

文章编号:1004-8227(2007)03-0363-05

水量衡算条件下人工湿地对有机物的去除

张 政¹, 付融冰^{2*}, 杨海真¹, 顾国维¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;

2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘 要:构建了芦苇和无植物人工湿地,在系统水量衡算的基础上比较了两种湿地对生活污水中有机物的去除效果。结果表明,在植物收割后的冬季,有植物湿地对有机物的去除率低于无植物湿地 2.2%;在其他季节,芦苇湿地对污水 COD_{Cr} 的去除率比无植物的高出 3.2%~4.2%,但对 BOD₅ 的去除率却比无植物的低了 1.8%~3.4%。有植物湿地对有机物的去除效果比无植物湿地有所改善,但是提高不多。比较了两种系统的氧化还原电位,有植物湿地比无植物湿地高 ($P < 0.05$),这种提高主要集中在湿地水面以下约 15 cm 的范围,从整体来看,两块湿地内部氧化还原状态大体相同,主要是强还原环境。比较了两块湿地基质中降解有机物的细菌、放线菌和真菌的数量,二者没有明显的差别,但是,有植物湿地的根际效应明显。考察了湿地进水有机负荷与去除量的关系,二者呈现显著的线性相关性 ($R^2 > 0.96$)。

关键词:潜流水平人工湿地;有机物;水量衡算;氧化还原电位;微生物

文献标识码:A

人工湿地是一种利用基质、微生物及动植物群落的相互作用去除污染物的生态系统,具有投资较少,耗能低、容易构建和维护方便的优点^[1,2]。普遍认为,与去除氮磷相比,人工湿地对有机物具有更优良的去除效果^[3~8]。人工湿地可以通过沉淀、拦截、吸附、植物吸收以及微生物同化作用降解有机物。微生物的降解是湿地去除污染物的最主要的机理^[9],植物在湿地污水处理中起着相当重要的作用。许多研究证明,有植物湿地比无植物湿地对有机物去除效果显著,但是这些研究往往没有考虑湿地植物的蒸发作用,比较没有建立在水量衡算的基础上。由于植物的蒸发表明影响湿地系统的水量平衡,蒸发作用实际上延长了污水在有植物湿地中的停留时间,进而改变了系统对污染物质的去除效果。因此比较有植物和无植物湿地对污染物的去除效果应该建立在物质平衡的基础上^[10,12]。

本试验构建了有植物和无植物潜流人工湿地,采用连续流的进水方式处理生活污水。在系统水量衡算的基础上,比较了两种湿地对污水有机物的去除效果,测定了湿地水体的氧化还原电位以及细菌、

真菌和放线菌在床体不同空间的数量,分析了两种湿地去除有机物效果差异的原因。

1 材料和方法

1.1 试验系统

在上海地区的自然环境中,构建了两套结构相同的由 PVC 板做成的试验装置,长 2.0 m,宽 0.5 m,深 0.6 m,一套为无植物对照湿地,一套为芦苇湿地。床体基质为粒径为 1 cm 的砾石和土壤混合而成(质量比 4:1),床体有效空隙率 0.32。芦苇的初始种植密度为 30 株/m²。水位控制在湿地表面以下 10 cm 处。第一年的 11 月份在装置中培植芦苇根茎,间歇投配污水培育系统,第二年 3 月份植物开始生长,连续进水至 5 月份,开始测定,芦苇在 12 月底收割,试验期 19 个月。

1.2 水量衡算

湿地系统中水量变化可以用下面公式表示:
 $\Delta V / \Delta T = INF + P - WO - DR - Ep$ 。式中, $\Delta V / \Delta T$ 为系统中水量变化(m³/m²);INF为系统进水

收稿日期:2006-05-29;修回日期:2007-03-14

基金项目:国家高技术研究发展 863 计划专项(2003AA601020)

作者简介:张 政(1966~),男,博士研究生,主要研究方向为水污染控制及水环境管理。

*通讯作者:E-mail:rongermmfu@163.com

(m^3/m^2) ; P 为降雨 (m^3/m^2) ; WO 为系统渗出水 (m^3/m^2) ; DR 为系统排水 (m^3/m^2) ; Ep 为蒸发量 (m^3/m^2) 。

在本试验条件下,床体内水位恒定,系统不向外界渗水,水量测定不在雨天进行,因此上式可为: $\text{INF} - \text{Ep} = \text{DR}$ 。进水用恒流泵控制,测定出水流量,通过上式可以算出湿地蒸发量。每月都进行水量平衡测定,见表 1。

