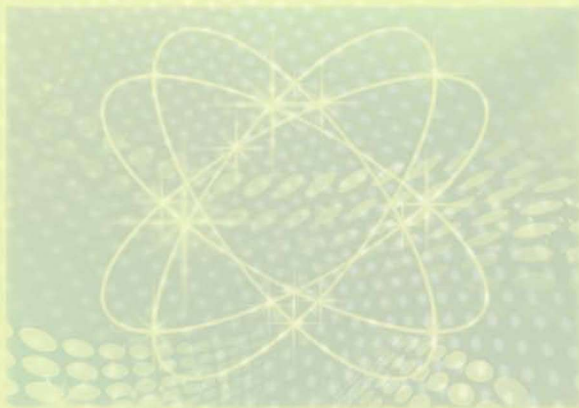


污水湿地生态处理技术



前言

人工湿地(Constructed Wetland)污水处理技术是近 20 年来发展起来的一种新型废水生态处理技术,其特点是投资省、处理效果好、工艺简单,运行费用低,维护方便,具有较大容量缓冲能力。人工湿地生态系统净化废水效率高,可替代二级处理厂和深度处理设施,其建设投资、运行和管理费用为一般常规方法的 1/5 - 1/10,有着广阔的应用前景。国内已在深圳、北京、山东、江苏等地区多处建造不同规模湿地污水生态处理系统,出水达到水质标准及中水要求,系统运行稳定,即使在冬季也有较好的净化效果。西安市周至县城镇污水处理厂、宝鸡市西府天地民俗旅游景区污水处理站等污水深度处理采用人工湿地工艺技术;西安秦岭北麓旅游度假区、上王村农家乐生活污水及亚健高尔夫球场生活污水均采用人工湿地污水生态处理技术,取得良好效果。

生活污水采用常规二级生化工艺处理,污水处理厂基本建设投资一般为 2000 ~ 3000 元/m³ · 水,吨水处理运行费约 0.7 ~ 1.0 元,应用人工湿地污水处理技术吨水建设投资仅需 100 ~ 200 元。随着城市建设扩展、新农村建设步伐加快、住宅区的增多,生活污水污染排放增大,处理达标及中水回用和节水尤其重要。利用河流滩地,构建人工湿地系统,用于处理日益增多的生活污水并就地

回用,可同时形成新的生态自然景观,有利于地区生态环境保护与恢复。

人工湿地污水生态处理技术,适合于乡镇、农村、旅游度假山庄、住宅小区生活污水就地分散处理与回用,河流水质净化及初期雨水处理与工业废水深度处理。结合区域绿化与水景观建设,建立水质湿地生态改善处理系统,将污水处理工程与景观绿化相结合,充分发挥资源的生态潜力,获得水处理与资源化的最佳效益,处理出水达标排放并可再利用,促进生态环境良性循环。

湿地植物应选择适合本地多年生长的耐污水生植物,芦苇(*Phragmites communis Trin*)、水稗(*Echinochloa crusgalli Beau V*)、水芹(*Oenanthe javanica Dc*)、香蒲(*Typha orientalis pres*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudothragmites Koel*)等挺水性物种,多作为污水湿地生态净化处理系统优选植物种类。

希望本书的内容能对从事污水湿地生态处理工程技术设计和建设者提供借鉴。

本书也可作为环境工程、水污染控制、生态环境保护教学、科研和环境管理工作者的参考。

目 录

1 概 论	/1
1.1 污水湿地净化技术发展	/1
1.2 人工湿地的结构类型	/2
1.3 湿地污水净化机理	/3
1.4 湿地污水处理主要影响因素	/7
1.5 研究与应用前景展望	/11
1.6 湿地与环境激素	/13
2 污水湿地净化动力学	/16
2.1 湿地磷转化数学模型	/16
2.2 污染物降解动力学	/17
3 人工湿地城市污水处理实验研究	/27
3.1 实验部分	/27
3.2 结果与讨论	/31
3.3 本章小结	/42
4 人工湿地二级生化出水深度处理实验研究	/45
4.1 实验部分	/45
4.2 结果与讨论	/47
4.3 本章小结	/63

5	人工湿地环境激素类污染物的净化模拟实验研究	/65
5.1	研究内容	/65
5.2	材料和方法	/65
5.3	结果与讨论	/66
5.4	本章小结	/76
6	污水湿地生态处理工艺设计	/78
6.1	工艺流程设计	/78
6.2	工艺系统设计	/78
6.3	工艺设计参数选取	/81
6.4	设计模式	/82
2	6.5 湿地阻塞成因与控制	/85
7	工程应用设计实例(一)	/89
7.1	工程概况	/89
7.2	工程设计	/89
7.3	湿地系统结构设计	/90
7.4	运行效果	/93
8	工程应用设计实例(二)	/95
8.1	工程概况	/95
8.2	工程验收监测概况	/97
8.3	工程验收监测结果	/98
9	工程应用设计实例(三)	/103
9.1	农村生活污水状况	/103

