

不同类型人工湿地研究进展及应用现状

王璐瑶^{1,2,3,4}, 郭超^{1,2,3,4}

¹陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

²陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年10月10日; 录用日期: 2021年11月12日; 发布日期: 2021年11月19日

摘要

近年来, 水环境污染问题的日益严峻使得全球水资源短缺问题更加突出, 人工湿地因其低成本、生态化、景观化、建设便利等优势被广泛应用于污水处理中。本文总结了目前人工湿地的四种主要类型, 分别为自由水表面流人工湿地、地下流人工湿地、混合流人工湿地和生态浮床, 阐述了各类型湿地系统的优势、研究现状及实践应用, 以期污水生态化处理的应用推广提供理论支撑。

关键词

自由水表面流人工湿地, 地下流人工湿地, 混合流人工湿地, 生态浮床

Research Progress and Application Status of Different Types of Constructed Wetlands

Luyao Wang^{1,2,3,4}, Chao Guo^{1,2,3,4}

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Nature and Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 10th, 2021; accepted: Nov. 12th, 2021; published: Nov. 19th, 2021

Abstract

In recent years, the increasingly serious water environment pollution problem has made the glob-

al water shortage problem more prominent. Constructed wetlands have been widely used in sewage treatment due to their low cost, ecological, landscaping, and convenient construction advantages. This article summarizes the four main types of constructed wetlands at present, namely, free water surface flow constructed wetlands, underground flow constructed wetlands, mixed flow constructed wetlands and ecological floating beds, and expounds on the advantages, research status and practical applications of each type of wetland system. Provide theoretical support for the application and promotion of ecological sewage treatment.

Keywords

Free Water Surface Flow Constructed Wetland, Underground Flow Constructed Wetland, Mixed Flow Constructed Wetland, Ecological Floating Bed

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

湿地是分布在陆地与水体之间过渡带的综合自然体。在生态学上,湿地是由水、永久性或间歇性处于水饱和状态下的基质及水生植物和其他水生生物所组成的,是一类具有较高生产力和较大活性、处于水陆交接相的复杂生态系统。湿地在自然界的形式多种多样,可分为天然湿地和人工湿地。城市的快速扩张和工业化发展通常伴随着大量废水的产生,因此,这些废水必须经过严格处理才能排向河流湖泊,否则将产生严重的环境问题,危及人类健康。目前常采用自然或传统钢筋混凝土形成的处理单元来进行废水处理以满足排放标准,不同的处理技术都各有优势及局限性,大多传统技术都需要消耗能源,而以人工湿地为主的自然技术主要依靠风能、太阳辐射、生物质能等,可通过植物、基质、生物种群、大量水等系统间的复杂作用来去除不同类型污染物,如:氮、磷、有机物、固体悬浮物、重金属离子和大肠菌群等,可以在不消耗化石能源的情况下处理更多的污水,大大降低运营成本[1][2]。因此,人工湿地由于其去除效率高、成本低、操作简单以及水和养分再利用的巨大潜力,已成为越来越受欢迎的废水处理选择。本文总结了目前湿地系统的主要类型、研究进展及应用现状,以期为污水生态化处理的应用推广提供理论支撑。

人工湿地处理系统通常分为四类,分别是自由表面流系统(FWS, free water surface)、地下水流系统(SSF, subsurface flow)、复合系统以及生态浮床湿地处理系统。地下水流系统可根据流动方向进一步分为垂直地下流(VSSF)和水平地下流(HSSF)系统,流态的选择主要取决于处理的目标成分、地理位置、成本、可用面积和处理目标。

2. 自由表面流人工湿地处理系统

自由表面流人工湿地处理系统一般为浅水盆地,表面有水,表层水一般是有氧的,而较深的水和基质通常是厌氧的,因此,该处理系统的水深通常小于 0.4 m,其水力负荷(HLR, hydraulic loading rates)介于 0.7 和 5.0 cm/d 之间,处理过程通过植被与水中相关生物膜之间的复杂相互作用发生[3]。与天然沼泽一样,该处理系统具有广泛的生物学特性,可有效通过微生物降解去除有机物,并通过过滤和沉淀去除悬浮固体,总悬浮固体、化学需氧量、生化需氧量和病原体的去除效率可以达到 70% 以上,氮的去除

效率通常为 40~50%，去除效率与多种因素相关，包括入水浓度、氮的化学形式、水温、季节、溶解氧浓度等[4]。该处理系统对磷的去除是可持续的，但速度相对较慢，去除率一般在 40%~90%。

