

潜流型人工湿地基质堵塞特性试验研究

鄢璐, 王世和, 黄娟, 刘洋, 王峰

(东南大学市政工程系, 南京 210096)

摘要:为解决设计不当或管理不善等原因造成的湿地堵塞问题, 深入揭示湿地堵塞特性及形成机制, 试验研究了芦苇潜流型水平流湿地和垂直流湿地的堵塞特性, 并以此比较了 2 种湿地长期运行的稳定性. 结果表明, 湿地堵塞后土壤中有机质积累量较大, 在湿地中各测量点达到了 1.5% ~ 5%, 其主要积累区域在湿地前部表层, 积累量为 4% ~ 5%, 对有机物积累量与土壤深度进行数值分析发现, 两者之间呈显著函数关系; 水平流湿地和垂直流湿地内部堵塞机制不同, 故堵塞后水平流湿地水力停留时间为 3.515 4 d, 较正常值缩短 21.88%, 而堵塞垂直流湿地水力停留时间为 5.464 8 d, 较正常值增长 21.44%. 湿地堵塞后污染物去除效率明显降低, 波动较大, 2 种湿地比较发现, 垂直流湿地的堵塞情况较水平流湿地更为严重.

关键词:人工湿地; 堵塞; 有机质; 水力停留时间

中图分类号: X52; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0627-05

Clogging Characteristics of the Subsurface Flow Wetland

YAN Lu, WANG Shi-he, HUANG Juan, LIU Yang, WANG Feng

(Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to resolve clogging problem of constructed wetlands caused by improper design or imperfect management and reveal the clogging mechanism, clogging characteristics of the horizontal flow reed wetland and vertical flow reed wetland were studied. Operation stabilities of two types of wetlands were compared. It shows that organic matter accumulates in medium and the concentration is 1.5% ~ 5%. It mostly occurs in the fore section of top layer in wetland and the concentration is 4% ~ 5%. The negative correlation between the organic matter content and the subsurface depth was demonstrated. The clogging mechanisms in the horizontal flow wetland and the vertical flow wetland are different. The hydraulic retention time of the horizontal flow wetland is 3.515 4 d which is shortened by 21.88%. While the hydraulic retention time of the vertical flow wetland is 5.464 8 d and extended by 21.44%. The results indicate that clogging decreases the treatment capacity and running stability conspicuously. The clogging phenomenon of the vertical flow wetland is worse comparatively.

Key words: constructed wetlands; clogging; organic matter; hydraulic retention time

人工湿地是自 20 世纪 70 年代以来迅速发展的污水处理新工艺^[1~3], 应用日益普遍^[4~7]. 然而, 由于设计不当或管理不善等原因, 湿地极易出现堵塞现象, 美国有近一半的构建湿地在投入运行后的 5 a 内形成了堵塞^[8], 国内的白泥坑、雁田、沙田等人工湿地也出现了不同程度的堵塞现象^[9,10].

湿地中堵塞层的形成是有机固体物在填料内部颗粒间隙的沉积、填料间隙内生物量生长和分解以及填料本身所含物质的化学沉淀反应等造成的, 堵塞后将严重影响污染物的去除效果^[11]. 因此, 深入研究人工湿地堵塞特性, 进一步揭示湿地堵塞的形成机制, 将有助于解决湿地堵塞问题, 提高湿地运行的稳定性, 优化人工湿地污水处理技术应用前景.

目前国外对于人工湿地堵塞问题的研究较少^[12~15], 国内吴振斌等^[11,16,17]对复合垂直流人工湿地的堵塞进行了研究, 但对普遍应用的水平流和垂直流湿地堵塞特性的研究尚鲜见报道. 本试验针对水平流芦苇湿地、垂直流芦苇湿地堵塞状况进行了系统研究, 比较了 2 种类型湿地长期运行的特性, 分

析了人工湿地的堵塞机制.

