

人工湿地对微污染物去除效果的研究进展

刀昶智, 吴 宣, 蒋榕鞠, 李佳慧, 赵 斌*

玉溪师范学院, 化学生物与环境学院, 云南 玉溪
Email: *zhaobin@yxnu.edu.cn

收稿日期: 2021年5月16日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月24日

摘 要

微污染物是近年来才逐渐兴起的一个词汇, 微污染物是一种新型环境污染物, 世界各国也开始重视这一大类环境污染物, 如何有效控制污水中各种微污染物成为了水处理中所面临的难题之一。人工湿地作为近年来逐渐发展起来的一种生态污水处理技术, 在微污染物的去除研究中逐渐受到关注。本文介绍了环境中不同种类的微污染物的来源、危害以及现有的去除方法, 分析了人工湿地对各类微污染物的去除效果, 分析了影响人工湿地去除微污染物的主要因素以及国内外对人工湿地去除微污染物的相关研究。最后, 对人工湿地去除微污染物的生态处理技术进行总结和进一步研究的展望。

关键词

人工湿地, 微污染物, 新型环境污染物, 去除效果

Research Progress on Removal Efficiency of Micropollutants by Constructed Wetlands

Changzhi Dao, Xuan Wu, Rongju Jiang, Jiahui Li, Bin Zhao*

College of Chemical Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan
Email: *zhaobin@yxnu.edu.cn

Received: May 16th, 2021; accepted: Jun. 17th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

Abstract

Micropollutant is a new kind of environmental pollutant, which is gradually rising in recent years. Countries all over the world have begun to pay attention to this kind of environmental pollutant. How to effectively control various micropollutants in sewage has become one of the difficult prob-

*通讯作者。

文章引用: 刀昶智, 吴宣, 蒋榕鞠, 李佳慧, 赵斌. 人工湿地对微污染物去除效果的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(3): 640-645. DOI: 10.12677/aep.2021.113072

lems in water treatment. As an ecological wastewater treatment technology gradually developed in recent years, constructed wetland has attracted more and more attention in the removal of micropollutants. This paper introduces the sources, hazards and existing removal methods of different kinds of micropollutants in the environment, analyzes the removal effect of various micropollutants by constructed wetland, analyzes the main factors affecting the removal of micropollutants by constructed wetland, and analyzes the domestic and foreign research on the removal of micropollutants by constructed wetland. Finally, the ecological treatment technology of constructed wetland to remove micropollutants is summarized and the prospect of further research is put forward.

Keywords

Constructed Wetland, Micropollutants, New Environmental Pollutants, Removal Efficiency

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自从人类第一次工业革命以后,世界的科技、工业等的飞速发展带动了世界的经济发展,各国的 GDP 飞速增长。但是,这一系列的“飞速”伴随的是人类赖以生存的环境遭到各类污染物的污染,各类污染中水污染便是污染最为严重的几类之一。近些年一大类新型污染物——微污染物(Micro pollutants)引起了越来越广泛的关注,水体中的微污染物包括:药品和个人护理品(Pharmaceutical and personal care products, PPCPs),微塑料(Micro plastics, MPs),内分泌干扰物(Endocrine disrupting chemicals, EDCs)等。由于各行各业都需要用到塑料,人类动物需要消耗药品,在农业中需要用到化肥农药,工业中需要用到各种有机化合物。导致环境中出现大量上述列举的微污染物对水体环境造成污染,不同种类微污染物的来源、危害以及现有的去除方法见表 1。