表 1 湿地运行水力负荷
Tab.1 Hydraulic Loads of Wetlands

HRT(d)	月份	植物蒸发量 (mm/d)	水力负荷 (mm/d)	
			芦苇湿地	无植物湿地
6	4~5	6.9~10.4	30.3~32.1	26.7
5	5~7	11.3~22.9	43.3~54.9	32.0
4	8~9	12.1~16.5	52.1~56.5	40.0
3	10~11	9.4~12.5	62.7~65.8	53.3
2	12~2	0.3~1.3	80.3~81.3	80.0

1.3 运行方式

生活污水经过初沉池后(水质见表 2)以连续流方式进入湿地。在不同的停留时间下,考察两块湿地对有机物的去除效果。用 KCI 示踪法测定污水在湿地中的实际停留时间。在测定芦苇湿地的蒸腾量的基础上,校正芦苇湿地的水力负荷,使两个湿地中的实际水力停留时间(HRT)相同(表 1)。为保证两个系统的有机物负荷相同,芦苇蒸发的水量由自来水($\text{TOC} < 3 \text{ mg/L}$)补充。

表 2 人工湿地对有机物的去除效果
Tab.2 Organic Matter Removal Efficiency
of Constructed Wetlands

停留时间	芦苇湿地		无植物湿地		
	COD _{Cr}	BOD ₅	COD _{Cr}	BOD ₅	
2d	进水(mg/L)	228.4(2.63)	122.3(2.21)	228.4(2.63)	122.3(2.21)
	出水(mg/L)	82.0(1.45)	29.4(1.15)	82.5(1.51)	23.5(1.23)
	去除率(%)	61.7(0.45)	76(0.67)	63.9(0.49)	78.5(0.71)
4d	进水(mg/L)	258.6(3.4)	140.5(3.2)	258.6(3.4)	140.5(3.2)
	出水(mg/L)	54.8(1.76)	21.4(1.54)	66.7(1.83)	16.6(1.62)
	去除率(%)	78.8(0.62)	84.8(0.59)	74.2(0.67)	88.2(0.64)
6d	进水(mg/L)	234.6(2.1)	128.1(3.47)	234.6(2.1)	128.1(3.47)
	出水(mg/L)	43.4(1.32)	16.3(0.86)	50.9(1.73)	13.8(1.21)
	去除率(%)	81.5(0.37)	87.3(0.35)	78.3(0.63)	89.1(0.58)

HRT = 2d, *n* = 18; HRT = 3, 4d, *n* = 24; HRT = 5d, *n* = 20; HRT = 6d, *n* = 12. 平均值(标准误).

1.4 分析方法

COD_{Cr}的测定采用重铬酸盐氧化法,BOD₅的测定采用压力法(Oxi Top IS BOD 测定仪)。微生物测定采用混菌法。

2 结果和讨论

2.1 有机物去除效果

由表 2 可见,有植物和无植物湿地对有机物的去除率都较高,随着 HRT 增大,去除率也随之增大。在 HRT 为 2 d 时,无植物湿地对 COD_{Cr}的去除率比芦苇湿地高 2.2 %,在 HRT 为 4、6 d 时,芦苇湿地对 COD_{Cr}的去除率均大于无植物湿地,分别高出 4.2 %和 3.2 %。在全部 HRT 下,芦苇湿地对 BOD₅的去除率小于无植物湿地,分别降低了 2.5 %、3.4 %和 1.8 %。在 HRT 为 4 d 时,芦苇湿地和无植物湿地对 COD_{Cr}及 BOD₅的去除率比 HRT 为 2 d 时有较大提高,但是 HRT 为 6 d 时比 HRT 为 4 d 时去除率提高并不多,这可能是因为 4、5 月份芦苇根系的渗出液以及部分死亡根系开始腐烂释放出有机物引起的^[12]。综合所有情况,芦苇湿地对有机物的去除效果比无植物湿地有所提高,但是提高并不显著($P > 0.05$)。Tanner 总结了相关研究数据,结果也表明有植物和无植物湿地对有机物的去除效果差别并不大^[13]。

表 3 为对两块湿地水体的氧化还原电位测定结果。可以看出,潜流水平湿地主要还是厌氧环境的,虽然芦苇湿地比无植物湿地水体的氧化还原电位略高,但是这种好氧状态的改善远远不能满足湿地降解有机物对氧的需求。实际上,在有机物质沉积丰富的区域,氧气多存在于床体表层很浅的范围和植物根区部位,有机物质的降解大部分是在厌氧条件

表 3 湿地沿程水体的氧化还原电位 Eh(mV)

