

氧调控下复合垂直流人工湿地脱氮研究

陶敏^{1,2,3}, 贺锋^{1*}, 徐栋¹, 周巧红¹, 梁威¹, 成水平¹, 吴振斌^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 黄石理工学院环境科学与工程学院, 黄石 435003; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:溶解氧是人工湿地脱氮的重要限制性因子, 调控湿地内氧状态分布是提高其脱氮效果的关键所在. 为此, 研究了夏、冬季时氧调控下复合垂直流人工湿地(IVCW)中氧状态的变化规律、脱氮效果及净化机制. 结果表明, 氧调控下IVCW中氧状态改善明显, 夏、冬季时好氧Ⅰ区范围(以深度表示)分别从22 cm、17 cm扩大至53 cm、44 cm; 即使冬季植物枯萎时, 氧调控下IVCW沿水流方向仍可依次形成好氧Ⅰ区-缺氧区-好氧Ⅱ区(O-A-O)3个功能区, 而冬季时常规IVCW仅有好氧Ⅰ区-缺氧区(O-A)2个功能区. 氧调控下IVCW的有机物降解和硝化能力显著增强, 尤其是冬季时COD、TN、NH₄⁺-N的平均去除率分别提高了12.2%、6.9%、15.1%; 并且采用8 h:16 h的间歇曝气方式, 出水中NO₃⁻-N浓度无明显增加. 另外, 好氧Ⅰ区是IVCW中污染物去除的主要区域, 氧调控主要是增强了该功能区的净化能力. 因此, 氧调控措施对于IVCW系统的优化与应用具有重要意义.

关键词:复合垂直流人工湿地; 氧调控; 脱氮; 氧化还原功能区; 净化机制

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)03-0717-06

Removal Nitrogen of Integrated Vertical-Flow Constructed Wetland Under Aeration Condition

TAO Min^{1,2,3}, HE Feng¹, XU Dong¹, ZHOU Qiao-hong¹, LIANG Wei¹, CHEN Shui-ping¹, WU Zhen-bin¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Oxygen is an important limit factor of nitrogen removal in constructed wetlands, so it is the key point for improving nitrogen removal efficiency of constructed wetlands that the optimization of oxygen distribution within wetlands. Therefore, oxygen status, nitrogen removal and purification mechanism of integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW) under aeration condition in summer and winter have been studied. The results showed that both oxygen levels and aerobic zones were increased in the wetland substrates. The area of oxic zone I (expressing with depth) extended from 22 cm, 17 cm to 53 cm, 44 cm, in summer and winter, respectively. The electric potential (Eh) profiling demonstrated that artificial aeration maintained the pattern of sequential oxic-anoxic-oxic (O-A-O) redox zones within the aerated IVCW in winter, while only two oxic-anoxic (O-A) zones were present inside the non-aerated IVCW in the cold season. The decomposition of organic matter and nitrification were obviously enhanced by artificial aeration since the removal efficiency of COD, TN and NH₄⁺-N were increased by 12.2%, 6.9% and 15.1% in winter, respectively. There was no significant accumulation of NO₃⁻-N in the effluent with an aeration cycle of 8 h on and 16 h off in this experiment. Moreover, we found that oxic zone I was the main region of pollutants removal in IVCW system, and artificial aeration mainly acted to enhance the purification capacity of this oxic zone in the aerated IVCW. These results suggest that aeration is important for optimization and application of IVCW system.

Key words: integrated vertical-flow constructed wetland(IVCW); aeration; nitrogen removal; redox zone; purification mechanism

人工湿地系统对于氮的去除作用包括基质的吸附、沉淀、水生植物的吸收、氮的挥发以及微生物的硝化与反硝化作用, 其中微生物的硝化与反硝化作用是湿地脱氮的主要途径^[1~3]. 硝化反应是好氧过程, 主要由硝化细菌和亚硝化细菌来完成; 而反硝化过程则在缺氧条件下由反硝化细菌来完成^[1, 4, 5]. 由此可见, 氧是影响人工湿地净化效果的重要限制因子之一, 它不仅影响微生物的种类、数量与酶活性, 还直接影响系统的净化效果.

