

复合湿地系统净化冷水鱼养殖废水的研究*

谷飞飞 洪剑明**

(首都师范大学生命科学学院,北京 100048)

摘 要

实验选址于北京市怀柔区渤海镇,建成的复合湿地系统包括经改良自然湿地和人工湿地两部分,用于当地冷水鱼养殖业排放的养殖污水的处理.结果表明:复合湿地系统对TN、TP、COD的去除率分别为61%、57%和66%,复合湿地的整体去除率大于使用一种单独的湿地处理系统.通过相关分析发现:在自然湿地系统中,TP和COD的去除率与入水浓度具有相关性;在人工湿地系统中,TN和COD的去除率与入水浓度具有相关性;在复合湿地系统中,COD的去除率和TN、TP的去除率具有相关性,而TN、TP的去除率之间没有显著的相关性.复合湿地系统结合了自然湿地和人工湿地的特点,是对冷水鱼养殖废水净化处理的新探索.

关键词:复合湿地系统,冷水鱼,养殖污水,湿地植物,去除率.

中图分类号:TP391

1 引 言

冷水鱼拥有品质高和不易发病的特点,在北京市怀柔山区泉水源头广泛养殖.养殖过程中投放饲料所含的氮、磷大约只有9.1%和17.4%被鱼同化^[1],未被同化的营养物质以残饵、排泄物等形式排入当地的河道及池塘等自然湿地.自然湿地被用来处理污水的历史可以追溯到1912年,其截留和净化的作用可以减少地表流和地下渗流中各种形式的氮元素和磷元素.但自然湿地具有较低的污染物负荷和自净能力有限的缺点,所以人们模仿自然湿地,创造水湿条件及种植相应的湿生植物等发展形成人工湿地^[2].人工湿地污水处理系统是由一些适合在污染环境条件下生存以大型水生植物为主的高低等生物,和处于水饱和状态的基质组成的人工复合体^[3],它根据自然湿地生态系统中的物理化学生化反应的协同作用来实现对污水的净化作用,是天然湿地的模拟和强化^[4],对氮和磷等营养元素的净化作用具有“运行稳定、低投资、高效率”的特点.

虽然有大量文献都突出人工湿地对污水中营

养物质的去除率,但是人们往往会忽略人工湿地的修建会受到地形的限制且需要足够长的停留时间(HRT),并对处理单元的入水浓度有一定的要求等.同时,人工湿地在修建初期也会由于水生植物群落和微生物群落尚未发育成熟,出现去除率不稳定的情况^[5].所以人工湿地不能替代自然湿地的功能,因为自然湿地中丰富的植物群落和成熟的微生物种群是人工湿地所不具有的^[6].

本实验在冷水鱼养殖场内构建了一段由河道、池塘组成的自然湿地和人工湿地的复合湿地系统,使其兼具自然湿地和人工湿地的特点,在复合湿地对冷水鱼养殖污水处理能力及处理机制方面进行了初步探索,旨在探明一条可持续的途径来减少北京地区冷水鱼养殖业对环境带来的压力.

2 材料与方法

2.1 实验区域介绍

该复合湿地位于北京市怀柔区渤海镇田仙峪村,卧佛山庄冷水鱼养殖场院内(40°26′北、116°31′东),海拔220 m,属于温带半干旱半湿润干燥季风气候区,年平均气温10℃~12℃,水温为9℃~12℃.自1996年该地成为旅游村落,冷水鱼养殖业发展迅速.冷水鱼养殖场具有废水排放时间不固定的特点,已建的生活污水处理设施不能有效处理其

收稿日期:2012-03-30

* 基金项目:北京市教委科技成果转化与产业化项目.

** 通讯作者:E-mail: hjm2910@263.net

污水;同时由于污水具有水温低的特点,利用湿地处理废水的实践也较少.冷水鱼养殖废水已经成为河流源头污染的主要污染源,造成怀柔水库及流域水质下降.经调查,污染主要来自冷水鱼养殖的残饵和排泄物等.大量养殖废水的排放对池塘水体及池塘周围水域造成了严重破坏.

