

垂直潜流人工湿地中有机物去除动态规律研究

叶建锋¹, 徐祖信², 李怀正¹

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:在分析垂直潜流人工湿地不同高度有机物去除率及其形态变化的基础上, 推求出各形态有机物在垂向沿程的平均去除速率, 建立了进水浓度和进水水力负荷规律曲线. 结果表明, 在本实验条件下, 垂直潜流人工湿地中有机物的去除主要集中在布水管至布水管下 10 cm 的基质层内, 进水水力负荷越小, 该基质层内有机物的去除率也越高; 在以粗砂作为垂直潜流人工湿地的基质、进水水力负荷 $\leq 0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的条件下, 垂直潜流人工湿地对有机物去除的有效高度为 60 cm; 布水管下 10 cm 基质层不同类型有机物的平均降解速率都处于最大, 随着垂向沿程深度的增加, 各类型有机物的平均降解速率都呈较大幅度递减趋势; 以砂子为基质的垂直潜流人工湿地进水浓度和进水水力负荷规律曲线可表示为 $(c_{\text{in}} - c_{\text{out}}) \times q = 1\,107.02 - 2.96 c_{\text{in}} \times q$.

关键词:人工湿地; 有机物; 动态规律; 去除; 垂直潜流

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)08-2166-06

Dynamic Rule of Organic Matter Removal in Vertical-Flow Constructed Wetland

YE Jian-feng¹, XU Zu-xin², LI Huai-zheng¹

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based upon the analysis of the removal rate and form change of the organic pollutants with the different height of the vertical-flow constructed wetland, it comes to the conclusion of the average longitudinal removal rate of variant forms organics and presents the influent concentration and the hydraulic load curve. The results indicated that: Under this experimental condition, the reduction of the organics in the vertical subsurface flow constructed wetland mainly occurred within the 0-10 cm substrate below the pipe distributor. In the meantime, the smaller the hydraulic load of influent, the higher the removal ratio of the organic pollutants in the substrate section. Under the condition that the vertical subsurface flow constructed wetland used the coarse sands as the substrate and kept the influent hydraulic load less than or equal to $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, the effective height of the organics removal was 60 cm. It also showed that the average degradation rate of different kinds of the organic pollutants has a maximum value in the 0-10 cm substrate section below the pipeline. Moreover, the degradation ratio of different kinds of the organics is in significant decreasing tendency with increasing the depth of the longitudinal direction along the pipe. Using sands as the substrate in the vertical subsurface flow constructed wetland, the relationship of the influent concentration and influent hydraulic load can be expressed by formula: $(c_{\text{in}} - c_{\text{out}}) \times q = 1\,107.02 - 2.96 c_{\text{in}} \times q$.

Key words: constructed wetland; organic matter; dynamic rule; removal; vertical-flow

人工湿地污水处理技术是 20 世纪 70 年代兴起的一种污水处理生态工程技术, 由于具有投资少、能耗低、管理方便等优点^[1,2], 正逐渐被应用于广大中小城镇和乡村地区的生活污水处理中^[3,4]. 垂直潜流人工湿地作为人工湿地的一种类型, 因其充分利用了湿地的空间, 发挥了系统间的协同作用, 使污水处理能力得到了大幅度提高, 且占地面积相对较小, 因而在污水处理中已经得到了广泛地应用^[5].

垂直潜流人工湿地对生活污水中的有机污染物有较好的去除效果, 废水中 BOD 和 COD 的去除率分别可达 85% ~ 95% 和 80% 以上^[6~16], 但湿地内部有机物的去除转化规律尚不清晰, 如何根据被净化污染水体种类的不同确定垂直潜流人工湿地的建造高度、进水水力负荷亦有待进一步研究.

