

反应器理论在复合垂直流构建湿地水流流态研究中的应用

付贵萍¹, 吴振斌¹, 任明迅¹, 贺锋¹, Alex Pressl², Reinhard Perfler² (1. 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, 武汉 430072; 2. 维也纳农业大学, 奥地利)

摘要: 运用反应器理论研究了一种新型的复合垂直流构建湿地系统(IVCW)的水流流态, 由示踪剂试验得到水流停留时间分布(RTD), 从而确定了 IVCW 在水力负荷为 200 ~ 800 mm/d 时, 停留时间为 19 ~ 35h, 并由 RTD 曲线的特征值确定 IVCW 的水流流态介于理想推流与完全混合流之间, 同时应用离散流模型, 不仅较好地模拟了 IVCW 的实际水流流态, 还得到了水流的 Peclet 准数在 11 ~ 19 之间. 通过有植物与无植物系统的对照发现植物根系有利于 IVCW 的水流流态接近理想推流状态.

关键词: 复合垂直流构建湿地; 停留时间分布; 离散流模型; 理想推流

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2002)04-05-0076

Application of the Reaction Theory to Flow Pattern on the Integrated Vertical Flow Constructed Wetland

Fu Guiping¹, Wu Zhenbin¹, Ren Mingxun¹, He Feng¹, Alex Pressl², Reinhard Perfler² (1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Agricultural Sciences Vienna, Austria)

Abstract: This study was conducted to determine the flow pattern of the integrated vertical flow constructed wetland (IVCW) by using the reaction theory. The retention time distribution (RTD), obtained by tracer experiment, showed the retention time was between 19 and 35h under 200 ~ 800 mm/d hydraulic loading rate, and the actual flow pattern was between the ideal plug flow and continuous stirred flow based on the characteristic value of the RTD. Furthermore, the dispersed flow model was found adequate in simulating the actual flow pattern of the IVCW and the Peclet number was determined between 11 and 19. Comparison the planted and unplanted IVCW, the plant root was found favorable for the flow pattern to approximate the ideal plug flow.

Keywords: integrated vertical flow constructed wetland; retention time distribution; dispersed flow model; ideal plug flow

作为具有湿地特征和功能的人工湿地,其内部的水流状况决定湿地生境的理化性质及营养物质的输入输出,因而直接影响污水的净化效果.然而,由于受湿地结构、植物根系、生物膜等多种因素的影响,湿地的水流状况十分复杂,目前这方面的研究工作较少,在很大程度上限制了人工湿地处理效率的提高,不利于该项技术的合理使用和不断发展.

本文提出的复合垂直流构建湿地(Integrated Vertical Flow Constructed Wetland, IVCW)是一种具有独特下行流-上行流复合水流方式的湿地系统,它使水流更加充分地流过整个处理基质,解决了以往渗滤湿地“短路”的

问题,并且形成了好氧与厌氧条件并存的复合水处理结构,显著提高了系统脱氮效果^[1].目前该类型湿地经过3年小试、中试的研究,已在深圳洪湖公园、观澜高尔夫球会、龙岗区田脚河等处建立了日处理量均超过1000t的城市及生活污水处理工程,取得了满意的水质净化效果,IVCW正在污水处理的实践中得到推广和应用.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(39925007); 欧盟国际科技合作项目(ERBICI 8CT960059)

作者简介: 付贵萍(1970~),女,贵州六盘水人,博士生,主要从事环境工程与生物净化等方向的研究.

收稿日期: 2001-07-21; **修订日期:** 2001-10-14

为了深入研究构建湿地的净化机理,本文应用生化反应工程中的反应器理论研究 IVCW 作为生化反应器所具有的水流流动特征,揭示 IVCW 中水流流态优于其他类型湿地的关键所在,为构建湿地优化设计和高效运行提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 IVCW 简介