由于潜流人工湿地自身构造的限制, 湿地内溶解氧浓度偏低、脱氮不彻底^[6~8]; 尤其当植物枯萎时, 植

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2010-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808172, 20877093, 30870221); 湖北省杰出青年基金项目(2010CDA093); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-002-004); 贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教科20090076)

作者简介: 陶敏(1982~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水环境生态工程, E-mail: tmiii@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hefeng@ihb.ac.cn, wuzb@ihb.ac.cn

物根系输氧减少,导致湿地冬季脱氮效果更差^[9]. 目前,人工湿地溶解氧调控脱氮措施主要有:预曝气^[10]、种植泌氧强的植物^[11]、频繁调节液面高度(潮汐流)^[12]、设置通气管^[13~15]、鼓风曝气^[16~18]等.但是,持续增氧会导致湿地出水中硝态氮浓度的大量增加,使总氮去除效率下降^[19]. 因此,如何调控与优化湿地沿程的溶解氧状态,创造硝化、反硝化反应各自所需要的环境条件对湿地脱氮效果显得尤为重要.

复合垂直流人工湿地(integrated vertical-flow constructed wetland, IVCW)是一种新颖的湿地处理系统,其独特的下行流池-上行流池结构以及间歇式进水方式,形成了好氧-缺氧不断变化的氧化还原环境,使系统具有良好的净化效果^[20~22],但脱氮仍不彻底.为此,本试验研究了夏季(植物生长)和冬季(植物枯萎)时,氧调控下人工湿地中氧状态的变化规律及脱氮效果,并从湿地系统氧化还原功能区的角度分析其“黑箱”净化机制,以期为人工湿地技术的优化提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 试验系统

试验系统位于温室中,由2套大小相同的复合垂直流人工湿地(integrated vertical-flow constructed wetland, IVCW)小试系统组成;每套 IVCW 系统由底部相通的下行池(1 m×1 m×0.65 m)和上行池(1 m×1 m×0.55 m)串联而成,基质填料为砂和砾石.下行流池和上行流池内分别栽种美人蕉(*Canna generalis*)和石菖蒲(*Acorus tartarinowii*).其中一套湿地下行池底部的排空管内平行埋有曝气管,其以软管与空气压缩机连接,曝气量采用气体流量计计量,另一套湿地作为不曝气对照系统,如图1.

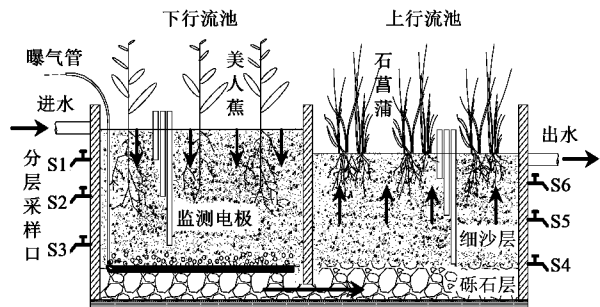


图1 复合垂直流人工湿地系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of IVCW

1.2 运行条件

系统进水为居民小区生活污水,采用间歇式进

水,水力负荷为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,水力停留时间为24 h.空气压缩机采用间歇停曝方式,运行/停止时间比为8 h:16 h,平均气体流量为 $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

1.3 采样及指标测定方法

沿水流方向分别在下行池、上行池(10 cm、30 cm、50 cm)设置6个分层采样口(S1、S2、S3、S4、S5、S6),如图1所示.试验时间为夏季(2008年6月~8月)和冬季(2008年12月~2009年2月),定期采集湿地进水、出水以及6个分层采样口出水水样,采样频率每周1次.

同时,分别在下行池、上行池(10 cm、30 cm、50 cm)设置6个氧化还原电位(Eh)监测点.基质Eh采用铂金-甘汞电极法,测定仪器为PHS-29型酸度计.电极均先预埋基质中,待稳定后开始测定,每0.5 h记录1次读数,连续测定3 d后取平均值.

