

垂直流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响

吴振斌¹, 任明迅^{1*}, 付贵萍¹, 贺锋¹, Alex Pressl² (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, E-mail: wuzb@ihb.ac.cn; 2. 奥地利维也纳农业大学, 维也纳)

摘要:通过在污水中加入示踪剂,研究了人工湿地的水力学特点及其对污水净化效果的影响规律。结果表明,影响水力学各特点的主要原因是湿地植物根系所造成的物理学和生物学上的效应。水力学各特点与污水净化效果之间存在着密切关系:出水快、出水量大的系统具有较好的净化效果;除无植物系统外,停留时间较长的系统有较好的净化效果;容水体积大的系统净化效果也较好;水力负荷则主要通过影响其他各水力学特点而影响净化效果。结果表明,对水力学特点的优化将极大地促进污水净化效果的提高。

关键词:垂直流人工湿地; 示踪剂; 水力学特点; 污水净化效果

中图分类号: 703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)05-05-0045

The Influence of Hydraulic Characteristics on Wastewater Purifying Efficiency in Vertical Flow Constructed Wetlands

Wu Zhenbin¹, Ren Mingxun¹, Fu Guiping¹, He Feng¹, Alex Pressl² (1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China E-mail: wuzb@ihb.ac.cn; 2. Agriculture University of Vienna, Vienna, Austria)

Abstract: The hydraulic characteristics of vertical flow constructed wetlands was investigated, and the influence of these characteristics on wastewater purifying efficiency was studied as an emphasis. The results of the experiments in small scale plots and medium scale plots showed the plant roots, with the physical and biological effects, play a significant role in hydraulics and the wastewater purifying efficiency. The other characteristics such as retention time, effluent velocity and influent load also directly affect the wastewater purifying efficiency of constructed wetland. To get a better understanding of the hydraulics will be crucial to the improvement of purifying efficiency and facilitate the practical use of constructed wetland.

Key words: vertical flow constructed wetland; tracer; hydraulic characteristics; wastewater purifying efficiency

垂直流人工湿地是应用于生活污水和工业污水净化处理的新型技术。它通过人工建立的半自然湿地生态系统中基质、湿地植物和基质内微生物 3 者的共同作用达到净化污水的目的,显示出了较好的净化效果^[1~5]。但由于湿地“黑箱效应”,对污水进入湿地系统后的流动转移过程,即水力学特点缺乏深入的了解,成为限制污水净化效果显著提高的主要原因。目前只有少数工作对湿地运行中和建造设计时的水力学问题有所注意^[6~11],且未得到规律性结论。由于水力学特点涉及到湿地生态系统中污水流动特征及由此引起的污染物质转移,直接影响着污水净化效果,对这一方面研究上的欠缺使得净化效果的提高及该技术的推广应用受到极大限制。

本实验对垂直流人工湿地的水力学特点,包括水力负荷、湿地容水体积(湿地孔隙度)、出水速率和出水量、停留时间,及其对污水净化效果的影响关系进行了研究,以期揭示水力学特点对污水净化效果的影响规律,为全面了解人工湿地内部的污水净化机制,提高这一人工生态系统的污水净化效果及其推广使用提供理论依据和实践经验。

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(Contract No. IC18-CT96-0059)

作者简介: 吴振斌(1956~),男,湖北黄梅人,研究员,博导。主要从事环境生物学、净化与恢复生态学、环境工程等方面的研究。

收稿日期: 2000-12-29

* 通信联系人

1 实验与方法

1.1 垂直流人工湿地系统的结构

人工湿地有小试(Small Scale Plots, SSPs)和中试(Medium Scale Plot, MSP).小试由底部相通的2个大小为1 m×1 m的池子串联而成;中试由底部相通的2个大小为9 m×9 m的池子串联而成(图1).湿地2池底部均铺较大的砂石,上面依次覆以逐渐变小的沙粒.Ⅰ池的沙粒面高出Ⅱ池10 cm.2池栽以不同的水生或湿生植物.Ⅰ池通过表层的布水管使得进水从表层流到底部,通过相通的底部流到Ⅱ池底部,在水的压力下再流至Ⅱ池表面,而后被表层的收集管收集排出.进水方式采用间歇式进水,Ⅰ天进水4次,每次间隔约6 h,以满足各种微生物的需氧要求.

