

文章编号: 1672 3031 (2005) 02-0130-05

水生植物对氮和磷去除效果的试验研究

马井泉¹, 周怀东¹, 董哲仁²

(1. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 在城市河流水体旁边设计并构建了梭鱼草、茭草、香蒲三种挺水植物湿地以及苦草沉水植物湿地, 研究了挺水植物湿地、沉水植物湿地对城市富营养化河流水体氮、磷的净化效果, 并对其净化机理进行探讨。结果表明: (1) 挺水植物湿地、沉水植物湿地对各种形态的氮、磷营养物质均有显著的去除效果, 但沉水植物湿地对营养物的去除能力要高于挺水植物湿地; (2) 沉水植物湿地内的溶解氧、pH 值明显地高于挺水植物湿地, 这主要是由于沉水植物生长茂密, 通过光合作用向水体释放氧气的 ability 明显地高于挺水植物; (3) 由于沉水植物湿地内的溶解氧高, 因而通过硝化反应对氮的去除作用比较明显。

关键词: 人工湿地; 富营养化; 挺水植物湿地; 沉水植物湿地

中图分类号: X173

文献标识码: A

1 问题的提出

人工湿地是一种由人工建造和监督控制的与沼泽地类似的地面^[1], 它利用自然生态系统中的物理、化学和生物三重协同作用来实现对污水的净化, 具有效率高、投资低、运转费低、维持费低等优点^[2], 在广大发展中国家具有广阔的应用前景^[3]。近十几年来, 人工湿地已经广泛地用来处理各种污水, 如生活污水^[4]、工业废水^[5]、暴雨径流^[6]、农业面源废水^[7,8]、垃圾渗滤液等。人工湿地作为自然处理系统, 已经表现出强大的污水处理能力和资源的重复利用价值。

人工湿地系统的提出开始于 20 世纪 70 年代, 在 80 年代得到迅速发展。目前, 在欧洲拥有数百个人工湿地^[9], 特别是德国、丹麦、英国、澳大利亚以及瑞士等, 人工湿地的发展非常迅速。美国对人工湿地的应用也非常广泛, 美国国家环保局组织专家编写了北美人工湿地数据库 (NADB)^[10], 该数据库汇总了 100 多个人工湿地的设计、运行以及水流特性及生态参数, 成为人工湿地运行的重要参考资料。

我国应用人工湿地处理污水发展较晚, 1987 年天津市环保所建成我国第一个占地 6hm²、处理规模为 1 400m³/d 的芦苇湿地工程^[11], 国家环保局华南环保所 1990 年在深圳建立了白泥坑人工湿地示范工程。十几年来, 我国多家环境科学研究机构开展了对人工湿地处理污水的研究, 如中国科学院武汉水生生物研究所在武汉东湖建立了复合垂直流人工湿地^[12,13]、深圳环境科学研究所建立的洪湖人工湿地系统及观澜高尔夫球场生活污水处理人工湿地^[14]等。

由于受试验场地的影响在城市内的河流水体旁边建立人工湿地对城市富营养化水体的净化研究, 开展的并不多。中国水利水电科学研究院于 2003 年承担了水利部科技创新项目“应用生态方法修复污染水体”的研究, 在该院水利芦荟园内建立了数块小型湿地, 开展应用人工湿地净化北京昆玉河水的研究。本研究的主要目的是利用人工湿地处理城市重富营养化水体, 净化水回流入原河流以实现水体的良性循环, 并对人工湿地处理污水的机理做进一步的探讨。

收稿日期: 2004 12 28

基金项目: 水利部重点创新基金资助 (SCX2003_02)

