

论述与研究

堵塞对复合垂直流湿地水力特征的影响

詹德昊, 吴振斌, 张 晟, 成水平, 傅贵萍, 贺 峰
(中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北
武汉 430072)

摘 要: 复合垂直流人工湿地系统(IVCW)堵塞后其水力特征会发生变化,通过示踪剂对小试和中试系统堵塞前后的水力特征进行了研究。结果表明,堵塞后 IVCW 出水流量减小,小试系统实际停留时间由堵塞前 21.3 h 延长至 32.5 h,中试系统实际停留时间从 19.4 h 延长至 26.8 h。IVCW 堵塞后容易造成下行池表面积水,既恶化了卫生条件又降低了系统的处理能力。

关键词: 人工湿地; 堵塞; HRT; 水力特征; 示踪试验

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2003)02-0001-04

Influence of Clogging on the Hydraulic Characteristics of Integrated Vertical Flow Constructed Wetland

ZHAN De-hao, WU Zhen-bin, ZHANG Sheng, CHENG Shui-ping,
FU Gui-ping, HE Feng

(State Key Lab of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430072, China)

Abstract: Variation in the hydraulic characteristics of integrated vertical flow constructed wetland (IVCW) will occur after it is clogged. Study was made by using tracer on the hydraulic characteristics of small-scale test system and pilot-scale system before and after their clogging. The result indicated that the outflow from IVCW is decreased when it is clogged. In the small-scale system, the hydraulic retention time (HRT) is extended from 21.3 h to 32.5 h, and in the pilot-scale system HRT is extended from 19.4 h to 26.8 h. The clogging of IVCW will result in free water (water log) on the surface of down-flow chamber, which will not only deteriorate the sanitary condition but also decrease the treatment capacity of the system.

Keywords: constructed wetland; clog; HRT; hydraulic characteristics; tracer experiment

目前国内外关于人工湿地堵塞的研究很少。新西兰的水和大气研究所 Tanner C C 等研究了人工湿地堵塞后有机物的积累情况^[1],波兰农业大学的

Ryszard Blaze Jewski 等人初步研究了潜流人工湿地处理生活污水的堵塞现象,并提出一个简单的理论方程来描述堵塞后的孔隙率变化^[2]。德国柏林大学

基金项目: 国家杰出青年基金项目(39925007); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-102)

的 Christoph Platzer 和 Klaus Mauch 综述了垂直流芦苇床堵塞的机理、参数和后果,但并未提出实际的解决办法^[3]。维也纳农业大学的 J. Laber, R. Haberl, R. Perfler 和 G. Langergraber 等人研究了复合垂直流湿地的堵塞与水头损失的变化规律^[4]。国内关于人工湿地堵塞的现象有一些报道^[5],但未见针对湿地堵塞的具体研究。

复合垂直流人工湿地系统(Integrated Vertical Flow Constructed Wetland, IVCW)是在“九五”期间由中科院水生生物研究所与德国科隆大学、奥地利维也纳农业大学等共同承担的欧盟国际合作项目(合同号:ERBIC18CT960059)中首先提出的。经过一系列的小试、中试,该系统已在深圳、上海等地大规模地应用于生活污水处理、景观水体水质改善以及农业灌溉用水回用等方面,取得了较好的效果。为了保障该系统长期稳定的运行,通过小试和中试研究了系统堵塞前后水力特征的变化,并分析了堵塞发生的原因以及可能的对策。

1 材料与方 法

1.1 IVCW 的基本结构

IVCW 由下向流池和上向流池组成,两池中间设有隔墙,底部连通。下行池和上行池中均填有不同粒径的砂和砾石,其中下行池的砂层比上行池厚 10 cm。两池底部均设颗粒较大的砾石层连通。其基本构造如图 1 所示。

