氮磷在阶式水生植物床中的去除效果及组成变化

宋海亮　吕锡武　李先宁　　稻森悠平
(东南大学环境科学与工程系,南京 210096)　　(日本国立环境研究所,日本 筑波 305-0053)

摘　要　利用串联运行的阶式水生植物床净化富营养化河水。考察了不同形态的氮磷在处理前后的浓度变化,在此基础上阐述水生植物床去除富营养化水体中氮磷的过程与机理。在水力负荷为 74 cm/d的条件下,总磷和总氮的去除率分别达 73.1%和 64.5%。植物根系对悬浮物的截留对去除河水中的氮磷起关键作用。采用多级串联的运行方式能有效克服一般湿地运行一段时间后因沉积物释放作用而引起处理水溶解性营养盐浓度上升的难题。

关键词　水生植物床　河水　串联运行　富营养化　湿地

中图分类号　X524　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1008-9241(2005)09-0054-04

The removal effect and composition variations of nitrogen and phosphorus in step aquatic-plant bed system

Song Hailiang[1]　Lu Xiwu[1]　Li Xianning[1]　Yuhei Inamori[2]
(1. Department of Environmental Engineering, Southeast University, Nanjing 210096;
2. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-0053, Japan)

Abstract　By using three-stage series-operation of aquatic-plant bed system to purify eutrophicated river water, the concentration variations of different nitrogen and phosphorus species of inflow and outflow were investigated. The processes and mechanisms of nitrogen and phosphorus removal from eutrophicated river water by aquatic-plant bed system were elucidated. The removal rates of total phosphorus and total nitrogen reached 73.1% and 64.5% respectively under the hydraulic loading rate of 74 cm/d. The function of root mat blocking suspended solid played a key role in removing nitrogen and phosphorus from river water. The style of series-operation overcame the shortcoming of common wetland that soluble nutrient concentrations in effluent arisen causing by sediment release after operating for a long time.

Key words　aquatic-plant bed; river water; series-operation; eutrophication; wetland

氮磷含量过高是导致蓝藻大量繁殖的根本原因。治理水体富营养化,一方面必须严格控制各类污染源将营养物质带入水体,另一方面须持续提取自然水体中已存在的大量氮磷。由于自然水体的水量极大,且营养盐浓度相对污水而言低得多,因此从技术途径上讲,后者的达成较前者要困难得多。目前处理富营养化自然水体的方法主要有化学、物理和生物方法。化学法是投撒混凝剂或吸附剂,效果是暂时的,且有副作用;物理方法如清挖底泥,费用较高,还可能导致水体氮磷平衡被破坏[1],水质更加恶化;生物方法如在水域中放养凤眼莲等水生杂草,但其恶性繁殖容易产生二次污染[2]。

本研究采用的水生植物床,是一种低成本、能持续去除自然水体中氮磷的资源循环型水质净化技术。其原理是在人工构建的床体中无土栽培多种可食用型或观赏型水生植物,通过植物过滤、微生物降解、水生植物吸收以及清除沉积物(底泥)等途径去除水体中的氮磷、有机物及藻类等。该技术首先通过选择茎秆或根系发达的水生植物(或水生蔬菜)将水中的悬浮性污染物、藻类等通过过滤作用去除,然后由微生物对沉积到床体底部的底泥中的有机物、氮磷类营养物等通过生物降解去除,同时植物吸

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50378014);江苏省自然科学基金资助项目(BK2004075);江苏省环保厅科技基金资助项目(苏环科 2002-19)
收稿日期:2004-04-25;修订日期:2004-10-27
作者简介:宋海亮(1979～),男,博士,讲师,主要从事水污染控制技术研究工作。E-mail: hlseu163@163.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

收作用也能去除水中及底泥中的部分氮磷营养盐,形成一个由水生植物、水生动物及微生物构成的高效生态净化系统,实现了物理过滤和生物处理相结合的处理方式。其主要特点是:通过不断收获水生植物和清除底泥并堆肥还田,将氮磷从人力不易控制的水体循环圈转移到易被人力调控的陆上循环圈,同时能克服普通人工湿地水力负荷低以及长期运行后处理能力下降等问题。

