

不同构型湿地氧分布及脱氮效果对比

黄娟¹, 王世和¹, 钟秋爽², 鄢璐¹

(1. 东南大学市政工程系, 南京 210096; 2. 江苏省建设厅科技发展中心, 南京 210013)

摘要:通过2组对比试验(垂直流与水平流湿地、单段式与三段式水平流湿地), 考察了不同构型湿地中溶解氧的分布情况及脱氮效果。结果表明: 不同构型人工湿地水力流态的区别, 导致了床体溶解氧分布和脱氮效果的差异。垂直流人工湿地独特的结构设计和水力流态更有利于湿地内部的供氧, 局部氧浓度可比水平流湿地高 0.17 mg/L; 脱氮效果优于相同运行条件下的水平流湿地, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率分别可提高约 9%、5%。三段式水平流湿地通过接触槽内复氧, 有效改善了溶解氧分布, 利于硝化反应进行, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率最高达 66%, TN 去除率最高达 71%, 分别比单段式湿地提高约 8% 和 5%。此外, 三段式湿地在较低水位下运行仍能取得较好的脱氮效果, 其最佳停留时间的范围也得以延展。

关键词: 构型; 溶解氧; 人工湿地; 脱氮效果

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)06-0117-05

Comparison of Dissolved Oxygen Distribution and Nitrogen Removal Effect in Wetlands with Different Structures

HUANG Juan¹, WANG Shi-he¹, ZHONG Qiu-shuang², YAN Lu¹

(1. Dept. of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Technology development center of reconstruction department, Jiangsu province, Nanjing 210013, P. R. China)

Abstract: The dissolved oxygen distribution and nitrogen removal effect in different structures of wetlands were investigated by two groups of comparison experiments (vertical flow with horizontal flow; single-stage with three-stage horizontal flow). It was found that the different hydraulic flow patterns in different structures of wetlands would result in different oxygen distribution and nitrogen removal effect. The special structure design and hydraulic flow pattern of vertical flow wetland were favorable to its dissolved oxygen distribution, which could increase 0.17 mg/L in local area than that in horizontal flow wetland. The nitrogen removal effect of vertical flow wetland was better than that of horizontal flow wetland in the same operation conditions. The removal efficiency of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN could increase 9% and 5% respectively in vertical flow wetland than that in horizontal flow wetland. Because of reaeration in contacting channels of three-stage wetland, the removal efficiency of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN reached 66% and 71% respectively, which improved 8% and 5% respectively than that of single-stage wetland. In addition, three-stage wetland could keep higher nitrogen removal effect even in low operation water level, and the range of its best hydraulic retention time(HRT) was extended.

Key words: structure; dissolved oxygen; constructed wetland; nitrogen removal effect

收稿日期: 2009-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909019, 50278016)

作者简介: 黄娟(1980-), 女, 博士, 主要从事污水处理技术研究, (E-mail) seu070703@163.com。

潜流型人工湿地(subsurface-flow constructed wetlands, SFCWs)作为目前广泛研究和应用的湿地处理系统,充分利用填料表面生长的生物膜、丰富的植物根系及填料截留等作用,达到净化污染物的效果^[1-3]。根据构型不同,潜流型人工湿地一般分为垂直流和水平流人工湿地,而在传统水平流湿地的基础上加以改进,产生了多段式水平流湿地^[4-5]。不同构型的人工湿地,其水流流态、微生态环境等均存在差异,进而导致污染物降解效果大相径庭^[6]。

目前,针对各类湿地的脱氮机理及效果进行了大量研究^[7-9]。普遍认为,人工湿地脱氮过程集湿地植物吸收、微生物硝化反硝化降解、基质吸附沉降及氨挥发的综合作用,其中,微生物硝化反硝化为主要途径。而湿地大部分区域处于严重缺氧,乃至厌氧的状态,故硝化作用这一好氧反应过程成为微生物脱氮的瓶颈。然而由于湿地脱氮是一个复杂的生态过程,迄今为止其机理仍未完全探明,故已有报道的脱氮效果差异显著^[10]。而关于湿地溶解氧的研究主要集中于植物根区的微环境特征,对于床体内分布及其与脱氮效果关系的探讨尚鲜见报道^[11]。因此,系统地对比研究不同构型人工湿地的溶解氧分布及脱氮效果,有利于进一步解析人工湿地脱氮机制,为人工湿地技术的实际应用和强化设计提供必要的理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 对比试验的湿地构型