本实验在分析垂直潜流人工湿地不同高度有机物去除率及其形态变化的基础上, 结合单位体积基

质表面挥发性生物膜含量推求出各形态有机物在垂向沿程的平均去除速率, 建立了进水浓度和进水水力负荷规律曲线, 以期垂直潜流人工湿地高度、最大进水负荷的确定提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 垂直潜流人工湿地反应器

实验采用 2 个平行的人工湿地反应器(编号为 A、B), 每个反应器平面尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 池高 1.4 m, 基本结构如图 1 所示. 湿地反应器内由上至下全部填充粗砂(填充高度为 120 cm), 距基质表面 10 cm 以下布设布水系统, 集水系统距单池底部 2.5

收稿日期: 2007-08-09; 修订日期: 2007-10-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601020); 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAC01A14)

作者简介: 叶建锋(1976 ~), 男, 博士, 主要研究方向为水污染控制及水环境模拟, E-mail: yejf@saes.sh.cn

cm, 布水管以下依次布置 1~5 号取样点, 其距布水管间距依次为 10、20、40、60、80 cm(在以下数据分析过程中以布水管处高度为 0 cm 高度). 反应器的基质表层种植芦苇, 种植密度为 4 根茎/m². 实验用粗砂取自长江安徽段河床, 粒径分布如表 1 所示. 粗砂粒径 d_{10} 、 d_{50} 分别为 0.25 mm 和 0.60 mm, 不均匀系数(C_u)为 3.2, 渗透系数为 1.27×10^{-2} cm/s.

表 1 实验粗砂粒径分布

Table 1 Size distribution of grain in the experiment systems	
粒径范围/mm	占总量的质量分数/%
>5	6.54
5~1.25	22.20
1.25~0.63	17.71
0.63~0.315	35.83
0.315~0.16	15.79
<0.16	1.93

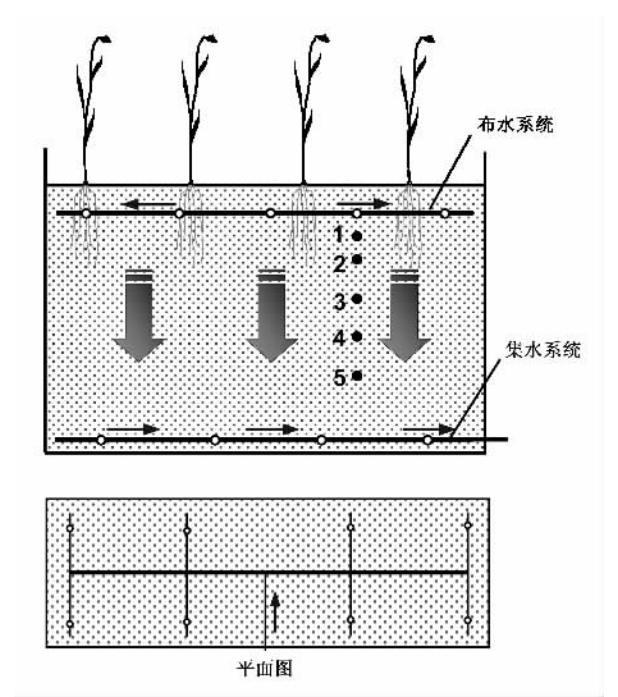


图 1 垂直潜流人工湿地系统示意

Fig.1 Schematic diagram of vertical-flow constructed wetland systems

1.2 试验进水水质和水力负荷

实验采用上海市莘庄污水处理厂初沉池出水絮凝沉淀后作为垂直潜流人工湿地反应器的进水, 进水水质见表 2. 采用连续进水方式, 反应器 A 的布水水力负荷为 0.5 m³/(m²·d), 进水有机负荷为 66.5~136 g/(m²·d); 反应器 B 的布水水力负荷为 0.3 m³/(m²·d), 进水有机负荷为 39.9~81.6 g/(m²·d).