Table 1. Sources, hazards and existing removal methods of micropollutants

表 1. 微污染物的来源、危害以及现有的去除方法

微污染物种类	来源	危害	现有的去除方法
药品和个人护理品 (PPCPs)	PPCPs 被人或动物食用后大约有 30%~90% 未经代谢的药物及其代谢产物被排入环境	人类传染病的医治和微生态环境构成潜在威胁	① 生物处理法 ② 混凝絮凝技术 ③ 氧化处理 ④ 吸附技术 ⑤ 人工湿地技术 ⑥ 集成技术
微塑料(MPs)	合成织物;塑料制品的物理破碎;塑料垃圾;化妆品等个人护理品中的微珠;洗衣废水	由于食物链的传递微塑料能进入人和动物血液,甚至肝脏等器官,造成肠道、生殖等系统的损害。微塑料在水体环境中会产生有毒添加剂,积聚有毒污染物,同时可作为传播有毒或有害微生物的载体,对人体健康构成危害	① 密度分离法 ② 吸附法 ③ 人工湿地技术 ④ 消解法
内分泌干扰物(EDCs)	农药化肥使用产生的农业废水;工业废水;垃圾渗滤液;有机废水的排放	干扰人类和其他动物的内分泌系统,从而对有机体的生殖、发育、神经、免疫、代谢等产生影响	① 活性炭吸附法 ② 膜截留作用法 ③ 生物降解法 ④ 高级化学氧化法

人工湿地(Constructed wetland, CW)是由人工建造、人工控制运行的为处理污水而人为设计建造的工程化的湿地系统。主要利用土壤、砂石、人造基质、植物、微生物的生物、物理、化学三种作用,对污水进行处理的一种技术。其作用机理包括吸附、降解、过滤、氧化还原、沉淀、微生物分解、转化、植物吸附吸收、蒸腾水分、养分吸收、产生氧气养分及各类动物的作用[1]。在上世纪90年代,欧美许多西方的发达国家在处理污水上利用了该技术,在许多处理污水的工艺、技术中的大部分的工艺技术都处理得不彻底,带来一些处理的副产物加剧了环境的污染。人工湿地是一个复合型的小型生态系统,它应用生态系统中物种共同生长、物质循环、能量流动及再生原理,结构与功能相互协调的原则,在促进污水中污染物质去除的前提下,充分发挥资源的生产潜力,防止由于处理污水中污染物而造成的环境的再污染,获得污水处理处置与资源合理利用的最佳效益。人工湿地的植物还能够为水体环境提供氧气,增加水体环境的活性。人工湿地植物在控制水体污染,降解分解有毒有害物质上也起到了重要的作用。人工湿地与传统污水处理厂相比具有投资少、运行成本低、二次污染较轻、去除效率较高等明显优势[2]。所以近年来世界各国对于利用人工湿地处理污染物越发重视。

过去人工湿地处理研究都只关心对有机物质和营养物质的去除,对微污染物的去处研究很少。其他处理微污染物的工艺方法成本较高步骤较为繁琐而且还会产生副产物。近年来,人们对人工湿地处理水体中的污染物不只是停留在常规污染物上,而且更多地倾向于处理微污染物的研究[3]。人工湿地处理微污染物性能见表2。

Table 2. Performance of constructed wetland in treating micro pollutants

表 2. 人工湿地处理微污染物性能一览表

微污染物类型	去除机理	去除效果	应用前景
药品和个人护理品 (PPCPs)	填料基质、土壤及沉淀物的吸附作用;降解作用使大分子化合物变为小分子化合物最后转化为 H ₂ O 和 CO ₂ ;植物根系的吸收作用去除[4]	随着 PPCPs 浓度由高到低人工湿地吸附率由 60% 升高到 90%;生物降解[5]、光解、水解加快了 PPCPs 降解效率;植物利用根茎叶吸附吸收,而且增加了降解酶的活性	建设费用低,处理效率高,处理方法环保。相比其他处理方法有很大的开发空间。
微塑料(MPs)	填料床基质、土壤及沉淀物的吸附和对微塑料的磨损减少其长度,微生物的降解和光氧化分解	经过人工湿地的物理、生物处理之后微塑料浓度大幅降低	占地面积小,处理微塑料的方式多样综合处理效率高,有的微塑料能被完全降解,可以解决处理方式单一的问题
内分泌干扰物(EDCs)	微生物的降解作用,植物的代谢,耗氧条件下提供电子使有机环状干扰物开环、断键形成小分子	在我国 8 月份人工湿地去除效果最好,去除效率能达到 70% 左右	成本低去除效果相对较好,遵循可持续发展战略