Tab.3 ORP at Different Fractional Distance Along the Wetlands						
湿 地	深度 (cm)	距离分数				
		0	0.25	0.5	0.75	1.0
有 植 物	20	- 214(35)	- 185(25)	- 177(29)	- 184(28)	- 138(31)
	30	- 233(27)	- 201(21)	- 235(27)	- 246(36)	- 197(25)
	50	- 244(21)	- 254(16)	- 263(24)	- 276(24)	- 274(18)
无 植 物	20	- 223(42)	- 194(23)	- 186(23)	- 195(35)	- 152(27)
	30	- 256(28)	- 217(33)	- 227(34)	- 254(27)	- 201(35)
	50	- 268(26)	- 252(17)	- 275(19)	- 274(25)	- 283(22)

注: HRT = 6d, n = 12, 平均值(标准差)

下进行的^[14]。因此,芦苇湿地对有机物的去除略有提高,但差别并不显著。

Kadlec 和 Knight^[12]以及 Merlin 等^[15]认为,湿地去除有机物能力强的原因是它综合了化学氧化、矿化(好氧/厌氧)和沉淀等过程,其中微生物的降解是最主要的过程^[9]。本试验测定了湿地基质微生物数量(表 4),表明芦苇湿地和无植物湿地基质微生物数量没有显著的差别,有植物湿地比无植物湿地对有机物去除的微小提高可能是由于有植物湿地

ORP 的微小提高和植物根际作用导致的。

对于无植物湿地对 BOD₅ 的去除率比芦苇湿地高,可以从植物根际作用得到解释。植物的根际效应使得污水中一些不易生物降解的有机物质转化容易降解的小分子物质的能力强,从而使污水中易生物降解部分增多,而无植物湿地中微生物更容易利用污水中可生物降解部分。因此,相对于有植物湿地,无植物湿地对 BOD₅ 的去除率高。

表 4 湿地系统中微生物的数量及分布(个/g)

Tab.4 Abundance of Microorganisms at Different Fractional Distance Along the Wetlands

微生物	系统	取样位置	距离分数				
			0	0.25	0.5	0.75	1.0
细菌	有植物	上层(15 cm)	1.1 ×10 ⁸	1.8 ×10 ⁷	1.3 ×10 ⁷	3.8 ×10 ⁶	2.9 ×10 ⁶
		下层(45 cm)	7.6 ×10 ⁷	5.3 ×10 ⁶	7.4 ×10 ⁵	3.2 ×10 ⁶	6.5 ×10 ⁵
		根际	2.8 ×10 ¹⁰	3.5 ×10 ⁹	4.2 ×10 ⁹	3.8 ×10 ⁹	1.7 ×10 ¹⁰
	无植物	上层(15 cm)	2.3 ×10 ⁸	2.1 ×10 ⁷	7.6 ×10 ⁶	4.3 ×10 ⁷	1.4 ×10 ⁶
		下层(45 cm)	1.7 ×10 ⁷	8.4 ×10 ⁵	2.2 ×10 ⁶	2.6 ×10 ⁶	7.1 ×10 ⁵
		根际					
放线菌	有植物	上层(15 cm)	3.7 ×10 ⁵	5.5 ×10 ⁴	4.7 ×10 ⁵	2.9 ×10 ⁵	3.4 ×10 ⁴
		下层(45 cm)	2.3 ×10 ⁵	3.2 ×10 ⁴	2.8 ×10 ⁴	3.5 ×10 ³	1.5 ×10 ⁴
		根际	4.6 ×10 ⁶	1.8 ×10 ⁷	5.3 ×10 ⁶	3.2 ×10 ⁵	2.1 ×10 ⁶
	无植物	上层(15 cm)	4.6 ×10 ⁵	1.2 ×10 ⁵	8.3 ×10 ⁵	1.9 ×10 ⁶	1.8 ×10 ⁵
		下层(45 cm)	3.5 ×10 ⁵	2.8 ×10 ⁴	5.8 ×10 ⁴	5.2 ×10 ⁴	6.4 ×10 ³
		根际					
真菌	有植物	上层(15 cm)	2.5 ×10 ⁴	4.0 ×10 ³	3.7 ×10 ⁴	5.4 ×10 ³	3.8 ×10 ⁴
		下层(45 cm)	1.6 ×10 ⁴	3.2 ×10 ³	4.3 ×10 ²	1.4 ×10 ³	1.6 ×10 ³
		根际	8.4 ×10 ⁵	4.6 ×10 ⁵	2.5 ×10 ⁵	3.8 ×10 ⁴	5.2 ×10 ⁵
	无植物	上层(15 cm)	1.8 ×10 ⁴	1.1 ×10 ⁴	5.2 ×10 ³	4.8 ×10 ⁴	2.9 ×10 ⁴
		下层(45 cm)	5.9 ×10 ³	8.8 ×10 ³	2.6 ×10 ³	7.4 ×10 ²	2.1 ×10 ³
		根际					