表 2 垂直潜流人工湿地反应器的进水水质

Table 2 Water quality of influent in the vertical-flow constructed wetland systems

水质指标	水质变化范围	平均值
pH 值	7.0~7.9	7.3
SS/mg·L ⁻¹	64~192	113
COD/mg·L ⁻¹	133~310	225
TP/mg·L ⁻¹	1.2~2.7	1.8
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	13.0~39.7	25.0

1.3 检测方法

1.3.1 生物膜和挥发性生物膜含量的测定

生物膜剥落采用“超声+化学剥落”法, 其具体操作如下: 首先从填料柱中取出一定量的基质, 用蒸馏水轻轻冲洗后将其置于 1 mol/L 的碱液中, 并在 60~80℃ 保持 30 min 水溶, 再经超声波冲击剥落生物膜. 生物膜重量分析方法如下: 在生物膜剥落后, 将含有生物膜的溶液经事先称重的 0.45 μm 滤膜过滤, 把滤膜置于温控在 105℃ 的烘箱内烘干 30 min 左右, 过滤前后滤膜的重量之差即为剥落生物膜重. 在测量了生物膜干重后, 将样品再置于 550℃ 的马弗炉内灼烧 15 min 至恒重, 经灼烧后干重的失重即为可挥发性生物膜部分.

1.3.2 有机物含量的测定

总有机物(TCOD)采用标准重铬酸钾法测定, 溶解性有机物(DOC)的测定采用将废水经 0.45 μm 滤纸过滤后测定滤液中的有机物值确定, 颗粒性有机物(POC) = 总有机物(TCOD) - 溶解性有机物(DOC).

2 结果与讨论

2.1 垂向沿程有机物浓度形态变化

在不同水力负荷的进水条件下[0.5 m³/(m²·d) 和 0.3 m³/(m²·d)], 垂直潜流人工湿地垂向沿程 TCOD、POC 和 DOC 浓度变化情况如图 2 所示.

2.1.1 基质浅层有机物去除率分析

从图 2 中可以看出, POC 和 DOC 在布水管至管下 10 cm 基质层内有较大的降幅.

在 0.5 m³/(m²·d)水力负荷条件下, 在布水管至管下 10 cm 基质层内, TCOD、POC 和 DOC 的去除率分别为 59.05%、75.90% 和 50.88%; 而在布水管下 10~110 cm 的基质层内, 三者的去除率依次为 35.58%、30.00% 和 36.90%.

在 0.3 m³/(m²·d)水力负荷条件下, 在布水管至布水管下 10 cm 基质层内, TCOD、POC 和 DOC 的去

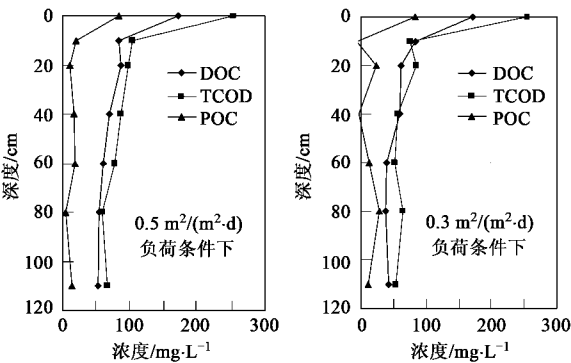


图 2 垂直潜流人工湿地沿程有机物浓度形态变化
Fig.2 Variation of the morphology and concentration of organic matter along the vertical-flow constructed wetland systems

除率分别为 70.07%、100% 和 51.46%；而在布水管下 10~110 cm 的基质层内，TCOD 和 DOC 的去除率依次为 30.26% 和 49.39%。

由此可以得出 2 个结论：①在垂直潜流人工湿地的垂向沿程上，POC 和 DOC 的去除主要集中在布

水管至布水管下 10 cm 的基质层内，尤其是 POC 在该基质层内去除效果更为明显；②进水水力负荷越小，垂直潜流人工湿地对有机物的去除率也越高，在布水管至管下 10cm 的基质层内有机物去除效果也越明显。

2.1.2 垂向沿程有机物去除效果

对图 2 中的 TCOD、POC 和 DOC 沿垂向沿程方向变化趋势分析，不同形态的有机物质沿程去除效果见表 3。

在进水为 0.5 m³/(m²·d) 水力负荷条件下，TCOD 含量在布水管至管下 10 cm 基质层内急剧下降，在布水管下 10~60 cm 距离内亦呈缓慢减少趋势，而在布水管 60 cm 以下基本处于稳定状态；DOC 与 TCOD 基本呈现出相似的沿程迁移去除状态，在布水管 60 cm 以下其含量业已基本处于稳定状态；POC 在布水管至布水管下 20 cm 基质层内显著下降（去除率为 86.75%，占总去除率的 99%），在布水管下 20 cm 以下深度其基本处于稳定。