作者简介: 马井泉 (1977-), 广西桂林人, 硕士生, 主要从事微污染水体生态修复机理研究。E-mail: majq@iwhr.com

2 试验方法与材料

2.1 人工湿地构造 人工湿地选择在中国水利水电科学研究院玉渊潭水利芦荟园内, 为 11 个并联的钢筋混凝土水池, 水池的尺寸为 $4\text{m} \times 2\text{m} \times 1\text{m}$ (长 \times 宽 \times 高)。水池底部 30~40cm 处为 1~4mm 过筛细砂, 上铺 15~20cm 厚壤土。每个水池设一个进水口, 进水来自配水池。在出水一侧, 沿垂直方向设立 4 个出水龙头, 其距水池底部的高度分别为 0.00、0.25、0.50、0.75m, 能分别采集各层的水样。采集底层水样的龙头安装有多孔管以便均匀地收集该层水样。试验水池内设立水标尺来控制水位以及计算水池的水量。

本次试验为静态试验, 在以往的静态试验中, 有些是通过添加蒸馏水或自来水以保持水体体积不变, 从而观察所测指标浓度的降低。也有人^[15]认为此种方法有其不足之处, 认为加入蒸馏水不能反映自然条件下水的蒸发和植物蒸腾引起的水量损失。因此, 本次试验通过设立水标尺观测其水位变化从而计算降雨、蒸发和植物蒸腾引起的水量的变化。

2.2 植物种类筛选及种植方法 植物种类筛选的原则是对氮、磷净化效率高, 具有一定经济价值或者景观效应, 能适宜北方的气候正常稳定生长。本次试验选用的植物既有挺水植物, 也有沉水植物。挺水植物有梭鱼草、茭草、香蒲, 沉水植物为苦草。其中梭鱼草具有良好的景观效应, 是一种水生花卉。茭草具有一定的经济效应, 在秋季生长的茭白是一种很好的蔬菜。沉水植物苦草对废水的净化效果非常好。

植物种植采用移栽的方法。水生植物幼苗来自北京上庄的京海俊光种植园, 为整株移栽。水生植物的种植时间为 2004 年 5 月中旬, 其种植密度为, 在 8m^2 的水池内分别种植了 10 棵梭鱼草、15 棵茭草、21 棵香蒲, 苦草种植密度为间隔 20cm。6 月初水生植物稳定生长。

2.3 试验与采样 试验水样来自玉渊潭试验电站船闸下游的河水, 由于玉渊潭电站很少放水, 因而其下游水体流动缓慢。表 1 为试验期间观测到的原水水质状况。根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 以及湖泊富营养化评价标准^[16, 17], 原水属重度富营养化水体。试验方案是使用水泵将河流水体抽到圆形配水池内, 混合均匀, 待其稳定后再排放到水池内。各水池同时进水, 在进水混合稳定后采集表层水样, 不定期取样观测各种营养元素在湿地内的变化情况。于 2004 年 7 月 28 日将原水注入水池, 梭鱼草、香蒲、茭草水深为 30cm, 苦草湿地水深为 50cm。观测周期为 30d。

表 1 试验水体的水质状况

pH 值	溶解氧 (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	氨氮 (mg/L)	硝酸盐氮 (mg/L)	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)
8.01~8.35	4.33~6.12	14.60~15.40	9.20~10.70	2.84~3.17	0.92~1.09	4.90~5.60	0.49~0.57

2.4 分析方法 水样采集后立即送入实验室进行分析。采样原则是在同一点进行水样采集, 时间均为早晨 9 时。测定的项目包括总氮(TN)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- \text{N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{N}$)、总磷(TP)、可溶性正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} \text{P}$)、pH 值、溶解氧(DO)。监测方法按照《水和废水监测分析方法》(第四版)规定的方法进行分析监测。pH 值、DO 分别采用 TOA DO_14P 以及 TOKO 化学试验设备公司的 TPX_90 便携式仪器测定。

3 结果与分析

3.1 湿地的运行及水生植物生长状况观察 水生植物移种后, 长势良好。6 月初, 梭鱼草、茭草、香蒲的植株高度分别为 50、70、30cm, 覆盖度为 5%, 苦草湿地的覆盖度为 10%。到 7 月初, 梭鱼草、茭草、香蒲的植株高度分别达到 80、120、60cm, 挺水植物湿地的覆盖度分别达到 30%、30%、50%, 苦草湿地的覆盖度达到 60%。到 8 月底, 梭鱼草、茭草、香蒲的植株高度分别为 120、180、80cm, 覆盖度均达 80%, 苦草湿地的覆盖度达到 100%。6 月初到 8 月底为植物生长最旺盛季节。