3. 地下水流人工湿地处理系统

地下水流人工湿地处理系统一般通过可渗透介质(如沙子、砾石或碎石)设计为水平或垂直地下流[1]。水平地下流是目前最常见的系统设计，但垂直地下流系统正变得越来越流行。因为在垂直地下流处理系统中，废水水平流过颗粒介质，通过分配系统通过整个表面区域并垂直通过介质，并与地下的好氧、缺氧和厌氧区域网络接触，好氧区一般位于植物根和根茎周围，可将氧气引入基质。该系统水深通常小于 0.6 m，其水力负荷一般为 2~20 cm/d。根据目前两种系统的应用表现，水平地下流处理系统和垂直地下流处理系统的 BOD₅ 去除效率分别为 75.10% 和 89.29%，COD 的去除效率分别为 66.02% 和 64.41%。相比之下，垂直地下流处理系统在降低 BOD 方面的性能比水平地下流处理系统更好，因为前者是间歇加载的，且具有不饱和流，使得更多的氧气可转移到过滤介质[5]。一般来说，水平地下流处理系统可以为反硝化提供良好的条件，但该系统硝化氮的能力通常是有限的，而垂直地下流处理系统又可去除 NH₃-N，但该系统又几乎不会发生反硝化作用。

有研究比较了种植香蒲的自由表面流人工湿地处理系统、水平地下流处理系统和垂直地下流处理系统，结果显示自由表面流人工湿地处理系统的处理效率最低，COD、NH₄-N、TN、TP 去除率分别为 16.5%、22.8%、19.8% 和 35.1%，水平地下流处理系统这四种参数的去除率分别为 39.6%、32.0%、52.1%、65.7%，垂直地下流处理系统则分别为 40.4%、45.9%、51.6%、64.3%。最终研究者使用自由表面流人工湿地处理系统和垂直地下流处理系统符合而成的处理系统种植香蒲和 *Scirpus lacustris* 来改善中国江苏省新沂河污染的水质，检测数据显示，在不同的水力负荷(0.2~1.3 g/m²·d)下，垂直地下流处理系统表现出更好的 COD (77.38%) 和 NH₃-N (96.9%) 去除率，而自由表面流人工湿地处理系统的 COD 和 NH₃-N 去除率分别为 61.1% 和 85.5% [6]。

4. 复合人工湿地处理系统

由于无法同时提供好氧和厌氧条件，单级人工湿地处理系统无法实现高总氮去除率，因此，可通过组合不同类型的人工湿地处理系统来发挥个系统的优势。由于单级系统可能难以处理大量废水，因此可将多个不同类型单级系统串连成混合系统，目前，大多数混合系统由分阶段排列的水平地下流处理系统和垂直地下流处理系统组成[1]。垂直地下流处理系统旨在去除有机物和悬浮固体并提供硝化作用，而反硝化作用、有机物和悬浮固体的进一步去除可在水平地下流处理系统中进行。有统计数据显示，发展中国家的混合系统主要用于亚洲，在调查的 15 个混合系统中，11 个用于处理市政污水，而其他混合系统设计用于处理各种类型的废水，包括湖水、医院废水、实验室废水和上流式厌氧污泥床反应器流出物。在这 11 个混合系统中，TSS、BOD₅、COD、NH₄-N 去除效果好，分别为 93.82%、84.06%、85.65% 和 80.11%，TP、NO₃-N、TN 去除效果较好，分别为 54.75%、63.58% 和 66.88%，其中 TP、NO₃-N 和 TN 的去除效率因系统配置、水力负荷和植物种类会显示出较大差异。Belmont 等人[7]为促进墨西哥 Rio Texcoco 流域的废水处理和废水回用作为水管理解决方案，在某小社区开展了一个试点规模的湿地系统，该系统由一个稳定池、水平地下流处理系统和种植 *T. angustifolia* 和 *Chrysanthemum cinerariaefolium* 的垂直地下流处理系统组成。该复合处理系统以 2 L/min 的流量运行，日均处理废水量为 2.88 m³，最终将生活污水中的 COD、TSS、NH₄-N、NO₃-N 和 TN 分别平均降低了 84.9%、58.6%、53.9%、81.7% 和 71.7%。Singh 等人[8]使用复合人工湿地处理系统处理来自尼泊尔 80 户家庭的高浓度废水，该复合系统包括一级厌氧反应器、两个水平地下流处理系统和两个种植芦苇和美人蕉的垂直地下流处理系统。结果显示，该混合系统在污染物去除方面非常有效：TSS 为 96%，BOD₅ 为 90%，COD 为 90%，NH₄-N 为 70%，TP 为 26%。