各中试试验系统均建于南京市锁金村污水处理厂。湿地底层为 0.2 m 厚粗糙砾石(粒径 40~60 mm),中层为 0.3 m 厚中等砾石(粒径 20~40 mm),上层为 0.15 m 厚细小砾石(粒径 10~30 mm),表层覆土约 0.2 m 厚。试验中,各人工湿地均种植芦苇(*Phragmites communis trin.*)。研究于 2003 年 7 月至 2006 年 12 月间进行,各试验取样时间均为上午 9:00—11:00,每 2 d 取样 1 次。每个工况运行稳定后,多次测定取平均值作为试验对比数据。

1.1.1 垂直流与水平流人工湿地

水平流、垂直流人工湿地结构分别如图 1、图 2 所示。2 湿地长、宽、高均分别为 3 m×1 m×0.85 m,进出水区采用穿孔板均匀布水。在 2 湿地床的上层(20 cm 深)、中层(45 cm 深)和底层(70 cm 深)分别沿程(0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m)设置 15 处取样点,研究湿地的空间氧分布规律。试验采用连续进水方式,水位控制 0.65~0.70 m 深,水力负荷为 25~35 cm/d。

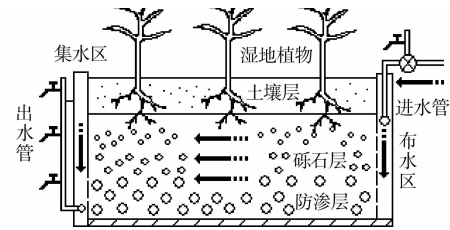


图 1 水平流人工湿地结构图

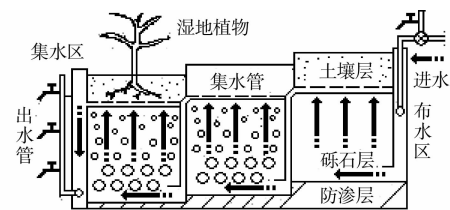


图 2 垂直流人工湿地结构图

1.1.2 单段式和三段式水平流湿地

为研究单段式与多段式水平流人工湿地,将长、宽、高分别为 13.3 m×3.4 m×0.85 m 的单段式水平流湿地改造为三段式水平流湿地。2005 年 6 月至 10 月考察三段式水平流湿地的脱氮效果随水力停留时间(1~10 d)和运行水位(40、60 cm 水深)的变化,并将其与改造前(2004 年 6 月至 10 月)的单段式湿地在相同水力停留时间和运行水位下相对比。三段式水平流湿地结构如图 3 所示。

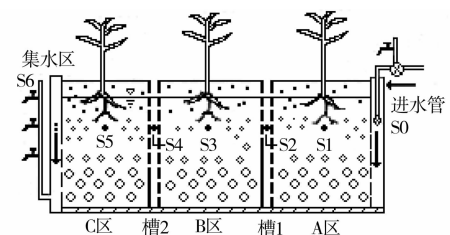


图 3 三段式水平流湿地结构图

三段式水平流湿地全长均分为 A、B、C 三区,各区间设有 0.3 m 宽砖砌接触槽,各槽进水堰均匀开孔,槽 1 出水堰于 0.5 m 高度以上开孔,槽 2 出水堰于 0.35 m 高度以上开孔,以防止湿地下层的短流现象,有效调节湿地各区水位,即使系统出水水位为 20 cm,A 区和 B 区水位仍能淹没植物根系,充分发挥植物和微生物作用。湿地沿程设 7 个采样点(深度方向均匀混合),S0 为湿地进水,S1、S3、S5 采样管位于沿程 2 m、6.5 m 和 11 m 处,S2、S4 为 2 接触槽内污水,S6 为湿地出水。水样密封,取样点水压与湿地中相同。

本组对比试验中,三段式与单段式水平流湿地均为连续进水,试验平均气温接近,水力停留时间及运行水位相同,结果具有可比性。

1.2 进水水质

系统进水为南京锁金村污水处理厂初沉池出水,水质条件见表1。

表1 人工湿地进水水质/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

DO	COD _{Cr}	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN
0.2~1.2	120~300	30~65	0~10	45~80

各水质指标的测定均采用《水和废水监测分析方法》(第4版)中的标准方法。

2 结果与分析

2.1 水平流与垂直流人工湿地的溶解氧分布

水平流和垂直流人工湿地溶解氧的空间分布如表2所示。

表2 水平流与垂直流湿地氧分布

沿程距离/m	水平流/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			垂直流/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层
0.5	0.56	0.50	0.42	0.60	0.54	0.45
1.0	0.41	0.31	0.19	0.43	0.38	0.20
1.5	0.42	0.28	0.13	0.45	0.35	0.30
2.0	0.51	0.32	0.10	0.58	0.40	0.17
2.5	0.43	0.23	0.05	0.47	0.29	0.25