IVCW 由串联的 2 个面积均为 1 m×1 m、深为 1 m 池组成,2 池剖面如图 1 所示.池中填有石、砂等基质.2 池基质的构成相同,底部均为厚度为 15 cm、粒径为 40~80 mm 的碎石,上部是粒径为 0~4 mm 的细砂,不同的只是第一池细砂层厚度为 55 cm,第二池细砂层厚度为 45 cm.2 池下层相通,并铺设导流管,上层设隔墙.湿地底部顺水流方向有 0.5% 的坡度.1、2 池分别种植菰(*Zizania caduciflora*)和菖蒲(*Acorus calamus*),种植密度为 38~41 株/m². IVCW 的处理流程为经初沉淀的污水首先均匀分布在第 1 池基质表面,然后垂直向下流过砂层、碎石层和导流管,进入第 2 池底部,再向上经过第 2 池的各基质层,最终被第 2 池基质表面均匀布置的收集管收集,排出系统,污水由此完成第 1 池下行流,第 2 池上行流的复合水流过程.在试验中为了解植物根系对水流的影响,另构筑一个具有相同构造的未种植植物的 IVCW 以便进行有无植物的比较.

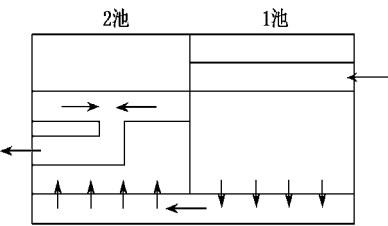


图 1 IVCW剖面图

Fig.1 Cross section diagram of IVCW system

IVCW 所处理的污水源于武汉东湖水果湖湖汉的富营养化水体.试验期间系统的水力负荷为 200、400、500、800、1200 mm/d,采取间歇进水方式,即每天所处理的污水分数次均匀投

配到湿地系统中.

1.2 示踪剂试验

采用生化反应工程中脉冲-响应法,即在系统进水中加入一种示踪剂脉冲,同时在系统出水中观测系统对此脉冲的反应^[2].常用的示踪剂有染料类或卤化物等多种物质,经比较试验,选择被湿地基质吸附较小(回收率为 90% 以上)的氯化钾(KCl)作为示踪剂,脉冲响应则通过连续监测系统出水的电导率变化来获得.示踪剂投加量为使进水电导值增至 3000 μS/cm 所需的 KCl 量,出水的电导率每 5 min 测定一次,数据连续被记录在相连的记录仪中,测定直至电导恢复至未加示踪剂时的背景值为止.每一水力负荷均进行 3 次示踪剂试验,选取示踪剂回收率最高的一次进行结果分析.试验中电导测定仪为 Profiline Conductivity Meter LF 19FS,数据记录仪为 Macro Data Logger 128 K,上述仪器均由维也纳农业大学提供.

2 结果与讨论

2.1 IVCW 停留时间分布

反应器理论认为要获取反应器中的水流状态最直接的方法就是示踪剂试验^[2].图 2 为不同水力负荷时示踪剂试验的结果,图中 2 条曲线都显示了示踪剂在试验开始以后逐渐流出系统的过程,其中在一段时间间隔后,流出量达到

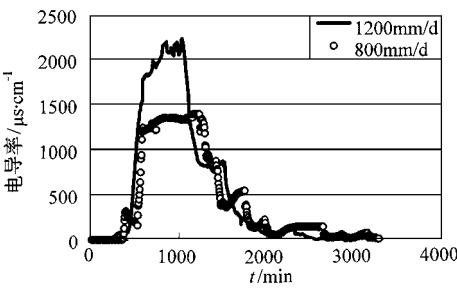


图 2 不同水力负荷下 IVCW 停留时间分布曲线

Fig.2 Retention time distribution curve under different HLR in IVCW

最大值.这一过程实际上反映了水流在 IVCW 这一反应器中停留的状况,因而曲线被称为停留时间分布(RTD).根据图中 RTD 曲线的形状可看出每个流体单元流经的停留时间

不一致,水流在整个介质中呈不均匀流动状态.造成此状况的原因是由于系统中植物根系的延伸、固体物沉积、生物膜的形成等使基质内部容水间隙分布不均,另外液流本身也有扩散作用的存在.RTD曲线最后的拖尾较长反映了一部分流体的停留时间很长,说明 IVCW 内水流还存在滞留区.