2.2 自然湿地的改良

实验地的自然河道长 50 m,宽 3 m,平均水深约 0.3 m,原有植物群落为芦苇—律草群落;池塘面积约 200 m²,原有植物群落为莎草—水蓼群落.根据《湿地公约》,本实验地处内陆湿地中的 M. 类别(永久性溪流)和 T_p. (永久性淡水池塘).为了加强自然湿地的对营养物质的净化作用,本实验于 2011 年 6 月初在原有地貌上重新整理了河道和池塘:将河道挖深 30 cm 后填充粒径为 2 cm 的砾石并在河道中种植了水葱 (*Scirpus tabernaemontani*)、黄花鸢尾 (*Iris pseudacorus*) 等挺水植物,行间距为 20 cm × 20 cm;在池塘中种植睡莲 (*Nymphaea alba*) 等沉水植物,凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 等浮水植物(见表 1) 种植密度分别为 1 株/m² 和 5 株/m². 水生植物的种植不仅能够增加水体生物多样性还能提高系统的处理效率.

表 1 复合湿地中种植的植物

植物种类 Varieties	拉丁名 Latin name	位置 location
黄花鸢尾	<i>Iris pseudacorus</i>	自然湿地、人工湿地
水葱	<i>Scirpus tabernaemontani</i>	自然湿地、人工湿地
水芹	<i>Oenanthe javanica</i>	自然湿地(河道)
香蒲	<i>Typha orientalis</i>	自然湿地、人工湿地
睡莲	<i>Nymphaea alba</i>	自然湿地(池塘)
凤眼莲	<i>Eichhornia crassipes</i>	自然湿地(池塘)
芦苇	<i>Phragmites australis</i>	人工湿地
美人蕉	<i>Canna indica</i>	人工湿地
菖蒲	<i>Acorus calamus</i>	人工湿地
千屈菜	<i>Lythrum salicaria</i>	人工湿地

2.3 人工湿地的设计和修建

人工湿地于 2011 年 5 月修建完成,试运行一个月后正式投入使用.该人工湿地由一个配水池(长:宽:高 = 10.5 m:2 m:1.5 m)和九个分三级串联的植物处理单元(长:宽:高 = 6 m:3 m:1 m)两部分构成,每级处理池间有曝气池,高差 20 cm.各植物处理池内填充相同的基质,具有 10 cm 厚的水泥砂浆防渗层.处理单元内部自下至上依次为:20 cm 厚粒径为约 8 cm 的鹅卵石;50 cm 厚粒径 2 cm ~ 4 cm 的石灰石碎石;20 cm 厚的沙土(见图 1),实验采用填料平均孔隙度(ε ,无量纲)约为 0.36.种植的植物种类

见表 1.

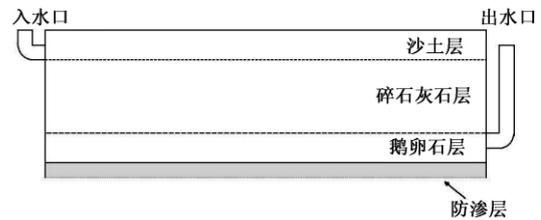


图 1 人工湿地处理单元设计图

2.4 取样与检测

本实验共设置三个取样点分别是污水排出口、改良自然湿地出口和人工湿地出口.水样采集与检验约 20 天进行一次.总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)浓度分别由碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法、重铬酸钾法进行测定.

TN、TP、COD 的去除率(r)计算公式如下:

$$r = (C - C_0) / C_0 \times 100\% \quad (\text{公式 2})$$

式中 r 为当次取样处理单元的去除率, C_0 为当次取样的进水中 TN、TP 或 COD 的浓度; C 为当次取样的出水中 TN、TP 或 COD 的浓度;

2.5 数据分析

数据分析采用 SPSS 17.0 统计分析软件,分别对自然湿地系统和人工湿地系统的入水 TN、TP、COD 浓度和去除率之间以及复合湿地对 TN、TP、COD 的去除率之间进行 Pearson 相关分析.实验中对 TN、TP、COD 的监测数据均符合正态分布,不符合正态分布的数据经过对数转换后符合正态分布.