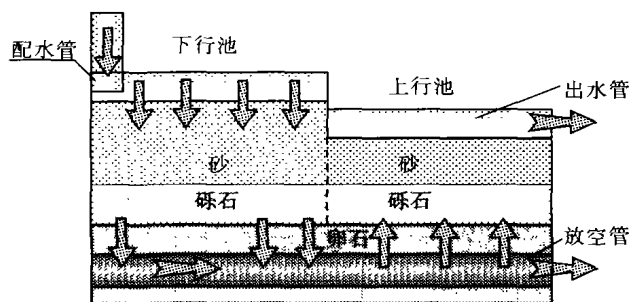


图 1 IVCW 构造示意图

小试系统上行池和下行池的平面尺寸均为 1 m × 1 m,其中上行池填层深为 0.45 m,下行池填层深为 0.55 m,粒径从上到下逐渐减小,表层是粒径 < 4 mm 的砂(厚为 25~35 cm),中间铺 10 cm 厚、粒径为 4~8 mm 的砾石,底部采用粒径为 16~32 mm 的卵石作为排水层。在下行池内种植美人蕉,上行池内种植石菖蒲。

中试系统上行池和下行池的平面尺寸均为 9 m

× 9 m,其基本构造及栽种植物种类与小试系统相同。

1.2 运行工况

小试和中试系统均采用间歇方式运行,水力负荷为 800 mm/d,分 4 次进入,间隔时间为 5 h。

1.3 示踪剂的选择

对于人工湿地停留时间分布的研究,通常采用的示踪剂有电解质、染料以及放射性同位素等。根据刘文兵等人对直接红棕(RN)、阳离子红(IGL)、硫化草绿(615)、硫化黑(B2RN)以及 NaCl 的比较,认为人工湿地对 NaCl 示踪剂的吸附能力最小,是测定其停留时间分布的最佳示踪剂^[6],因此采用 NaCl 作为示踪剂。

1.4 出水流量变化与水量平衡的测定

在一次进水后,测定中试系统单位时间的出水流量以及最终出水总量,并与进水总量相比较以了解系统水量损失和系统内部空间的状况。

1.5 水力停留时间的测定

采用刺激—响应法,即首先在进水中投加 NaCl,使其电导率上升到背景值的 10 倍以上,再瞬时一次性投加到 IVCW 系统中,然后维持系统正常运行。在系统出水口连续监测出水电导率的变化至恢复到背景值时终止试验。

电导率的测量采用维也纳农业大学提供的 WTW LF197-S 型电导仪,该仪器隔 15 min 自动测定一次,并将数据储存在 128 K 的 Macro Data Logger 中。

2 结果与讨论

2.1 系统出水流量变化与水量平衡

IVCW 中试系统水力负荷为 800 mm/d 时,堵塞前后出水速率变化如图 2 所示。

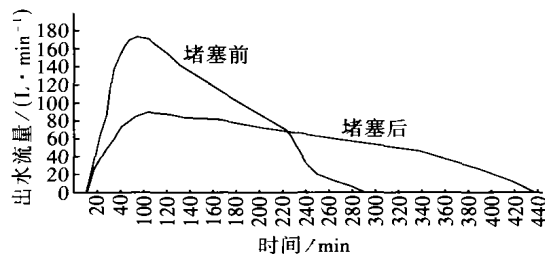


图 2 中试系统堵塞前后的出水速率变化

由图 2 可知,堵塞前后系统出水流量达到最高峰所经历的时间相近,但堵塞后最大流量明显低于堵塞前(由堵塞前的 170 L/min 降至 89 L/min),表

明湿地系统堵塞后水流不畅。

IVCW 系统的一个进、出水周期从堵塞前的不足 5 h 延长至堵塞后的约 8 h, 而两次进水的间歇期为 5 h。因此系统堵塞后前一个周期的进水尚未完全流出, 后一个周期就已经开始进水, 造成堵塞后污水在系统内部积累, 并在下行池表面形成集水, 从而阻碍了空气中的氧气向填料层扩散, 导致下行池供氧不足, 系统处理效果下降。

中试系统堵塞前后累积流量的变化见图 3。虽然堵塞前后两条曲线达到峰值的时间不同, 堵塞后的累积流量曲线增长缓慢, 出水流量小, 持续时间长, 但二者最终都趋于同一值, 而且与进水总量相差不多。由于试验湿地面积小, 水分蒸发以及植物蒸腾作用可以忽略, 同时试验过程中没有降雨, 可见系统水量损失不大, 进、出水总量基本平衡。