由表2可见,当2组湿地在进水溶解氧浓度均为0.84 mg/L时,垂直流人工湿地各取样点的溶解氧浓度均高于水平流人工湿地。在湿地中、上层,垂直流湿地内溶解氧浓度比水平流湿地最多高出0.08 mg/L。分析认为,垂直流态下床体的死水区缩小,植物根系的润湿条件更好,有利于须状根的生长,根系释氧增强。同时发达的根部疏松了表层土壤,使孔隙率增加,从而湿地的表面复氧作用增强。2湿地底层的溶解氧浓度均明显低于中、上层,但垂直流湿地比水平流有了明显改善,尤其在沿程1.5 m处比水平流湿地高出0.17 mg/L。这是由于水平流湿地中床体底层易形成死水区,出现严重供氧不足,而垂直流湿地中每一段底部水流是由前一段上部的污水经引水管流入,故有效地补充了下部床体中的溶解氧,使其有所回升,保证了垂直流湿地底层仍具有一定的溶氧浓度。

2.2 水平流与垂直流人工湿地的脱氮效果

人工湿地脱氮效果和氧环境密切相关,故垂直流湿地在供氧上表现出的独特优势必然影响其脱氮效果。试验考察了水平流、垂直流湿地 NH₄⁺-N、

TN月平均去除率的年度变化,如图4所示。

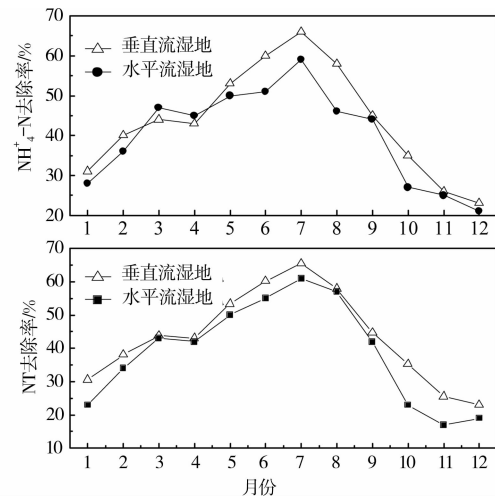


图4 垂直流与水平流湿地脱氮效果

由图4可见,相同运行条件下,垂直流和水平流人工湿地的脱氮效果存在统计学差异(NH₄⁺-N去除率: $t=2.89, P=0.015 < 0.05$; TN去除率: $t=4.66, P=0.00069 < 0.05$)。垂直流人工湿地的NH₄⁺-N、TN去除率普遍高于水平流湿地,夏季(6至8月份)差异更为明显。其中,6月份垂直流湿地的NH₄⁺-N去除率比水平流湿地高9%,TN去除率比水平流湿地高5%。分析认为,湿地构型的不同,造成污水流态和处理微环境的差异。由垂直流湿地的独特设计可看出,上行流湿地每一段中污水由底部的砾石层向上流经土壤层,再由集水管流入下一段的底层填料。即废水从表层的好氧区经集水管流入底层的厌氧区,再自下而上流经缺氧或好氧区,如此循环有利于含氮污染物的硝化反硝化降解。另一方面,植物的新陈代谢及其对系统水力学特性的影响,影响了物质在断面上的分布^[12]。垂直流湿地中,物质在水流断面上的分布仅与植物根系的绝对密度有关,污水与植物根系得以充分接触。而水平流湿地中,植物根系在断面上分布不均,导致水流阻力的不等,从而造成物质的分布不均,未能充分发挥植物对污染物的吸收作用。综合以上因素,垂直流湿地的脱氮效果明显高于水平流湿地。

2.3 三段式与单段式水平流湿地的溶解氧分布

鉴于湿地长宽比大于3:1,故假定沿湿地纵向断面上水流方向一致。控制HRT为5~7 d,单段式与三段式水平流湿地在40 cm和60 cm运行水位时,溶解氧浓度沿湿地长度的分布状况如图5所示。

由图可见,60 cm运行水位时,单段式人工湿地沿程溶解氧浓度均低于0.4 mg/L,出水接近于0,甚至出现低于监测底限的情况。单段式湿地的这种长

期厌氧和缺氧状态,抑制了好氧微生物的生长,不利于有机物和氮的去除。而三段式人工湿地沿程溶解氧分布明显高于单段式湿地,尤其在 S2 和 S4 采样点处溶解氧浓度明显提高,湿地中段 S3 处溶解氧浓度达 0.5 mg/L。可见,三段式水平流湿地通过两个接触槽内的气液表面复氧,缓解了潜流湿地的厌氧状态,整体改善了潜流湿地的氧环境,有利于有机物的好氧降解和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的硝化反应。