注:湿地基质上下两层比较采用 *t* 检验, *n*₁ = *n*₂ = 5;有植物湿地和无植物湿地比较采用 *F* 检验。

2.2 进水负荷与去除量关系

从图 1 中可以看出,两块湿地的进水 COD_{Cr}、BOD₅ 负荷和去除量之间体现了显著的线性相关性

(*R*² > 0.96)。Tanner 的研究也表明有植物和无植物湿地进水有机物负荷与去除量之间存在显著的线性关系(*R*² > 0.99)^[13]。根据图中模拟的方程,两

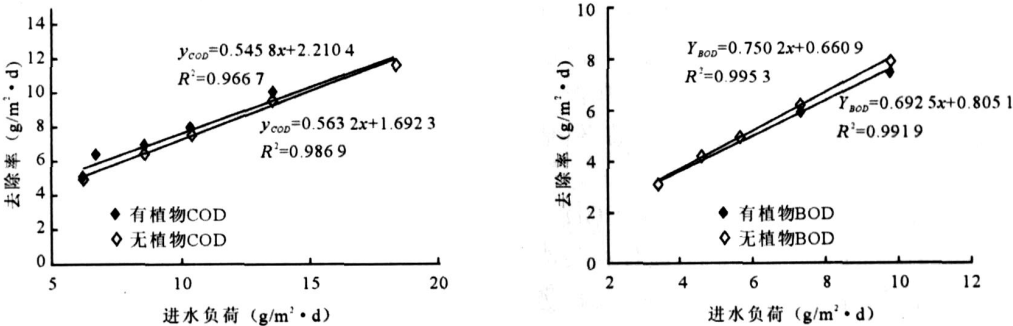


图 1 湿地进出水有机负荷关系(左:COD_{Cr};右 BOD₅)

Fig.1 Organic Matter Loading Rate Versus Removal Rate (left: COD_{Cr}; right: BOD₅)

块湿地对有机物的去除差别不显著。

2.3 湿地氧化还原状态

相关研究^[16~18]表明,有植物湿地 ORP 比无植物湿地高,但是这种氧化状态改善的程度往往取决于湿地植物根系伸展的范围、植物、基质和污水水质等因素。试验在植物生长较快的 4、5 月份测定了湿地的 ORP(表 3),根据 Kadlec 和 Knight 的划分^[12],在距湿地表面以下 20~50 cm 范围内基本是强还原环境,湿地后半部表层 10 cm 范围内为中等还原环境。有植物湿地内部氧化还原电位比无植物湿地略高,是由于芦苇具有较强的输氧能力所致,但是这种提高主要集中在湿地基质水面以下约 15 cm 的范围内,因为芦苇根系的 90 %主要集中在湿地上部 20 cm 的基质层中。从整个湿地来看,两块湿地内部水体主要是厌氧状态的。

2.4 湿地微生物分布及数量

细菌、放线菌和真菌是参与有机物降解的主要微生物菌群,根据 F 检验表明,两块湿地中细菌的数量没有明显的差异 ($P > 0.05$),并且在每块湿地中细菌的数量从前到后整体上是递减的,这表明细菌的繁衍主要取决于营养物质的丰富程度。两块湿地中放线菌和真菌数量没有显著差异 ($P > 0.05$),而且沿程分布规律不明显。3 种微生物数量上层多于下层 ($P < 0.05$),相差约 1 个数量级。

对于有植物湿地,根际微生物数量比非根际基质微生物数量高出约 1,2 个数量级,说明湿地植物的根际效应显著。在湿地床体不同沿程处,根际微生物数量没有明显的变化规律。

3 结论

(1) 有植物湿地和无植物湿地对有机物的去除率都很高,随着 HRT 增大,去除率也增大。除了 HRT 为 2 d 时,芦苇湿地对 COD_{Cr} 的去除率均大于无植物湿地的,分别高出 4.2 %和 3.2 %;在所有 HRT 下,芦苇湿地对 BOD_5 的去除率比无植物湿地降低了 2.5 %、3.4 %和 1.8 %。总体而言,芦苇湿地对有机物的去除效果比无植物湿地有所提高,但是提高并不显著 ($P > 0.05$)。

(2) 芦苇湿地和无植物湿地的进水 COD_{Cr} 、 BOD_5 负荷和去除量之间体现了显著的线性相关性 ($R^2 > 0.96$)。根据模拟的方程,两块湿地对有机物的去除差别不显著。

