

污水人工湿地系统中有机物积累规律与堵塞机制的研究进展

杜中典, 崔理华, 肖 乡, 朱夕珍

(华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘 要: 论述了人工湿地系统中有机物积累规律、土壤堵塞机制以及避免系统堵塞的措施。最后探讨了人工湿地中有机物动态的研究发展方向。

关键词: 人工湿地; 有机物积累; 土壤堵塞

中图分类号: X703.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 0267(2002)05 – 0474 – 03

Advance in Regularity of Organic Matter Accumulation and Clogging Mechanisms of Constructed Wetlands

DU Zhong-dian, CUI Li-hua, XIAO Xiang, ZHU Xi-zhen
(College of Natural Resources & Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: As the high purification efficiency and relatively small land requirement for purification of wastewater by wetland, the treatment systems by constructed wetland has been popular and increasingly used in many countries. The present paper reviews the regularity of organic matter accumulation, soil clogging mechanisms as well as the methods of avoiding soil clogging in constructed wetlands. Finally, the future research directions of organic matter dynamic state are also discussed.

Keywords: constructed wetlands; organic matter accumulation; soil clogging

人工湿地(Constructed Wetlands)是 20 世纪 70 年代末期发展起来的一种废水生物处理技术,它具有投资低、能耗低、出水水质好,有较强的脱氮除磷功能以及运行管理方便等特点,因而该技术已被世界各国所接受,并用来处理多种形式的废水。人工湿地对废水的处理综合了物理、化学和生物 3 种作用^[1]。它成熟后,填料表面和植物根系中生长了大量微生物,形成了生物膜。废水流经时,SS 能被填料及根系阻挡截留,有机物通过生物膜的吸附、同化及异化作用而得以去除。湿地床层中由于植物根毛的输氧及传递特性,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,这样就使得废水中的氮磷不仅能被植物、微生物作为营养物质直接吸收,而且也可以通过硝化、反硝化作用及微生物对磷的过量积累作用从废水中去除,最终通过湿地填料的定期更换或植物的收割使污染有机物从系统中去除。

人工湿地系统可分为三种类型:表面流湿地(Surface Flow Wetlands)、潜流湿地(Subsurface Flow Wetlands)和垂直流湿地(Vertical Flow Wetlands)。近年来人们对垂直流人工湿地产生了

收稿日期: 2001 – 11 – 07

基金项目: 广东省自然科学基金项目(19990721)

作者简介: 杜中典(1977—),男,山东微山人,现为华南农业大学环境科学与工程系硕士研究生,研究方向是水污染控制工程和污水生态处理技术。

兴趣。在垂直流人工湿地系统中,以间歇的剂量将废水施于湿地表面,废水垂直渗透通过多为砂砾的基质。间歇投放废水以保持基质具有良好的氧转移特性,并进行废水的硝化。植物在湿地表面形成一个垫层,有利于捕获需氧降解的悬浮固体。用砂砾作为基质,避免了以土壤为基础的平流系统所遇到的传导性问题,而且湿干交替的运行方式既有利于渗滤速率的恢复,又利于提高基质的固磷作用。

1 人工湿地系统中有机物含量的变化

湿地有机物含量的变化取决于系统有机物的投入量和输出量之间的平衡关系。若将湿地亚系统看作一个“黑箱”,则湿地系统有机物的瞬时变化率为:

$$\frac{d OM}{d t} = I - O$$

式中: OM 为湿地有机物; I 为有机物的投入量; O 为有机物的输出量; t 为时间。

湿地有机物的投入量主要由废水中贡献的有机物量、植物的生物产量和生物产量的分配所决定的,植物的生物产量由植物地上部分残留、根产量与根分泌物组成。湿地系统有机物输出途径主要有两个方面,一个是湿地系统中有机物分解所放出的二氧化碳和其他无机物质,另一个是随废水流出所带走的有机物质。