本研究重点考察了 3级串联式水生植物床对氮磷的去除及原水流经各阶植物床时不同形态氮磷的变化。

1　材料与方法

1.1　试验设施

试验设施建于太湖西岸湖滨,占地 1900 m^2,植物种植面积 1420 m^2。水生植物床用砖石混凝土建造,内部不填充任何基质。首端为进水配水渠,末端为出水集水渠,中部是植物栽培区,如图 1所示。栽培区采用 3级串联的形式,级间池底标高顺水流方向逐级降低 15 cm;每级又分隔成 21条栽培水路,水路是水生植物床的基本单元,为矩形浅池,长宽深分别为 15 m、1.5 m和 0.3 m,如图 2所示。水深通过活动堰板调节。河水经泵提升至配水渠,再经过 PVC管以重力流方式进入各条水路,出水汇集至出水渠后返回河流。

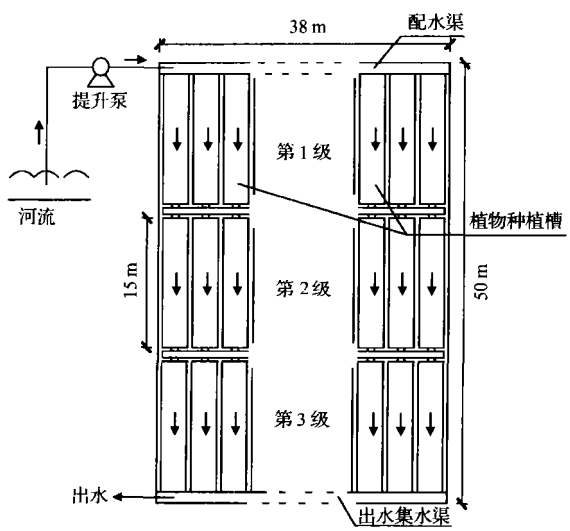

图 1　阶式水生植物床工艺流程示意图

Fig 1　Flow chart of series-operation aquatic-plant bed system

试验采用连续进水方式,有效水深为 10 cm,进水流量为 43.6 m^3/h,单级水力负荷为 221 cm/d,相应的空床理论水力停留时间为 1.1 h;3级总水力负荷约为 74 cm/d,总水力停留时间为 3.3 h。

图 2　植物栽培水路单元示意图

Fig 2　Schematic diagram of unit channel for plantation

1.2　试验水源

取自太湖西岸某入湖河流。该河主要接纳了附近村落的生活污水、农田排灌水以及上游城市地表径流等,是典型的受面源污染的富营养化河流。

1.3　试验植物及种植方法

水蕹菜 (*Ipamoea aquatica*),又名空心菜,喜温,旋花科牵牛属,蔓性草本植物。2003年 3月开始在试验实施旁的塑料大棚中用种子育苗,到 5月初苗地上部分平均高为 20 cm左右时移栽到水生植物床中,漂浮于水面自由生长。本文试验内容在水蕹菜生长最旺盛的 7、8两个月份开展,其间水温为 25～32℃。

1.4　检测项目及方法

水质检测在现场建设的化验室进行。总氮 (TN)、氨氮 (NH_4^+-N)、氧化态氮 (NO_x^--N)、总磷 (TP)分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、纳氏试剂比色法、酚二磺酸分光光度法和钼酸铵分光光度法测定;均按标准方法进行[3]。溶解性总氮 (DTN)、溶解性总磷 (DTP)的测定是将水样经 0.45 μm醋酸纤维滤膜过滤后所得滤液分别按上述 TN、TP的测试方法进行;正磷酸盐 (PO_4^{3-}-P)是将上述滤液不经过消解而直接进行钼蓝显色反应后比色测定。颗粒性有机氮 (PON)、颗粒磷 (PP)和溶解性有机氮 (DON)则在上述测定数据的基础上通过计算求得:PON = TN - DTN, PP = TP - DTP, DON = DTN - (NH_4^+-N + NO_x^--N)。

