

1-6 人工湿地系统的除污机理

沈耀良 (苏州城建环保学院 苏州 215011)

王宝贞 (哈尔滨建筑大学 哈尔滨 150001)

摘要 根据人工湿地系统的基本构造、植物的作用特性及有关研究,分析了该工艺中氧的转移变化规律,对有机物及氮、磷的去除机理和湿地床系统中微生物种类、数量及主要特征。研究表明,湿地床系统中有机物的去除是通过多种微生物的协同作用实现的;氮的去除以连续地硝化和反硝化作用为主要途径;磷则是通过湿地床的截留、聚磷菌的过量吸收及与填料床中砾石的反应等过程而去除的。湿地床植物根系较高的氧化还原势为微生物的活动创造了有利的条件,微生物的数量、种类及其特征与污染物去除率之间有良好的相关性。

关键词 人工湿地 废水处理 机理

1 前言

人工湿地(CW)是一种新型废水处理工艺,具有处理效果好、氮磷去除能力强、运转维护管理方便、工程基建与运行费用低及对负荷变化适应性强等优点。近几年来,国内外对人工湿地系统的研究日益重视,并已召开过四次国际会议,总结各国人工湿地废水处理的经验,提出了一些有关的机理和参考设计规范及数据。1996年9月在奥地利维也纳召开的第四次国际研讨会,标志着人工湿地系统作为一种独具特色的新型废水处理技术已正式进入水污染控制领域。

目前,国外已有数百座人工湿地处理系统,处理规模有大有小,规模最小的仅处理一家一户排放的污水,规模大的用以处理1000人口排放的污水(系统占地5000m²)。1985年以来,美国田纳西河流域管理局在美国东部建造了一系列人工湿地系统处理该流域内的废水。

我国自“七、五”开始对人工湿地开展研究以来,已建成一些示范工程及芦苇湿地系统,但对人工湿地系统的设计、除污机理等的研究还缺乏一定的深度,尚有待开展这方面的深入研究。

2 人工湿地的基本构造及类型

人工湿地是一种由人工建造和监督控制、与沼泽地类似的处理系统,它利用自然生态系统中的物理、化学和生物的三重协同作用来实现对废水的净化。这种湿地系统是在一定长宽比及底面坡度的洼地中,由土壤和按一定坡度填充的级配填料(如砾石等)的填料床组成。废水在填料床的缝隙中或床体表面流动。在床体表面种植具有处理性能好、成活率高、抗水性强、生长期长、美观、且有经济价值的水生植物(如芦苇、荇菜等),形成一个独特的动植物生态系统。当床体表面种植芦苇时,常称之为芦苇湿地。

人工湿地通过植物的光合作用及茎、根的输氧作用,供给湿地床除污需氧量;同时由于发达的植物根系及填料表面生长的生物膜的作用、填料床体的截留作用及植物对营养物的吸收作用,而实现对废水的净化。

人工湿地按废水湿地床中的不同流动方式可分为三类,即潜流湿地(Subsurface Flow Wetland, SSFW)、地表流湿地(Surface Flow Wetland, SFW)和垂直流湿地(Vertical Flow Wetland, VFW)。后两种湿地系统因环境条件较差、处理效果受气温影响较大及对基建要

求较高,目前已不多采用。

在潜流湿地系统中,污水经配水系统(由卵石或砾石组成)在湿地的一端均匀地进入填料床植物的根区,并在填料床内部流动。床体表面植物生长有极为发达的根系,可以深入到表土以下0.6~0.7m的砾石层中,并交织成网而与砾石一起构成透水性良好的系统。这些植物根系具有较强的输氧能力,可使根系周围的水环境中保持较高浓度的溶解氧,供给生长在砾石和根系表面好氧微生物的生长,并在根系周围形成好氧、缺氧和厌氧环境,通过多种微生物的协同作用、床体的截留作用等实现优良的处理效果。图1所示为潜流湿地系统。



图1 潜流湿地系统

3 人工湿地系统的除污机理

人工湿地对污染物的去除过程综合了物理、化学和生物的重重协同作用。成熟的人工湿地系统中的填料表面及植物根系生长着生物较为丰富的生物膜。废水流经湿地床时,大量的悬浮固体被填料和植物根系截留,其它污染物则通过生物膜的生物降解与植物的吸收等作用而被去除。湿地床中植物的光合作用及植物茎、根系对氧的输送和传递,使根系周围的水环境中依次呈好氧、缺氧及厌氧状态,即具有有机物、氮磷去除所需的环境。通过对湿地床中填料的定期更换或栽种植物的收割,而最终使污染物从系统中去除。

