

人工湿地废水处理机理

吴晓磊

(清华大学环境工程系, 北京 100084)

摘要 对人工湿地的构造、作用机理进行了较详尽的说明, 湿地中物理、化学及生物协同作用以及湿地植物输氧造成的湿地基质中好氧、缺氧和厌氧状态的交替出现是保证其对氮磷及有机物具有较强处理效率的原因。研究表明: 对进水浓度较低的城市污水, 湿地的 BOD_5 和 COD 去除率大于 80%, 出水 BOD_5 为 10 mg/L 左右。总氮及总磷去除率可大于 60% 和 90%, 较常规二级处理方式具有一定的优越性。

关键词 人工湿地, 废水处理, 有机物, 脱氮, 除磷。

人工湿地(Constructed Wetlands)是本世纪 70 年代末发展起来的一种废水处理新技术。其特点是^[1, 2]: 出水水质好, 具有较强的氮、磷处理能力, 运行维护管理方便, 投资及运行费用低, 比较适合于管理水平不很高, 水处理量及水质变化不很大的城郊或乡村。与传统生物处理工艺相比, 其作用机制及处理系统中物质的变化过程有较大的差异。为此, 本文将对人工湿地的构造, 作用机制及废水中一些常见物质(有机物、氮、磷、氧)在其中的变化过程进行综合评述。

1 人工湿地

人工湿地是一种人工建造和监督控制的与沼泽类似的地面, 其设计和建造是通过对湿地自然生态系统中的物理、化学和生物作用的优化组合来进行的, 也正是利用这 3 种作用的协同关系来进行废水的处理^[3]。

其构造可简述为: 在一定长宽比及底面坡降的洼地中, 按一定的坡度填充选定级配的填料如石子, 在填料表层土壤中种植一些处理性能良好, 成活率高, 生长周期长, 美观及具有经济价值的水生植物(如芦苇), 构成一个湿地生态系统。在设计湿地处理系统时, 应尽可能增加水流在其中流动的曲折性, 以增加该系统的稳定性和处理能力。实际设计中, 往往将湿地多级串联或附加一些预处理、后处理构筑物构成处理系统。

设计中, 湿地的长宽值可按下式计算。

$$W = Q/K_s \cdot S \cdot d$$

其中, W : 池宽(m); Q : 湿地平均处理流量(m^3/d); d : 池深(m); K_s : 填料导水率 $[m^3/(m^2 \cdot d)]$; S : 湿地床坡度;

为了保证废水以推流方式流经湿地, L/W 应大于 3/1, 而且 $L \geq 20 m$ 。

池深选择则根据池形、水质及湿地植物的根系深度来进行, 以使大部分废水都能在植物根系中流动。在美国, 利用芦苇床湿地处理城市污水, 池深采用 60—76 cm, 而德国为 60 cm^[4]。池底坡降及填料表面坡降往往受水力坡降及填料级配的影响, 一般选值范围为 1%—8%。

人工湿地因水流方式差异可分为以下 3 类: 表面流湿地, 潜流湿地和立式流湿地, 其构造如图 1 所示。

(1) 表面流湿地(Surface Flow Wetlands 缩写为 SFW) 废水在填料表面漫流, 它与自然湿地最为接近, 绝大部分有机物的去除是由长在植物水下茎、杆上的生物膜来完成。这种湿地不能充分利用填料及丰富的植物根系, 卫生条件亦不好, 故设计中一般不采用。

(2) 潜流湿地(Subsurface Flow Wetlands 缩写为 SSFW) 水在填料表面下渗流, 因而可充分利用填料表面及植物根系上生物膜及其他各

种作用处理废水,而且卫生条件较好,故被广泛采用。以下主要对它进行讨论。

(3) 立式流湿地(Vertical Flow Wetlands 缩写为 VFW) 水流动况综合了 SFW 和 SSFW 的特点,但其建造要求高,易滋长蚊蝇,目前亦不多用。

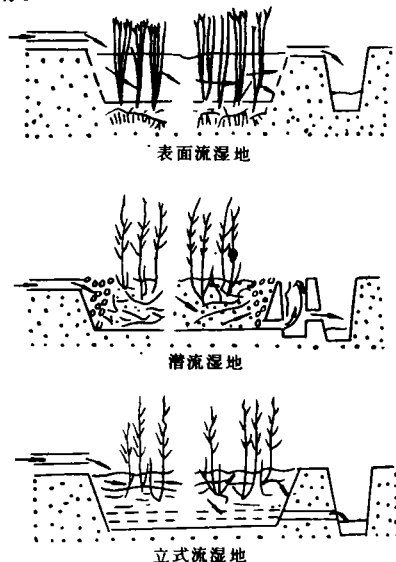


图1 3种人工湿地构造

2 人工湿地处理机理

人工湿地对废水的处理综合了物理、化学和生物3种作用。它成熟后,填料表面和植物根系中生长了大量的微生物形成生物膜,废水流经时,SS被填料及根系阻挡截留,有机质通过生物膜的吸附及同化、异化作用而得以去除。湿地床层中因植物根系对氧的传递释放,使其周围的微环境中依次呈现出好氧、缺氧和厌氧状态,保证了废水中的氮、磷不仅能被植物及微生物作为营养成分直接吸收,还可以通过硝化、反硝化作用及微生物对磷的过量积累作用从废水中去除,最后通过湿地基质的定期更换或收割使污染物质最终从系统中去除。