5. 生态浮床湿地处理系统

生态浮床湿地处理系统是一种新型湿地处理系统, 它由生长在漂浮垫上而不是扎根在沉积物中的有根、挺水的大型植物组成。垂直地下流处理系统在高流速或极端雨洪发生时, 其处理能力是有限的, 而生态浮床湿地处理系统的主要优势就在于可以应对这些条件下的不同水深的处理, 因此, 该系统还可设计成一个延长的滞留池, 起到处理和稳流的作用。相关数据显示, 生态浮床湿地处理系统对 BOD₅、COD、NO₃-N、TN 和 TP 的去除率分别为 79.31%、55.20%、73.45%、62.45% 和 49.58%, 与其他植物扎根沉积物的湿地相比, 该系统中植物对养分和其他元素(例如重金属)的同化可能更高[9], 因为该系统中植物根部不与底栖沉积物或土壤接触, 只能获取漂浮垫和水柱中的养分, 在漂浮垫下方, 根、根茎和悬垂的根生物膜网络为污染物的生化转化和物理过程(例如过滤和截留颗粒)提供了生物活性表面积。迄今为止, 生态浮床湿地处理系统已被用于观赏池塘和湖泊的水质改善、栖息地改善和美学改善。Boonsong 和 Chansiri [10]研究了 *V. ziznioides* (L.) Nash 在泰国曼谷使用生态浮床湿地处理系统在 3 天、5 天和 7 天三种不同水力负荷下处理生活污水的效率, TN 和 NH₄-N 的平均去除效率分别为 9.97%~62.48% 和 13.35%~58.62%, TP 和磷酸盐的平均去除效率分别为 6.3%~35.87% 和 7.40%~23.46%。其中 7 d 的水力负荷对 BOD、TN 和 TP 的处理效果最好, 平均去除效率分别为 90.5%~91.5%、61.0%~62.5% 和 17.8%~35.9%。Sun 等人[11]研究了在中国广州使用生态浮床湿地处理系统在 120 L/m²·d 的水力负荷下处理入水中 TN 浓度为 8.7 g/m³ 的污水, 最终 TN 的去除效率为 72.1%, NO₃-N 为 75.8%, NO₂-N 为 95.9%, COD 为 94.6%。

6. 结语

在本综述中, 对比各类型人工处理系统可以发现, 复合人工湿地处理系统在去除 TSS、COD、NH₄-N 和 TN 上具有更大的优势, 去除效率分别 93.82%、85.65%、80.11% 和 66.88%。与自由表面流、混合系统和生态浮床对 TP 的去除率分别是 49.16%、54.75% 和 49.58% 相比, 水平和垂直地下流对 TP 的去除率更高, 分别是 65.96% 和 59.61%。此外, 垂直地下流的 BOD 去除率最高, 为 89.29%。由于目前城市污水量日益增加, 污水中氮、磷、有机物、病菌、抗生素等污染物复杂且含量不一, 各污染物之间在去除中拮抗或促进作用的研究还较少, 针对不同污染类型的污水, 建立各污染物去除率都较高且运行稳定的复合湿地处理系统的研究尚显不足, 还需要进一步的研究与实践

基金项目

陕西省重点研发项目(2020SF-420); 陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2020-27)。

参考文献

- [1] Vymazal, J. (2011) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, **45**, 61-69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>
- [2] 陈淑芬. 多级渠塘—湿地复合生态处理系统削减坡地排水中氮磷负荷研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [3] Vymazal, J. (2005) Horizontal Sub-Surface Flow and Hybrid Constructed Wetlands Systems for Wastewater Treatment. *Ecological Engineering*, **25**, 478-490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>
- [4] Kadlec, R.H. (2009) Comparison of Free Water and Horizontal Subsurface Treatment Wetlands. *Ecological Engineering*, **35**, 159-174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.04.008>
- [5] Kadlec, R.H. and Wallace, S.C. (2009) *Treatment Wetlands*. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- [6] Ruan, X., Xue, Y., Wu, J., Ni, L., Sun, M. and Zhang, X. (2006) Treatment of Polluted River Water Using Pilot-Scale Constructed Wetlands. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **76**, 90-97. <https://doi.org/10.1007/s00128-005-0893-7>

- [7] Belmont, M.A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A. and Metcalfe, C.D. (2004) Treatment of Domestic Wastewater in a Pilot-Scale Natural Treatment System in Central Mexico. *Ecological Engineering*, **23**, 299-311. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.003>
- [8] Shirish, S., *et al.* (2009) Performance of an Anaerobic Baffled Reactor and Hybrid Constructed Wetland Treating High-Strength Wastewater in Nepal—A Model for Dewats. *Ecological Engineering*, **35**, 654-660. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.019>
- [9] Headley, T.R. and Tanner, C.C. (2012) Constructed Wetlands with Floating Emergent Macrophytes: An Innovative Stormwater Treatment Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **42**, 2261-2310. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574108>
- [10] Boonsong, K. and Chansiri, M. (2008) Domestic Wastewater Treatment Using Vetiver Grass Cultivated with Floating Platform Technique. *Information Systems Education Journal*, **12**, 73-80.
- [11] Sun, L., Liu, Y. and Jin, H. (2009) Nitrogen Removal from Polluted River by Enhanced Floating Bed Grown Canna. *Ecological Engineering*, **35**, 135-140. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.016>