1 材料与方法

1.1 人工湿地试验系统

如图 1、2 所示, 水平流人工湿地池体尺寸为 3.3 m × 1.0 m × 1.0 m, 底面坡度 1%. 垂直流人工湿地池体尺寸为 3.3 m × 1.0 m × 1.0 m, 底面坡度 2%, 纵向分隔为 3 个等体积单元, 各单元落差为 8 cm, 湿地进水经布水区进入第 1 区底部, 在水压作用下, 由砾石层向上流经土壤层后进入集水管, 并通过该管进入第 2 区底层, 向上流经砾石层、土壤层后由集水管进入第 3 区底部, 最后在第 3 区上层进入集水区排出. 处理区填料由 4 层组成, 分别为粗糙砾石、中等砾石、细小砾石及土壤. 湿地植物为芦苇 (*Phragmites communis trins*), 属多年生草本, 栽种密度为 15 ~ 20

收稿日期: 2007-03-15; 修订日期: 2007-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50278016)

作者简介: 鄢璐(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: yanlu2948@hotmail.com

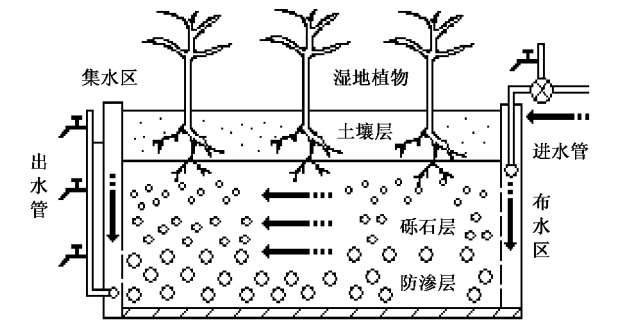


图1 水平流潜流型人工湿地结构

Fig.1 Structure of horizontal flow SFS wetlands

株/m².湿地进水流量为 216 L/d.

1.2 试验进水水质

湿地的试验进水来自南京市锁金村污水处理厂的初沉池出水,进水水质及流量较稳定,水质条件见

表 1 人工湿地进水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Water quality of inflow/mg·L⁻¹

BOD ₅	COD	DO	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	SS	TP	pH
100 ~ 120	150 ~ 300	0.75 ~ 1.15	40 ~ 68	7.5 ~ 12.5	45 ~ 90	80 ~ 260	3.1 ~ 6.8	7.8 ~ 8.2

色由棕红经紫色变为暗绿色,同时以不加土壤的试剂进行空白测定^[19].按下式计算有机质含量.

$$c = \frac{(V_0 - V) \times N \times 0.003}{\text{烘干土样重(g)}} \times 100\%$$

式中, V₀ 为空白试验时消耗 FeSO₄ 体积(mL); V 为分析土壤样品时消耗的 FeSO₄ 体积(mL); N 为 FeSO₄ 标准溶液的浓度(mol/L).

1.4 水力停留时间的测定

根据刘文兵等^[20]对于人工湿地染料示踪剂的研究表明,阳离子红(IGL)染料较适合人工湿地,回收率为 81%.故采用刺激-响应法,以脉冲注入法加入阳离子红染料,用分光光度计在 500 nm 波长处测定出水阳离子红浓度.

2 结果与分析

2.1 堵塞湿地基质中有机质含量

试验用人工湿地床建于 2003 年初,经过长达 3 a 的持续运行后,2005 年末开始出现了较严重的堵塞情况,表现为:水平流芦苇湿地呈现表面流特征;垂直流湿地第 1 单元出现淹水,后部单元进水不畅,湿地出水不稳定;湿地表面出现黑绿色膜状淤泥并伴有恶臭.