由于 RTD 的形状反映了流体流动的状况,有必要对其进行定量地描述.该类型曲线具有 2 个特征值,一为均值,即平均停留时间 τ ,表达式为:

$$\tau = \frac{\sum t c(t) \Delta t}{\sum c(t) \Delta t}$$

另一特征值为方差 σ_0^2 ,表示停留时间的分散程度,表达式为:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum t^2 c(t) \Delta t}{\sum c(t) \Delta t} - \tau^2$$

根据曲线 RTD 上各点的试验数据,并由以上 2 表达式可得 IVCW 在各水力负荷时水流的平均停留时间与方差,见表 1.表中水力负荷为 500 mm/d 时,方差 σ_0^2 最小,表明水流分散程度最小,流体流出系统较集中;而水力负荷为 200 mm/d 时的方差 σ_0^2 最大,说明此时水流比较分散.反应器理论认为流态有 2 种理想情况,一是理想推流,即同时进入反应器的流体经过相同的路径,以同样的停留时间流出反应器,分布曲线 RTD 方差 $\sigma_0^2 = 0$.另一种流态为理想的完全混合流,这时反应器中的水流呈现完全混合状态,反应器内每一处的反应物浓度均相同,分布曲线 RTD 方差 $\sigma_0^2 = 1^{[3]}$.表 1 中方差 $0 < \sigma_0^2 < 1$,证明湿地实际反应器流动状况介于理想推流和完全混合流之间.然而,目前在湿地设计中均假设水流呈推流^[4~5],这样就可能过于理想化地估计实际水流状况,同时在确定停留时间时,若按照推流的定义,即水流同时流出湿地的时间来计算,表达式为:

$$t_{\text{推}} = nV/Q$$

式中, n 为湿地介质的孔隙率; $t_{\text{推}}$ 为推流条件下的停留时间(h); V 为系统的几何体积(m^3);

Q 为湿地系统的流量(m^3/d).

表 1 复合垂直流构建湿地系统中
不同水力负荷下污水停留时间

Table 1 Hydraulic retention time under different
hydraulic loading rate in IVCW

水力负荷 / $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	σ_0^2	τ/h	$t_{\text{推}}/\text{h}$
800	0.8	0.17	19	11
500	0.5	0.08	35	16
400	0.4	0.20	23	22
200	0.2	0.23	24	43

按此计算所得的停留时间 $t_{\text{推}}$ 与按 RTD 所得到的平均停留时间 τ 相比(表 1),可看到两者有显著差异,对于 IVCW 来说,推流的假设在多数情况下会过低估算实际停留时间.

确切掌握湿地反应器中水流的流态具有十分重要的意义,这不仅是因为可以更加确切地掌握停留时间,也是由于水流流态的不同会影响反应结果.对于一级反应,推流不仅比混合流所需要的反应容积小,而且反应物降到同一浓度所需反应时间更短,即反应的效率更高^[3],因此湿地中水流愈接近推流,反应的效果愈好.而相反水流的混合程度高,则不利于湿地反应器净化作用的发挥,由此可见水力负荷为 500 mm/d 的水流 RTD 函数方差最小,水流更接近推流,有利于湿地中污染物的降解反应.此外,在湿地的设计和建造时要充分考虑系统的均匀布水、填料粒径的合理搭配以及植物的选择和栽培,尽量给系统创造推流的条件,使湿地能够充分发挥净化效率.

2.2 IVCW 实际反应器的流动模型

由于湿地实际反应器中水流流态介于理想推流和完全混合流之间,因而尝试采用反应器理论中非理想流动模型——离散流模型对其进行数学模拟.