目 录
MU LU

9.2	污水处理工艺技术	/104
9.3	处理工艺流程	/106
9.4	主要构筑物及参数	/107
9.5	湿地系统运行管理	/108
9.6	沼气池运行管理	/110
10	污水湿地生态处理回用技术	/115
10.1	城市污水集中处理回用存在的问题	/115
10.2	污水湿地处理回用技术的优点	/118
10.3	本章结论	/121
附录 1	城市污水处理及污染防治技术政策	/122
附录 2	农村生活污染防治技术政策	/129
附录 3	人工湿地运行和管理手册	/134
	参考文献	/150
	后 记	/156

1 概 论

湿地系指天然或人工,长久或暂时性沼泽地、湿地、泥炭地或水域地带,带有静止或流动淡水、半咸水,咸水水体者,包括低潮时水深不超过 6m 的海域。湿地(wetlands)的中英文原意都是指过度湿润的土地,是陆地和水域之间的过渡区域。由于土壤浸泡在水中,所以特征植物得以生长。湿地是重要的自然生态系统和自然资源,具有巨大的经济、生态和社会效益,是实现可持续发展的重要基础。湿地具有维持生物多样性、蓄洪防旱、降解污染、调节气候、防止自然灾害等多种功能。湿地的生态价值对人类生存极为重要,其作用正在被人类逐步认识。湿地污水净化技术研究和应用是目前水处理领域研究的热点,构建湿地生态污水处理技术研究重点主要在构建湿地设计、湿地处理工艺、净化流程与效益研究,污水湿地生态处理技术的研究目前已取得显著进展。

1

1.1 污水湿地净化技术发展

Hammer 等人将人工湿地(constructed wetland)定义为: 一个为

了人类的利用和利益,通过模拟自然湿地,人为设计与建造的由饱和基质、挺水与沉水植被、动物和水体组成的复合体。夏汉平等认为,人工湿地是指通过模拟天然湿地的结构与功能,选择一定的地理位置与地形,根据人们的需要人为设计与建造的湿地。

湿地被应用于污水净化始于 20 世纪 50 年代,而用人工湿地进行污水净化的研究始于 20 世纪 70 年代末。人工湿地是一个自适应的系统,其废水处理技术特点是投资省,处理效果好,运行维护方便,是一种生态治理污水的方法,可作为传统污水处理方法的一种有效替代技术,对于水环境修复以及生态恢复具有重要意义,因而越来越受到世界各国的重视和关注。目前它被广泛应用于处理生活污水、工业废水、矿山及石油开采废水、农业点源污染和面源污染以及水体富营养化的治理,人工湿地与天然湿地污水处理相比有着可控的特点,有人为控制措施,从而可以优化系统去除 BOD、COD、营养元素和细菌污染物的效能,最大限度地进行水力条件控制和湿地植物管理,也可结合进行人工景观美学设计。

2

1.2 人工湿地的结构类型

1. 人工湿地类型

人工湿地可分为 4 大类。①人工生境湿地,协助天然湿地用于生物多样性的保护;②人工抗洪湿地,用于控制洪水或泄洪;③人工水产湿地,用于农业生产与水产养殖;④人工处理湿地,用于

污水污物处理。而人工湿地污水净化系统通常是指处理湿地。

2. 人工湿地结构

水体、基质、水生湿生植物和微生物是构成人工湿地污水处理系统的基本要素。按污水的流动方式人工处理湿地可分为 3 种类型: 表面流人工湿地(SFW)、潜流人工湿地(SFS) 和垂直流人工湿地(VCW)。其他设计类型均以此为基础, 进行必要的改进或复合而产生的。表面流人工湿地系统中, 废水在湿地的土壤表层流动, 水深较浅(一般在 0.1 ~ 0.6m)。与潜流人工湿地系统相比, 其优点是投资省; 缺点是负荷低, 北方地区冬季表面会结冰, 夏季会滋生蚊蝇, 散发臭味。潜流人工湿地系统, 污水在湿地床的表面下流动, 一方面可以充分利用基质的截留作用, 提高处理效果; 另一方面由于水流在地表以下流动, 保温性较好, 处理效果受气候影响较小, 占地较小, 且卫生条件较好, 建设成本较高, 是目前欧洲国家大多采用的一种设计类型; 而与水平流系统对污水中营养物质的去除效果相比, 由 Seidel 首次设计的垂直流人工湿地系统具有更大的优越性。