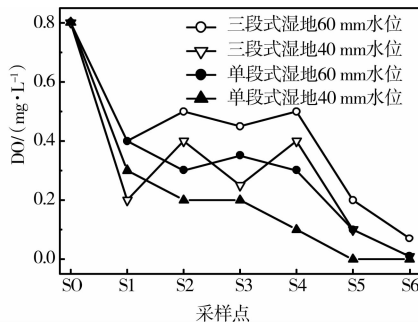


图 5 三段式及单段式湿地 DO 分布

在 40 cm 运行水位下,单段式湿地溶解氧的沿程分布均低于 60 cm 运行水位。这是由于湿地填料厚度约为 0.85 m,运行水位越低,则水面上覆盖填料厚度越厚,不利于空气中氧渗透至污水,因此 40 cm 水位运行时,潜流湿地表面大气复氧作用更加微弱;同时,由于湿地芦苇根长一般在 20~40 cm,可推得 40 cm 水深处的根系量大大少于 60 cm 水深处。植物根系的大量减少,也导致溶解氧供应不足。而三段式湿地中接触槽内的大气复氧作用有效地缓解了溶解氧不足的问题,使其沿程溶解氧均高于单段式湿地。

2.4 三段式与单段式水平流湿地的脱氮效果

三段式与单段式水平流湿地分别在 40 cm 和 60 cm 水位下运行, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的净化效果随 HRT 的变化规律如图 6 所示。由图 6 可见,在相同运行工况下,三段式与单段式水平流湿地的脱氮效果存在统计学差异(60 cm 运行水位下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率: $t=4.49, P=0.0015 < 0.05$; TN 去除率: $t=3.77, P=0.0044 < 0.05$ 。40 cm 运行水位下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率: $t=4.22, P=0.0023 < 0.05$; TN 去除率: $t=5.64, P=0.00032 < 0.05$)。

相同运行工况下,三段式水平流湿地对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率明显高于单段式水平流湿地。潜流湿地中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要依靠植物根系吸收和微生物硝化反应去除,而溶解氧是关键的限制因子。三段式水平流湿地中的溶解氧状况一定程度上得以改善,使系统内硝化细菌数量增加,活性增强, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 硝化

率有所提高。当 HRT 为 6~8 d 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均可达到 65% 以上,最高值比单段式湿地提高约 8%。由于湿地系统中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的硝化反应是脱氮的限制性步骤,故 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率的提高必然导致 TN 去除率相应提高。此外,三段式水平流湿地水流更为曲折,有利于污水与基质、植物根系及微生物充分接触,故 TN 去除率在 HRT 为 7 d 时达到最高值 71%,比单段式水平流湿地 TN 去除率最高值高 5%。

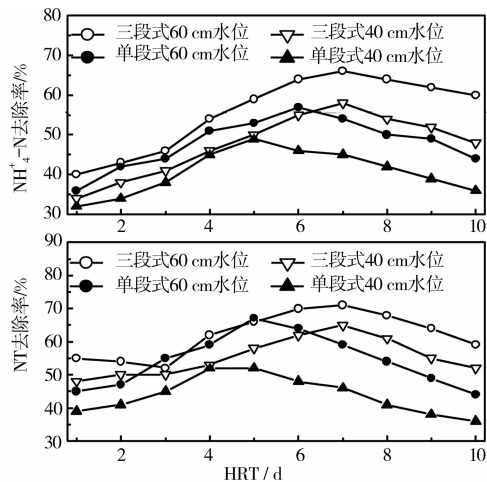


图 6 三段式及单段式湿地脱氮去除效果

比较 2 湿地在 40 cm 水位运行时的脱氮效果可以发现,三段式湿地的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率最高值分别达 58% 和 65%,比单段式湿地分别高出 9% 和 13%。分析认为,在低水位运行时,单段式湿地床体厌氧严重,而三段式湿地接触槽的设置一定程度上缓解了厌氧状况;此外,接触槽出水堰对污水起到一定的抬高作用,有效提高了系统 A 区和 B 区的实际水位,有利于湿地上层土壤基质和植物根系附着的大量微生物充分发挥降解作用。因此,三段式水平流湿地采用低水位出水时,仍能保持较高的脱氮效率。