溶解氧(DO)、pH采用Thermo Orion Five-Star型便携式测定仪测定,化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、总氮(TN)等指标按国家标准方法进行测定^[23].

1.4 数据处理

水质指标测试结果均取平均值,并求出标准偏差.采用非线性相关分析探讨IVCW系统基质氧化还原电位(Eh)与深度(h)之间的关系,统计分析软件为Origin 7.0.

2 结果与分析

2.1 氧状态分布

复合垂直流人工湿地在常规运行状态下,进水溶解氧浓度在 $1.0 \sim 4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,湿地中溶解氧在下行池上层(监测点S2,约25 cm深)即已降至 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,使得好氧区域较小,不利于硝化反应的充分进行;尤其是冬季植物枯萎时,溶解氧在下行池中下层及整个上行池都处于很低水平,使得湿地系统冬季硝化效果更差.因此在IVCW下行池深约60 cm处设置曝气管,用于改善湿地内溶解氧水平.结果显示,强化曝气改善了湿地内溶解氧的分布,见图2.

通过基质氧化还原电位(Eh)也可以反映湿地中氧环境的状态,根据土壤氧化还原环境的划分原则,好氧、缺氧、厌氧环境的Eh值的范围分别为 $>300 \text{ mV}$ 、 $-100 \sim 300 \text{ mV}$ 、 $< -100 \text{ mV}$ ^[24].夏、冬季2种状态(曝气与不曝气)下基质氧化还原电位的沿程变化如图3所示,可以看出其结果与溶解氧的分布是一致的.从基质Eh的空间变异来看,

IVCW 在夏季常规运行状态下,下行池表层(S1)、两池底层(S3、S4)、上行池表层(S6)的氧化还原电位分别表现为好氧环境($>300\text{ mV}$)、缺氧环境($-100\sim 300\text{ mV}$)、好氧环境($>300\text{ mV}$),即沿水流方向湿地内依次形成了好氧Ⅰ区-缺氧区-好氧Ⅱ区3个氧化还原功能区;IVCW 在冬季时则仅形成了好氧区-缺氧、厌氧区2个氧化还原功能区,这主要是由于冬季植物枯萎导致根系泌氧减少的缘故.通过人工强化曝气,即使是在冬季,IVCW 都可形成好氧Ⅰ区-缺氧区-好氧Ⅱ区3个氧化还原功能区.这种不同的氧化还原环境分别为好氧、兼性和厌氧微生物提供了适宜小生境,从而提高了系统的脱氮效果.