在水生植物生长之初, 各水池内均生长有一定的水网藻等藻类植物, 且水网藻生长密度最大的为香

蒲和茭草湿地, 苦草湿地内也有少量的如金鱼藻等其它沉水藻类。但随着挺水植物的稳定生长以及对面覆盖度的增大, 到7月底, 由于光照和营养竞争的原因, 水网藻等水生藻类基本消失。

3.2 人工湿地对各种形态氮的净化效果 人工湿地对氮有着比较强的去除能力。氮在人工湿地内的转化途径包括矿化、水生植物吸收、微生物的硝化、反硝化以及氮的挥发^[18]等。氮在湿地中呈现复杂的生物地球化学循环, 包括7种价态^[19]的多种转化。水体中的有机氮可矿化为氨氮等无机氮, 无机氮是植物生长过程中不可缺少的物质而直接被植物摄取, 并合成植物蛋白质等有机氮。这一部分占总氮量的8%~16%。湿地对氮的去除主要依靠于微生物的硝化和反硝化作用。

图1为3种形态的氮在湿地内浓度变化情况。从图1(a)可以看出, 人工湿地对TN有着良好的净化效果。在监测的1个月内, 梭鱼草、茭草、香蒲和苦草湿地内TN的浓度分别降低了4.117、2.133、3.823和4.533mg/L, 对TN的净化效率分别达到75%、57%、80%和90.7%。其中原水进入的前15d内TN浓度下降比较快, 而之后的15d内下降速度明显降低。由于湿地对氮去除的一个重要过程是湿地基质对含氮污染物的截留, 因而随着水体中TN浓度的降低, 基质所截留的含氮物质有可能释放回水体, 使得水体中TN浓度降低较慢。

图1(b)表明, 人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化效果非常显著, 原水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度比较高, 说明河流受到了外界污染。试验期间, 梭鱼草、茭草、香蒲和苦草湿地内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度分别下降了2.165、2.313、1.904和2.818mg/L, 净化效率分别达到88%、87.4%、92.2%和97%。人工湿地表层水体中溶解氧浓度比较高, 有利于湿地内硝化反应的发生, 使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 迅速转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