1.3 湿地污水净化机理

人工湿地污水净化处理机理较复杂。湿地净化污水是湿地中基质、植物和微生物相互关联, 物理、化学和生物过程协同作用的结果。其中物理作用主要是过滤、沉积作用。污水进入湿地, 经过

基质层及密集的植物茎叶和根系,可以过滤、截留污水中的悬浮物,并沉积在基质中;化学反应主要指化学沉淀、吸附、离子交换、拮抗和氧化还原反应等,这些化学反应的发生主要取决于所选择的基质类型;生化反应主要指微生物在好氧、兼氧及厌氧状态下,通过开环、断键分解成简单分子、小分子等作用,实现对污染物的降解和去除,其中构成人工湿地的四个基本要素都具有单独的净化污水能力,尤其是人工湿地基质中微生物类群在人工湿地污水净化过程中起到重要的作用。

1. 有机污染物的去除机理

人工湿地对污水有机污染物 COD_{cr} 、 BOD_5 有较强的降解去除能力。污水流经湿地床时,其中的有机物被基质颗粒所吸附而截留,有机物迅速被微生物所氧化、分解,转化成 CO_2 及无机盐类,并不断被植物作为营养而吸收。 BOD_5 去除基本上是在基质表层进行的,微生物生长和基质形成的生物膜对污水有机物的降解起主要作用,其主要为好氧生化反应。污水不溶性有机物污染物通过湿地基质的沉淀、过滤作用,在厌氧条件下逐步分解,被微生物利用;废水中溶解态的有机物则通过植物根系生物膜的吸附、吸收及生物代谢过程而被分解去除。随着处理过程的不断进行,湿地床中的微生物相应地繁殖生长,通过对湿地床填料的定期更换及对湿地植物的收割而将有机体从系统中去除。

2. 氮去除机理

污水中氮主要以有机氮和氨氮的形式存在,在处理过程中有

用而从系统中去除。湿地系统氮转化规律如图 1.1 所示。

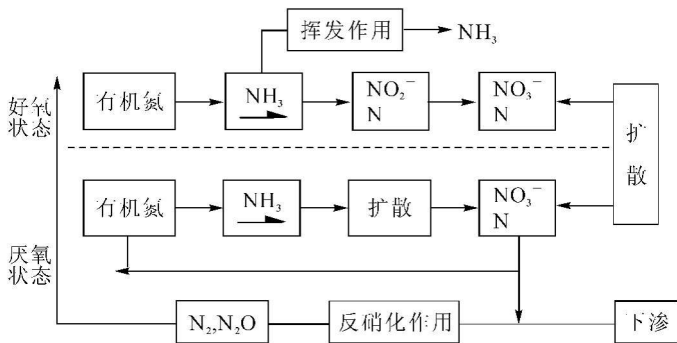


图 1.1 人工湿地中氮的转化过程

物的硝化和反硝化以及挥发等。氮在湿地系统生物化学循环较复杂,包括七种价态的转换,氮的转换受氧化还原特性及微生物分解过程的影响。研究表明,污水中的无机氮作为植物生长过程不可缺少的物质而直接被植物摄取,并合成植物蛋白质等有机氮,通过植物的收割可使之去除,但这部分仅占总氮量的8%~16%,不是主要的脱氮过程。在人工湿地系统中,植物根茎下形成有利于微生物硝化作用的好氧微区,同时在远离根系周围形成厌氧区提供反硝化条件,所以人工湿地脱氮主要是靠微生物的硝化、反硝化作用。

3. 磷去除机理

污水中无机磷是植物生长所必需的营养物质,植物吸收无机

磷同化合成 ATP、DNA 和 RNA 等有机成分,通过对植物的收割而将磷从系统中去除;另一方面,微生物吸收磷(将磷作为微生物体必需的成分 $C_{60}H_{87}O_{23}P$,供生长所需)通过聚磷菌对磷的过量积累,将其从湿地水中去除。传统二级污水处理工艺,微生物对磷的正常同化吸收一般只能去除进水中磷含量 4.5% ~ 19%,主要由聚磷菌的过量摄磷作用实现的。人工湿地由于植物光合作用及呼吸作用(光反应和暗反应)的交替进行,植物根系输氧量的多少随光照强度而相应地发生变化,湿地床内不同区域耗氧速率不同,致使基质内部交替地出现好氧和厌氧状态,利于微生物对磷的释放和积累作用的发生;床体填料对磷的吸收及与磷酸根离子的化学反应(如离子交换作用等),对磷的去除亦有一定的作用。含铁质和钙质的填料可与水中的磷酸根反应而沉淀下来,也有利于磷的去除。上述三种磷去除作用强弱不同,一般以植物对磷的吸收为主(如芦苇等快速且长期生长的挺水性植物对磷的需求量大)。人工湿地中磷的去除是由植物的吸收、填料床的沉淀过滤固结及微生物的积累协同作用完成的。