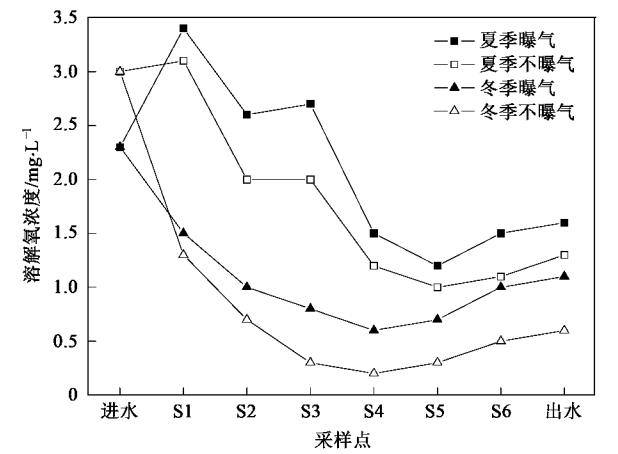


图2 湿地中溶解氧浓度的变化

Fig.2 Variation of DO concentration in IVCW

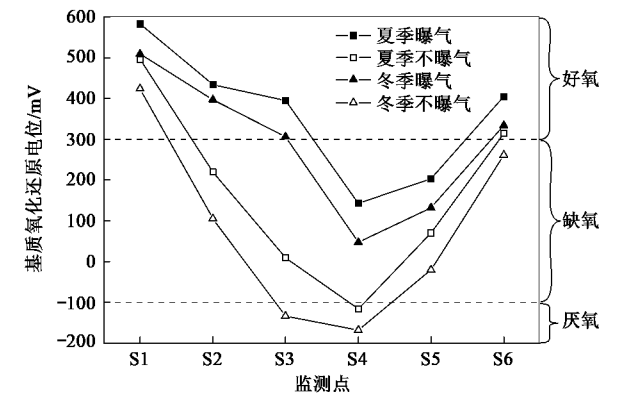


图3 湿地中基质氧化还原电位的变化

Fig.3 Variation of substrate redox potential in IVCW

2.2 COD 的去除

在 IVCW 中增设曝气管,不仅可以提高湿地内溶解氧的含量,而且还可以刺激好氧微生物的生长,促进有机物的降解(图4).夏季时,曝气 IVCW 对

COD 的平均去除率为 81.2% ,较不曝气 IVCW 略提高了 4.8% .然而冬季时,曝气 IVCW 对 COD 的去除率范围维持在 $62.3\%\sim 75.8\%$ 之间(平均去除率为 68.3%),表现得非常稳定,较不曝气湿地显著提高了 12.2% .这说明在夏季植物生长茂盛以及气温较高时,氧调控措施对湿地系统的有机物降解影响较小;但在冬季时,曝气措施可一定程度上减少低温及植物枯萎对 COD 去除的影响,这与 Maltais-Landry 等^[12]、Ouellet-Plamondon 等^[16] 的研究结论是一致的.

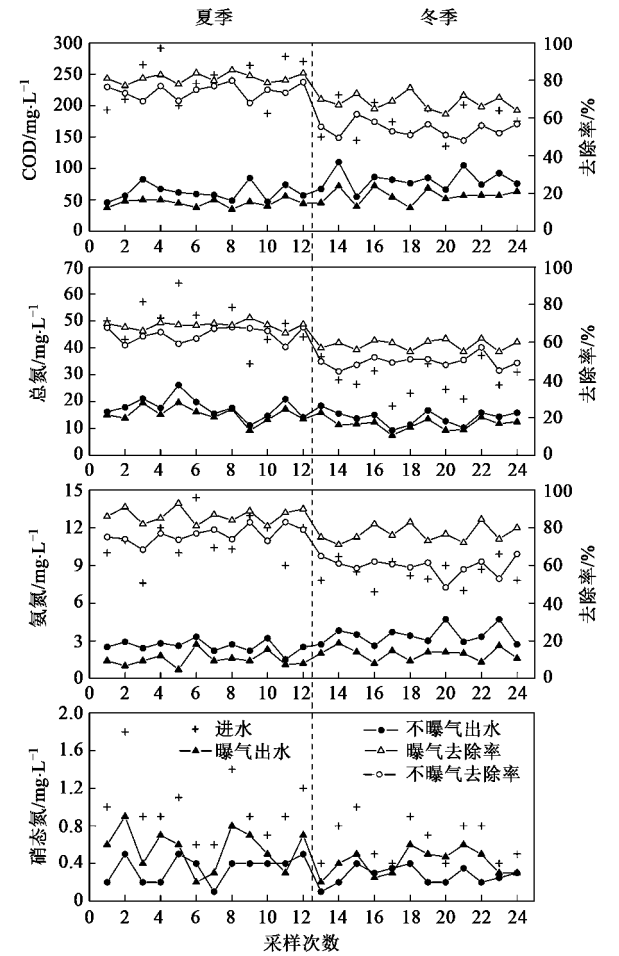


图4 曝气与不曝气 IVCW 对 COD、总氮、氨氮、硝态氮的去除效果比较

Fig.4 Comparison of COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ removal in aerated and non-aerated IVCWs

2.3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除

在常规 IVCW 中,由于溶解氧浓度在下行池中上层已降至很低水平,硝化反应难以充分进行,尤其是冬季植物枯萎时硝化作用更弱.氧调控下 IVCW 中溶解氧水平改善明显,下行池 S3 监测点的溶解氧浓度维持在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,可以满足氨氮硝化对溶

解氧的需求. 无论是夏季还是冬季,曝气 IVCW 的硝化能力都显著高于不曝气 IVCW;尤其是冬季时,曝气 IVCW 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为 76.8%,较不曝气 IVCW 提高了 15.1%,且与夏季时不曝气 IVCW 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率相当. 因此,从某种程度上说明,氧调控措施能完全补偿冬季低温以及植物枯萎对湿地系统硝化能力的影响.