3.1 湿地床中氧的变化规律

人工湿地中氧的来源主要是通过植物的光合作用,植物根系对氧的传递和释放,进水中挟带的氧及水面的更新作用而获得。湿地植物通过光合作用产生的氧,一部份通过植物

的运输组织和根系的输送作用释放到湿地环境中,如图2所示。由于植物根系的输氧作用使根系周围形成一个好氧区域,同时由于好氧生物膜对氧的利用而使离根系较远的区域呈缺氧状态,而在更远的区域则呈厌氧状态。这些溶解氧含量不同的区域分别有利于废水中不同污染物的降解、转化及去除。

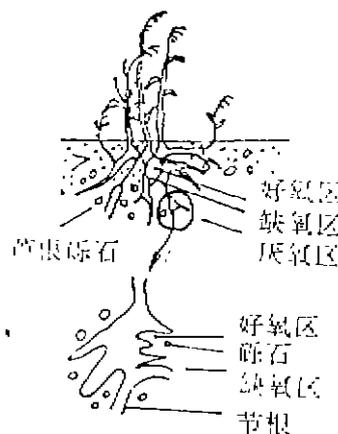


图2 湿地床中溶解氧随区域的变化

湿地床中溶解氧含量不仅具有区域性变化规律,还具有时间性变化规律。对芦苇湿地系统在处理废水前后的氧化还原势变化规律的研究表明,在湿地床处理废水之前,随光照强度的增加及光照时间的延长,芦苇根系区的氧化还原势(ORP)逐渐升高;在夜间由于缺乏光照,芦苇根系区的ORP则将逐渐降低。这说明芦苇叶片通过光合作用产生的氧是通过芦苇的茎和根系输送到地下部份根区的。芦苇由于光合作用产生的氧通过根状茎和不定根向水中传递而使水中的溶解氧浓度升高,并在水中呈现出积累效应,到天黑时积累量达最大值。夜间,由于芦苇根系的呼吸和微生物的代谢作用,使水中的溶解氧下降。在湿地床处理废水的过程中,床体内的溶解氧在一天内的变化较小,这是由于床体内微生物在氧化降解污染物的过程中对氧的消耗,使芦苇通过茎和根系向水中传递的氧不能积累所致,如图3所示。

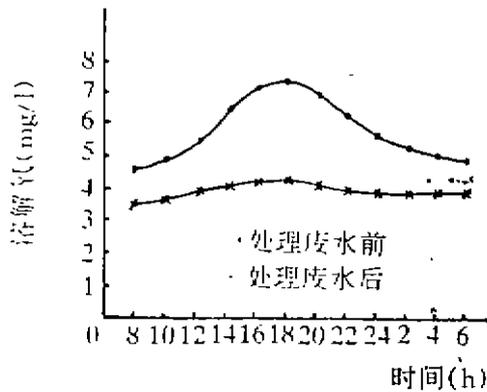


图3 湿地床中溶解氧随时间的变化

3.2 湿地床对有机物的去除

人工湿地具有较强的有机物去除能力,一方面,废水中的不溶性有机物通过湿地床中填料的截留作用而被去除,并可为部份兼性或厌

氧微生物所利用;另一方面,废水中的溶解性污染物则通过植物根系及填料表面生物膜的吸附,吸收及生物代谢作用而被降解去除,即湿地床的有机物去除是物理的截留沉淀和生物的吸收降解作用的结果。国内有关对城市污水的研究表明,废水中的不溶性 BOD₅ (约占废水总 BOD₅ 的 50%) 和 COD 可在进水的 5 米内通过截留和沉淀作用而被快速去除,而 SS 则可在进水的 10 米内去除 90% 左右;此外,在进水浓度不高的情况下,湿地系统对 BOD₅ 和 COD 的去除率分别可达 85%~95% 和 80% 以上,处理出水中的 BOD₅ 浓度可在 10mg/L 左右。