4. 金属离子的去除

湿地水生植物具有富集重金属离子的功能,主要是被其根部所吸收,基质土壤对污水中金属离子也具去除作用。金属离子在土壤中去除主要依靠吸附、沉淀、离子交换等,金属离子在土壤胶体表面被置换吸附并生成难溶化合物,也可与土壤胶体颗粒螯合而生成复合物。

1.4 湿地污水处理主要影响因素

1. 湿地植物

常用于人工湿地的植物种类见表 1.1。常用的挺水植物种类有香蒲(*Typha sp.*)、芦苇(*Phragmites sp.*)、鹿草(*Scirpus sp.*) 和苔草(*Carex sp.*) 具有污水处理能力又有观赏价值的植物,如美人蕉 (*Canna indica L.*) 等。

表 1.1 用于人工湿地废水处理的植物种类 (Guntenspergen et al. 1999)

挺水植物	沉水植物	浮水植物
<i>Scirpus robustus</i>	<i>Egeria densa</i>	<i>Lagorosiphon major</i>
<i>Scirpus lacustris</i>	<i>Ceratophyllum demersum</i>	<i>Salvinia rotundifolia</i>
<i>Oplectus lacustris</i> Schoen	<i>Elodea nuttallii</i>	<i>Spirodela polyrhiza</i>
<i>Typha domingensis</i>	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	<i>Pistia stratiotes</i>
<i>Cannaa flaccida</i>		<i>Lemna minor</i>
<i>Iris pseudacorus</i>		<i>Eichhornia crassipes</i>
<i>Scirpus pungens</i>		<i>Wolffia arrhiza</i>
<i>Glyceria maxima</i>		<i>Hydrocotyle umbellate</i>
<i>Eleocharis dulcis</i>		<i>Lemna gibba</i>
<i>Eleocharis sphacelata</i>		<i>Lemna spp.</i>
<i>Typha orientalis</i>		
<i>Zantedeschia aethiopica</i>		
<i>Colocasia esculenta</i>		

人工湿地成熟以后,当污水进入湿地,经过基质层及密集的植物茎叶和根系,可以过滤、截留污水中的悬浮物。同时湿地中的植物能够从废水中吸收营养物质作为自身生长所需的营养源而去除污染物。根据德国学者 Kickuth R. 的根区法理论,由于生长在湿地中的挺水植物对氧的输送、释放、扩散作用,将空气中的氧转运到根部,再经过植物根部的扩散,在植物根须周围环境中依次出现好氧区、兼氧区和厌氧区,有利于硝化、反硝化反应和微生物对磷的过量积累作用,达到除氮、磷等污染物的效果;在湿地植物的选择上,芦苇床技术应用较普遍,应用范围也较广。有研究表明,植物的存在有利于系统中硝化作用的发生,有植物系统的人工湿地总氮(TN)的去除率明显高于无植物系统,有植物系统对凯氏氮、氨氮、尤其是亚硝态氮的去除效果明显优于无植物系统。张甲耀等人对不同植物的去氮效果进行了研究,潜流型人工湿地污水处理系统对总氮(TN)的去除率分别为:芦苇系统 49.34%、茭白系统 45.49%、无植物系统 38.69%,这说明不同的植物具有不同的去污效果。研究表明,植物须根系比根状茎、匍匐茎等具有更好的污水净化效果。阳承胜等人通过对宽叶香蒲、芦苇、荇菜和狗牙根的研究发现,这四种植物都具有较强的吸收和富集重金属的能力,且主要富集在植物的地下部分,荇菜富集重金属能力最强,宽叶香蒲相对较弱。重金属在植物体内同器官中分布在被测的四种植物体内的分布呈现一致的规律性,即根>凋落物>地下茎>地上茎>叶,重金属主要富集在植物根部和地下茎部,以 Pb 最为典型。还有研

究表明,在人工湿地的沉积物和植物中,金属浓度比天然湿地中的高,且对于大多数金属来说,Mn、Zn、Cu、Ni、Cr 等元素可以被湿地植物所积累,通过人工湿地系统植物吸收—收割的途径去除污水中的重金属污染物,将是传统污水处理的有效替代技术。湿地收获的植物能否作为饲料,以及如何处理利用这些植物是一个值得研究的问题。