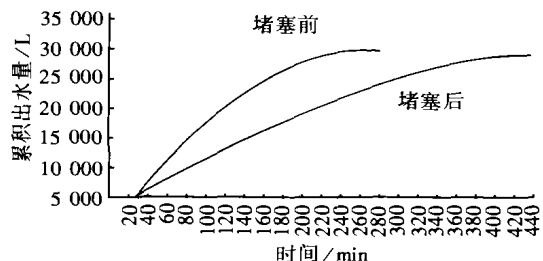


图 3 中试系统堵塞前后的累积流量变化

2.2 小试系统水力停留时间变化

水力停留时间是人工湿地设计中使用最广泛的参数之一。人工湿地在经过一段时间的运行后, 一些无机物以及难降解有机物会积累在湿地中而堵塞填料间的空隙, 改变系统的水流路径, 增大 IVCW 内部水流的混合、短流以及回混, 从而延长了该系统的实际水力停留时间。

NaCl 示踪试验结果如图 4 所示。

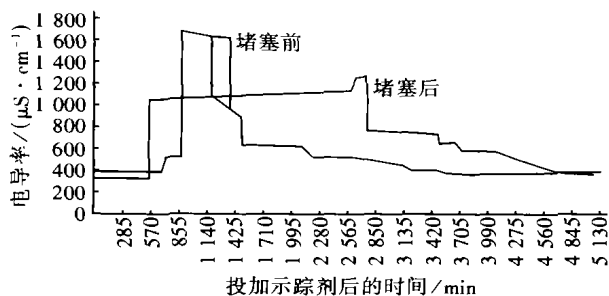


图 4 小试系统堵塞前后水力停留时间的变化

从图 4 可以看出, IVCW 系统堵塞前比堵塞后的示踪剂流出时间短, 示踪剂浓度变化大, 出水电导

率峰值高, 说明堵塞后系统内部水力特征发生了改变。

根据 IVCW 的几何尺寸、填料的孔隙率以及出水平均流量可以计算出污水在 IVCW 中的理论停留时间^[7]:

$$t_{th} = \frac{nV}{Q} \times 24 \quad (1)$$

式中 t_{th} ——理论水力停留时间, h

n ——填料孔隙率, 取 0.32

V ——IVCW 体积, m^3

Q ——系统平均流量, m^3/d

根据计算, 当平均流量为 $0.8 m^3/d$ 时的理论水力停留时间为 13.4 h。

污水在人工湿地系统中的实际停留时间 t_m 的平均值可以通过下式求得^[7]:

$$t_m = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt \quad (2)$$

采用辛普生公式对试验结果进行数值分析, 计算得 IVCW 堵塞前的 $t_m = 21.3 h$, 堵塞后的 $t_m = 32.5 h$ 。可见小试系统堵塞后的水力停留时间延长了 52.6%, 说明堵塞后湿地系统内部的短流及混流增强。

2.3 中试系统水力停留时间的变化

中试系统自 1999 年建成以来, 一直运转良好。2001 年进行了冲击负荷试验, 水力负荷最高达到 $2000 mm/d$, 造成了中试系统一定程度的堵塞。在下行池表面形成一层毯状的致密污泥层, 阻挡了污水下渗, 导致下行池表面长期积水, 最高时积水可达 30 cm。在中试系统堵塞的状态下, 按上述方法进行了示踪剂试验, 并与堵塞前的数据相比较, 如图 5 所示。

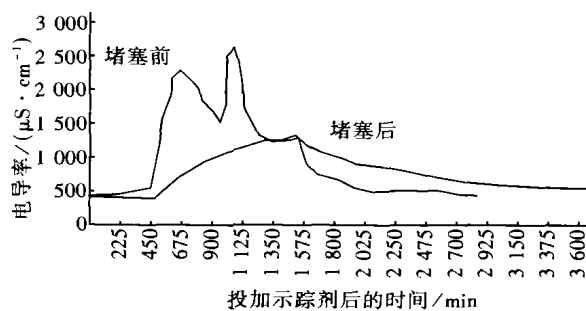


图 5 中试系统堵塞前后水力停留时间的变化

与小试系统相同, 中试系统堵塞前示踪剂流出时间短, 最大流量大, 说明堵塞后污水在基质内的渗透速度下降。

根据式(1)、(2)计算,理论停留时间为 13.4 h;堵塞前的实际平均停留时间为 19.4 h,堵塞后的实际停留时间延长至 26.8 h,比堵塞前延长了 38%。