(3) 有植物湿地水体 ORP 比无植物湿地的高,

提高主要集中在湿地基质水面下约 15 cm 的深度,从整个湿地床体内部来看,连续运行的潜流水平湿地水体主要是厌氧状态的。

(4) 根据 F 检验表明,芦苇湿地和无植物湿地中细菌、放线菌和真菌数量没有明显的差异 ($P > 0.05$)。3 种微生物数量在湿地中上层多于下层 ($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 1994, 29(4): 71~78.
- [2] Brix H. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance [A]. Constructed wetlands for water quality improvement [C]. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1993.
- [3] Hammer D A, Knight R L. Designing constructed wetlands for nitrogen removal [J]. Water Science and Technology, 1994, 29(4): 15~27.
- [4] Brow D S, Reed S C. Inventory of constructed wetlands in the United States [J]. Water Science and Technology, 1994, 29(4): 309~318.
- [5] Kadlec R H. Overview: surface flow constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 1994, 32(3): 1~12.
- [6] Knight R L, Ruble R W, Kadlec R H, et al. Wetlands for wastewater treatment: performance database [A]. Moshiri G A. Constructed wetlands for water quality improvement [C]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 35~58.
- [7] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations [J]. Ecology Engineering, 1999, 12: 5~12.
- [8] Steer D, Fraser L, Boddy J, et al. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent [J]. Ecology Engineering, 2002, 18: 429~440.
- [9] Hatano K, Trettin C C, House C H, et al. Microbial populations and decomposition activity in three subsurface flow constructed wetlands [A]. Constructed wetlands for water quality improvement [C]. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1993.
- [10] Howard Williams C. Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands, a theoretical and applied perspective [J]. Freshwater Biology, 1985, 15: 391~431.
- [11] Kadlec R H. Monitoring report on the Bellair wastewater treatment facility [R]. Wetlands Ecosystem Res Group Rep, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA 1981.
- [12] Kadlec H, Knight R L. Treatment wetlands [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.
- [13] Tanner C C. Plants as ecosystem engineering in subsurface flow treatment wetlands [J]. Water Science and Technology, 2000, 44(11~12): 9~17.
- [14] Liesak W, Schnell S, Revsbech N P. Microbiology of flooded

- rice paddies [J]. FEMS Microb Reviews, 2000, **24**: 625~645.
- [15] Merin G, Pajean J L, Lissolo T. Performance of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area [J]. Hydrobiologia, 2002, **469**: 87~98.
- [16] Burgoon P S, Reedy K R, DeBusk T A. Performance of subsurface flow wetlands with batchload and continuous-flow conditions [J]. Water Environ Res, 1995, **67**:855~862.
- [17] Dunbabin J S, Pokorny J, Bowmer K H. Rhizosphere oxygenation by *Typha domingensis* in miniature artificial wetland filters used for metal removal from wastewaters [J]. Aquat Bot, 1998, **29**:303~317.
- [18] Tanner C C, D'Eugenio J, McBride G B, et al. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms [J]. Ecol Eng, 1999, **12**:67~92.

COMPARISON OF ORGANIC MATTER REMOVAL IN SUBSURFACE HORIZONTAL-FLOW WETLANDS BASED ON WATER BUDGET

ZHANG Zheng¹, FU Rong-bing², YANG Hai-zhen¹, GU Guo-wei¹

(1. State Key Lab of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Planted with *Phragmites australis* and unplanted wetlands were constructed to compare organic matter removal from domestic wastewater based on water budget. Planted wetland had a removal rate of organic matter 2.2 % lower than unplanted wetland in winter with plant harvested. In other seasons, the removal rate of COD_{Cr} in planted wetland was 3.2 %~4.2 % higher than that in unplanted wetland, while BOD₅ was 1.8 %~4.8 % lower than that in unplanted wetland. Consequently, planted wetland showed a little well overall performance than unplanted, but the improvement was not obvious. Comparisons of paired systems commonly showed a little higher oxidation reduced potential (ORP) than unplanted wetland; however, the increase mainly concentrated on the range of top 15 cm water. From the overall bed, ORP is mostly similar for both wetlands with anaerobic condition. Bacteria, actinomycetes and fungi in wetlands substrate were monitored, and there was little difference between planted and unplanted wetlands. However, rhizosphere effect of reed was strong. Organic matter loading rate and removal rate showed obviously strong linear relationships ($R^2 > 0.96$).

Key words: subsurface horizontal-flow wetland; organic matter; water budget; oxidation reduction potential; microorganism