为研究有无植物和不同植物的人工湿地水力学特

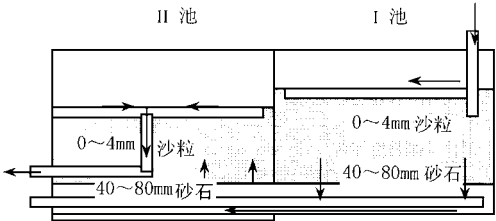


图1 人工湿地系统结构示意图

Fig.1 Structure pattern of constructed wetlands

点差别,在4个具代表性的小试系统开展相应实验.此外,在中试进行不同水力负荷的实验以探索水力负荷对各水力学特点的影响.各湿地系统的植物组合与水力负荷详见表1.

1.2 水力学实验

表1 小试和中试系统中的植物组合与负荷

Table 1 The composes of macrophytes and hydraulic loading in SSPa and MSP					
湿地系统	小 试				中 试
	1 号	2 号	3 号	4 号(对照)	
Ⅰ池植物	宽叶香蒲 (<i>Typha latifolia</i>)	狭叶香蒲 (<i>Typha angustifolia</i>)	蔗草 (<i>Scirpus triqueter</i> Linn)	无植物	菰 (<i>Zezenia latifolia</i>)
Ⅱ池植物	菖蒲 (<i>Iris pesudacorus</i> L)	灯心草 (<i>Juncus effusus</i>)	苔草 (<i>Carex</i> sp.)	无植物	菖蒲 (<i>Iris pesudacorus</i>)
每次进水量/L	200	200	200	200	16200 / 24300
水力负荷/ $\text{m m} \cdot \text{d}^{-1}$	800	800	800	800	800 / 1200
COD _{Cr} 单位面积负荷 / $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	37.36	37.36	37.36	37.36	37.36/56.04

(1)出水速率、出水量的测定 实验在4月~5月的夏季进行.抽取东湖湖水,经蓄水池初步沉淀和定量后作为湿地的进水.在一次进水(进水量200 L)后测量湿地系统的单位时间出水量及最终出水总量.由此可初步了解水体在湿地系统中的流动快慢和湿地内部空间状况及其容水体积.

(2)水体停留时间的测定 加入示踪剂(本实验采用NaCl)到进水中,使水体电导值上升到一定值后进水到湿地中,之后进行正常的间歇式进水.利用水质分析仪跟踪测定各湿地出水电导值的变化情况.仪器可每5 min记录一次数据.至电导值恢复到背景值时停止实验.通过计算可得到水体在湿地内的停留时间及系统对示踪剂的吸附、吸收能力.

2 结果与讨论

2.1 污水净化效果的比较测定

同时以多个水质指标研究比较了不同湿地系统对污水的净化效果.水质测量方法参见文献[12].污水直接取自武汉东湖湖水,各项指标显示湖水已经高于国家地面水质量标准Ⅴ类水标准,属于污染水.其水质各指标详见表2.

表2 人工湿地进水(东湖湖水)水质情况/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Influent qaulity of constructed wetlands

参数	COD _{Cr}	BOD ₅	TSS	KN	TP	IP
平均值	46.7	7.89	10.8	4.37	0.297	0.1086
标准差(SD)	19.2	4.18	5.7	2.8	0.169	0.101

对小试4系统净化效果的比较(见表3)可以看出:人工湿地小试和中试系统对污染物质的去除率都达到了50%~60%以上,有的甚至达到了80%~90%.经过净化处理后的出水水质达到了国家地表水质量标准Ⅲ类水质,部分指标还达到了Ⅱ类水标准.其中,小试

系统中 3 号对污水中的 BOD、TSS、TP 和 IP 等多项指标具有最好的净化效果,1 号系统对 COD、BOD 有着较佳的去除效果;2 号则显示出了最佳的 KN 净化效果,无植物的 4 号对各个指标的净化效果都很差。中试系统对 IP、KN、TP、COD 均具有较好的去除率,而对 BOD、TSS 的去除效果不太理想。

表 3 人工湿地各系统对污染物的去除率¹⁾
(平均值)/ %

Table 3 Removal rates of the constructed wetlands under a hydrological load of 800 mm/d (average value)						
系统	COD _{Cr}	BOD ₅	TSS	KN	TP	IP
1 号	66.6	89.0	80.2	50.3	57.7	- 19.4
2 号	65.0	87.9	78.0	51.1	54.7	- 31.9
3 号	62.3	90.8	84.4	49.5	59.1	- 7.0
4 号	62.6	87.7	79.2	41.0	27.5	- 11.43
中试	66.1	76.7	72.4	63.3	76.7	71.6