2 人工湿地系统中有机物的积累

2.1 水力负荷和停留时间对人工湿地中有机物积累的影响

随着人工湿地的运行,出现了有机物的积累,并且随着水力负荷的增加而增加。开始有机物的积累速率较快,随后有机物的积累速率是下降的。国外垂直流砂滤床中试实验研究表明^[2],开始 2 年的积累速率是随后 3 年的 1.2—2 倍。虽然随着时间的运行,这种积累速率有所下降,但仍然高于天然湿地。同时湿地中有机物积累量的逐渐增加是和有效水力停留时间的减少趋势是有关系的,但二者之间并不是一种直接的关系。这表明其它因素,比如积累有机物的体积密度及其空间分布也可能对系统水力停留时间产生一定的影响。

2.2 植物和微生物对人工湿地中有机物积累的影响

湿地中积累的有机物总量一般要超过废水所贡献的有机物总量,可以从两个方面解释这种现象:一方面,在含营养物质丰富的湿地系统中,微生物大量生长繁殖所形成的颗粒状有机物是系统中有机物积累总量的一个组成部分。另一方面,系统中植物的年生长量是相当高的,植物的地上部分衰落时的残留物、根系及根系分泌物(这类有机物积累量随一年中季节循环变动较大)都有助于系统中有机物积累量的增加,因而植物是系统中最大的额外有机物来源。研究实验表明^[2],种植植物的系统中积累的有机物量比在相同条件下没种植植物的高 1.2—2 kg·m⁻²,这部分高出的有机物可能是由植物所贡献。

当废水流经稠密的植物根系时,废水中不溶性的有机物被截留下来,而且也增加了废水的水力停留时间。种植植物的湿地系统在较高的水力负荷下运行时,虽然系统中有机物的积累量较大,但其填料孔隙率并没有明显的减少,这也许在该系统中,积累的有机物较不种植植物的系统中积累的有机物的分子结构不同,污泥密度大,因而在填料中所占的容积较小的缘故。

2.3 C/N 比对人工湿地中有机物积累的影响

一般说来,在种植植物的系统中 C/N 比相对来说较高。一方面反映了植物残留、根系及根分泌物在系统内的积累;另一方面反映了由于植物根毛的输氧及传递作用,使得硝化得以顺利进行,为反硝化创造了条件,因而造成了氮的损失。有的学者^[3]指出在人工湿地中上层的 TN 和 TC 呈线性关系,并得出种植植物的系统和没种植植物的系统中的线性方程分别为:

$$TN = -0.021 + 0.124 \times TC \quad (r^2 = 0.98)$$

$$TN = -0.078 + 0.083 \times TC \quad (r^2 = 0.95)$$

根据 TN 和 TC 的线性关系,我们可以由 TC 来估算湿地基层中氮的储备量,同时也可以从这种线性关系中看出和系统中积累的有机物相关的氮是湿地系统中一个相当大的氮贮存库。

2.4 人工湿地中有机物积累的空间分布模式

湿地系统中积累的有机物在水平方向上的分布为,废水入口处,有机物的积累量较大,而且随着距离的增加,有机物积累量逐渐下降。例如,Chris C. Tanner 等^[3]通过在垂直流砂滤床取样分析得出,种植植物的湿地系统废水入口处有机物积累量最

高达 9.5 kg·m⁻²,而在出口处则下降到 2—5 kg·m⁻²。相似的是,没有种植植物的湿地系统中,有机物积累量在 1—4 kg·m⁻² 之间变动。有机物积累量在垂直方向上的分布随着床体深度的增加而呈现减少的趋势。在种植植物的系统中,有机物的积累主要发生在湿地表面和上面的基层,而且对于水力负荷较高的湿地来说,这种有机物积累空间分布模式更加明显。

3 人工湿地堵塞的机制

3.1 由有机物积累造成的系统堵塞

堵塞过程可分为下面三个阶段^[4]。第一个阶段是渗透速率接近系统开始运行时的渗透速率,但呈现逐渐下降趋势;接着是一个实质性的平稳下降阶段;最后是间歇的系统堵塞阶段直至持续堵塞发生。Laak^[5] 指出湿地系统在未达到平衡状态之前,堵塞仅仅依靠有机负荷。湿地系统达到平衡之后,当有机物积累到一定程度,沉积在湿地表面的有机物形成了一层黑色粘膜,包括厌氧分解产物,比如多糖类物质和聚尿类物质^[6],以及由于受低温限制而没有发生化学变化的有机化合物^[7],导致了系统孔隙的外部堵塞,沉积在孔隙内的有机物导致了孔隙内部的堵塞。简放凌^[8]指出,如果湿地系统内有机物的积累量达到 5% 以上时,过滤功能就会失效。当堵塞现象发生时,使得废水的有效停留时间减少,原来的流动路径短路,废水在湿地表面径流,影响湿地长期运行的稳定性,甚至使湿地系统失去其应有的功能。

