

复合垂直流人工湿地污水氮的去除效果研究

吴振斌¹, 徐光来², 周培疆^{1,2}, 张兵之¹, 成水平¹, 付贵萍¹, 贺峰¹

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学环境科学系, 湖北 武汉 430072)

摘要:采用复合垂直流人工湿地(IVCW)系统,研究了系统内部水流方向上各态氮和其它理化参数的变化。结果表明,复合垂直流人工湿地中,硝态氮、亚硝态氮、溶解氧和 pH 沿水流方向逐渐减小;总氮去除率为 43.63%,可使劣 V 类水的总氮指标降至Ⅲ类;氮的去除主要发生在下行池,上行池因溶解氧低、有机碳不足和系统向水中释放氮的原因,脱氮效果不明显。

关键词:垂直流湿地; 污水处理; 总氮; 氨氮

中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2004)04-0757-04

Removal Effects of Nitrogen in Integrated Vertical Flow Constructed Wetland Sewage Treating System

WU Zhen-bin¹, XU Guang-lai², ZHOU Pei-jiang^{1,2}, ZHANG Bing-zhi¹, CHENG Shui-ping¹, FU Gui-ping¹, HE Feng¹

(1. State Key Lab of Fresh Water Ecology and biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Dept. of Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: As a new ecological engineering for wastewater treatment and water quality management thrived at 1970's, with the advantages of low construction fee, low daily cost and easy to operation and management, constructed wetland (CW) is popularized all around world. CW purified sewages by physics, chemistry and biologic function between the plant, microorganism and soil layer. It is well known that the discharging of sewages including surplus nitrogen will cause eutrophication of water body. A key function of the wetland would be provided additional nitrogen removal. Integrated vertical flow constructed wetland (IVCW) was a new sewage treatment technology by CW which was proposed together by Institute of Hydrobiology of Chinese Academy of Sciences, German Kalong University and Austria's Vienna Agricultural University during "the Ninth Five-Year Plan" in China. IVCW was composed of down-flow vertical system and up-flow vertical system planted by *Canna generalis* and *Acorus tatarinowii* respectively. There was a partition wall between two vertical systems whose bottom was fed through. The down-flow vertical system was 10cm higher than up-flow vertical system, that water flows in the course did not need motive force. IVCW had a longer water restrain time and stronger reply oxygen ability than common wetland sewages treatment system because of length flow and intermission inpouring water. Changes of the nitrogen and physical-chemical characters of different layers in IVCW treating sewages were measured. The results showed that nitrate nitrogen and nitrite nitrogen decreased by 56.96% and 63.43% along the direction of water in the constructed wetland because they were deoxidized to N_2O and N_2 by denitrification, and dissolved oxygen and pH also decreased since the oxygen consumed by nitrification and life function and acid release from organic compound decomposed and nitrification. The total nitrogen concentration of lake water and effluent water was $2.120\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1.195\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. IVCW was a well sewage treating system with the removal rate of total nitrogen 43.63% and the index of total nitrogen in wetland down from beyond V to III, according to the environmental quality level of surface water in China. The nitrogen removal mainly happened in down-flow system in constructed wetland. The denitrification efficiency in up-flow system was not remarkable since the low dissolved oxygen ($0.71 \sim 1.48\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and lack of organic carbon (COD_{Cr} , varied from 20.96 to 28.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and the organic nitrogen release from wetland system toward water. The amination of nitrogen was dominant while nitration was shorter for low dissolve oxygen and oxidation-deoxidized status in IVCW. Increasing reply oxygen and organic carbon in up-flow system could advance the nitrification and denitrification that were crucial function of nitrogen removal in wetland and could improve the nitrogen removal efficiency of IVCW. Subsection inpouring water or pretreatment to transform ammonia nitrogen to nitrate nitrogen were recommendatory means to increase denitrification efficiency in wetland.

Keywords: vertical flow wetland; sewage treatment; total nitrogen; ammonia nitrogen

收稿日期: 2004-01-09

基金项目: 国家“十五”重大科技专项“受污染城市水体修复技术与工程示范”(2002AA601021)

作者简介: 吴振斌(1956—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为生态工程技术与水生植物生理生态学。