3.3 湿地系统对氮、磷的去除

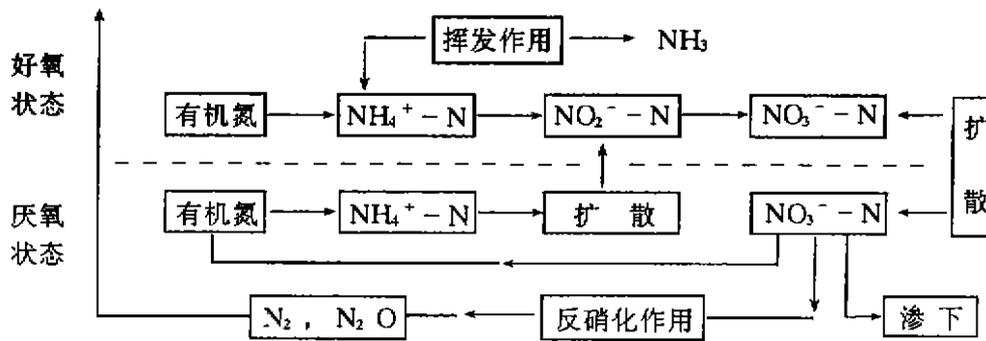


图4 人工湿地床中氮的变化规律

图4所示为各种状态的有机和无机氮在人工湿地中的变化规律。原废水中的氮一般以有机氮和氨氮的形式存在。废水中的有机氮在处理过程中被异养微生物首先转化为氨氮,而后氨氮在硝化菌的作用下被转化为无机的亚硝态氮和硝态氮,最后通过反硝化以及植物根系的吸收作用而从系统中去除。废水中的无机氮则可通过植物的生长吸收而被去除。但是,人工湿地中的氮主要是通过微生物的硝化和反硝化作用而被去除的。如前所述,湿地系统中的植物根系的输氧及对氧的释放,使得床体内部存在许多好氧、缺氧和厌氧区,这相

当于许多串联或并联的 A²/O 单元,使硝化和反硝化作用在湿地中同时发生。这使得人工湿地处理系统具有比传统活性污泥法更强的脱氮能力,同时其工程投资也比 A²/O 工艺大为节省。资料表明,人工湿地对 TN 的去除率可达 60% 以上。

人工湿地对磷的去除是通过微生物的积累、植物的吸收及湿地床的物理化学等几方面共同作用完成的。污水中的无机磷一方面在植物的吸收和同化作用下,被合成为 ATP、DNA 和 RNA 等有机成份,通过对植物的收割而将磷从系统中去除;另一方面,通过微生物

对磷的正常同化吸收,聚磷菌对磷的过量积累,通过对湿地床的定期更换而将其从系统中去除。在传统的二级污水处理工艺中,微生物对磷的正常同化吸收一般只能去除进水中磷含量的4.5%~19%,因而,微生物对磷去除主要是通过聚磷菌的过量摄磷作用而实现的。由于人工湿地中植物的光合作用及呼吸作用(即所谓的光反应和暗反应)的交替进行,致使系统中交替地出现好氧和厌氧状态,通过在厌氧条件下的放磷及在好氧条件下的摄磷(过量摄磷)而利于对磷的去除。此外,湿地床中填料对磷的吸收及填料与表层土壤(含钙量为2.5kg/100kg土壤的表土)中钙与磷的反应、含钙质填料与磷的反应及填料与 PO_4^{3-} 的离子交换反应也利于对磷的去除。综合上述三种作用,人工湿地对磷的去除率可高达90%左右。Bhamidmarri等对湿地系统的研究表明,当进水中的磷含量为2.6~35.9mg/L时,系统对TP的平均去除率为90%。天津市环科所的研究亦表明,当进水的TP浓度在2~3mg/L和 PO_4^{3-} 浓度在0.32mg/L左右时,芦苇湿地系统对TP和 PO_4^{3-} 的去除率可分别达86.3%~90.9%和74.7%~92.6%。

3.4 湿地系统中微生物的特征

湿地床中不同区域内的各种微生物,构成了湿地系统特有的生物相,且不同区域内微生物的数量、种类及特性对处理效果具有较大的影响。

目前,人工湿地系统多以芦苇作为湿地植物。芦苇是一种禾本科的挺水植物,具有很广的适应性和很强的抗逆性,是一种具有观赏和经济价值的良好的净水植物。自八十年代中期以来,德国、法国、丹麦、奥地利、比利时及荷兰等西欧国家都以芦苇湿地处理小城镇的废水。我国目前对人工湿地系统的研究及有关应用也大多以芦苇作为湿地植物(有时亦辅以一定数量的其它植物,如大米草、茭苳等)。现以芦苇湿地系统说明系统中微生物的特征。