2. 湿地基质

人工湿地基质主要由土壤、砂和卵石等组成,具有高效“过滤器”的作用,主要功能:①植物根系的吸收、转化、降解和生物合成作用;②土壤中的细菌、真菌和放线菌等微生物的降解、转化和生物的固定化作用;③土壤的有机、无机胶体及其复合体的吸收、络合和沉淀作用;④土壤的离子交换作用;⑤土壤和植物的机械阻留作用;⑥土壤的气体扩散作用。土壤的净化能力受气候和其他环境条件的影响,植物在温暖的生长季节,对生物可降解的有机污染物,上述要素中①②③项起主要作用;对无机盐类、营养元素和重金属等污染物,①②项起重要作用;对那些易挥发的或者可以转化为气态污染物的则⑥项起主导作用。有研究认为含有机质丰富的基质有助于吸附各种污染物,如含 CaCO_3 较多的石灰石有助于磷的去除。湿地基质土壤的物理性能至关重要,一般要求土壤质地为黏土土壤,渗透性为慢中性,土壤渗透率为 $0.025 \sim 0.35\text{cm/h}$ 为宜,不同粒径基质与水力传导性见表 1.2。其次土壤的氧化还原电位也是影响污水处理效果的重要因素之一。湿地的一个重要特征

是存在好氧与厌氧界面,从而使土体内的氧化还原电位变幅高达1000mV(-300 ~ 700mV),从而直接或间接地影响湿地去污效果。土壤的化学性质针对不同的植物有不同的要求,如芦苇需要土壤pH 值为6.5 ~ 8.0;对耐盐碱也有极限,土体中 $\text{Cl}^- < 1\%$, $\text{CO}_2 < 2\% \sim 5\%$ (土壤重量比)。此外,Ca 的含量过高影响K 的吸收,妨碍芦苇的生长,K/Ca 临界值最好大于29。

表 1.2 基质类型与水力传导性(Chen et al. 1995)

基质类型	粒径/mm	渗水性(η)	水力传导性(k_s) /ms
粗砂	2	0.32	1.2×10^{-2}
碎石砂	8	0.35	5.8×10^{-2}
细碎石	16	0.38	8.72×10^{-2}
中碎石	32	0.40	11.6×10^{-2}
粗岩石	128	0.45	115.7×10^{-2}

3. 湿地微生物种群

基质微生物种群在人工湿地污水净化过程中起着重要的作用,生物化学反应主要是在微生物和酶的作用下进行的。人工湿地中的微生物极其丰富,这为人工湿地污水处理系统提供了足够的分解者,研究发现,芦苇床系统的根表面根际土的细菌数量可达 10^8 个/g(干重),数量稳定,受季节温度影响变化较小。不同的湿地类型中具有不同的优势菌属,与天然湿地相比,优势微生物组成基本一致。湿地微生物对污水中的特征污染物具有显著的去除效果,如N 的去除主要通过硝化和反硝化过程,大多数人工湿地处于

一种厌氧状态,所以反硝化过程是 N 去除的主要途径之一。而反硝化过程($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$)是一个连续的酶促反应,所以在 N 的去除中微生物起重要的作用。梁葳等人研究认为,微生物作用是污水中的凯氏 N 以及 COD 去除的主要途径,而磷细菌的数量也与磷的去除率呈明显的正相关。还有研究表明,微生物的活性受各种因素的影响: V. J. Shackle 等人研究了在人工湿地中酶活性与碳的供应和调节作用,通过对 β -葡萄糖苷酶、磷酸酯酶和硫酸酯酶与碳供应关系的研究,认为不同的酶活性受不同形态碳的影响。当湿地中碳过量时, N 和 P 就可能成为微生物增长的限制因子。微生物活性还受到其他有害因子的干扰,已有研究表明,除草剂和难降解高分子化合物可显著降低反硝化微生物的除氮能力, Cr^{3+} 、 Cr^{6+} 对反硝化作用也有抑制作用。

1.5 研究与应用前景展望

人工湿地的理论研究涉及学科较多,如系统反应动力学、系统水文学和土壤学等。与其他生物处理方法一样,人工湿地对废水污染物的去除效率更具不稳定性, Bastian 等人于 1993 年整理了北美人工湿地系统对各种典型污染物的去除效率,显示去除效果的可变性较大。人工湿地对有机物的去除率范围为 50% ~ 90%; 固体悬浮物的去除率 40% ~ 94%; 氮的去除率 30% ~ 98%; 磷的去除效率 20% ~ 90%。正是因为这种不确定性,对于人工湿地的应用