从图1(c)可看出, 湿地内硝酸盐氮浓度变化幅度比较大, 可能是由于硝化反应中将氨氮转化为硝酸盐氮, 因而硝酸盐氮的浓度在开始有升高的现象。

另外, 从图1可以看出, 沉水植物苦草湿地对氮的净化效果要明显好于挺水植物的湿地。

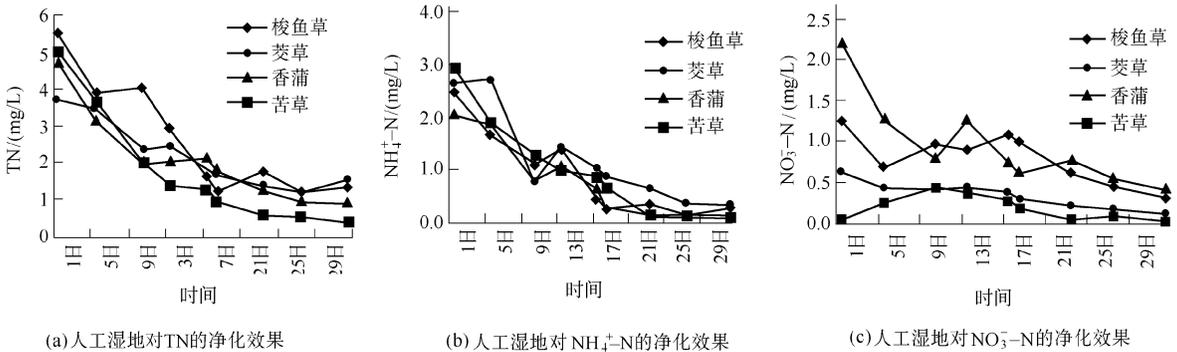


图1 人工湿地对各种形态氮的净化效果

3.3 人工湿地对各种形态磷的净化效果 人工湿地对磷的去除主要包括植物的吸收、人工湿地基质的截留、微生物固定以及在水体中的物理化学沉淀^[20]。由于人工湿地基质的截留和水体中的物理化学沉淀作用最终只能将磷固定在湿地系统之内, 这种作用会随着时间的延长而达到饱和甚至在一定的条件之下重新释放。因而, 人工湿地对磷的最佳去除方式为植物的吸收, 通过收割植物达到对磷的去除。

图2为人工湿地对两种形态磷的净化效果。从图2看出, 挺水植物湿地和沉水植物湿地对磷的净化效果均非常显著。在监测的30d内, 梭鱼草、茭草、香蒲和苦草湿地内总磷分别下降了0.2529、0.3469、0.2571和0.3171mg/L, 净化效率为90%、97%、90%和98%。梭鱼草、茭草、香蒲和苦草湿地内可溶性磷酸盐分别下降0.2407、0.2373、0.212和0.2547mg/L, 净化效率分别达到97%、98%、95%和99%。在试验的前20d总磷和可溶性磷酸盐浓度下降比较快, 水质已基本达到了地表水水质标准规定的II类水(湖、库)标准, 在监测的25d之后水体中总磷和可溶性磷酸盐的浓度已经非常低。

3.4 人工湿地内DO、pH值的变化情况 在试验期间, 使用TOA DO_14P溶解氧测定仪以及TOKO化学试验公司的TPX_90 pH测定仪测定了DO和pH值。测定时间在8月14日, 从8:20到23:20, 每隔1h监

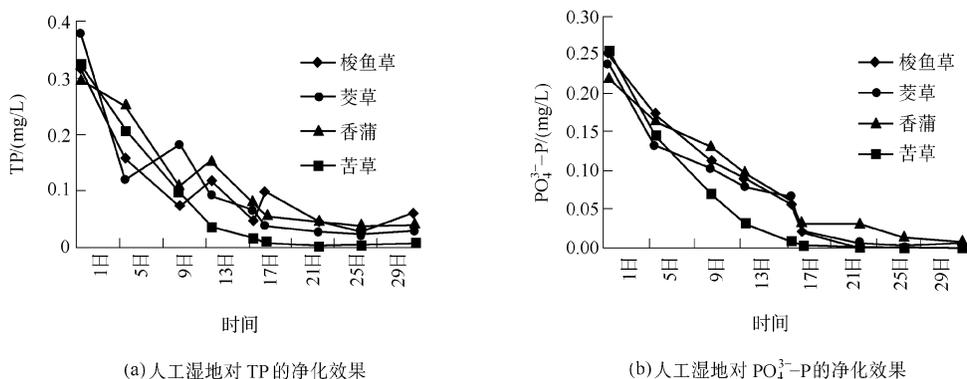


图2 人工湿地对两种形态磷的净化效果

测一次。测定结果分别见图3和图4。

从图3可以看出,人工湿地内溶解氧变化幅度较大,其中在12:00到16:00溶解氧浓度较高,主要是由于这个时间段光照最强,植物的光合作用也最强,说明水体中溶解氧浓度的变化主要是由于植物的光合作用。

从图4可以看出,湿地内pH值也有一定的变化,且变化趋势与溶解氧变化趋势一致。结合图3和图4可以得出,沉水植物苦草湿地内溶解氧和pH值明显要高于其它挺水植物湿地。苦草湿地的溶解氧基本上处于过饱和状态。