表 3 垂直潜流人工湿地中不同形态有机物质去除态势

Table 3 Removal situation map of different forms of organic matter in vertical-flow constructed wetland systems

垂向沿程 高度/cm	0.5 m³/(m²·d)负荷条件下			0.3 m³/(m²·d)负荷条件下		
	TCOD	POC	DOC	TCOD	POC	DOC
0~10	急剧下降 59%	急剧下降 86%	急剧下降 50%	急剧下降 70%	急剧下降 100%	急剧下降 64%
10~20						
20~40	缓慢减少 10%		缓慢减少 25%	缓慢减少 7%	略有回升 5%	缓慢减少 13%
40~60		基本稳定(回升 3%)		基本稳定(下降 1%)	基本稳定(下降 4%)	
60~110	基本稳定(下降 4%)		基本稳定(下降 4%)			基本稳定(下降 1%)

在进水为 0.3 m³/(m²·d) 水力负荷条件下，TCOD 含量在布水管至管下 10 cm 基质层内同样呈现急剧下降趋势，在布水管下 10~40 cm 距离内呈缓慢减少，而在布水管 40 cm 以下基本处于稳定状态；DOC 在布水管 60 cm 以下其含量基本处于稳定状态；POC 在布水管至布水管下 10 cm 基质层内显著下降，在布水管下 10~20 cm 基质层内其含量又有所上升，以下深度其含量亦基本处于稳定。

2.1.3 垂直潜流人工湿地有效高度的确定

从图 3 中可以看出，在 0.5 m³/(m²·d) 进水负荷条件下，TCOD、POC 和 DOC 得以有效去除的高度分别为 60、20 和 60 cm；而在 0.3 m³/(m²·d) 进水负荷条件下，TCOD、POC 和 DOC 得以有效去除的高度分别为 40、20 和 60 cm。由此可见，在粗砂作为垂直潜流人工湿地的基质、进水水力负荷 ≤ 0.5 m³/(m²·d) 条件下，其对有机物去除的有效高度为 60 cm。

2.2 垂向沿程有机物平均降解速率的确定

2.2.1 垂向沿程 DOC 降解平均速率

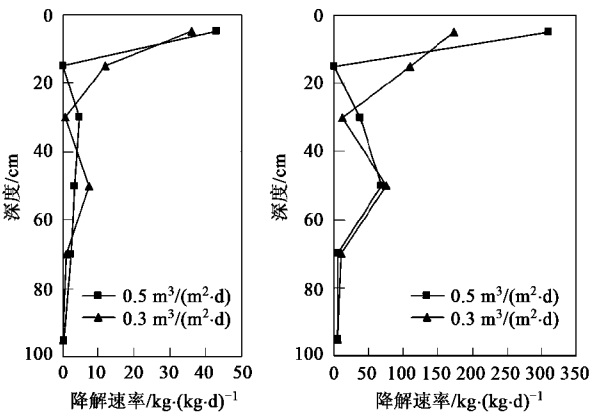


图 3 垂向沿程溶解性有机物降解的平均速率
Fig.3 Average degradation rate of dissolved organic matter along the vertical distance

根据有机物沿程去除效果和沿程各层基质表面的平均生物膜量和挥发性生物膜量（表 4），推求出不同水力负荷条件下垂向沿程溶解性有机物降解的平均速率，具体见图 3。

表 4 沿程有机物去除效果和各层生物膜、挥发性生物膜平均含量/mg·mL⁻¹

Table 4 Organic matter removal efficiency along the distance and the average concentration of bio-film and volatile bio-film in each layer/mg·mL ⁻¹							
基质层 /cm	高度 /cm	0.5 m ³ /(m ² ·d)负荷条件下			0.3 m ³ /(m ² ·d)负荷条件下		
		DOC 去除量	生物膜	挥发性生物膜	DOC 去除量	生物膜	挥发性生物膜
0~10	10	87	0.010 10	0.001 40	88	0.012 25	0.002 55
10~20	10	0	0.011 20	0.002 35	21	0.008 80	0.000 95
20~40	20	17	0.009 25	0.002 25	2	0.007 80	0.000 85
40~60	20	9	0.007 00	0.000 65	21	0.007 25	0.001 40
60~80	20	6	0.006 05	0	2	0.005 50	0.000 90
80~110	30	1	0.004 85	0	0	0.004 45	0