2. 人工湿地去除微污染物国内外研究现状

2.1. 国外研究现状

M. Hijosa-Valsero 等[6]对几个处理含有常规污染物抗生素污水的中小型室外人工湿地进行研究分析,类型不同的抗生素在人工湿地系统中的去除机理不同,甲氧苄氨嘧啶(Trimethoprim)以及磺胺类药物的处理方法主要为人工湿地中所存在的微生物降解作用。在美国路易斯安娜州的一个采用氧化塘类型的人工湿地污水处理系统的污水处理厂内, J. L. Conkle 等[7]在进出水排放的水体中对 10 种药物活性化合物进行了收集监测,其中 8 种可在进水中检测到,而出水中只能检测到 7 种,并且大部分水体有机或无机化合物的去除率超过 90%。D. Q. Zhang 等[8]在研究人工湿地对一些药物的去除效果时发现。环境在有氧条件下可以促进一些药物的生物降解。Hijosa-Valsero 等[9]通过实验发现,卡马西林(Carmasilin)在冬天的质

量去除率与湿地植物的蒸腾作用存在明显的线性关系。美国的 Kolpin [10]调查美国某一段河流研究发现内分泌干扰物 17 α -乙炔基雌二醇含量在每 5.7%样品中含量大于 5 ng/L, 人工湿地系统在秋季对壬基酚类物质有较好的处理效果。

2.2. 国内研究现状

刘建、张文龙等[11]调查研究了水平潜流人工湿地对城市生活污水中的 8 种内分泌干扰物去除效果。结果表明: 在水力负荷为 0.17 m/d, 水力停留时间为 4.6 d 情况下, 水平潜流人工湿地对雌激素酮(E1), 雌激素三醇(E3), 双酚 A (BPA)。辛基酚(OP), 17 β 雌二醇(E2), 17 α -雌二醇(17 α -E2), 17 α -乙炔基雌二醇(EE2)的平均去除率分别为 81.4%、39.3%、73.9%、44.1%、69.7%、82.2%、65.2%。其中, 4-正壬基酚(4-n-NP)在湿地出水中未检测到。人工湿地中内分泌干扰物在每一段的去除效果变化结果表明, 湿地前半段对内分泌干扰物的去除效果高于后半段, 说明人工湿地系统前半段微生物的活性最高降解也更有效。刘操等[12]通过现场取样、测定, 研究了北京官厅水库上游的一个人工湿地系统在秋季(植物茂盛)和冬季(植物枯萎)对环境内分泌干扰物和人工合成激素的处理效果。结果表明, 人工湿地系统在秋季对酚类内分泌干扰物有较好的处理效果, 而在冬季的处理效果不明显。杨海燕等[13]总结了人工湿地与污水厂二级处理的对比效果, 深度处理(二级处理后带 UV 处理)的对比效果研究后, 得出人工湿地对污水中药品及个人护理品的处理效果与污水厂的处理效果相似或比其更好[14]。

3. 人工湿地处理微污染物的影响因素

3.1. 温度

适宜的温度能够促进加强微生物的生理活动, 温度不适宜不利于微生物的生长繁殖, 破坏微生物的生理活动, 还会导致微生物的形态和生理特性发生改变, 甚至导致微生物的死亡。微生物能对各种微污染物进行降解去除, 温度影响微生物就大大降低了人工湿地对微污染物的去除效率。

温度对植物的影响, 低温下植物生长缓慢, 大多数植物在 0 $^{\circ}$ C 就停止生长。大多湿地植物在夏季生长旺盛, 有很好的处理效果, 但是在冬季植物都枯死即使植物根部存活不能进行光合作用导致水体供氧不足而大大降低人工湿地系统对微污染物的去除效率[15]。