人工湿地中各种物质传递和转化因含氧差异而有所不同,如图2所示。

2.1 氧变化情况

如图2所示,氧来源于植物根毛的释放、来水及水面更新溶氧。湿地植物光合作用产生的氧气,一部分通过输运组织和根毛输送释放到

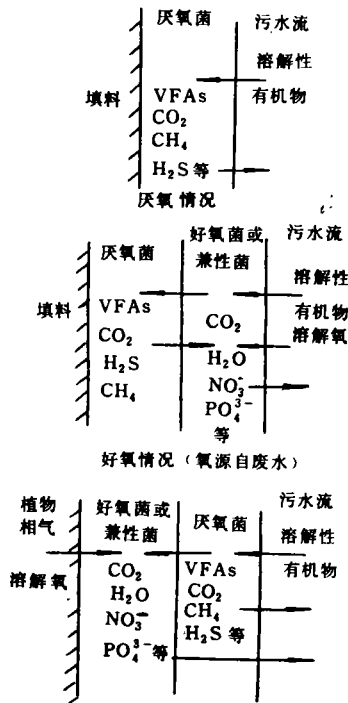


图2 人工湿地中物质传递和变化

湿地环境中。输送过程及氧在湿地中分布状态如图3所示(以芦苇床为例)。这种输氧作用使根毛周围形成了一个好氧区域,其中好氧生物

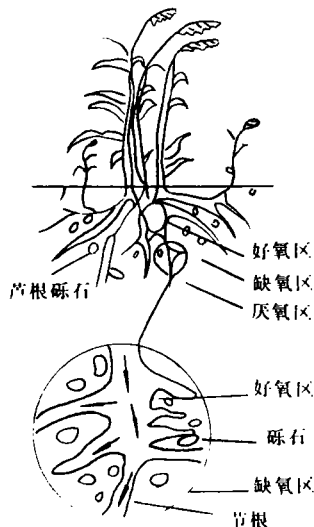


图3 湿地中氧的分布及植物输氧过程

膜对氧的利用使离根毛较远的区域呈现缺氧状态,更远的区域则完全厌氧,分别有利于大分子有机物及氮、磷的去除。

湿地中的氧气可作为好氧微生物氧化分解

有机物的电子受体,最终以 CO_2 的形式释放到系统外的环境中;它们的存在也是硝化作用和对磷的过量积累所不可缺少的。在硝化菌作用下,它将以 NO_2^- 或 NO_3^- 化合态形式存在。

2.2 湿地对有机物处理机制

人工湿地显著特点之一是对有机物有较强的处理能力。不溶性有机物通过湿地的沉淀、过滤可以很快从废水中截留下来,被微小生物加以利用;可溶性有机物则可通过生物膜的吸附及微生物的代谢过程被去除。研究表明^[1]:在进水浓度较低情况下,人工湿地对 BOD_5 的去除率可达 85%—95%。 COD 去除率可大于 80%,城市污水通过湿地处理后,出水 BOD_5 在 10 mg/L 左右。北京市环境保护科学研究所的试验还表明^[5]:不溶性 BOD_5 (约占总 BOD_5 的 50%左右)和 COD 在进水 5 m 的距离内可迅速地去除;约 90%的 SS 在进水 10 m 以内得以去除。