从图 3 中可以看出,在布水管至布水管下 10 cm 处的基质层内,溶解性有机物的平均降解速率都处于最大,其中用挥发性生物膜表示分别为 310.71 kg/(kg·d) [0.5 m³/(m²·d) 条件下] 和 172.55 kg/(kg·d)[0.3 m³/(m²·d)条件下];随着沿程深度的增加,溶解性有机物的平均降解速率都呈递减趋势,用生物膜表示分别为 0~69.23 kg/(kg·d)[0.5 m³/(m²·d)条件下]和 11.11~110.53 kg/(kg·d)[0.3 m³/(m²·d)条件下],同时也发现在 40~60 cm 高处的基质层内都较上下基质层的有机物平均降解速率快,但和布水管以下 10 cm 基质的有机物平均降解速率比,还是要低 5 倍左右。

2.2.2 垂向沿程 TCOD 和 POC 平均去除率分析

颗粒性有机物在人工湿地中的去除主要有 2 种途径:一是基质对其截留而得以去除,二是截留下来的颗粒性有机物被微生物进一步去除;而总有机物包括颗粒性有机物和溶解性有机物的共同去除,其各自垂向沿程平均去除率分别见图 4。

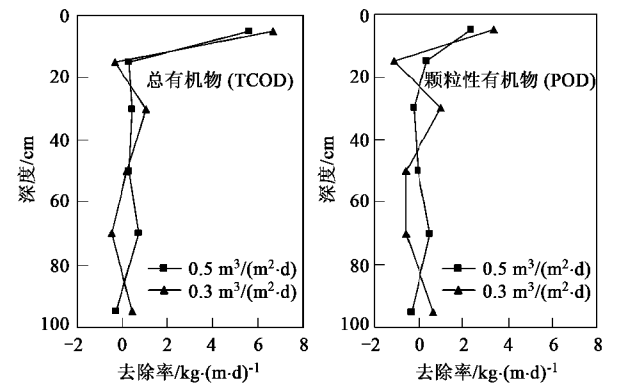


图 4 垂向沿程总有机物、颗粒性有机物去除的平均速率

Fig.4 Average removal rate of total organic matter and particulate organic matter along the vertical distance

从图 4 中可以看出,在垂向沿程的布水管至布水管下 10 cm 基质层中,总有机物和颗粒性有机物的去除速率都最高,分别达到 5.63 kg/(m·d)和 2.36

kg/(m·d)[0.5 m³/(m²·d)],6.68 kg/(m·d)和 3.38 kg/(m·d)[0.3 m³/(m²·d)],同时也可以得出进水水力负荷越小,在该基质层的总有机物、颗粒性有机物的去除速率就越大.而在布水管下 10 cm 以下基质层中,总有机物和颗粒性有机物去除的平均速率都较小,其中总有机物最大去除速率也只有 1.05 kg/(m·d)[0.3 m³/(m²·d)条件下,20~40 cm 基质层内],同层同负荷相应的颗粒有机物最大去除率为 0.98 kg/(m·d)。

2.3 垂直潜流人工湿地理论最大进水负荷

参照垂直潜流人工湿地有效高度的推求结果(有效高度为 60 cm),根据不同污染负荷条件下总有机物在不同高度基质层的平均去除速度得出其平均去除速度的拟合曲线(见表 5)。