人工湿地(Constructed Wetland)是近 20 年发展起来的废水处理工艺。其主要利用湿地中植物、微生物和基质之间的物理、化学和生物作用达到污水净化的目的。高含氮生活污水与废水的排放会造成水体富营养化,因此对氮的去除是污水处理中的重要任务。人工湿地对各态氮具有良好的去除效果^[1, 2],其对氮的去除机制包括基质的吸附、过滤、沉淀以及氮的挥发、植物的吸收和湿地中微生物硝化与反硝化作用的去除。微生物的硝化、反硝化作用在氮的去除中有重要作用,其基本条件是存在大量的硝化菌、反硝化菌和适当的湿地土壤环境条件。硝化过程中需要硝化菌群的存在以及必要的好氧条件,湿地系统内部特别是非根际区域经常处于厌氧状态,从而限制了硝化菌的增长和硝化反应的发生^[3]。目前人工湿地除氮效果方面的报道很多,但缺乏机制方面的研究。本文对复合垂直流人工湿地(Integrated Vertical Flow Constructed Wetland, IVCW)系统中氮的去除机制进行了研究,评价了复合垂直流人工湿地系统内部氮的变化规律。

1 材料与方法

1.1 IVCW 的结构

IVCW 由下行池和上行池组成,2 池中间设有隔墙,底部连通。下行池和上行池均填有一定粒径的砂和砾石,其中下行池的砂层比上行池厚 10 cm。2 池底部均设有较大的砾石层连通。其基本结构如图 1 所示。污水首先经过布水管向下流行,穿过由砂和砾石组成的基质层,在底部的连通层汇集后,穿过隔墙进入上行池。在上行池中,污水由下向上依次经过砾石层、砂层后经收集管收集排出。污水在 IVCW 中流动

完全不需要动力,依靠 2 池中的水位差推动水流前进^[4]。与一般的垂直流湿地相比,此种结构使 IVCW 具有较长的水力停留时间和较强的复氧能力。

系统上行池和下行池的平面尺寸均为 1 m × 1 m,其中上行池深为 0.45 m,下行池深为 0.55 m,在下行池内种植美人蕉(*Canna generalis*),上行池内种植石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)。

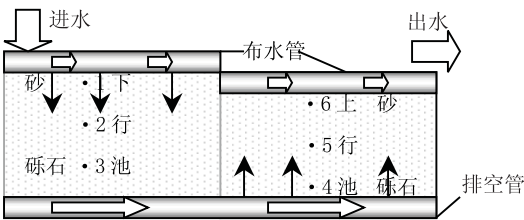


图 1 复合垂直流人工湿地系统示意图
Figure 1 Schematic diagram of IVCW

1.2 分析测试

上行池、下行池垂直方向均匀分布 3 个采样点。水温、电导、电位、pH 值测定采用 Cole Parmer 60648 型笔式电导仪、电位仪和 pH 计,溶解氧测定使用 UC-12 型便携式溶氧仪,以上理化指标均为当场测定;总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮等化学指标测定方法采用国家环保总局推荐方法^[5]

1.3 运行状况

系统进水为武汉东湖一生活污水排口一侧约 150 m 处的湖水,水质见表 1,为劣 V 类。经初沉池沉淀后进入人工湿地系统。采用间歇式进水,水力负荷为 800 mm · d⁻¹,分 8 次进水,间隔时间 2 h。系统常年运行,试验持续 6 周,每周同一时间取样测试。

表 1 系统进水水质(mg · L⁻¹)
Table 1 Water quality of influx sewage(mg · L⁻¹)

TN	NH_4^+-N	TP	BOD ₅	COD _{Cr}	SS	pH	DO
2.12 ~ 3.08	0.72 ~ 1.13	0.382 ~ 0.683	3.17 ~ 5.78	30.69 ~ 43.60	11.1 ~ 28.5	7.78 ~ 8.40	1.51 ~ 4.02

2 结果与分析

2.1 总氮的去除效果

通过对床体进出水和连续各采样点总氮浓度的检测,系统各部分总氮的变化见图 2。从图 2 可以看出,除 5、6 号采样点略有升高外,水流中总氮浓度随流程延长逐渐减小。湿地系统中总氮的去除机理是多样的,包括挥发、硝化-反硝化、植物摄取和基质吸附。IVCW 系统内部 pH 值以及水力

停留时间不利于氮的挥发和植物的摄取,实际上基质的吸附也只能占一小部分^[6],主要去除机理是微生物

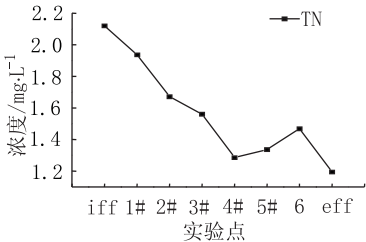


图 2 复合垂直流人工湿地系统总氮变化

Figure 2 Changes of the total nitrogen concentration in IVCW

的硝化-反硝化作用，因此水流流程和停留时间越长，微生物的硝化反硝化作用进行的越完全，脱氮效果越好。系统进出水总氮浓度分别为 $2.120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.195\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，总氮去除率达到 43.63%，可使劣 V 类水的总氮指标下降至Ⅲ类。