2006 年 3 ~ 4 月间,在堵塞的水平流湿地和垂直流湿地土壤基质中分上(0 ~ 5 cm)、中(5 ~ 10 cm)、

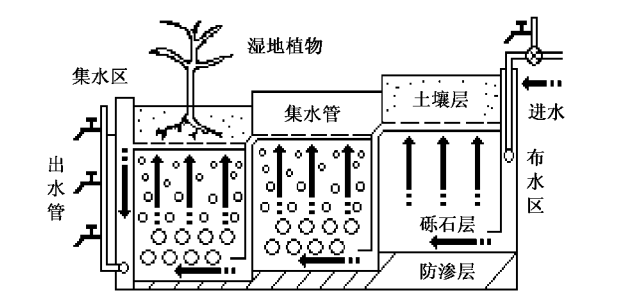


图2 垂直流潜流型人工湿地结构

Fig.2 Structure of vertical flow SFS wetlands

表 1. 试验中水质指标测试均采用国标法^[18].

1.3 基质中有机质的测定

采集湿地中土样,自然风干后加入一定量的标准重铬酸钾-硫酸溶液,在 185 ~ 190℃ 消煮 5 min,冷却后加入指示剂,以 FeSO₄ 标准溶液滴定至溶液颜

下(10 ~ 15 cm)3 层的前(0 ~ 1.1 m)、中(1.1 ~ 2.2 m)、后(2.2 ~ 3.3 m)部共 9 处采样点取样,测定土样的有机质含量,平均测定结果如表 2.

表 2 堵塞后湿地土壤有机质含量^{1)/%}

Table 2 Organic matter in soil in wetlands after clogging/%

土层	水平流湿地			垂直流湿地		
	前	中	后	前	中	后
上层	4.28	2.17	1.70	5.03	3.24	2.09
中层	3.96	2.03	1.43	4.76	3.01	1.87
下层	4.01	1.91	1.50	4.82	2.86	1.92

1)湿地初始运行时土壤有机质含量低于 1%

由表 2 可见,湿地中有机质含量较高,积累情况明显.垂直流湿地中有机质浓度高于水平流湿地.2 种湿地中有机质的空间分布规律较明显:垂直方向上,基质上层的有机质浓度最高,中下层的有机质含量差别不大;沿程方向上,湿地前端的有机质浓度最高,其后逐渐下降.由此可见,湿地中因有机质积累而发生的堵塞主要出现在基质的前部表层.垂直流湿地的水流方向为下进上行流,有机质积累规律与水流方向相反,这是因为试验主要考察的为湿地土壤层中有机质的含量,下部为砾石层,并且有研究表明垂直流湿地内部更接近于完全混合式反应器^[21],因此该类湿地土壤层中水流并不是按一定方向有规律流动,而湿地上层土壤受植物根系影响,孔隙率较

大,纳污量也进而增大,故有机质积累量较下层土壤更多.对湿地中的有机质含量和基质深度作相关性

曲线拟合,其关系见表3.
2.2 堵塞对湿地水力停留时间影响

表3 有机质含量与基质深度关系¹⁾

Table 3 Relation of organic matter content and substrate depth		
沿程方向	水平流湿地	垂直流湿地
前部	$y = 38.936\ 68 \exp(x/-0.010\ 24) + 3.984\ 02 \quad (r = 0.988\ 4)$	$y = 40.101\ 35 \exp(x/-0.009\ 77) + 4.789\ 42 \quad (r = 0.976\ 2)$
中部	$y = 1.143\ 33 \exp(x/-0.324\ 36) + 1.19 \quad (r = 1)$	$y = 1.013\ 92 \exp(x/-0.116\ 9) + 2.578\ 75 \quad (r = 1)$
后部	$y = 46.022\ 04 \exp(x/-0.009\ 47) + 1.464\ 54 \quad (r = 0.967\ 2)$	$y = 33.328\ 56 \exp(x/-0.009\ 73) + 1.894\ 54 \quad (r = 0.9751)$

1)表中 y 为有机质含量(%), x 为基质深度(m)

湿地正常运行时水力停留时间为 4.5 d,堵塞后在水平流湿地和垂直流湿地进水端投加阳离子红示踪剂,观测到之后 10 d 中的出水示踪剂流出情况如图 3 所示.