2.4 TN 的去除

人工湿地脱氮的主要途径是依靠微生物的硝化与反硝化作用,通过氧调控措施可以促进微生物的硝化作用,实现了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的转化;但如何创造厌缺氧的环境条件促进微生物的反硝化作用,是实现总氮完全去除的关键所在. Jamieson 等^[19] 研究表明,持续增氧可为湿地中的好氧微生物提供充足的氧源,提高湿地对 COD 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率;但持续增氧会导致湿地出水中硝态氮浓度的大量增加,使 TN 的去除效率下降. 本试验采用 8 h:16 h 的间歇停曝方式,结合 IVCW 独特的下行流-上行流的复合水体流态,形成了时空上动态变化的好氧/厌缺氧环境

条件,促进了硝化与反硝化反应的充分进行,从而提高了总氮的去除. 冬季植物枯萎时,氧调控下 IVCW 对 TN 的平均去除率达到 58.5%,较不曝气 IVCW 提高了6.9%.

另外,由图 4 可以看出,曝气与不曝气 IVCW 系统出水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度差别不大,进一步说明采用 8 h:16 h 的间歇停曝方式提供了反硝化反应所需的缺氧环境条件,促进了反硝化作用的进行.

3 讨论

3.1 氧调控下 IVCW 中氧化还原功能区范围的变化

为了定量比较氧调控下 IVCW 中氧化还原功能区范围的变化,对基质氧化还原电位 (Eh) 与深度 (h) 之间进行拟合,然后利用拟合方程推算出各氧化还原功能区的范围,结果见表 1. 可见,夏、冬季时氧调控下 IVCW 中好氧 I 区范围(以深度表示)分别从 22 cm、17 cm 扩大至 53 cm、44 cm,有利于有机物好氧分解和硝化反应的进行.

表 1 曝气与不曝气 IVCW 中各氧化还原功能区的范围
Table 1 Depth of different redox function units in aerated and non-aerated IVCWs

条件	拟合方程	R^2	范围(以深度表示)/cm		
			好氧 I 区 (>300 mV)	缺氧区 (-100 ~ 300 mV)	好氧 II 区 (>300 mV)
夏季曝气	$Eh = 0.002\ h^3 - 0.265\ 4\ h^2 + 3.486\ 5\ h + 561.08$	0.921	53	51	16
冬季曝气	$Eh = 0.002\ 3\ h^3 - 0.318\ 5\ h^2 + 5.548\ 8\ h + 478.67$	0.943	44	66	10
夏季不曝气	$Eh = 0.187\ h^2 - 24.557\ h + 747.73$	0.973	22	87	11
冬季不曝气	$Eh = 0.203\ h^2 - 26.113\ h + 676.97$	0.995	17	103	0