3.2. 基质填料

在人工湿地系统中基质本身不但可以吸附 PPCPs、MPs、EDCs 同时也为植物对为污染物的吸附和微生物降解 PPCPs、MPs、EDCs 提供了良好的附着场合[16], 基质填料般由砾石、钢渣、土壤、细砂、粗砂、沸石等介质的一种或几种构成。Dordio 等[17]研究了不同基质种类对降固醇酸(Clofibric acid)的去除作用, 结果显示陶粒对降固醇酸的吸附率能达到 75%左右。而多孔的岩石的吸附率不到 10%, 沙子甚至对其吸附任何作用, 所以可以得出基质的种类可直接影响到基质的吸附能力。不同基质对 COD、TP、TN 的去除效率见图 1。不同的基质填料对水体污染物的去除效果及效率有很大的差别。

3.3. 植物

水生植物能够利用茎叶蒸腾、根系吸附等作用去除污染物。国外研究表明无论是夏季还是冬季, 药品化合物的蒸发蒸腾作用与去除率的斯皮尔曼系数都很高(冬季 0.964 夏季为 0.893), 这就表明植物的蒸腾作用与去除率有直接的关系。Hijosa-Valsero [1]等研究发现有植被种植的表流人工湿地对克拉霉素(Klaricid)和甲氧苄氨嘧啶(Trimethoprim)的去除效果要优于没有植物种植的湿地; 而水平潜流人工湿地种植香蒲后对甲氧苄氨嘧啶(Trimethoprim)和红霉素(Erythromycin)的去除效果要优于种植前。大多数研究表

明有植物的湿地要比没有植物的湿地去除效果要好，具有发达根系和茎叶的植物的人工湿地要比植物少植物不茂盛的人工湿地处理效果要好。

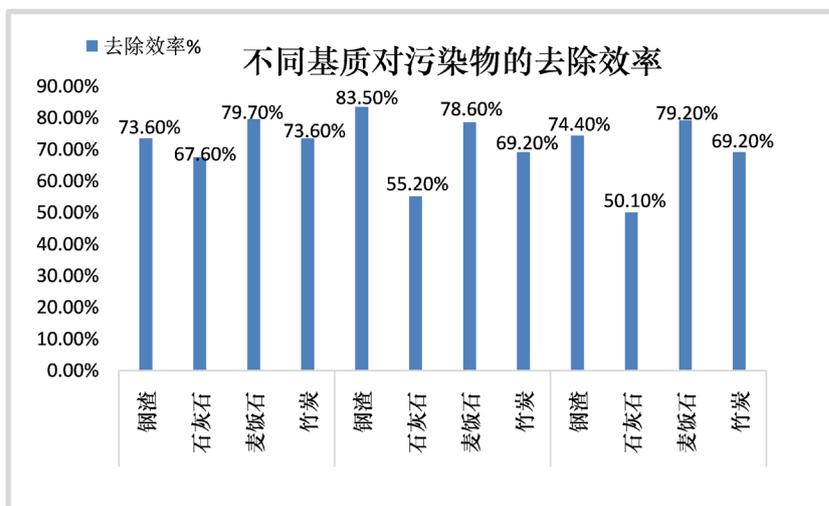


Figure 1. Removal efficiency of COD, TP and TN by different substrates

图 1. 不同基质对 COD、TP、TN 的去除效率图

4. 结论及展望

4.1. 结论

针对常见的去除微污染物的方法来说，人工湿地的利用大大强化了微污染物的去除效果，并且人工湿地相较于其他处理方法更加节能环保，在去除微污染物等其他常规污染物的同时不会产生副污染物并且能够起到净化空气的效果，符合当今社会可持续发展原则，不管是国外还是国内对人工湿地的利用率和建造也越来越多。但是，人工湿地处理微污染物也有很大的局限性，在温度低的春季和冬季处理微污染物和处理常规污染物的效果就不好，对于植物、基质填料的选取也有要求。在处理大量污水的时候，需要的人工湿地系统的规模也很大，对建设地面积的需求就很大。