离散流模型是将一定程度的返流叠加在流体的推流中,并用轴向扩散系数 D_L 来表示轴向分子扩散、涡流扩散及流速分布所产生的扩散.同时该模型还假定同一反应器内轴向扩散

系数不随时间及位置而变,其数值大小仅与反应器的结构、操作条件及流体性质有关^[3]。在离散流模型推导中,引入了 Peclect 准数(P_{ez})这一模型参数,它表示对流运动和轴向扩散传递的相对大小,反映了返混的程度。当 $P_{ez} \rightarrow 0$ 时,对流传递速率较之扩散传递速率要慢得多,为理想完全混合流情况,当 $P_{ez} \rightarrow \infty$ 时,扩散传递相对与对流传递可忽略不计,即为理想推流,可见 P_{ez} 愈大,轴向返混程度愈小。 P_{ez} 亦可通过停留时间分布函数获得。表达式为:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2}{P_{ez}} - \frac{2}{P_{ez}^2} (1 - e^{-P_{ez}})$$

确定了模型参数 P_{ez} ,就可求得离散流模型

对反应物出口与进口浓度比 c/c_0 的预测值:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{4 \alpha \exp\left[\frac{P_{ez}}{2}\right]}{(1 + \alpha)^2 \exp\left[\frac{aP_{ez}}{2}\right] - (1 - \alpha)^2 \exp\left[-\frac{aP_{ez}}{2}\right]}$$

其中: $d = \sqrt{1 + \frac{4 K \tau}{P_{ez}}}$

式中, K 为一级不可逆反应速率常数; c_0 、 c 为进出口反应物浓度; τ 为平均停留时间。

表 2 中列出各水力负荷时湿地出水与进水中 COD_{Cr} 比值的模型预测值和实测值,两者数值上很接近,说明离散流模型能够较好地模拟 IVCW 时的水流流态。表中的 P_{ez} 值小于 100,表明系统存在着返混情况。从 $[COD_{Cr}]/$

表 2 离散流模型对复合垂直流构建湿地实际流态的模拟
Table 2 The predicted COD_{Cr} of outflow based on dispersed flow model

水力负荷/ $m \cdot m \cdot d^{-1}$	t/h	P_{ez}	α	预测 $[COD_{Cr}]/[COD_{Cr}]_0$	实测 $[COD_{Cr}]/[COD_{Cr}]_0$ 的平均值
0.8	19	11	1.2	0.43	0.50
1.2	17	19	1.1	0.40	0.44

$[COD_{Cr}]_0$ 来看, P_{ez} 值愈小,出流浓度愈高,返混程度愈严重,对提高系统的净化效果不利,可见实际反应器偏离理想流动状况的后果就是降低了反应器的处理效果。

文献[6]在对表面流湿地和潜流湿地的研究中得到 P_{ez} 为 3~14,文献[7]研究的单一下行流人工湿地中 P_{ez} 数为 12~15,相比之下,IVCW 水流的 P_{ez} 值较大,为 11~19。由于 P_{ez} 值愈大,则轴向扩散程度愈小,系统水流愈接近理想状态,愈有利于系统的净化作用,可见 IVCW 中虽然仍存在返混现象,但水流流态比以往的其他类型湿地有很大的改善,这也是 IVCW 对污染物去除效果较其他类型湿地有明显提高的原因所在。

2.3 植物根系对 IVCW 水流流态的作用

湿地中的植物是构建湿地有别于其他污水净化工艺的一个重要特征,由于湿地植物的根系深扎于湿地基质中,必然会对水流流态造成影响。图 3 为水力负荷为 500 $m \cdot m / d$ 时有植物与未种植植物的 IVCW 中污水停留时间分布曲

线,从图 3 可以发现,无植物系统中示踪剂比有植物系统提前流出,而且无植物系统 RTD 曲线提前达到峰值。根据 RTD 曲线计算得平均停留时间 τ 与方差 σ^2 如表 3 所示。

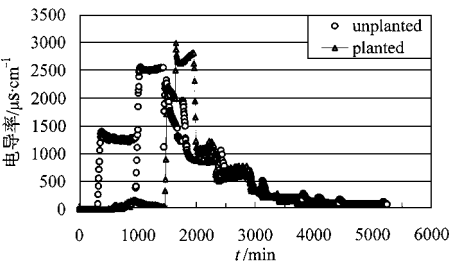


图 3 有植物与无植物 IVCW 中污水停留时间分布曲线
Fig. 3 Retention time distribution curve for the planted and unplanted IVCW