3.2 氧调控下 IVCW 中氧化还原功能区净化效率的变化

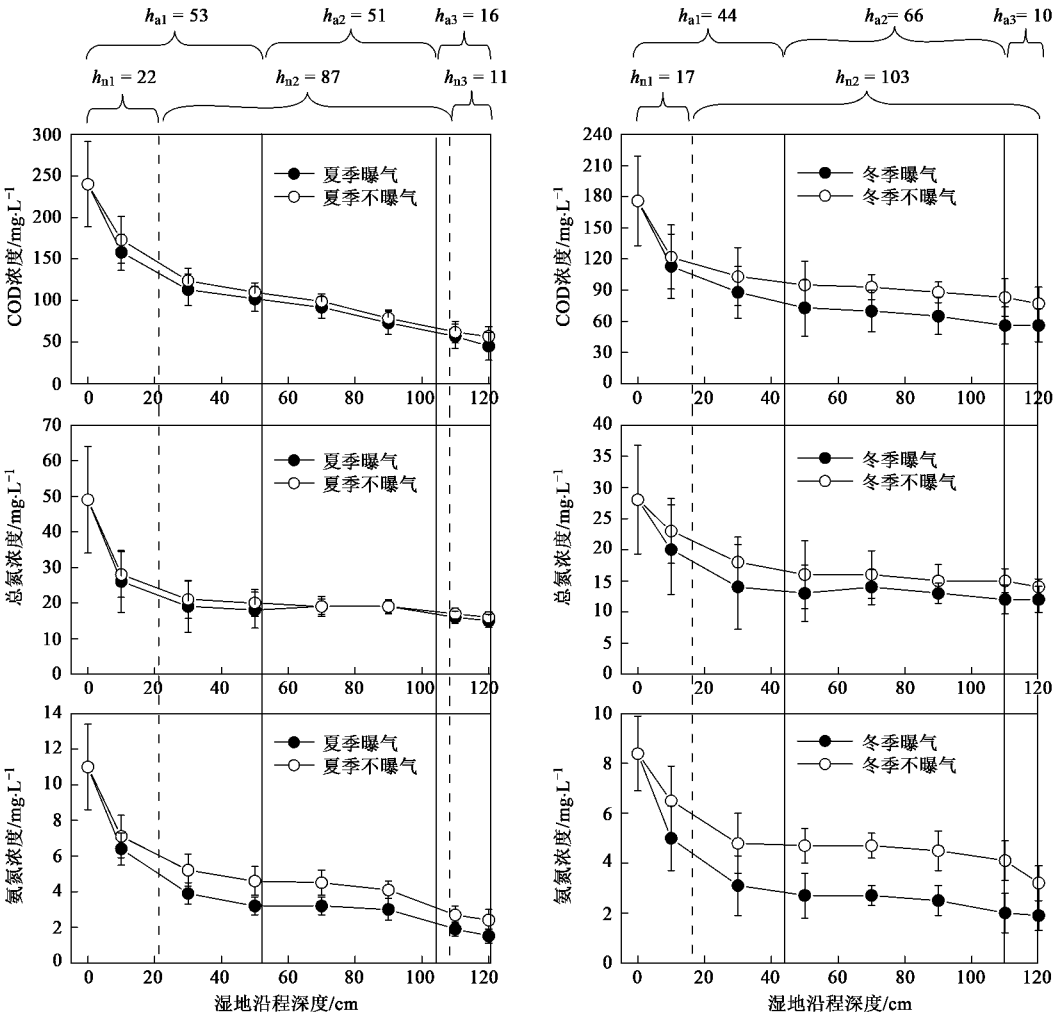
由图 5 可见,在氧调控措施和季节(植物、气温等)的影响下,IVCW 中氧化还原功能区范围会发生变化,从而影响着沿程污染物浓度的变化. 好氧 I 区是有机物好氧分解和硝化反应的区域,承担了大部分 COD、氨氮的去除. 夏季时,曝气促进了 IVCW 的硝化能力,氨氮含量大大降低,在 S2 采样口氨氮浓度就已经降到 $4\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下;但是,曝气对 IVCW 沿程 COD、总氮浓度影响不显著. 冬季时,氧调控下好氧 I 区的范围扩大至 44 cm,增强了基质微生物活性,加快了好氧反应速率,显著提高了有机物和氮的去除,该功能区(以 0 ~ 50 cm 计)内 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率较不曝气时分别提高了约 12.5%、10.7%、23.8%.

缺氧区主要是进行有机物的厌氧分解和反硝化

反应. 不曝气 IVCW 中缺氧区范围偏大,尤其是冬季时其范围达到 103 cm,几乎占据整个湿地区域,极大限制了 COD 的降解以及氨氮的硝化过程. 在氧调控的作用下,夏、冬季缺氧区与好氧区范围大小的比值分别从 2.6、6.1 降至 0.7、1.2,由此可见 IVCW 中各氧化还原功能区的范围得到了优化,从而提高了系统的脱氮效果.