在试验进水条件下,单段式水平流湿地最佳 HRT 为 5~6 d,而三段式水平流湿地对最佳 HRT 的控制要求有所降低,当 HRT 为 4~9 d 时, TN 去除率均能达到 60% 以上。这是由于单段式水平流湿地中, HRT 过长易导致系统厌氧区扩大,不利于硝化反应进行,而三段式水平流湿地中,由于溶解氧状况的改善,使湿地即使在较长 HRT 下运行,仍能保持较高的脱氮率。

3 结论

1) 不同构型人工湿地中水力流态的区别,导致

了床体溶解氧分布的差异,进而使含氮污染物净化效果大相径庭。

2)垂直流湿地各取样点溶解氧浓度均高于水平流湿地,湿地底层溶解氧改善更为明显。相同运行工况下,垂直流湿地脱氮效果优于水平流湿地, NH_4^+-N 去除率比水平流湿地最多高出9%,而TN去除率最多高出5%。

3)三段式水平流湿地通过接触槽内的复氧作用,有效改善了床体溶解氧状况,利于硝化反应进行, NH_4^+-N 去除率最高达到66%,TN去除率最高达到71%,分别比单段式湿地提高了约8%、5%。

4)三段式水平流湿地降低了其运行水位和最佳HRT的控制要求,即在较低水位(40 cm深)下运行仍可保持较高的脱氮效果,HRT为4~9 d时,TN去除率均能达到60%以上。

参考文献:

- [1] MATAMOROS V, PUIGAGUT J, GARCIA J, et al. Behavior of selected priority organic pollutants in horizontal subsurface flow constructed wetlands: A preliminary screening[J]. *Chemosphere*, 2007, 69(9): 1374-1380.
- [2] CHRISTINA V, REIMO A, KASPAR N, et al. Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380: 66-74.
- [3] 杨长明, 顾国泉, 李建华, 等. 潜流人工湿地系统停留时间分布与N、P浓度空间变化[J]. *环境科学*, 2008, 29(11): 3043-3048.
- YANG CHANG-MING, GU GUO-QUAN, LI JIAN-HUA, et al. Residence time distributions and spatial variation of N, P in the subsurface-flow constructed wetlands for purification of eutrophic aquaculture water [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(11): 3043-3048.
- [4] 黄娟, 王世和, 鄢璐, 等. 三段式潜流湿地污水净化效果[J]. *水处理技术*, 2007, 33(3): 65-68.
- HUANG JUAN, WANG SHI-HE, YAN LU, et al. Wastewater purification with three-segment subsurface wetland[J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(3): 65-68.
- [5] 祝宇慧, 田光明. 复合流人工湿地处理生活污水的试验研究[J]. *水处理技术*, 2009, 35(1): 46-53.
- ZHU YU-HUI, TIAN GUANG-MING. Experimental study of hybrid flow constructed wetlands treating domestic sewage[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35(1): 46-53.
- [6] 杜晓丽, 徐祖信, 王晟. 两种改进型垂直潜流人工湿地脱氮途径分析研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(3): 62-66.
- DU XIAO-LI, XU ZU-XIN, WANG SHENG. Analysis of nitrogen removal routes in two modified vertical subsurface-flow constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(3): 62-66.
- [7] VARIGA S, CHONGRAK P. Nitrogen mass balance and microbial analysis of constructed wetlands treating municipal landfill leachate[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(3): 565-570.
- [8] JEREMY F, DORIN B, KELLY A R, et al. Nitrogen removal from domestic wastewater using the marshland upwelling system[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27(1): 22-36.
- [9] IWA. Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation. International water association scientific and technical report No. 8 [R]. London, UK: IWA Publishing, 2000.
- [10] 黄娟, 王世和, 鄢璐, 等. 潜流型人工湿地硝化和反硝化作用强度研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(9): 1965 - 1969.
- HUANG JUAN, WANG SHI-HE, YAN LU, et al. Intensity of nitrification and denitrification in subsurface-flow constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9): 1965 - 1969.
- [11] 鄢璐, 王世和, 雒维国, 等. 运行条件下潜流型人工湿地溶氧状态研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(10): 2009- 2013.
- YAN LU, WANG SHI-HE, LUO WEI-GUO, et al. Study on the oxygen condition in subsurface flow wetlands in operation [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10): 2009- 2013.
- [12] PETER F B. Rootzone dynamics in constructed wetlands receiving wastewater: A comparison of vertical and horizontal flow systems[J]. *Wat Sci Tech*, 1995, 32(3): 281-290.

(编辑 胡英奎)