2　结果与分析

2.1　磷的去除效果

磷的去除效果如表 1所示。由表可见,处理水中 TP和 DTP浓度均呈逐级下降趋势,经过 3级净化后,TP浓度从 0.283 mg/L降低到 0.076 mg/L,总去除率为 73.1%,DTP浓度从 0.095 mg/L降低到 0.044 mg/L,总去除率为 53.7%。但 PO_4^{3-}-P浓度沿程变化情况有所不同,第 1级出水的 PO_4^{3-}-P浓度高于原水,即第 1级水生植物床中发生了较明显的 PO_4^{3-}-P溶出现象;从第 2级出水开始,PO_4^{3-}-P浓度才较原水有所降低,最后一级出水浓度则从原水的 0.032 mg/L减少到 0.022 mg/L,总去除率为 31.2%。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 原水和各阶出水中不同形态磷的浓度

Table 1 Concentrations of different phosphorus species in inflow and each step outflow (mg/L)

检测项目	原水	出水		
		第 1级	第 2级	第 3级
TP	0.283 (0.238～0.373)	0.149 (0.103～0.173)	0.111 (0.058～0.157)	0.076 (0.026～0.110)
DTP	0.095 (0.054～0.128)	0.083 (0.045～0.107)	0.066 (0.042～0.098)	0.044 (0.012～0.078)
PO_4^{3-}-P	0.032 (0.018～0.054)	0.060 (0.040～0.073)	0.040 (0.026～0.074)	0.022 (0.007～0.025)

注:表中数据为 10次测定值的平均值,括号内为测定值变化范围

图 3进一步分析了不同形态的磷在每一级中的减少量在 3级总去除量中所占的比例。由图可见,第 1级对 TP和 PP的去除贡献最大。尤其是 PP,整个系统所去除的 PP中有近 80%的量在第 1级中被去除。后 2级对 PP的去除贡献均远远小于第 1级,但第 2级略大于第 3级。

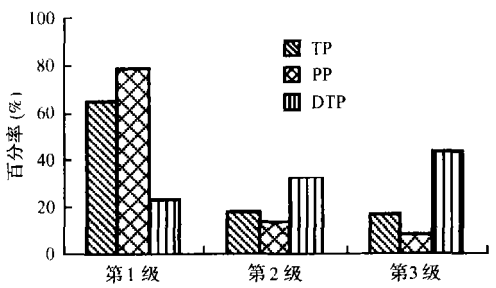

图 3 各级对不同形态磷的去除贡献

Fig 3 Comparison of the ratios of each step removal to total removal for different phosphorus species

分析原因,河水中的 PP是以泥沙、生物残体和浮游植物等形式存在,当原水流经栽培水路时,由于水流紊动程度较河流中大大降低,泥沙、生物残体、浮游植物等极易通过沉淀、吸附等物理作用沉降到池底或被截留吸附在水下发达的植物根系表面,于是 PP浓度迅速降低,进入到后级的 PP相应就少,因此后 2级水路对 PP的去除量就不可能超过第 1级。TP浓度经过第 1级后也显著下降,这主要归功于 PP的大量去除。因为构成原水中 TP的绝大部分是 PP,这一点从表 1中可以明显看出,原水 TP中的 DTP只有 30%左右,其余部分则是 PP,因此当 PP去除率高时,TP的去除率必然高。

与 PP的情况恰好相反,从第 1级至第 3级,对 DTP的去除贡献则明显呈阶梯状上升的特点。这是因为泥沙、生物残体和浮游植物等悬浮物质被截留下来以后,其性质并不稳定,它们不但含有大量的氮磷营养元素,还富含有机质,微生物就很容易在根系间隙繁殖。在微生物的作用下,悬浮物被摄食和分解,微生物作用将原本以颗粒态形式存在的磷元素源源不断地以溶解态的形式释放返回到水生植物床的水相主体中。与此同时,水路中栽培的植物对溶解性磷有吸收作用,吸收和释放两者之间的差值才是表观净去除量,即通过水质测定所反映的去除量。在第 1级水路中,一方面此处沉积的底泥最多,相应的溶解性磷释放量大;另一方面,这些底泥还有的有机质也较多,在水生植物床体局部形成充分的还原环境,加速了溶解性磷的释放[4]。所以溶解性磷的释放速率第 1级最大,后 2级依次减小。而前后级的植物品种、栽培量、营养条件和生长环境都相同,所以植物对磷的吸收速率可认为相差无几。上述 2方面综合使得 DTP表观去除量由前往后逐级增大。表 1中出现的第 1级 PO_4^{3-}-P溶出现象也正是由于 PO_4^{3-}-P的释放速率超过了栽培植物对 PO_4^{3-}-P的吸收速率而导致的。