好氧 II 区是继续降解 COD 以及氨氮的硝化过程. 夏季时,由于大气复氧和植物根系输氧的作用,不曝气 IVCW 中此功能区可恢复为好氧环境,其范围与曝气 IVCW 仅相差 5 cm,因而功能区沿程污染物浓度变化差别不大. 冬季时,由于植物枯萎以及湿地表层冰封的影响,不曝气 IVCW 中此功能区变为缺氧环境;而在氧调控作用下,好氧 II 区仍然存在,促进了 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除.

一般的水平潜流人工湿地,水流方式为水平推



h_{a1} 、 h_{a2} 、 h_{a3} 分别为曝气 IVCW 中好氧 I 区、缺氧区、好氧 II 区 3 个氧化还原功能区的范围;
 h_{n1} 、 h_{n2} 、 h_{n3} 分别为不曝气 IVCW 中好氧 I 区、缺氧区、好氧 II 区 3 个氧化还原功能区的范围

图 5 氧调控下湿地沿程 COD、总氮、氨氮浓度的变化

Fig. 5 Variation of COD, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in IVCW under aeration condition

流,表层基质内的污水一直处于好氧环境,而中下层基质内污水则长期处于厌、缺氧环境,对于同一污水其经过的氧环境条件不变,这种单一的好氧或厌氧环境不利于氮的去除.据研究发现,潜流人工湿地内部整体处于缺、厌氧状态,基质氧化还原电位一般都为负值,能充分满足反硝化作用但不能满足硝化作用的要求^[25, 26].复合垂直流人工湿地独特的下行流-上行流(“U”型)复合水体流态,使IVCW具有好氧-缺、厌氧-好氧依次变化的氧环境特征,类似于O-A-O(oxic-anaerobic-oxic)废水组合工艺,有利于硝化与反硝化脱氮,使IVCW较其它同类人工湿地具有较高的脱氮效果.另外,由图5可以发现,无论是曝气还是不曝气,好氧I区中污染物的浓度削减最快,它是污染物去除的主要区域;并且氧调控措施主

要是扩大了好氧I区的范围,增强了此功能区的净化能力,从而提高了整个湿地系统的脱氮效果.

4 结论

(1)夏季时不曝气IVCW沿水流方向依次形成了好氧I区-缺氧区-好氧II区(O-A-O)3个功能区,而冬季时只有好氧I区-缺氧、厌氧区(O-A)2个功能区;氧调控下IVCW中氧状态改善明显,夏、冬季时好氧I区范围(以深度表示)分别从22 cm、17 cm扩大至53 cm、44 cm,并且即使冬季植物枯萎时好氧II区仍能存在,有利于各类好氧反应的充分进行.

(2)氧调控下IVCW的有机物降解和硝化能力显著增强,尤其是冬季时COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别提高了12.2%、6.9%、15.1%;并且采

用 8h、16h 的间歇停曝方式,出水中 NO₃⁻-N 浓度没有明显增加。

(3)好氧 I 区是 IVCW 中污染物去除的主要区域,氧调控主要是增强了该功能区的净化能力,特别是冬季时功能区(以 0 ~ 50 cm 计)内 COD、TN、NH₄⁺-N 的去除率较不曝气时分别提高了约 12.5%、10.7%、23.8%。

致谢:张甬元教授、刘保元教授、付贵萍、梁威和张丽萍等在实验过程中给予了指导;李明、余丽华、孔令为、曹湛清等在实验数据测定中给予帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] Kadlec R H, Knight R L. Treatment wetlands [M]. Chelsea, Michigan, USA: Lewis Publishers, 1996.

[2] Benham B L, Mote C R. Investigating dairy lagoon treatability in a laboratory-scale constructed wetlands system [J]. Transactions of the ASAE, 1999, **42**:495-502.