同时可以看出 IVCW 下行池脱氮效果较好，这可能是因为下行池溶解氧高于上行池，系统硝化作用进行的较充分所致。上行池溶解氧偏低 ($0.71\sim1.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，限制了硝化作用的进行，而系统本身生物尸解过程中有氮的释放，导致上行池的总氮浓度变化缺乏规律性。

反硝化作用是耗能过程。Lin 的研究发现每去除 $1\text{ mgNO}_3-\text{N}$ 需要消耗 $6.7\sim8.0\text{ mgCOD}$ ，有机碳限制了系统的脱氮作用^[7]。本试验中上行池总氮去除效率低与达到此部位的水中低的 COD_{Cr} 浓度有关 (COD_{Cr} 浓度 $20.96\sim28.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，少碳缺能源和多硝态氮影响了氮的去除效果。

2.2 无机氮的变化

氮在废水中以 4 种形态存在：有机氮、铵态氮、硝态氮和亚硝态氮。这 4 种形态的氮在湿地中主要经过氨化、硝化和反硝化过程最终变成气态氮从湿地中去除。图 3 表示各采样点铵态氮、硝态氮和亚硝态氮的变化。

由图 3 可以看出，硝态氮、亚硝态氮随水流方向规律性递减，这是由于湿地系统内部硝化和反硝化作用把水中的硝态氮、亚硝态氮还原成 N_2O 、 N_2 从系统中排出所致。

铵态氮在整个流程中出了两个上升点：4 号、出水分别高于前一个采样点的铵态氮浓度。原因可能是湿地系统的氨化作用处于主导地位，硝化作用不明显，这与文献[8]一致，与湿地氧含量、氧化还原状况有关。4 号采样点不仅水中的溶解氧低，也是植物根系难以到达的区域，植物根际好氧的微环境很难形成，以上因子限制了铵态氮经硝化作用转化为硝酸盐氮和亚硝酸盐氮，从而使铵态氮在此区域有积累现

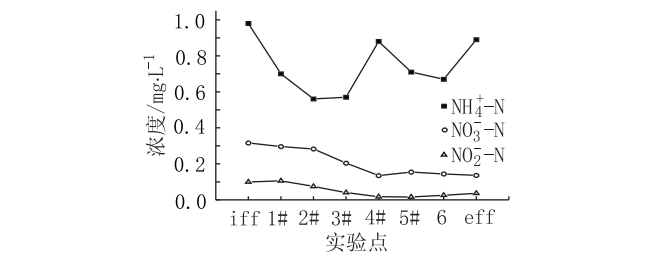


图 3 复合垂直流人工湿地系统各态氮变化
Figure 3 Concentration changes of different forms nitrogen in IVCW

象。出水的铵态氮略高于 6 号采样点主要原因可能是由于位于该层的生物腐殖质（有机氮）在水解过程中释放部分铵态氮所致。吴振斌等曾报道 IVCW 的硝化作用存在一定的空间差异，而反硝化作用的差异不明显，本试验的结果与其一致^[9]。

IVCW 对铵态氮、硝态氮、亚硝态氮的去除率分别为 9.18%、56.96%、63.43%。无机氮的去除占总氮去除的 35.98%，系统主要去除的是有机氮。有机氮是经过氨化作用转化为氨氮，再通过硝化-反硝化作用从系统中去除的，进而说明了 IVCW 氨化作用较强，硝化作用则在较低水平进行。

2.3 其他理化参数的变化

表 2 表示进水随水流方向上其他理化参数的变化。溶解氧在 1 号采样点处有所增加，进入系统后的湖水溶解氧随水流方向逐渐减小，位于系统前半部分的溶解氧显著大于后半部分。水流的溶解氧在 1 处升高是由于湖水经初沉池进入系统时有一定的冲击曝气所致，随后降低主要是由于生物的生理活动和硝化作用消耗了水中的氧。系统内部氧化还原电位(ORP)随水流方向逐渐降低，反映了湖水在湿地中的净化过程。

