实、来源不同的数据被收集、整理，用于指导人工湿地系统的建设与运行，从而不可避免地会产生矛盾。因此，本书的内容主要来自于可靠的研究数据和人工湿地在高浓度生活污水二级处理实际应用中所积累的资料。

人工湿地系统包括两种类型，即表流人工湿地和潜流人工湿地，它们有许多共性，主要区别是两类湿地的水面线位置不同。这两种不同类型的湿地为适应特定场所的特征需设计不同的外形和大小，使工程结构、运行性能最优化。这两种类型的人工湿地根据现场土壤条件和管理条例要求，一般都铺设防渗层。

表流人工湿地在外观和功能上都接近于自然湿地，具有敞水区、挺水植物、变化的水深以及其他湿地特征。如图 2.2 所示为表流人工湿地的主要组成部分。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、敞水区和植物生长区的不同组合型式、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。

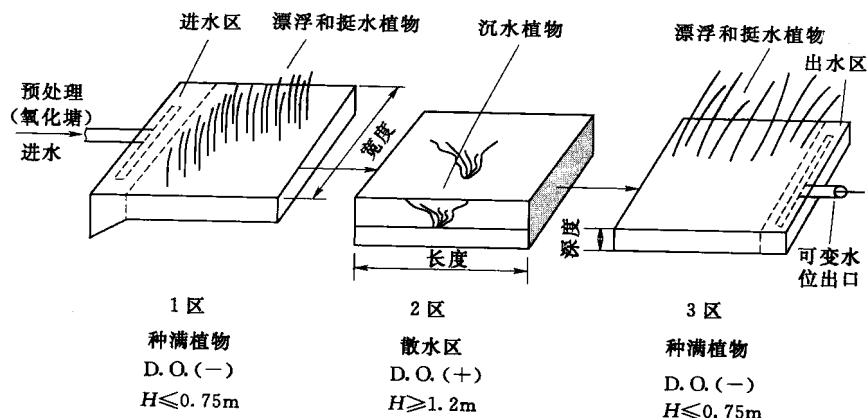


图 2.2 表流人工湿地系统构成

潜流人工湿地由可种植湿地植物的砾石床组成。如图 2.3 所示为潜流人工湿地系统结构示意图。和表流人工湿地系统一样，潜流人工湿地系统也包括围堰、用来调节和分配污水的进水口及出水口装置。除形状和尺寸以外，其他设计参数还包括处理基质（砾石形状和粒径）和植物的选择。植物的选择主要考虑景观的要求，而不是考虑性能的要求。

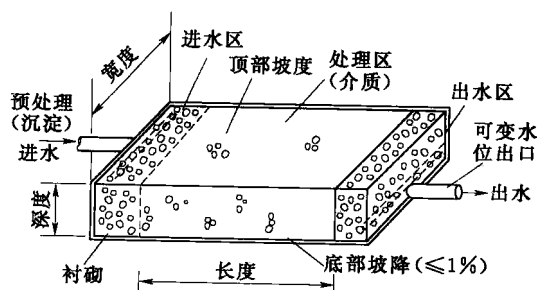


图 2.3 潜流人工湿地床系统构成

人工湿地简单的外观和自然功能，掩盖了污水处理机理的复杂性。与自然湿地不同，人工湿地的设计和运行要求其性能满足一定的标准。人工湿地建成和投入运行后，为了保证系统正常运行，需要按期进行监测。根据监测结果，对系统进行局部的调整，再加上日常管理，以维持系统处于最佳的运行状态。

本章介绍的人工湿地生态学的基础知识，有助于规划人员、决策者、地方政府部门和其他一些使用人工湿地处理污水技术的相关人员对人工湿地的了解。本章简单介绍人工湿地功能和生态学基础知识，使读者掌握其基本内容。为把重点放在湿地的处理性能方面，并没有详细讲解生态学知识。读者可借助其他出版物来增加湿地生态学方面的知识。在假定人工湿地的设计者和运行管理者已具有一定的湿地生态学基础知识的情况下，后面的章节中详细介绍了人工湿地的内容。虽然本书主要着眼于湿地处理市政污水功能，但对利用湿地要素的其他相关系统也进行了介绍。另外，本书还介绍了原位处理社区生活污水和非市政污水的人工湿地系统。

因为潜流人工湿地的处理效果不依赖于湿地植被和散水区域，所以本章的部分内容仅介绍与表流人工湿地相关的设计和管理方面的内容。

2.2 人工湿地生态学

人工湿地是一个将物理、化学和生物过程与工程和管理体系相结合的生态系统。要成



功建设和运用生态系统来处理污水,需要对系统的组成和相互关系有基本的了解和认识。

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进行运行,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、总悬浮物(TSS)浓度、生化需氧量(BOD)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。然而,即便已知进水流量,要建立人工湿地水平衡模型,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。第3章将详细讨论建立模型的问题。

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,会由于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,从而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相应的减少。

2.3 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。这种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(Bavor et al., 1989; Burgoon et al., 1989; Gearheart et al., 1989; Thut, 1989)。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。下面概述植物生态学的一些基本原理,以期对理解人工湿地有所帮助。

2.3.1 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暖和寒冷季节运行特性变化幅度要比小规模湿地小（Wittgren and Maehlum, 1996）。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。

2.3.2 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，初级生产生物量高，可吸收积存于表流人工湿地和池塘系统中。植物特性见表 2.1。水葫芦在热带区域的池塘系统中能很好地去总悬浮物和藻类。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。然而在北美现有社会经济状况下，对沼气进行经济、有效回收的成功案例不多。

表 2.1 人工湿地植物特性

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，不能在空气中挺立。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，因此敞水区的设计停留时间要比藻类生长需要的时间短