表 5 沿程总有机物平均去除速度及其拟合曲线

Table 5 Average removal rate of total organic matter and its fitting curve along the distance			
基质层 /cm	有机污染负荷		任意负荷条件下拟合曲线(x 为污染负荷、 y 为去除速率)
	127 g·(m ² ·d) ⁻¹	76 g·(m ² ·d) ⁻¹	
0~10	5.63	6.68	$y = 8.24 - 0.021x$
10~20	0.26	-0.34	$y = -1.23 + 0.012x$
20~40	0.41	1.05	$y = 2.00 - 0.016x$
40~60	0.30	0.19	$y = 0.026 + 0.0022x$

根据进出水污染负荷量的质量守恒定律,可以得出以下计算公式:

$$(c_{in} - c_{out}) \times q = \sum_{i=1}^4 v_i h_i \times 10^3 \tag{1}$$

式中, c_{in} 为进水浓度,mg/L; c_{out} 为出水浓度,mg/L; q 为进水水力负荷,m³/(m²·d); v_i 为第*i*基质层的总有机物平均去除速度,kg/(m·d); h_i 为第*i*基质层的高度,m。

结合表 5 中的拟合曲线,式(1)可表示为:

$$(c_{in} - c_{out}) \times q = 1\,107.02 - 2.96\,c_{in} \times q \tag{2}$$

参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB

18918-2002)对有机物最高允许排放浓度的规定,可以得出不同排放浓度条件下,以砂子为基质、有效高

度为 60 cm 的垂直潜流人工湿地进水浓度和进水水力负荷的相应规律曲线见图 5.

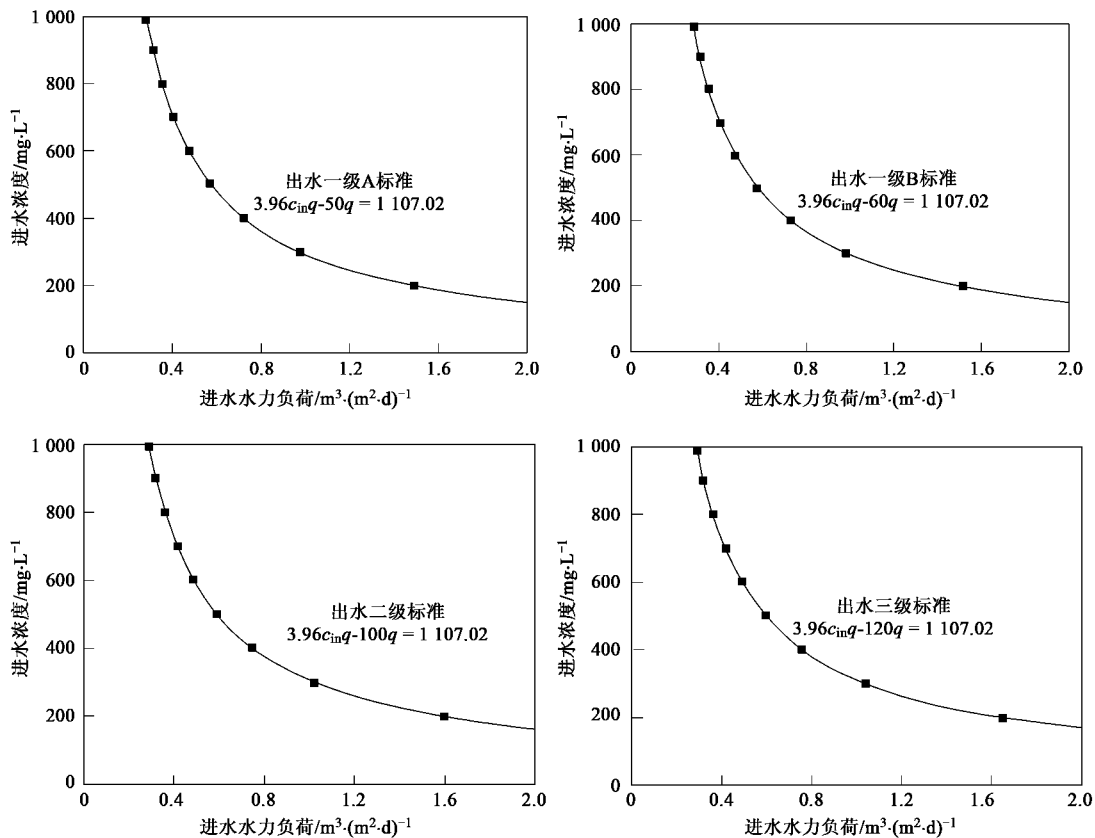


图 5 垂直潜流人工湿地的进水浓度和进水水力负荷规律曲线

Fig.5 Variation curve of concentration and hydraulic load of influent in vertical-flow constructed wetland systems