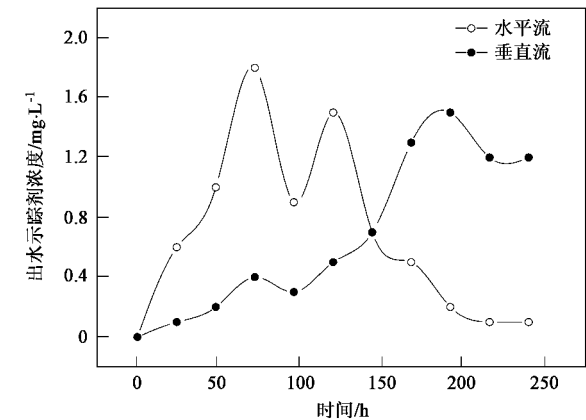


图3 湿地出水示踪剂浓度

Fig.3 Concentration of tracer in outflow of wetlands

堵塞后的湿地内部流场偏离理想流型,其原因主要是在反应器中存在的死角、短路流及沟流等现象,研究堵塞湿地偏离理想反应器的方法是对污水在反应器中的停留时间分布进行分析,故由图3分析可得堵塞湿地试验系统出水示踪剂停留时间分布曲线[即液龄分布函数 $E(t)$ 曲线],由公式 $F(t) = \int E(t)dt$ 得示踪剂流出总量曲线[即累积液龄分布函数 $F(t)$ 曲线].

由图4、图5中 $E(t)$ 、 $F(t)$ 曲线与不同反应器的标准曲线相对照发现^[22],堵塞湿地介于活塞流反应器和 CSTR 间,属于一般反应器类型.同时由图4可见,堵塞水平流湿地和垂直流湿地的出水示踪剂停留时间分布曲线形状明显不同,说明2种湿地的堵塞机理有所差异,故堵塞后系统内流场有所不同.由 $F(t)$ 曲线的计算结果可知,堵塞水平流湿地的示踪剂流出率为 79.38%,堵塞垂直流湿地为

73.44%,基本接近示踪剂试验标准值 81%,其中垂直流湿地的示踪剂积累量比水平流湿地略高.

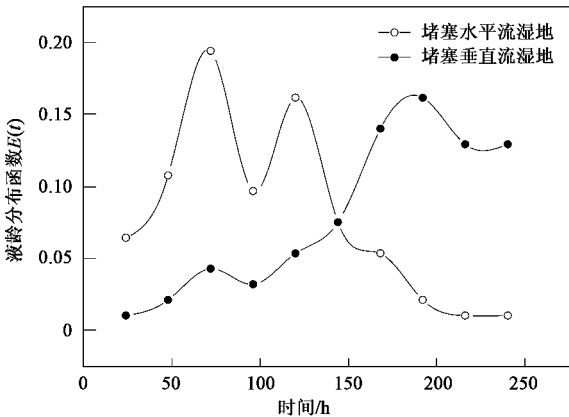


图4 堵塞湿地出水示踪剂停留时间分布曲线

Fig.4 Retention time distribution curve of tracer in outflow from clogged wetlands