3 实验结果

复合湿地系统在 2011 年 6—11 月的运行中对废水中 TN、TP、COD 的平均去除率分别为 61%、57% 和 66% (见表 2).复合湿地系统由自然湿地和人工湿地两部分构成,分别对两部分的 TN、TP、COD 进水浓度与去除率之间的相关分析(见表 3)表明:自然湿地系统中 TP 的去除率与入水浓度极显著相关($p < 0.01$),COD 的去除率与入水浓度显著相关($p < 0.05$),TN 的去除率与入水浓度没有显著的相关性($p > 0.05$);人工湿地系统中 TN 和 COD 的去除率与入水浓度极显著相关($p < 0.01$),而 TP 的去除率与入水浓度没有显著的相关性($p > 0.05$).经过相关矩阵分析(见表 4),复合湿地系统中,COD 的去除率与 TN、TP 去除率显著相关($p < 0.05$),

TN、TP 去除率之间没有显著相关性 ($p > 0.05$) .

表 2 复合湿地系统 2011 年整体运行状况

	入水 Influent($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			出水 Effluent($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			去除率 Removal(%)		
	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min
TN	11.90	4.93	2.50	2.27	1.57	0.50	87	61	9
TP	5.97	1.81	0.27	0.90	0.34	0.16	95	57	22
COD	243.00	66.41	15.00	14.70	10.52	10.00	96	66	27

表 3 自然湿地系统和人工湿地系统中入水浓度与去除率的相关分析

		Pearson 相关系数	Sig. (two-tailed)
TN	自然湿地 NWs	0.606	0.084
	人工湿地 CWs	0.906**	0.001
TP	自然湿地 NWs	0.850**	0.004
	人工湿地 CWs	0.101	0.797
COD	自然湿地 NWs	0.747*	0.021
	人工湿地 CWs	0.902**	0.001

**Significant level $p = 0.01$ $n = 9$.

表 4 复合湿地对 TN、TP、COD 去除率的相关矩阵分析

		TN	TP	COD
TN	Pearson 相关检验	1		
	Sig. (two-tailed)			
TP	Pearson 相关检验	0.547	1	
	Sig. (two-tailed)	0.064		
COD	Pearson 相关检验	0.663*	0.589*	1
	Sig. (two-tailed)	0.026	0.048	

* Correlation is significant at the 0.05 level $n = 9$.

4 分析及讨论

湿地对污水的净化作用是湿地基质、植物和微生物共同作用的结果^[7]. 湿地系统去除 TN 的机制包括物理(沉积与挥发)、化学(吸附) 和生物(微生物作用和植物吸收) 三方面的协同作用. 在复合湿地系统中, 自然湿地部分对 TN 的平均去除率为 36%, 人工湿地部分对 TN 的去除率为 34%. 根据图 2(a), 自然湿地在运行初期的采样中 TN 去除率在 25% 以下, 可能与改造河道的碎石基质内植物的根系尚未发育成熟, 没有建立通畅的氧运输通道和产生丰富的微生物群落, 从而使得处理区域缺氧限制了硝化和反硝化速率有关^[8]. 9 月到 11 月底, 由于气温降低的原因, 人工湿地中的植物枯落物增多, 使得植物吸收的 N 元素返还于水体, 使得人工湿地对 TN 的去除率持续降低. 此时自然湿地基质中根际微生物群落趋于成熟, 对污染物起到了吸收和过滤的作用维持了较高的去除率^[9].