4.2. 展望

人工湿地系统对处理微污染物中的药品和个人护理品(PPCPs)、微塑料(MPs)、内分泌干扰物(EDCs)在国内外研究得还很少，特别是对微塑料(MPs)的处理研究最少，大多都只停留在密度分离、膜处理技术方面，在人工湿地处理微塑料上很少有人研究。人工湿地在当下环境现状中是一种生态的污水处理系统，相比于其他处理技术，人工湿地系统建设成本低，处理效果较好。在人工湿地中植物根系吸收和吸附、填料基质的吸附、微生物的降解等都对微污染物去除有明显的效果。从目前的研究结果来看人工湿地对微污染物的去除效果较好，人们可以加强对人工湿地去除微污染物的研究，不断改进人工湿地生态系统，使得人工湿地系统能够越来越广泛使用，未来的工作在人工湿地去除效率及规模化利用方面应做长期的探索研究。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(2019B60, 2019B48, 2019B22)。

参考文献

- [1] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1994, 16(3): 83-86.

- [2] 张永勇, 张光义, 夏军, 等. 湿地污水处理机理的研究[J]. 环境科学与技术, 2005, 28 (增刊): 165-167.
- [3] 陈秀荣, 周琪. 人工湿地脱氮除磷特性研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(7): 526-529.
- [4] 肖敏如, 刘磊, 赵新华. 人工湿地处理污水中药物与个人护理品的研究进展[J]. 工业水处理, 2015, 35(3): 1-4.
- [5] Matamoros, V., Caselles-Osorio, A., Garcia, J. and Bayona, J.M. (2008) Behaviour of Pharmaceutical Products and Biodegradation Intermediates in Horizontal Sub-Surface Flow Constructed Wetland. A Microcosm Experiment. *Science of the Total Environment*, **394**, 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.029>
- [6] Hijosa-Valsero, M., Fink, G., Schlusener, M.P., et al. (2011) Removal of Antibiotics from Urban Wastewater by Constructed Wetland Optimization. *Chemosphere*, **83**, 713-719. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.004>
- [7] Conkle, J.L., White, J.R. and Metcalfe, C.D. (2008) Reduction of Pharmaceutically Active Compounds by a Lagoon Wetland Wastewater Treatment System in Southeast Louisiana. *Chemosphere*, **73**, 1741-1748. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.09.020>
- [8] Zhang, D.Q., Tan, S.K., Gersberg, R.M., et al. (2011) Removal of Pharmaceutical Compounds in Tropical Constructed Wetlands. *Ecological Engineering*, **37**, 460-464. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.002>
- [9] Hijosa-Valsero, M., Matamoros, V., Sidrach-Cardona, R., et al. (2010) Comprehensive Assessment of the Design Configuration of Constructed Wetlands for the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products from Urban Wastewaters. *Water Research*, **44**, 3669-3678. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.022>
- [10] Kolpin, D.W., Furlong, E.T., Meyer, M.T., et al. (2002) Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1999-2000: A National Reconnaissance. *Environmental Science & Technology*, **36**, 1202-1211. <https://doi.org/10.1021/es011055j>
- [11] 刘建, 张文龙, 李轶, 等. 环境内分泌干扰物在人工湿地中的去除研究[J]. 环境工程, 2011, 29(2): 24-27.
- [12] 刘操, 王子健, 许宜平, 等. 人工湿地系统对内分泌干扰物质的去除效果[C]//中国化学会, 内蒙古大学. 中国化学会第八届水处理化学大会暨学术研讨会. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2006: 354-359.
- [13] 杨海燕, 杨博, 孙广东. 人工湿地处理污水中药品及个人护理品的效能研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(9): 35-40.
- [14] 刘小为, 陈忠林. UV/O₃ 降解水中新兴微污染物的特性与机理研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [15] 何起利, 梁威, 贺锋, 等. 人工湿地氧化还原特征及其与微生物活性相关性[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 844-849.
- [16] 邓欢欢, 杨长明, 李建华, 等. 人工湿地基质微生物群落的碳源代谢特性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(6): 698-702.
- [17] Dordio, A.V., Teimão, J., Ramalho, I., et al. (2007) Selection of a Support Matrix for the Removal of Some Phenoxycetic Compounds in Constructed Wetlands Systems. *Science of the Total Environment*, **380**, 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.015>