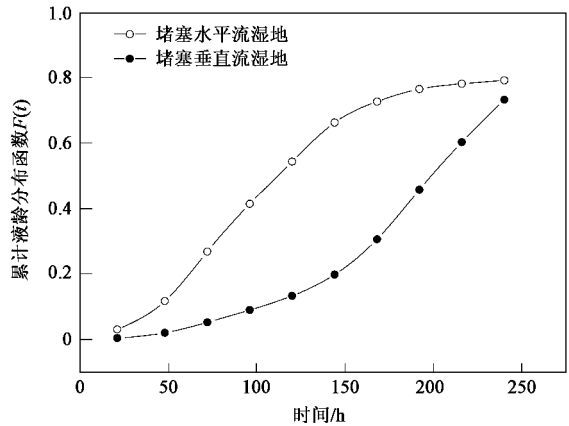


图5 堵塞湿地示踪剂流出总量曲线

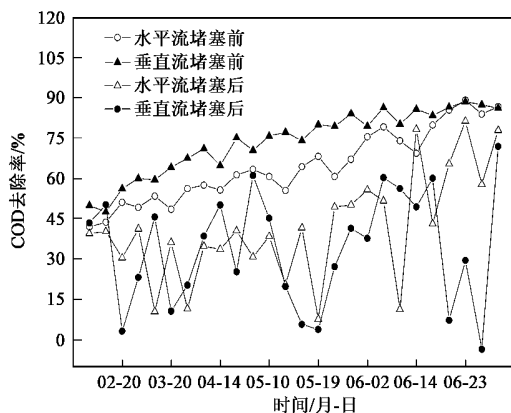
Fig.5 Sum graph of additional conductivity multiply effluent quantity

堵塞湿地中的实际停留时间 t 可由下式求得.

$$t = \int_0^{\infty} tE(t)dt$$

对试验结果进行数值分析可得,堵塞水平流湿

地实际停留时间为 3.515 4 d, 较之正常值缩短了 21.88%, 说明堵塞后的水平流湿地中的短路和沟流现象严重, 同时湿地的表面短流现象也使停留时间进一步缩短. 堵塞垂直流湿地的实际停留时间为 5.464 8 d, 较之正常值增长了 21.44%, 可见垂直流湿地中的堵塞主要表现为基质中阻力增大, 污水流速下降.



2.3 人工湿地堵塞对污染物去除影响

试验测定了 2003 年至今的进出水污染物指标, 本研究主要选取了 2006-01 ~ 2006-06 代表性试验数据(1 月 6、18 日, 2 月 20 日, 3 月 6、13、20、29 日, 4 月 5、14、19、28 日, 5 月 10、15、17、19、24、29 日, 6 月 2、5、9、14、19、21、23、26、30 日), 与 2005 年湿地同期数据比较, 如图 6 所示.

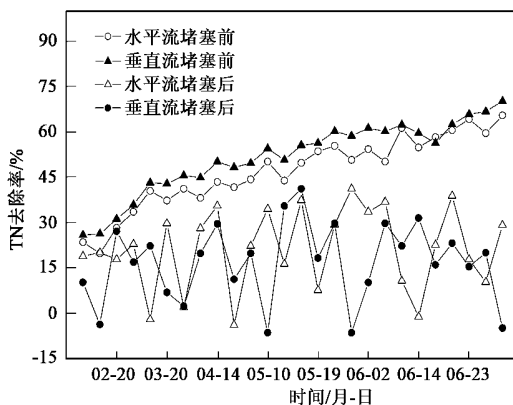


图 6 湿地堵塞前后 COD、TN 去除率

Fig. 6 Removing efficiency of COD, TN in clogged and unclogged wetlands

由图 6 分析, 湿地堵塞前, COD 和 TN 去除率较稳定, 2~6 月间随时间推移温度升高, 去除率呈逐渐上升趋势, 对水平流湿地 COD 去除率-时间做线性分析, 线性关系明显($r = 0.956\ 52$, $SD = 4.077\ 09$, $p < 0.000\ 1$); 湿地堵塞后, 去除率低于正常水平, 且极不稳定, 甚至出现负值, 仍对水平流湿地 COD 去除率-时间做线性分析, 线性关系较差, 数据分散度大($r = 0.585\ 84$, $SD = 16.817\ 47$, $p = 0.001\ 66$). 可见湿地堵塞明显影响了系统的正常运行, 降低了污染物去除效果及稳定性.

同时由图 6 分析可见, 正常运行时垂直流湿地净化效果优于水平流湿地, 湿地堵塞后, 垂直流湿地污染物去除率经常低于同期的水平流湿地, 对堵塞垂直流湿地 COD 去除率-时间做线性分析($r = 0.117\ 26$, $SD = 21.519\ 27$, $p = 0.568\ 34$), 湿地运行的稳定性状况劣于堵塞水平流湿地. 故垂直流湿地的长期运行稳定性差于水平流湿地.