1) 水力负荷 800 mm/d

2.2 出水速率、出水量与污水净化效果

小试的 4 个系统中,1 号的初始出水量最大,其次是 3 号 2 号,无植物系统 4 号出水最慢(见图 2)。在出水后 15 min 以前,1 号比 2 号 3 号的出水量都要大。其原因很可能是 1 号的植物宽叶香蒲和菖蒲均具有深扎的根状茎,起到水流通道的作用促进了水体在湿地系统中的垂直流动与水平迁移。此外,粗大根状茎减小了湿地的孔隙度,降低容水体积而使出水量增大。2 号中 I 池植物狭叶香蒲根系也很发达,但 II 池植物灯心草根系为入土不深的小须根,没有达到沟通湿地上下层的程度,所以出水较 1 号慢。3 号的植物均为须根系植物,比 1 号植物粗大的根状茎更有效地增加了水流通通道,且不易侵占湿地自身的孔隙,故出水畅快,出水伊始便达到了最大值。

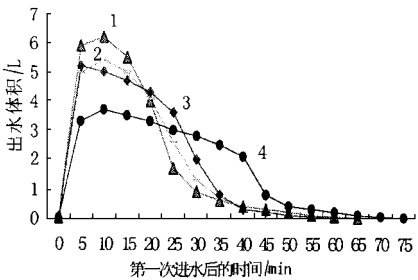


图 2 小试 4 系统出水速率与出水量的比较

Fig.2 Comparison of the effluent velocity and effluent quantity of four SSPs systems

同时可以看出无植物的对照系统 4 号与 1 号、2 号 3 号的出水速率差别十分显著。不仅出水速率最小,单位时间出水量也相差甚远。据此可知,植物根系可以促进水体在湿地中的流动,是影响出水状况的主要因素。此外,植株根系的存在还通过影响湿地容水体积也间接地影响到了出水状况。

出水速率和净化效果之间的关系在 4 个系统中十分吻合:具有最大出水速率的湿地系统 3 号具有最好的净化效果。原因在于具有较大出水速率的湿地系统往往有着发达的根系,而发达的根系给湿地系统内部带来了丰足氧气,增强了微生物的活性。由于须根系较根状茎和地下茎更能起到疏导水流和输导氧气的功能,3 号系统比 1 号具有更佳的污水净化效果。无植物系统 4 号出水速率最慢,净化效果也最差。出水量与净化效果之间的关系也基本一致:有着最大出水量的 1 号和 3 号具有最好的净化效果,出水量小的系统净化效果也较差。

在中试 2 个不同水力负荷的试验中出现了特殊现象:水力负荷增大,出水速率却呈现变小的趋势(图 3)。其原因可能是湿地植物生长过于旺盛,其根系过度伸长和交错使得湿地内部孔隙度下降,沙粒板结而水流不畅导致出水速率变慢。考虑到“出水速率慢的湿地系统净化效果较差”这小试系统中的规律,此现象反映出根系在湿地系统中的一个消极作用。

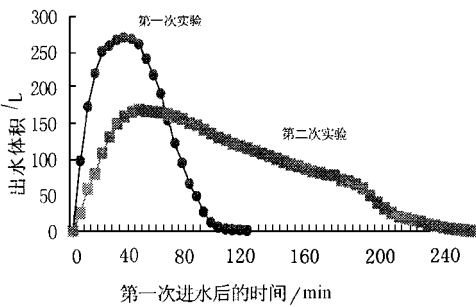


图 3 中试不同水力负荷的 2 次实验出水速率比较

Fig.3 Comparison of the effluent velocity of two experiments in MSP under different hydraulic load

2.3 停留时间与污水净化效果

根据小试的孔隙体积及进水负荷,由公式:

停留时间(d) = $\frac{\text{孔隙体积(L)}}{\text{每天进水负荷(L/d)}}$

可以算出停留时间理论值为 0.66d。小试 4 系统停留时间测量值(具体计算程序与公式另文发表)分别是 1 号

为 1.33 d; 2 号为 1.25 d; 3 号为 1.32 d 和 4 号为 1.30 d。很明显, 4 系统的实测停留时间比理论值都要大 1 倍左右, 究其原因, 是植物根系和基质微生物对示踪剂的吸收作用, 以及系统基质的吸附作用延迟了示踪剂的洗出。