废水中大部分有机物的最终归宿是被异养微生物转化为微生物体及 CO_2 和 H_2O ,这些新生的有机体可以通过填料定期更换最终从系统去除。

2.3 湿地对氮的处理

氮在湿地系统中循环变化如图 4 所示,包括了 7 种价态,多种有机、无机形式的转换。

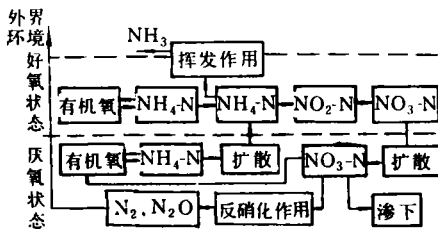


图 4 湿地中氮的变化

来水中的氮基本以有机氮和氨氮 2 种形式存在。一般情况下,有机氮被微生物分解成氨氮,所以人们更关心无机氮的去除。

废水中无机氮作为植物生长过程中不可缺少的物质可以直接被植物摄取,合成植物蛋白质等有机氮,通过植物的收割而从废水和湿地系统中去除。

但是氮的去除主要是通过微生物的硝化、反硝化作用来完成的。如前所述,湿地植物根毛的输氧及传递特性,使其中连续呈现好氧、缺氧及厌氧状态,相当于许多串联或并联的 A/A/O 处理单元,使硝化作用和反硝化作用可以在湿地系统中同时进行。硝化作用只改变氮的形式(将 NH_4^+-N 转化为 NO_2^--N 和 NO_3^--N),反硝化作用才可使氮以 N_2 和 N_2O 形式从系统中根本去除。所以,人工湿地比传统活性污泥处理系统(一般无法完成反硝化作用)具有更强的氮的处理能力,比人工的 A/A/O 系统则节省得多。资料表明^[2]:人工湿地总氮去除率可大于 60%

2.4 湿地对磷的处理

人工湿地对磷的去除是植物吸收、微生物去除及物理化学作用 3 方面共同作用的结果。

如同无机氮一样,无机磷也是湿地植物必需的营养。废水中无机磷在植物吸收及同化作用下可变成植物的 ATP, DNA 及 RNA 等有机成分,通过植物的收割而去除。

物理化学作用包括填料对磷的吸附及填料与磷酸根离子的化学反应,这种作用对无机磷的去除会因填料的不同而有差别。由于石灰石及含铁质填料中 Ca 和 Fe 可与 PO_4^{3-} 反应而沉淀去除 PO_4^{3-} ,因而它们是除磷效果较好的填料。含钙质或铁质的地下水渗入人工湿地也有利用磷的去除。

微生物对磷的去除包括它们对磷的正常同化(将磷纳入其分子组成)和对磷的过量积累。在一般二级污水处理系统中,当进水磷含量为 10 mg/L 时,微生物对磷的同化吸收(形成污泥组成式 $\text{C}_{60}\text{H}_{87}\text{O}_{23}\text{N}_{12}\text{P}$ 的一部分)去除仅是进水总磷量的 4.5%—19%,所以,微生物除磷主要是通过强化后对磷的过量积累来完成的。

由于湿地中植物光合作用光反应、暗反应交替进行,根毛输氧多少的交替出现,以及系统内部不同区域对氧消耗量的差异,导致了系统中厌氧、好氧的交替出现,使磷的过量释放和过量积累得以完成。这是常规二级处理方式所难以满足的。

R. Bhamidimarri 等的实验表明^[2]：当进水总磷浓度为 2.6—35.9 mg/L 时，人工湿地对总磷平均去除率为 90%。

3 结束语

人工湿地的特殊构造使湿地自身形成了一个较为复杂的生态系统。在此系统中，物理、化学及生物的协同作用使废水中的污染物质能得到较彻底的处理。特别是湿地植物根系的输氧、在湿地基质中形成的好氧、缺氧及厌氧状态交替出现，极有利用微生物对氮、磷的去除。同时，湿地系统由于能收获象芦苇这样的植物，

具有较好的生态效益，较常规的二级污水处理工艺有着一定的优越性。

致谢 本文得到了钱易先生的精心指导，在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 朱彤等。环境科学研究。1991, 5:28
- 2 Bhamidimarri R et al. Wat. Sci. Tech.. 1991, 24(5): 247
- 3 Tennessee Valley Authority. River Basin Operations Water Resources, Destruction of Constructed Wetlands for Treatment of Municipal Wastewater, Monitory Report for the Period: March 1988 to October 1989, 1990; 5
- 4 诸惠昌等。环境科学。1993, 14(2): 39
- 5 丁廷华。环境科学。1992, 13(2): 8

• 常识 •

体育锻炼的环境选择

目前我国约有 3 亿人坚持体育锻炼。群众性体育活动的广泛开展，不仅大大提高了我国人民的体质，甩掉了“东亚病夫”的耻辱帽，而且还造就了大批优秀运动员，使我国成为亚洲乃至全世界的体育强国之一，提高了我国国威。

参加体育锻炼，增进体能和提高健康水平，除持之以恒和注意锻炼方式方法外，还需注意选择合适的体育锻炼环境。这一点，对于各级体育工作组织者，教练和体育老师来说，尤为重要。

现代城市和工业的发展，使人类的生活环境大为复杂化，特别是工业和居民生活排放的废气污染了大气环境，对体育锻炼带来的影响不可低估。科学研究表明，人 5 周不吃飯或 5 天不喝水尚有生存的希望，但断绝空气 5 分钟以上就会死亡。一个人每分钟要呼吸十几次，一次大约要吸入 500 毫升的空气，一天要呼吸 1 万升，吸入的空气重量比吃的食物要重几倍。而且，人对空气中物质的吸收很快，其吸收速度与静脉注射差不多。体育锻炼时，特别是运动量较大的活动，不仅吸入的空气量大，而且对空气物质的吸收也大大加快。因此，空气中如果存在有害的物质，哪怕是微量的，也会对人体健康产生十分不利的影响。空气中的有害物质多从燃煤中