3 结论

(1) 堵塞湿地中土壤有机质积累严重, 达到 1.5%~5%, 其主要积累区域在湿地前部表层, 水平流湿地为 4.28%, 垂直流湿地为 5.03%; 土壤中有有机质积累量和土壤深度呈一定的函数关系.

(2) 堵塞后水平流湿地表面流现象、内部短流、沟流现象严重, 其水力停留时间为 3.515 4 d, 较正常值缩短 21.88%; 垂直流湿地内部阻力增大, 水流不畅, 其水力停留时间为 5.464 8 d, 较正常值增长 21.44%.

(3) 湿地堵塞明显影响系统对有机物和总氮的去除效率, 堵塞后湿地净化效果较差, 并且波动较大; 正常运行时的垂直流湿地除污效率优于同期水平流湿地, 但从长期运行而言, 垂直流湿地的堵塞情况更为严重, 其长期运行稳定性劣于水平流湿地.

参考文献:

- [1] 陈长太, 王雪, 祁继英. 国外人工湿地技术的应用及研究进展[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 105-106.
- [2] 籍国东, 孙铁珩, 李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 224-228.
- [3] Stecher M C, Weaver R W. Effects of Umbrella Palm and Wastewater Depth on Wastewater Treatment in a Subsurface Flow Constructed Wetland[J]. Environ Technology, 2003, 24(4): 471-478.
- [4] Mantovi P. Application of a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland on Treatment of Dairy Parlor Wastewater[J]. Bioresource Technology, 2003, 88(2): 85-90.
- [5] Ji G D, Sun T H, Zhou Q X, et al. Constructed Subsurface Flow Wetland for Treating Heavy Oil Produced Water of the Liao He Oil Field in China[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(4): 489-495.

[6] 曲向荣,贾宏宇,张海荣,等.辽东湾芦苇湿地对陆源营养物质净化作用的初步研究[J].应用生态学报, 2000,11(2):270-272.

[7] 鲁敏,曾庆福.七种植物的人工湿地处理生活污水的研究[J].武汉科技学院学报, 2004,17(2): 32-35.

[8] USEPA. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment[M]. Washington DC. USEPA 832-R-93-008, 1993.

[9] 陈韞真,叶纪良.深圳白泥坑、雁田人工湿地污水处理场[J].电力环境保护, 1996,12(1):47-51.

[10] 胡国光,曹向东,穆瑞林.深圳市沙田人工湿地污水厂简介[J].给水排水, 2003,29(8):30-31.

[11] 付贵萍,吴振斌,张晟,等.构建湿地堵塞问题的研究[J].环境科学, 2004,25(3):144-149.

[12] Tanner C C, Sukias J P. Accumulation of Organic Solids in Gravel-bed Constructed Wetlands[J]. Wat Sci Tech, 1995,32:229-240.

[13] Ryszard B, Sadzide M B. Soil Clogging Phenomena in Constructed Wetlands with Subsurface Flow[J]. Wat Sci Tech, 1997,35: 183-188.

[14] Platzer C, Mauch K. Soil Clogging in Vertical Flow Reed Beds-Mechanism, Parameter, Consequence and Solutions[J]. Wat Sci Tech, 1997,35:175-181.

[15] 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 System for Water Pollution Control[C]. Florida, 2000.

[16] 詹德昊,吴振斌,徐光来.复合垂直流构建湿地中有机质积累与基质堵塞[J].中国环境科学, 2003,23(5):457-461.

[17] 詹德昊,吴振斌,张晟,等.堵塞对复合垂直流湿地水力特征的影响[J].中国给水排水, 2003,19(2):1-4.

[18] 国家环境保护局编.水和废水检测分析方法[M].(第四版)北京:中国环境科学出版社, 2002.200-284.

[19] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社, 1986.186-187.

[20] 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.

[21] 付贵萍,吴振斌,任明迅,等.垂直流人工湿地系统中水流规律的研究[J].环境科学学报,2001,21(6):720-725.

[22] 许保玖,龙腾锐.当代给水与废水处理原理[M].(第二版).北京:高等教育出版社, 2000. 78-83.