3.2 影响人工湿地堵塞的因素及避免堵塞的措施

造成湿地堵塞的因素是多方面的。当垂直流人工湿地用来治理含较多不易降解的 SS 成分时,堵塞容易发生。可以通过废水的前处理,减少进水中难降解的 SS 来防止堵塞的发生;由于湿地系统中植物能够向系统中贡献较多的有机物,因而植物对系统的堵塞也有很大的影响。减少由植物造成有机物堵塞的办法是选择一种植物品种,其残留物中所含难降解化合物的水平较低或者定期收割植物的地上部分以及定期去除系统表面积累的有机物粘膜;由于废水中连续的营养物质的供应,系统内生物量的产生也是影响堵塞的一个因素。微生物可能将少量慢分解的和难分解的化合物轻度改变就直接进入稳定的腐殖质成分,而且生物量的体积对系统堵塞的影响要比其干重大。为了维持湿地的功能,生物量的产生速度和矿化速度必须达到一种平衡状态^[9]。Ryszard Blazejewski 等^[10]认为厌氧条件加速了系统的堵塞,因而间歇的投水方式和适当的湿地干化期对于系统避免堵塞也是必要的。

4 人工湿地中有机物动态的研究发展方向

目前虽然关于人工湿地中有机物动态变化的研究很多,但仍有不少问题待于解决。

(1) 由于湿地有机物的各种组分混合在一起,目前的测定手段还难以将各种组分的分解过程分开。

(2) 人工湿地有机物积累和系统渗透率之间的关系是目前人工湿地研究中值得关注的一个问题。Kawanishi^[11]曾建立了一个数学模型,模拟生物量生长和由生物堵塞造成的土壤渗透

性变化之间的关系。同时人工湿地的使用寿命也是我们关心的问题。简放凌^[8]曾研究了高浓度的工业废水有机物加入土壤后,土壤有机碳和全氮的动态变化可用一级反应动力学方程去模拟。由此推出的预测公式和极限公式可以预测土壤有机碳、全氮的含量和极限值以及达到极限值所需的时间。因此通过建立数学方程来预测人工湿地的使用寿命,为湿地填料的更新提供科学依据。

(3) 湿地有机物分解的因子是已知的,但有关机制并非完全清楚,大有进一步研究的必要。随着土壤有机物研究的进展和电子计算机的应用,一系列的土壤有机物动态模型问世,如 Parton 等(1987,1989)的 CENTURY 模型。一些影响有机物动态变化的因子在实验中不好加以控制,通过建立湿地有机物动态模型,让计算机模拟影响因子,这样我们可以加深对系统中有机物分解和积累机制的理解。因而湿地系统有机物动态模型已成为目前研究的热点。

参考文献:

- [1] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 2000, **16** (3): 83 – 86.
- [2] Chris C Tanner, James P S Sukias, Martin P Upsdell. Organic matter accumulation during maturation of gravel – bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters[J]. *Wat Res*, 1998, **32** (10): 3 046 –

3 053.