对有植物的系统而言, 停留时间长的系统(1 号和 3 号)由于污水可在湿地系统内部经历更长时间的停留净化, 有着更好的净化效果; 而无植物的对照系统 4 号其较长的停留时间是由于缺少植物根系的水流疏导作用所造成的, 没有这一对应关系。

中试的 2 次实验的停留时间分别为理论值 0.56 d, 0.37 d; 测量值 0.81 d, 0.69 d。变化规律同小试系统类似。同时, 可以发现进水负荷增大时停留时间减小, 根据在小试系统中所得结论, 这不利于污水的净化。但进水负荷太小, 又可能未充分发挥湿地系统的净化功能, 所以进水负荷的大小有必要开展进一步的研究确定, 以找到一个较佳进水负荷。

2.4 水力负荷与污水净化效果

中试进行的不同水力负荷的实验结果表明, 水力负荷不同, 出水速率表现出极大差异。反常的是, 有着更大水力负荷的第 2 次实验的出水速率及其单位时间出水量最大值却比第一次的小(见图 3)。这一结果可能的原因是: 实验时植物正处旺盛生长期, 其过于密集的根系不仅没有了导流作用, 反而使沙粒板结, 流水不畅, 而且根系生长过长将侵占湿地下层的较大空间, 延缓了水从前池到后池的时间。

从图中也可看出, 系统在大的进水负荷(1200 m³/d)比小进水负荷 800 m³/d 下具有较小的停留时间和降低的出水速率与出水量。可见, 系统在 1200 m³/d 负荷下不及 800 m³/d 下的净化效果好。

2.5 湿地容水体积与污水净化效果

人工湿地的容水体积也即其孔隙度, 主要由人工湿地建造所用的基质大小决定, 但也受湿地植物根系和沉积物的影响。一般地, 较大的容水体积能容纳更多的水量, 水体污染物在湿地内部受到较长时间的吸附与吸收转化, 因此对污染物质有着更好的净化效果。

由于 4 个小试系统的基质与进水水源完全一致, 各系统容水体积主要受其中生长的植物根系影响。植物根系降低了容水体积(某些植物发达的地下茎甚至堵住湿地系统的下层大孔隙区, 出现滞流现象), 减少了能长期停留在湿地内部的水量, 不利于污水的净化; 但另一方面, 根系的吸收功能及其对好氧微生物的促进作用加强了净化能力。因此, 本实验中湿地容水体积与污水净化效果之间缺乏对应的线性关系。

2.6 示踪剂洗脱速率与净化效果

出水电导值的大小表明出水所含示踪剂量的多少, 从它的变化可以看出示踪剂每次洗出的量的多少。同时这也反映了植物、微生物及湿地基质对示踪剂的吸收、吸附能力。从图 4 可以看出: 4 号、2 号的出水电导值在加入示踪剂后的第一次进水的冲洗下就出现了一个较高值, 而 3 号和 1 号此时并无显著的升高, 存在一个明显的滞后现象。这说明虽然系统有着相同构造和相同的基质, 但由于不同植物根系的不同吸收能力造成了示踪剂洗出速率的不同。而无植物系统 4 号在第 1 次进水后洗出示踪剂最多也正是缺乏植物根系和湿地内微生物的吸收。从结果来看, 3 号、1 号比 2 号、4 号吸收能力更强。这也从一个方面解释了为什么 3 号、1 号具有较 2 号、4 号更好的净化效果。

中试系统 2 次实验的出水电导变化趋势与小试系统基本相似。

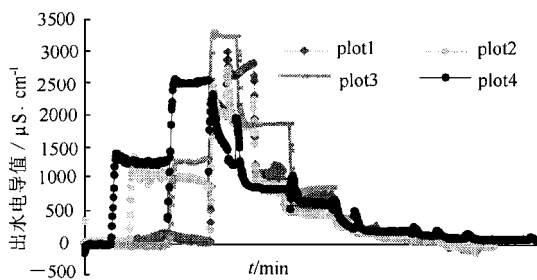


图 4 小试 4 系统的出水电导值变化

Fig. 4 The variation of effluent conductivity values in 4 plots of SSPs

3 结论

(1) 植物根系是除湿地质基外影响水力学特点的主要因素。其对水力学特点造成的物理效应一是减小了湿地容水体积(孔隙体积), 提高了出水量、出水速率; 二是增加了表层砂土的水流通道并沟通基质上下层, 使污水流动迅速, 出水畅快, 缩短了停留时间。虽然根系所造成的这种物理效应不利于污水在系统内的长期停留和微生物的缓慢降解作用, 但根系还具有吸收、转化污染物质的显著功能, 再加上根系周围的富氧环境对好氧微生物活动的促进作用, 这种生物学效应又使其净化效果得到了很大程度的弥补。从这 2 个效应来考虑, 须根系比根状茎、匍匐茎等具有更好的污水净化效果。