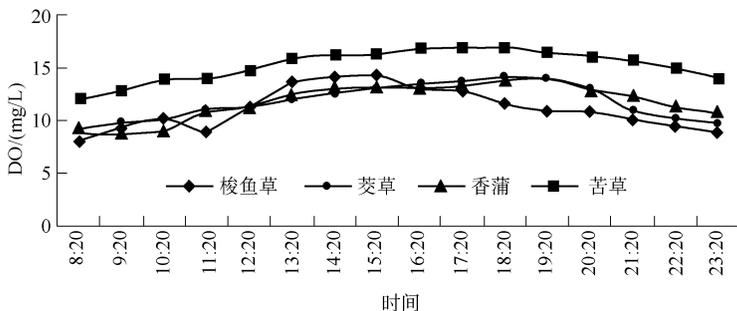


图3 人工湿地内溶解氧的变化情况

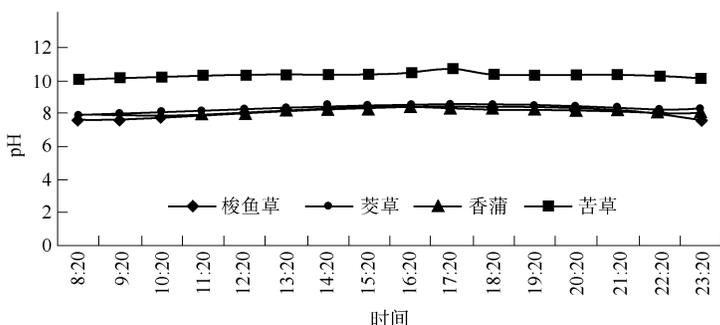


图4 人工湿地内 pH 值的变化情况

4 结论

(1) 由于本试验的人工湿地处于运行初期,因此各种挺水植物之间对营养物质的去除效果并没有明显的差别。沉水植物生长在水底,其根、茎、叶等全部与水接触,可以通过整株植物来吸收营养物质,因而对污染物的净化能力比较强。对pH值和溶解氧的观测也表明,沉水植物的光合作用要高于挺水植

物,向水体的输氧能力高于挺水植物。沉水植物对营养物质的去除能力也要高于挺水植物。

(2) 由于本次监测时间为8月初到9月初,为植物生长最旺盛期,并且原水的水力停留时间比较长,因此人工湿地表现出了非常高的净化效率。在监测之初的15d内湿地对营养物质的去除速度非常快,第25d之后湿地内各种形态的氮、磷营养物的浓度已非常低。因此在下一步试验中,应调整湿地运行状态,调整水力停留时间以及污染负荷,最大限度地发挥人工湿地的净化效果。

(3) 本次设计和建造的人工湿地,没有使用大颗粒的碎石作为基质,仅使用细砂和壤土作为人工湿地植物的基质床,非常类似于自然条件下的湿地状况,且费用低廉。建立的挺水植物湿地、沉水植物湿地对氮、磷的净化效果比较显著。城市富营养化河流水体主要是由于氮、磷含量过多,导致藻类大量繁殖,通过本文试验表明,可以建造人工湿地以及恢复水体周边的岸边带湿地实现对污水的截留和净化。

参 考 文 献:

- [1] 马井泉,周怀东.人工湿地在我国的研究与应用现状[A].中国环境水力学2004[C].北京:中国水利水电出版社,2004.303-309.
- [2] 白晓慧,王宝贞,余敏,聂梅生.人工湿地污水处理技术及其发展应用[J].哈尔滨建筑大学学报,1999,32(6):88-92.
- [3] Patrick D. Implementation of constructed wetlands in developing countries[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(5): 27- 34.
- [4] David S, Lauchlan F, et al. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single family domestic effluent[J]. Ecological Engineering, 2002, 18: 429- 440.
- [5] Vrhovsek K D. Constructed wetland for industrial wasted water treatment[J]. Wat. Res., 1996, 30: 2287- 2292.
- [6] Green M B, Martin J R. Constructed reed beds clean up storm overflows on small wastewater treatment works[J]. Wat. Environ. Res., 1996, 68: 1054- 1060.
- [7] Blaskerud B C. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural nonpoint source pollution[J]. Ecological Engineering, 2002, 18: 351- 370.
- [8] Raisin G W, Mitchell D S. The use of wetlands for the control of nonpoint source pollution[J]. Wat. Sci. Tech., 1995, 32(3): 177- 186.
- [9] Haberl R, Peifler R, Mayer H. Constructed wetlands in Europe[J]. Wat. Sci. Tech., 1995, 32(3): 305- 315.
- [10] Jos Verhoeven T A, Arthur Meuleman F M. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations[J]. Ecological Engineering, 1995, 12: 5- 12.
- [11] 唐运平,米瑞兰.芦苇湿地滤床处理城市污水的研究[J].环境工程,1992,10(2):1-5.
- [12] 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,1999,11(3):279-283.
- [13] Liang W, Wu Z B, Zhan F C, Deng J Q. Root zone microbial populations, urease activities, and purification efficiency for a constructed wetland[J]. Pedosphere, 2004, 14(3): 401- 404.
- [14] 安树清.湿地生态工程—湿地资源利用与保护的优化模式[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [15] 葛莹,王晓月,常杰.不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J].环境科学学报,1999,19(6):690-693.
- [16] 金相灿.中国湖泊环境[M].北京:海洋出版社,1995.
- [17] 夏青,陈艳卿,等.水质基准与水质标准[M].北京:标准出版社,2004.
- [18] Lei Y, Chang H T. Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosms with and without vegetation[J]. Ecological Engineering, 2001, 18: 91- 105.
- [19] 吴晓磊.人工湿地废水处理机理[J].环境科学,1994,16(3):83-86.
- [20] Pant H K, Reddy K R, Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed media of sub surface flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2001, 17: 345- 355.

(下转第154页)

Study on chemical characteristics of phosphorus in sediment of Erhai Lake

WANG Yu chun¹, CILI Neng bu², MA Ger lian², ZHOU Huai-dong¹

(1. Department of Water Environment, IWHR, Beijing 100038, China;

2 The Dali Branch of Monitor Center of Water Quality, Bureau of Hydrology of Yunnan Province, Yunnan Dali 671000, China)

Abstract: In order to understand the chemical characteristics of phosphorus in the sediment of Erhai Lake, more than 18 sediment cores have been collected, and the content and chemical forms of sedimentary phosphorus have been analyzed. The results of this study showed that the content of sedimentary total phosphorus ranges from 736.40 to 1 602.50mg/kg in surface sediment samples, with an average value of 964.60mg/kg. By applying the sequential extraction method, study on the phosphorus chemical phases, mainly Ca-bound P and organic phosphorus forms, showed that the vertical distribution profile of sedimentary phosphorus is possibly related to early diagenesis processes of sediment in Erhai Lake.

Key words: sediment; phosphorus; chemical forms; Erhai Lake

(责任编辑: 王成丽)

(上接第 134 页)

Study on aquatic macrophytes for purification of eutrophic water

MA Jing-quan¹, ZHOU Huai-dong¹, DONG Zhe ren²

(1. Dept. of Water Environment, IWHR, Beijing 100038, China;

2. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: In 4 laboratory-scale man-made wetlands, which include 3 emergent macrophyte (mullet grass, wild rice and cattail) man-made wetlands and 1 submergent macrophyte (ell grass) man-made wetlands, nutrient removal tests were conducted. The purpose of this investigation was to find a new way to treat the eutrophic river water in cities and, further more, to study the purification mechanism of the man-made wetlands. Significant roles of removing nitrogen and phosphorus were found in all the wetlands. The best removal rate was obtained in the submergent macrophyte wetlands, which had a higher removal rate of nutrients than that of emergent macrophyte and higher level of Dissolved Oxygen (DO) and pH due to its larger capacity of oxygen releasing via photosynthesis. It can be concluded that the man-made wetland systems can be utilized as a suitable solution for water purification.

Key words: man-made wetlands; eutrophication; emergent macrophyte wetlands; submergent macrophyte wetlands

(责任编辑: 王冰伟)