[3] Vymazal J, Brix H, Cooper P F, *et al.* Removal mechanisms and types of constructed wetlands [A]. In: Vymazal J, Brix H, Cooper P F, *et al.* Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe [C]. Leiden: Backhuys Publishers, 1998. 17-66.

[4] Reddy K R, D'Angelo E M. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 1997, **35**: 1-10.

[5] Lee M A, Stansbury J S, Zhang T C. The effect of low temperatures on ammonia removal in laboratory-scale constructed wetland [J]. Water Environment Research, 1999, **71**: 340-347.

[6] Van-Oostrom A J, Russell J M. Denitrification in constructed wastewater wetlands receiving high concentration of nitrate [J]. Water Science Technology, 1994, **29**: 7-14.

[7] Cottingham P D, Davies T H, Hart B T. Aeration to promote nitrification in constructed wetlands [J]. Environmental Technology, 1999, **20**: 69-75.

[8] Wu M Y, Franz E H, Chen S. Oxygen fluxes and ammonia removal efficiencies in constructed treatment wetlands [J]. Water Environmental Research, 2001,**73**(6): 661-666.

[9] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetlands [J]. Water Science Technology, 1994, **29**: 71-78.

[10] Noorvee A, Pöldvere E, Mander Ü. The effect of pre-aeration on the purification processes in the long-term performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. Science of the Total Environment, 2007, **380**: 229-236.

[11] Austin D C, Lohan E, Verson E. Nitrification and denitrification

in a tidal vertical flow wetland pilot. Proceedings of the water environment technical conference 2003 [R]. Los Angeles, California: Water Environment Federation, 2003.

[12] Maltais-Landry G, Chazarenc F, Comeau Y, *et al.* Effects of artificial aeration, macrophyte species, and loading rate on removal efficiency in constructed wetland mesocosms treating fish farm wastewater[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2007, **6**(4): 409-414.

[13] Green M, Friedler E, Safrai I. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland utilizing a passive air pump [J]. Water Research, 1998, **32**(12): 3513-3520.

[14] Lahav O, Artzi E, Tarre S, *et al.* Ammonium removal using a novel unsaturated flow biological filter with passive aeration [J]. Water Research, 2001, **35**(2): 397-404.

[15] 孙亚兵,冯景伟,田园春,等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 环境科学学报,2006,**26**(3): 404-408.

[16] Ouellet-Plamondon C, Chazarenc F, Comeau Y, *et al.* Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate [J]. Ecological Engineering, 2006, **27**(3): 258-264.

[17] 任拥政,章北平,海本增. 局部充氧提高波形潜流人工湿地除污效能的研究[J]. 中国给水排水,2007,**23**(11):28-31.

[18] 鄢璐,王世和,钟秋爽,等. 强化供氧条件下潜流型人工湿地运行特性[J]. 环境科学,2007,**28**(4):736-741.

[19] Jamieson T S, Stratton G W, Gordon R, *et al.* The use of aeration to enhance ammonia nitrogen removal in constructed wetlands [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2003, **45**: 109-114.

[20] Zhao W Y, Wu Z B, Zhou Q H. Removal of dibutyl phthalate by a staged, vertical-flow constructed wetland [J]. Wetlands, 2004, **24**(1): 202-206

[21] 吴振斌,徐光来,周培疆,等. 复合垂直流人工湿地污水氮的去除效果研究[J]. 农业环境科学学报,2004, **23**(4): 757-760.

[22] 陶敏,贺锋,徐栋,等. 复合垂直流人工湿地氧化还原特征及不同功能区净化作用研究[J]. 长江流域资源与环境,2008, **17**(2):291-294.

[23] 国家环境保护总局. 水和废水分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002.

[24] 牟树森,青长乐. 环境土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 1993.

[25] Green M, Safrai I, Agami M. Constructed wetlands for river reclamation; Experimental design start-up and preliminary results [J]. Bioresource Technology, 1996, **55**(2): 157-162.

[26] 张甲耀,夏盛林,熊凯,等. 潜流型人工湿地污水处理系统的研究[J]. 环境科学,1998,**19**(4):36-39.