系统 pH 值在 7.11~8.12 之间，且呈规律性递减。一般情况下 $\text{pH}<8.5$ 时， NH_3 的挥发可以忽略^[10]。而本试验中水力停留时间较短，植物对氮的摄取也很少，所以本文主要考虑硝化与反硝化作用脱氮。pH 值的逐渐降低可能是系统内部的硝化作用以及有机物在分解过程中不断产酸所致。

表 2 系统内部理化参数的变化

Table 2 Changes of physical-chemical parameters in wetland system

项目	进水	1	2	3	4	5	6	出水
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.75	4.08	3.68	2.73	1.48	0.74	0.71	0.60
pH	8.12	7.90	7.71	7.57	7.37	7.33	7.17	7.11
ORP/mV	64.5	53.7	41.6	32.2	21.7	19.0	10.6	6.4
$\text{Ec}/\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$	864	864	844	844	890	931	891	872
$\text{T}/(^{\circ}\text{C})$	14.1	14.2	14.7	15.8	17.5	17.3	16.7	17.1

电导率(E_c)总体上规律不明显,但出水稍高于进水,有人认为这是植物的生理活动及根系微生物种群的活动改变了基质的酸碱等条件导致基质离子的释放^[11]。

系统位于地面以下,基质层对水温有缓冲作用。当短期内气温升高时系统内部温度低于外界温度,气温突然下降时,湿地系统对水流又有一定的升温作用。

3 讨论

试验中 IVCW 总氮去除率为 43.63%,进水的总氮浓度属于劣 V 类水,出水总氮浓度为 $1.195 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到国家 III 类水排放标准,表明 IVCW 具有良好的除氮能力。

IVCW 除氮的主要功能区在下行池,在下行池系统内各态氮的浓度随着水流的方向逐渐减小,具有良好的除氮效率;上行池溶解氧低限制了硝化作用,出水 COD_{Cr} 浓度为 $18.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,有机碳的相对不足限制了反硝化作用,加上系统基质中有机氮的释放,总氮和氨氮浓度没有出现规律性的变化。

由于系统整体缺氧,充氧能力低。虽然间歇式进水改善了氧状况,但进水中的溶解氧在下行池即已消耗至很低的水平,不能提供良好的硝化作用环境条件,不能产生大量硝酸盐作为反硝化作用的底物,使硝化-反硝化途径不畅通,因此提高氮的去除效率最重要的是提高系统中硝化作用的强度^[12]。试验的结果表明提高 IVCW 的脱氮效率关键在于改善上行池的充氧能力,以提高湿地系统的硝化能力去除铵态氮,如曝气、分段进水或对污水进行预处理使铵态氮转化为硝态氮,以增强系统的反硝化脱氮效率。此外,通过改善湿地中植物和基质的状况,来增加上行池有机碳的浓度以补充反硝化所需能量,也是一个切实可

行的措施。

参考文献:

- [1] Gersberg RM, Elkins BV and Goldman CR. Nitrogen Removal in artificial wetland[J]. *Water Res*, 1983, 17: 1009 – 1014.
- [2] Jennifer A Schaafsma, Andrew H Baldwin, Christopher A Streb. An evaluation of a constructed wetland to treat wastewater from a dairy farm in Maryland[J]. *USA, Ecological Engineering*, 2000, 14: 199 – 206.
- [3] Armstrong R. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants [J]. *Nature*, 1964, 204: 801 – 802.
- [4] 吴振斌,詹 德,张 晟,等. 复合垂直流构建湿地的设计方法及净化效果[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(1): 12 – 16, 41.
- [5] 国家环保局编. 水和废水监测分析方法(第三版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [6] A J van Oostrom. Nireogen removal constructed wetlands treating nitrified meat processing effluent[J]. *Wat Sci Tech*, 1995, 32(3): 137 – 147.
- [7] Ying – Feng Lin, Shuh – Ren Jing, Tze – Wen Wang, Der – Yuan Lee. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal groundwater in constructed wetlands[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 199: 413 – 420.
- [8] 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.
- [9] 吴振斌,周巧红,贺 锋,等. 构建湿地中试系统基质剖面微生物活性的研究[J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 422 – 426.
- [10] JVymazal, HBrix, PFCooper, RHaberl, RPerfler and JLaber. Removal mechanis and types ofconstructed wetlands[M]. Leiden: Backhuys Publishers, 1998. 17 – 66.
- [11] 贺 锋,吴振斌,付贵萍,等. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 279 – 283.
- [12] 张甲耀,夏盛林,邱克明,等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(3): 323 – 327.

致谢:感谢马剑敏博士和张莉华、陶菁、侯燕松和邓平同学对实验给予的帮助,在此一并致谢。