3.4.1 不同微生物的数量

有关研究表明,在天然的芦苇床中,各类微生物的数量都比较少,而人工芦苇湿地床在处理废水之前,其填料床中各类微生物的数量与天然芦苇床基本接近。但随着芦苇床对废水的处理,微生物的数量逐渐增加,在一定时间内达到最大值并趋于稳定。检测表明,芦苇床内存在明显的好氧菌和厌氧菌群体,在芦苇的根、茎上,好氧微生物占优势,而在芦苇的根系区则既有好氧微生物的活动,也有兼性厌氧微生物的活动。对芦苇床在冬季处理废水的研究表明,虽然芦苇的地上部份在冬季要枯萎,但床中各类微生物的数量则基本上保持在较高的水平上,不过好氧微生物和兼性厌氧微生物数量的相比值有所减少。表1列出了湿地床中不同区域的微生物种类及其数量,表2列出了不同时期各类微生物的数量。

表1 芦苇床不同区域微生物的数量

微生物种类	根面(cfu/g干根)	根际土(cfu/g干土)
真菌	$6.7 \times 10^4 \sim 1.7 \times 10^5$	$5.4 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$
放线菌	$5.9 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^6$	$1.7 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^6$
兼性厌氧菌	$3.6 \times 10^5 \sim 6.9 \times 10^6$	$2.6 \times 10^5 \sim 4.7 \times 10^7$
硝化菌	$2.0 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^6$	$5.3 \times 10^3 \sim 3.9 \times 10^5$
反硝化菌	$1.1 \times 10^6 \sim 9.9 \times 10^6$	$1.7 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^7$
原生动物	$3.5 \times 10^1 \sim 2.2 \times 10^6$	$2.8 \times 10^3 \sim 4.9 \times 10^4$
细菌总数	$1.5 \times 10^8 \sim 5.4 \times 10^8$	$5.7 \times 10^7 \sim 3.6 \times 10^8$

注:一年检测数据

表2 芦苇床不同时期各类微生物的数量

微生物种类	夏季		冬季	
	根面(cfu/g 干根)	根际土(cfu/g 干土)	根面(cfu/g 干根)	根际土(cfu/g 干土)
真菌	(0.7~1.5) × 10 ⁵	(0.5~1.2) × 10 ⁵	(6.7~7.5) × 10 ⁴	(5.4~5.8) × 10 ⁴
放线菌	(1.9~2.4) × 10 ⁶	(1.2~2.7) × 10 ⁶	(0.6~2.7) × 10 ⁶	(0.2~1.2) × 10 ⁶
兼性厌氧菌	(1.4~2.6) × 10 ⁶	(2.3~3.5) × 10 ⁷	(0.4~6.9) × 10 ⁶	(0.3~4.3) × 10 ⁶
原生动植物	(3.7~8.9) × 10 ⁵	(1.7~4.2) × 10 ⁵	(0.4~1.5) × 10 ⁶	(0.02~2.3) × 10 ⁵
硝化菌	(0.6~1.3) × 10 ⁶	(0.2~3.9) × 10 ⁵	(2.0~7.2) × 10 ⁴	(0.53~2.1) × 10 ⁴
反硝化菌	(1.1~9.9) × 10 ⁶	(1.8~2.0) × 10 ⁷	(1.4~5.7) × 10 ⁶	(1.7~6.5) × 10 ⁶
细菌总数	(4.9~5.4) × 10 ⁸	(2.1~3.6) × 10 ⁸	(1.5~4.4) × 10 ⁸	(0.57~2.6) × 10 ⁸

3.4.2 优势微生物种群

人工芦苇湿地系统中的优势菌属主要有三种,它们分别是假单胞杆菌属(*Pseudomonas*)、产碱杆菌属(*Alcaligenes*)及黄杆菌属(*Flavobacterium*)。与天然的芦苇床相比,人工床中的优势微生物组成与其基本相等。上述几种优势菌属均为快速生长微生物,而且其体内大多含有降解质粒,因而它们是对废水中有机物分解的主体微生物种群。

3.4.3 不同微生物对污染物的降解作用

废水中各类污染物的去除与湿地系统中生长的微生物种类和数量有关。表3列出了芦苇湿地系统中不同微生物与废水中不同污染物去除率之间的相关性系数(r)值。相关性系数的大小反映了某一种微生物对某一类污

染物去除能力的高低或一定数量的微生物去除某种污染物数量的多少。由表3可知,不同微生物与BOD和COD去除率之间有明显的相关性,说明系统对BOD和COD有良好的去除率;废水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除与硝化和反硝化菌的数量也具有明显的相关性,这说明硝化和反硝化作用是芦苇湿地系统的主要除氮方式;废水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除与湿地中的各类微生物均不具有明显的相关性,这说明系统中的磷不是由微生物的作用引起的,而是由植物的吸收及化学作用引起的;废水中总大肠杆菌的去除与放线菌和原生动植物数量有明显的相关性,这说明芦苇床中的原生动植物和放线菌是去除大肠杆菌的主要作用者。