3 结论

(1) 在本实验条件下,垂直潜流人工湿地中有机的去除主要集中在布水管至管下 10 cm 的基质层内,其中 POC 在该基质层内去除效果尤为明显;进水水力负荷越小,布水管至管下 10 cm 的基质层内有机物的去除率也越高.

(2) 在以粗砂作为垂直潜流人工湿地的基质、进水水力负荷 $\leq 0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的条件下,垂直潜流人工湿地对有机物去除的有效高度为 60 cm.

(3) DOC 在布水管下 10 cm 基质层内的平均降解速率最大,在 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 水力负荷条件下分别为 $310.71 \text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 和 $172.55 \text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$;POC 在布水管下 10 cm 基质层内的去除速率亦处于最大,2 种进水水力负荷条件下分别为 $2.36 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{d})$ 和 $3.38 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{d})$.

(4) 以砂子为基质的垂直潜流人工湿地中,进水浓度和进水水力负荷规律曲线可表示为:

$$(c_{in} - c_{out}) \times q = 1107.02 - 2.96 c_{in} \times q .$$

参考文献:

[1] 籍国东,倪晋仁. 人工湿地废水生态处理系统的作用基质[J]. 环境污染治理技术和设备, 2004,5(6): 71-75.

[2] Drizo A, Frost C A, Grace J, *et al.* Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1996b,33(17): 3595-3602.

[3] 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.

[4] 丁廷华. 污水芦苇湿地处理系统示范工程的研究[J]. 环境科学, 1992,13(2): 8-13.

[5] 王宝贞,王琳. 水污染治理新技术-新工艺、新概念、新理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[6] Knight R L, Payne W E, Borer R E, *et al.* Constructed wetlands for livestock wastewater management[J]. Ecological Engineering, 2000, 15: 41-55.

[7] Nguyen L M. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters[J]. Ecological Engineering, 2000, 16: 199-221.

[8] Mays P A, Edwards G S. Comparison of heavy metal accumulation in

- a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage[J]. *Ecological Engineering*, 2001, **16**: 487-500.
- [9] Gillespie W B, Hawkins W B, Rodgers J H, *et al.* Transfers and transformations of zinc in constructed wetlands: mitigation of a refinery effluent[J]. *Ecological Engineering*, 2000, **14**: 279-292.
- [10] Thut R N. Feasibility of treating pulp mill effluent with a constructed wetland[A]. In: Moshiri G A (ed). *Constructed wetlands for Water Quality Improvement*[C]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1993. 441-447.
- [11] Rivera R, Warren A, Curds C R, *et al.* The application of the root zone method for the treatment and reuse of high-strength abattoir waste in Mexico[J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(5): 271-278.
- [12] Sun G, Gray K R, Biddlestone A J, *et al.* Treatment of agricultural wastewater in a combined tidal flow-down flow reed bed system[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(3): 39-146.
- [13] Laber J. Constructed wetland system for storm water treatment[J]. *Journal of Environment Science and Health*, 2000, **A35**: 1279-1288.
- [14] Thurston K A. Lead and petroleum hydrocarbon changes in an urban wetland receiving stormwater runoff[J]. *Ecological Engineering*, 1999, **12**: 387-399.
- [15] Bachand P A, Horne A J. Denitrification in constructed free-water surface wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2000, **14**: 9-32.
- [16] Angelo E M, Reddy K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hyper-eutrophic lake water [J]. *Journal Environmental Quality*, 1994, **23**: 928-943.