湿地中 TP 的去除机制包括沉淀、植物吸收、泥炭堆积和吸附反应^[9]. 植物的种植不仅增强了自然

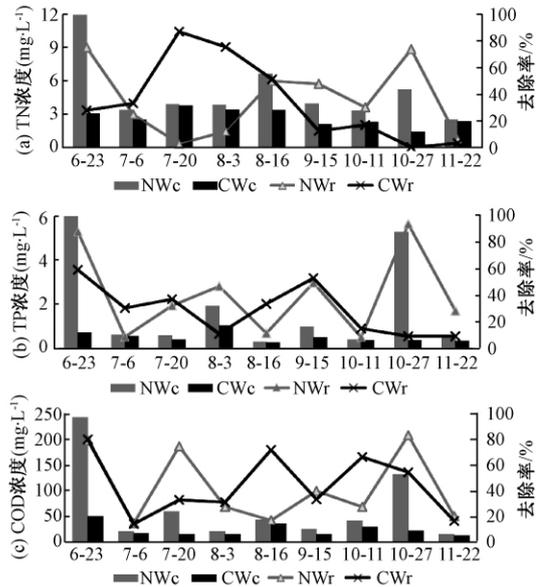


图 2 复合湿地中自然湿地和人工湿地系统分别做入水浓度和去除率的相关分析

柱状图代表入水浓度, 折线代表各系统的去除率. 横坐标代表时间. NWc 为自然湿地入水浓度, CWc 为人工湿地入水浓度, NWr 为自然湿地的去除率, CWr 为人工湿地去除率.

湿地对 TP 的吸收能力也通过植物根系的扩散作用提高了河道和池塘底泥中溶氧, 增强了底泥中微生物群落对水体中 TP 吸收作用. 本实验中, 自然湿地部分对 TP 的平均去除率为 41%, 人工湿地部分对 TN 的去除率为 28%. 根据表 3, 自然湿地系统中 TP 的入水浓度与去除率极显著相关 ($p < 0.01$), 可能与种植湿地植物以及基质改造有关. 人工湿地系统中, 处理单元内的植物根系尚未发育成熟, 植物吸收以及微生物分解等作用尚不占主导地位, 基质吸附是主要的去除磷的机制^[10]. 根据图 2(b), 10 月之后人工湿地系统的去除率降低的主要原因是植物的枯落物中的有机物质腐烂将营养元素返还于湿地系统. 复合湿地系统对 TP 的去除率平均为 57%, 略低于 Vymazal (2007) 提出的 60 ~ 70% 的研究结果^[11].

湿地对 COD 去除的途径主要是通过水生植物, 微生物和基质的共同作用^[12]. 在复合湿地系统中,

自然湿地和人工湿地部分对 COD 的平均去除率分别为 43% 和 45%。在图 2(c) 中,自然湿地中 COD 的入水浓度小于 43 mg/L 时去除率会小于 40%,即自然湿地对 COD 的去除率降低主要是由于入水浓度的降低造成的,与 Yalcuk 等人研究一致^[8]。本实验中污水中的有机污染物质净化机理主要是基质的过滤作用和部分微生物分解作用,即使在污水滞留时间较短的情况下,人工湿地对有机污染物质也有较好的过滤作用,这就是自然湿地系统和人工湿地系统的入水浓度都和 COD 去除率极显著相关 ($p < 0.01$) 的原因。

根据表 5,复合湿地系统对 COD 的去除率与 TN、TP 显著相关 ($p < 0.05$),这可能是由于有机物集中排放时浓度过高而没有足够的供氧使水体中含氧量降低从而发生了有机物的厌氧分解,同时有机物作为反硝化细菌的碳源促进了反硝化反应^[8],加强了湿地对氮元素的去除能力;本实验中复合湿地系统刚刚投入使用,不论是自然湿地部分还是人

工湿地部分基质的吸附能力都尚未达到饱和,所以复合湿地系统对 COD 也具有吸附作用,这与湿地去除 TP 的机制相似。复合湿地系统对 TN、TP 的去除率之间没有显著的相关性,反映了湿地对 TN 的去除作用不是主要依靠基质的吸附作用,而是主要依靠生物降解的作用^[13]。