美国环保局的研究表明^[8],潜流型人工湿地推流床堵塞后会形成表面流,从而使得水力停留时间减小。其主要原因是堵塞后一部分污水不进入填料层,而是直接经湿地表面流出,因此减少了实际水力停留时间。而对于 IVCW,由于其水流路径比较特殊,污水必须先向下流动经过下行池,然后才能向上流动经上行池流出,堵塞后的填料渗透系数减小,水流渗透速度减缓,污水流线由于回混等原因延长,因此实际水力停留时间不减小,反而延长。

堵塞造成 IVCW 水流不畅,实际水力停留时间延长,极易造成下行池表面严重滞水。这一积水层阻碍了空气中的氧气进入基质层,造成 IVCW 的好氧微生物活性降低,因此堵塞后 IVCW 对 BOD_5 、COD 去除率下降。同时,由于堵塞导致填料表面积水,使得蚊蝇更容易滋生,卫生条件恶化。

人工湿地堵塞后,目前还没有很好的恢复对策。国外流行的做法是让堵塞后的床体经过几个星期的停床修整来部分恢复渗透性,而轮休期的长短则取决于天气条件。

3 结论

① IVCW 堵塞后,系统的水力特征发生了改变,出水流量减小,水力停留时间延长。

② 试验表明,IVCW 小试系统实际水力停留时间:堵塞前为 21.3 h,堵塞后延长至 32.5 h;中试系统堵塞前为 19.4 h,堵塞后延长至 26.8 h。

③ IVCW 系统堵塞后造成了下行池的表面积水,既恶化了周边卫生条件,又降低了系统对有机物的去除能力,因此在 IVCW 的设计、施工以及运行管理中应尽量避免堵塞现象的发生。

致谢:感谢奥地利维也纳农业大学提供实验仪

器;参与研究工作的还有邱东茹、陈德强、周巧红、徐光来、杨涛、王雄辉、陆国胜、何芳、陶菁、邓萍、刘爱芬、张利华等同志,夏宜铮研究员,詹发萃、刘保元、邓家齐、谭瑜云、庄德辉副研究员,作者在此对他们的贡献表示诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] Tanner C C, Sukias J P. Accumulation of organic solids in gravel - bed constructed wetlands [J]. *Wat Sci Tech*, 1995, 32: 229 - 240.
- [2] Ryszard Blazejewski, Sadzide Murat - Blazejewska. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow [J]. *Wat Sci Techn*, 1997, 35: 183 - 188.
- [3] Platzer C, Mauch K. Soil clogging in vertical flow reed beds - mechanism, parameters, ... consequences and ... solutions [J]. *Wat Sci Tech*, 1997, 35: 175 - 181.
- [4] Laber J, Haberl R, Perfer R, *et al*. Influence of substrate clogging on the treatment capacity of a vertical - flow constructed wetland system [A]. In *Proceeding of 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control* [C]. Floria, 2000.
- [5] 朱彤,许振成,胡康萍,等.人工湿地污水处理系统应用研究 [J]. *环境科学研究*, 1991, 4(5): 17 - 22.
- [6] 刘文兵,史建福,黄时达.人工湿地床示踪剂的研究 [J]. *四川环境*, 1995, 14(4): 11 - 15.
- [7] 许保玖. *当代给水与废水处理原理* [M]. 北京:高等教育出版社, 1992.
- [8] USEPA. *Constructed wetlands treatment of municipal wastewater* [M]. EPA/625/R - 99/010, 1993.

作者简介:詹德昊(1972 -), 男, 湖北红安人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为环境微生物学。

电话:(027)87214832(O) 87413089(H)

E-mail: dehao_zhan@sina.com

收稿日期:2002 - 10 - 08

以水资源的可持续利用 支持经济社会的可持续发展