表3 芦苇湿地系统中不同微生物与污染物去除率间的相关性(r)

微生物	BOD	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	总大肠杆菌
真菌	0.54	0.40~0.59	0.34~0.41	0.16	0.53
放线菌	0.74	0.71	0.29~0.48	0.02~0.08	0.91
兼性厌氧菌	0.44~0.83	0.39~0.81	0.66	0.11	0.85
硝化菌	0.76	0.77	0.72~0.91	0.35	0.34~0.44
反硝化菌	0.75	0.75	0.82~0.89	0.38	0.42~0.45
原生动植物	0.61~0.74	0.63~0.71	0.28~0.44	0.06~0.25	0.93~0.97
细菌总数	0.90	0.86	0.46~0.64	0.09~0.14	0.62~0.68

4 结 语

目前,人工湿地系统正在不断研究、应用和发展之中,是受到各国日益重视的废水处理实用新技术。对湿地系统除污机理的研究是人工湿

地系统应用和研究的一个十分重要的内容,也是历次国际水质协会召开研讨会的重要课题。因此,须深入开展这方面的研究,以取得适合于国内不同地区、不同气候条件及不同废水特性的实用数据,以利其在适当地区推广应用。

6-1) 环境、资源、新工艺和催化剂 X13

柯禅拓 李 静 (首都经贸大学 北京 100026)

TG 426 X13

摘 要 从环境优先和资源充分利用优先两条原则出发,论述了现代某些工艺对环境的影响及对资源的不合理的利用,提出了改造原来对环境有影响和对资源不充分利用的工艺,建立以催化剂为核心的新工艺。

关键词 环境 资源 催化剂 零排出 清洁工艺

最有可能实现清洁工艺的研究领域之一是开发新的催化剂,原来看似难于实现的反应,加入催化剂后改变了反应途径,不但能够进行反应,而且所期望产物的收率十分可观。一氧化碳与氢气混合,原有加氢的倾向,由于活化能比较大,虽加热到几百度,加压到几十、几百个气压,反应仍然非常缓慢,但如果使用铜-锌-铝氧化物催化剂、铁-碱催化剂、铈系催化剂、镍系催化剂、钴系、铁系催化剂、氧化钨系催化剂或钨系催化剂,就可分别制得甲醇、高级醇类、乙二醇、甲烷、人造汽油、异构烃汽油或高分子量的石蜡。催化剂在控制反应方向和产物结构方面也有不少非常突出的例子,使用 Ziegler-Natta 型催化剂,使异戊二烯定向聚合为人工合成天然橡胶,其中顺式结构占 98%。催化分生物催化和非生物催化两大领域,非生物催化领域中使用金属特别是过

渡金属化合物作为催化剂在现代工业已被普遍应用,一般有非均相催化反应和均相催化反应。使用固体催化剂的非均相反应普遍应用于现代工业生产中,而通常使用过渡金属络合物作为催化剂的均相催化反应和非均相催化反应相比具有条件温和、反应选择性好等优点,深受人们的青睐。生物催化剂主要是生物体内的酶,它具有比非生物催化剂高得多的催化活性和选择性,并且产生废物也少。

1 革新原有无催化剂工艺,使用催化剂

1.1 低危害物代替高危害物

某些原有化合物工艺,反应物不仅对人和环境有害,而且反应条件要求高,反应过程长,产生了大量的中间产物,闲置了大量的资源。当然,不排除在中间产物中发现新的物质,从

参 考 文 献

- 1 Watson, J. T, et al. Design Considerations and Control Structures for Constructed wetlands for wastewater Treatment, Proc. 1st International Conference on Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chattanooga, 1988
- 2 李科德等. 芦苇床系统净化污水的机理. 中国环境科学, 1995, 15(2): 140 - 144
- 3 Cooper P. F. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, edited by G. A. Moshiri, Lewis Publishers, Boca Raton, FLA, USA, 1993
- 4 Mandi, L, et al. Water Res, 1996, 9
- 5 Vrhovsek, D, et al. Water Res, 1996, 9
- 6 沈耀良等. 新型废水处理技术—人工湿地. 污染防治技术, 1996, 9(1-2): 1 - 8

(收稿日期: 1997-01-27)