表 3 表明,有植物系统中污水的停留时间均大于无植物系统,这一结果与潜流湿地中的情况正好相反,潜流湿地中有植物系统的停留时间短于无植物系统的停留时间^[8]。仔细研究后发现,潜流湿地中水流水平流过基质,植物根

系减小了上层基质空隙率,导致水流流向更下层的区域,造成污水未能充分均匀地流经整个基质层,使得停留时间缩短,而在 IVCW 中水流是从整个基质表面垂直流入湿地,植物根系的分布使基质中水流路径更加曲折,造成水流停留时间增长,可见潜流湿地和 IVCW 中水流流动特点的差异,导致了植物对水流停留时间影响的截然不同.

表 3 IVCW 有无植物系统中水流分布的对比
Table 3 The comparison of the flow distribution between the planted and unplanted IVCW

水力负荷 / $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	IVCW	平均停留 时间 τ/h	停留时间分布 曲线方差 σ^2	Peclect 准数
500	有植物系统	35	0.08	24
	无植物系统	28	0.33	5
800	有植物系统	19	0.17	11
	无植物系统	15	0.28	6

表 3 中列出的 σ^2 和 P_{ez} 值中,有植物系统 σ^2 均小于无植物系统的 σ^2 ,有植物系统 P_{ez} 值都大于无植物系统的 P_{ez} 值,都一致反映了有植物系统较无植物系统水流分散程度小的趋势,表明植物根系的存在不但没有给水流流态造成负面影响,而且由于植物根系增加了表层砂土的水流通道并沟通基质上下层,有利于水体在垂直方向的流动,促进了系统中水流保持近似理想推流的较好状态.此外,通过表 3 中不同水力负荷下水流流态的比较,水力负荷由 500 增至 800 mm/d 时,有植物系统的 P_{ez} 由 24 降至 11,降幅为 54%,无植物 P_{ez} 由 5 变为 6,幅度为 17%,说明水力负荷的变化对有植物系统的水流扩散程度影响更加明显,对无植物系统影响不大.

3 结论

(1) 根据示踪剂试验所得的 RTD 曲线可以

判断构建湿地中水流流态,并由此确定 IVCW 的实际流态不呈理想推流状态,而是介于理想推流与完全混合流之间,并得到 IVCW 在水力负荷为 200 ~ 800 mm/d 时,水流实际停留时间为 19 ~ 35h.

(2) 离散流模型能够较好地模拟 IVCW 的水流流态,由模型还得到 IVCW 水流的 Peclect 准数范围为 11 ~ 19,由此得知新型构建湿地 IVCW 较以往的表面流和潜流湿地的水流更接近理想推流状态,从而进一步促进了污染物净化效率的提高.

(3) 根据有无植物 IVCW 系统的对照可知,湿地植物根系不仅延长了污水在系统中的停留时间,同时植物根系的延伸有利于水流流态趋近理想推流状态.

参考文献:

1 付贵萍,吴振斌,任明迅等.垂直流人工湿地污水处理系统水流规律的研究.环境科学学报,2001,21(6):726~731.

2 C·P·小莱斯利·格雷迪,亨利·C·利姆编著.废水生物处理理论与应用.北京:中国建筑工业出版社,1989.109~118.

3 戚以政,汪叔雄编著.生化反应动力学与反应器.北京:化学工业出版社,1999.345~379.

4 诸惠昌.新型废水处理工艺——人工湿地的设计方法,环境科学,1993,14(2):39~43.

5 高拯民,李宪法主编.城市污水土地处理利用设计手册.北京:中国标准出版社,1990.242.

6 Kadlec R H, Knight R L. Treatment wetlands. Lewis: Boca Rotan, 1996.251.

7 Machate T et al. Degradation of Phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland. Wat. Res., 1997, 31(3):554~560.

8 Edward L Marsteiner, Anthon G Collins et al. The influence of Macrophytes on subsurface flow wetland hydraulics, 5th international conference on wetland systems for water pollution control. Conference preprint Book 1. Vienna: 1996, II/2-1~7.