- [3] Chris C Tanner, James P Sukias. Accumulation of organic solids in gravel – bed constructed wetlands. 1995, **32**(3): 229 – 239.
- [4] Jones J H and Taylor G S. Septic tank effluent percolation through sands under laboratory conditions[J]. *Soil Sci*, 1965, 99: 310 – 309.
- [5] Laak R. (1986). Wastewater Engineering Design for Unsewered Areas. 2nd edition. Lancaster: Technomic.
- [6] Thomas R E, Schwartz W A and Bendixen T W. Soil chemical changes and infiltration rate reduction under sewage spreading[J]. *Soil Sci Am Proc*, 1966, 30: 641 – 646.
- [7] De Vries J. Soil filtration of wastewater effluent and the mechanism of pore clogging[J]. *Water Pollut Control Fed*, 1972, 44: 565 – 573.
- [8] 简放凌. 高浓度工业废水有机物在土壤中的动态变化及其预测研究[J]. 农业环境保护, 1995, **14** (2): 72 – 74.
- [9] ristoph Plataer, Klaus Mauch. Soil clogging in vertical flow reed beds – mechanisms, parameters, consequences and solutions? [J]. *Wat Sci Technol*, 1997, **35** (5): 175 – 181.
- [10] Ryszard Blazejewski and Sadzide Murat – Blazejewska. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow[J]. *Wat Sci Tech*, 1997, **35**(5): 183 – 188.
- [11] Kawanishi T, Kawashima H, Chihara K and Suzukj M. Effect of biological clogging on infiltration rate in the soil treatment systems[J]. *Wat Sci Tech*, 1989, **22** (3 – 4): 101 – 108.
- [12] Hey D L, Kenimer A L and Barrett K R. Water quality improvement by four experimental wetlands[J]. *Ecol Eng*, 1994, 3: 381 – 397.
- [13] Rickerl D H, Janssen L L and Woodland R. Buffered wetlands in agricultural landscapes in the Prairie Pothole Region: environmental, agronomic, and economic evaluations[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **55**(2): 220 – 225.
- [14] 缪绅裕,陈桂珠,等. 人工湿地中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. 生态学报, 1999, **19**(2): 236 – 241.
- [15] Reddy K R, Conner G A O and Gale P M. Phosphorus sorption capacities of wetland soils and stream sediments impacted by dairy effluent [J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 438 – 447.
- [16] Cooper P F and Findlater B C. Constructed wetlands in water pollution control. Pergamon Press, 1990. 77 – 96.
- [17] 曹向东,王宝贞,蓝云兰,等. 强化塘——人工湿地复合生态塘系统中氮和磷的去除规律[J]. 环境科学研究, 2000, **13**(2): 15 – 19.
- [18] Jacobs T C and Gilliam J M. Riparian losses of nitrate from agricultural drainage waters[J]. *J Environ Qual*, 1985, **14**: 472 – 478.
- [19] Eriksson P G and Weisner S E B. Nitrogen removal in a wastewater reservoir: The importance of denitrification by epiphytic biofilms on submersed vegetation[J]. *J Environ Qual*, 1997, **26**: 905 – 910.
- [20] Xue Y, Kovacic D A, Gentry L E, et al. Insitu measurements of denitrification in constructed wetlands[J]. *J Environ Qual*, 1999, **28**: 263 – 269.
- [21] Martin H W, Ivanoff D B, Graetz D A and Reddy K R. Water table effects on Histosol drainage water carbon, nitrogen, and phosphorus[J]. *J Environ Qual*, 1997, **26**: 1 062 – 1 071.
- [22] 张甲耀,等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(3): 323 – 327.

(上接第 473 页)

- [7] David A K, David M B, Gentry L E, Starks K M, and Cooke R A. Effectiveness of constructed wetlands in reducing nitrogen and phosphorus export from agriculture tile drainage[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 1 262 – 1 274.
- [8] Rosenberg R, Elmgren R, Fleischer S, et al. Marine eutrophication case studies in Sweden[J]. *Ambio*, 1990, 19: 123 – 125.
- [9] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望[J]. 地球科学进展, 2000, **15**(6): 666 – 672.
- [10] 宁 远,沈承珠,谭炳卿,等译. 河流保护与管理[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997. 191 – 202.
- [11] 丁疆华,舒 强. 人工湿地在处理污水中的应用[J]. 农业环境保护, 2000, **19**(5): 320 – 封三.
- [12] Hey D L, Kenimer A L and Barrett K R. Water quality improvement by four experimental wetlands[J]. *Ecol Eng*, 1994, 3: 381 – 397.
- [13] Rickerl D H, Janssen L L and Woodland R. Buffered wetlands in agricultural landscapes in the Prairie Pothole Region: environmental, agronomic, and economic evaluations[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **55**(2): 220 – 225.
- [14] 缪绅裕,陈桂珠,等. 人工湿地中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. 生态学报, 1999, **19**(2): 236 – 241.