复合湿地的构建不仅避免了自然湿地或者人工湿地中的不足,还促进了它们之间的联合作用。改良后的自然湿地对复合湿地系统整体的去除率有重要作用,尤其是在人工湿地初步建立、根区微生物群落还没有成熟的时期;人工湿地入水水质经过初步净化后使出水水质更加稳定。因为复合湿地系统具有更加全面的去除方式,所以复合湿地对 TN、TP 和 COD 的去除率大于单独使用一种湿地系统。结合冷水鱼养殖业的污水排放特点,怎样将自然湿地和人工湿地结合成复合湿地系统,以达到更好的去除效果将会是湿地处理技术的一个关键点。

参 考 文 献

- [1] 方圣琼,胡雪峰,巫和昕.水产养殖废水处理技术及应用[J].环境污染治理技术与设备,2004,9(5):51-55.
- [2] 刘汉湖,白向玉,夏宁.城市废水人工湿地处理技术[M].北京:中国矿业大学出版社,2006:64-70.
- [3] 汪俊三,覃环.植物碎石床人工湿地处理富营养化水和微污染水体实验研究[M].北京:中国环境科学出版社,2009:1-3.
- [4] 崔丽娟,张曼胤,李伟,等.人工湿地处理富营养化水体的效果研究[J].生态环境学报,2010,19(9):2142-2148.
- [5] 张洪刚,马安娜,洪剑明.垂直流人工湿地的设计及净化功能初探[J].节水灌溉,2006,6:31-34.
- [6] Zhang H, Cui B, Hong J, et al. Synergism of natural and constructed wetlands in Beijing, China[J]. Ecol. Eng., 2011, 37: 128-138.
- [7] Tanner C C, Sukias J P S, Sukias M P. Relationships between loading rates and pollutant removal during maturation of gravel-bed constructed wetlands[J]. Environ. Qual., 1998, 27: 448-458.
- [8] Yalcuk A, Ugurlu A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment[J]. Bioresour. Technol., 2009, 100: 2521-2526.
- [9] 张洪刚,洪剑明.人工湿地中植物的作用[J].湿地科学,2006,4(2):146-154.
- [10] 刘树元,阎百兴,王莉霞.潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响[J].生态学报,2011,31(6):1538-1546.
- [11] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Sci. Total Environ., 2007, 380: 48-65.
- [12] Scholz M. Classification methodology for Sustainable Flood Retention Basins[J]. Landsc. Urban Plann., 2007, 81: 246-256.
- [13] Sun G Z, Zhao Y Q, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system[J]. Bio. technol., 2005, 115: 189-197.

Study on the Treatment of Wastewater from Cold Water Fish Breeding by an Integrated Wetland System

Gu Feifei Hong Jianming

(College of Life Science , Capital Normal University , Beijing 100048)

Abstract

In the study ,an integrated wetland system(IWS) including constructed wetlands(CWs) and modified natural wetlands(NWs) was established for aquaculture wastewater treatment located at the Bohai Town ,Huairou District , Beijing. The results show that the removal efficiency of TN ,TP ,COD in the IWS is 61% ,57% and 66% , respectively. The overall removal efficiency of the IWS is greater than use a separately wetland treatment system. The correlation analysis show that significant relationship existed between the removal efficiency and influent concentration of TP and COD in NWs ,and it also exist between the removal efficiency and influent concentration of TN and COD in CWs. As for the IWS ,the removal efficiency of COD is positively correlated with that of TN and TP with the correlation coefficient of 0.663 ,0.689 respectively ,under the significance level of 0.05. However ,the correlation between the removal efficiencies for TN and TP is not significant. IWS is integrating functions of NWs and CWs which could explore a new way to treat the wastewater discharged from cold water fish farming.

Key words: integrated wetland system , cold water fish , aquaculture wastewater , wetland plant , removal efficiency.

作者简介 谷飞飞(1985 -) ,男 ,河北人 ,硕士生 ,研究方向:湿地生态学. E-mail: gufeifeizi@ gmail. com.