(2) 对于有植物系统, 停留时间较长的系统有较好的净化效果。无植物系统由于没有植物根系的导流, 停

留时间也较长但无良好净化效果.在相同的停留时间条件下,无植物系统比有植物系统的污水净化效果要差.

(3) 由于人工湿地中植物根系和微生物的吸收与分解作用以及系统基质的吸附作用,示踪剂在系统中的实际停留时间(即示踪剂的洗脱时间)比理论值要长得多,尤其是在小试系统中.可见人工湿地对 NaCl 等离子型污染物质具有较强的吸收功能,这方面湿地基质显示出比植物根系更主要的作用.

(4) 中试实验结果表明,进水负荷增大引起停留时间、出水速率和出水量的下降,不利于污水的净化处理.但另一方面,进水负荷太小又不能充分发挥湿地的净化潜力.因此湿地系统都存在一个较佳进水负荷.由于湿地较佳进水负荷对提高湿地系统净化效果,准确开展实际应用有着重大意义,有必要在今后的工作中对较佳进水负荷进行研究确定.

致谢 实验及论文写作过程中得到夏宜琤、邱东茹、成水平、况琪军等人的帮助.

参考文献:

- 1 Sherwood C R et al. Subsurface flow wetlands —— A performance evaluation. *Water Environ. Res.*, 1995, **67**(3): 244 ~ 248.
- 2 Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research*, 1998, **18**(2): 393 ~ 399.
- 3 Edward L, Marsteiner et al. The influence of macrophytes on subsurface flow wetland(SSFW) hydraulics. 5th international conference on wetland systems for water pollution control. Vienna: Conference Preprint Book 1, 1996. II/2-1 ~ II/2-7.
- 4 Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands. *Water science and Technology*, 1997, **35**(6): 11 ~ 17.
- 5 Chris C T, James P S Sukias. Organic matter accumulation during maturation of a gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. *Water Research*, 1998, **32**(10): 3046 ~ 3054.
- 6 Machate T et al. Degradation of phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland. *Water Research*, 1999, **31**(31): 554 ~ 560.
- 7 Torres J J et al. Study of the internal hydrodynamics in three facultative ponds of two municipal WSPs in Spain. *Water Research*, 1999, **33**(11): 1133 ~ 1140.
- 8 Nameche T H, Vassel J L. Hydrodynamic studies and modelization for aerated lagoon and waste stabilization ponds. *Water Research*, 1998, **32**(10): 3039 ~ 3045.
- 9 胡康萍.人工湿地设计中的水力学问题研究. *环境科学*研究, 1991, **4**(5): 8 ~ 12.
- 10 王久贤.白泥坑人工湿地水力学计算研究. *广东水力水电*, 1997, (6): 50 ~ 52.
- 11 William J M, Karen M W. Water quality, fate of metals, and predictive model validation of a constructed wetlands treating acid mine drainage. *Water Research*, 1998, **32**(6): 1888 ~ 1900.
- 12 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. *水和废水监测分析方法*(第三版).北京:中国环境科学出版社, 1989.
- 13 William J M, Karen M Wise. Water quality, fate of metals, and predictive model validation of a constructed wetlands treating acid mine drainage. *Water Research*, 1998, **32**(6): 1888 ~ 1900.
- 14 Lantzke I R, Heritage A D et al. Phosphorus removal rates in bucket size planted wetlands with a vertical hydraulic flow. *Water Research*, 1998, **32**(34): 1280 ~ 1286.
- 15 Chris C T, John S C et al. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm waste - waters in constructed wetlands. *Water Research*, 1995, **29**(1): 17 ~ 26.
- 16 Breen P F. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetland for wastewater treatment. *Water Research*, 1990, **24**(6): 689 ~ 697.
- 17 张甲耀, 夏盛临等.潜流型人工湿地污水处理系统的研究. *环境科学*, 1998, **19**(4): 36 ~ 39.