来，如一氧化碳、二氧化硫和吸附在尘埃上的苯并芘等；汽车排出的氮氧化合物对健康也有很大危害。

体育工作的组织者和参加体育锻炼的人，都应该设法避开一些有害场所，尤其不要让青少年在体育锻炼时接触有害的空气，因为他们对有害物质最敏感，最容易受到伤害。例如，有风的时候，要避开烟囱下风向烟气落地浓度最大的地区。静风状态下，不要在烟囱周围锻炼，此时烟扩散不出去，有害物质直接降落在烟囱周围。在早晨和傍晚的昼夜交替的时候，北方常有逆温发生，烟流下洗，烟囱周围污染最重。清晨跑步，应选择城市郊区方位，避免受街道汽车或居民煤烟的影响。在工厂附近，更应注意避害，应选择上风向进行体育活动。此外，雾天不要进行体育锻炼，因为这种天气时空气中浓集了大量有害物质。

空气污染还使一些传统健身方式受限。如原本晒太阳或进行日光浴有益于健康，但由于大气臭氧层的破坏，使地面紫外线辐射增强，皮肤因此受到紫外线伤害，甚至引起皮炎或皮肤癌。

因此，如何根据环境变化特点，运用科学知识指导体育锻炼，已成为体育工作者一项新的任务。

东胜市伊克昭盟师范学校体育教研室 李文海 供稿

With the rapid development of economy, surface and ground waters in Beijing area have been polluted much more seriously in recent years, causing the situation of shortage in water resources to be steadily deteriorated and the sustainable development of economy in Beijing to be restricted greatly. Based on the socio-economic conditions and water environment in 1991 in Beijing, direct sewage discharge coefficient, complete sewage discharge coefficient, direct COD discharge coefficient and complete COD discharge coefficient were used to comprehensively analyse the current status of sewage discharge from Beijing. Appropriate measures have been suggested for improving the water environment condition.

Key words: sewage discharge coefficient, COD coefficient, water pollution, water diversion.

Direct Thermochemical Liquefaction Technology for Treatment of Municipal Sewage Sludge. He Pinjing et al. (School of Environ. Eng., Tongji Univ., Shanghai 200092); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(3), 1995, pp. 75–78

The direct thermochemical liquefaction technology developed in the 1980s was used in the treatment of sewage sludge and resource recovery. Over 40% of organic matter in sewage sludge were converted into a fuel oil with a caloric power of ≥ 33 MJ/kg while TOC being converted at a rate of up to about 90%. The whole process was found to be a net energy exporting process. A review was also given on the development, current status and prospect of this process.

Key words: sludge treatment, direct thermochemical liquefaction, conversion of sludge to fuel oil.

Nonlinear Theory in Environmental Sciences and It's Implication. Ye Changming (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(3), 1995, pp. 79–82

A nonlinear theory in environmental science was suggested with an integrated analysis and theoretical judgement based on previous work. The implication of nonlinear theory for environmental

scientific research and pollution control was discussed by taking several examples.

Key words: multimedia environment, nonlinear theory, interface effect, pollution control.

Mechanism of Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. Wu Xiaolei (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084);

Chin. J. Environ. Sci., **16**(3), 1995, pp. 83–86

A detailed investigation was made on the configuration and mechanism of constructed wetlands. It was concluded that the high efficiencies of removing nitrogen, phosphorus and organics are mainly due to the synchronization of physical, chemical and biological processes, and due to the alteration of aerobic, anoxic and anaerobic conditions. For municipal wastewater containing less COD, BOD₅ and COD removal rates are greater than 80%, and BOD₅ in effluent is around 10 mg/L. The removal rates of total nitrogen and total phosphorus are greater than 60% and 90%.

Key words: constructed wetlands, wastewater treatment, organics, nitrogen removal, phosphorus removal.

Physiological Properties of Luminescent Bacteria and Its Application in Environmental Monitoring.

Huang Zheng and Wang Jialing (Institute of Environmental Medicine, Tongji Medical Univ., Wuhan 430030); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(3), 1995, pp. 87–90

A review was made on the following three respects: the physiological properties of luminescent bacteria, the utilization of luminescent bacteria toxicity test (L. B. T test) in environmental monitoring and the new progress of this technique. The advantages of L. B. T test were evaluated and its trends of future were suggested. It was predicated that L. B. T test would become an important method in environmental monitoring.

Key words: luminescent bacteria, toxicity test, environmental monitoring.