2.2 氮的去除效果

原水和各级出水中不同形态氮的浓度平均值见表 2。由表可见,出水中 TN、DTN、NH_4^+-N和 NO_x^--N浓度均呈逐级下降趋势,经过 3级净化后,浓度分别从 2.633、1.721、0.683和 0.772 mg/L降低到 0.934、0.660、0.348和 0.101 mg/L,总去除率分别为 64.5%、61.6%、49.0%和 86.9%。

图 4反映了 TN、DTN、PON和 DON的沿程变化过程。图中 PON和 DON为计算值,故以虚线表示。由图可见,PON的浓度在第 1级减少最多,这一点与 PP的变化特点相似,也是由于原水中悬浮物质被大量截留的缘故。而 DON经历了先升后降的变化过程,第 1级出水中 DON浓度高于原水。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　原水和各阶出水中不同形态氮的浓度

Table 2　Concentrations of different nitrogen species in inflow and each step outflow　(mg/L)

检测项目	原水	出水		
		第 1级	第 2级	第 3级
TN	2.633 (1.844～3.672)	1.806 (1.078～2.455)	1.262 (0.752～1.902)	0.934 (0.500～1.371)
DTN	1.721 (1.161～2.367)	1.374 (0.841～1.714)	0.931 (0.730～1.194)	0.660 (0.472～0.907)
NH_4^+-N	0.683 (0.263～1.124)	0.475 (0.249～0.801)	0.373 (0.198～0.594)	0.348 (0.181～0.509)
NO_x^--N	0.772 (0.403～1.152)	0.543 (0.332～0.881)	0.320 (0.189～0.543)	0.101 (0.053～0.323)

注:表中数据为 10次测定值的平均值,括号内为测定值变化范围

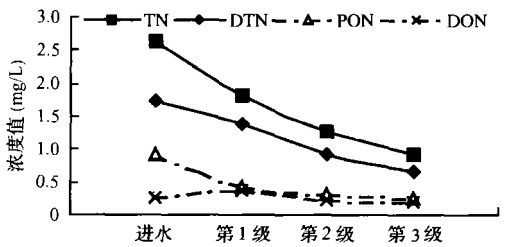

图 4　不同形态的氮沿程变化

Fig 4　Changes of different nitrogen species along the flow

分析其原因,颗粒态有机氮 PON主要包括半分解的有机质 (如氨基酸、酰胺和蛋白质氮等)、微生物躯体和腐殖质,除腐殖质因其多与粘粒矿物结合紧密而不易矿化外,半分解的有机质和微生物躯体均很容易通过腐败过程成为 DON,而 DON水解成 NH_4^+-N的过程则相对较慢;这样 PON转化为 DON的速率就大于 DON向 NH_4^+-N转化的速率,造成了 DON在水路中的积累。需要进一步说明的是,尽管存在有机氮的氨化作用,但并没有出现 NH_4^+-N 的积累,这是因为系统中 DO浓度高,硝化作用较强;同时,硝态氮又是各形态氮中最容易被植物吸收的,试验期间正值植物生长旺季,因此没有出现 NO_x^--N积累的现象。DTN浓度则几乎是沿直线下降,即原水经过每一级后浓度减少值基本相等。由于 DTN的去除主要通过去除占 DTN比例较高的 NH_4^+-N和 NO_x^--N来实现,这 2种形态的无机氮主要通过硝化反硝化和植物吸收作用被去除,由此可知,各阶植物床中植物吸收量与反硝化脱氮量的和基本处于同一水平。

3　结　论

(1) 在夏季运用水生植物床净化富营养化河水的试验结果表明,该技术能有效去除富营养化水体中的氮磷营养元素。在总水力负荷为 74 cm/d的条件下, TP和 TN的去除率可分别达到 73.1%和 64.5%。

(2) 对不同形态的氮磷在水生植物床中去除过程的详细分析表明,植物根系对原水中的悬浮物有很高的捕捉效率,是氮磷去除的重要途径;被捕捉截留的悬浮物会不断分解释放出溶解性氮、磷,并被植物吸收同化。利用 3级串联的方式,有效克服了其他人工湿地系统[5,6]中出现的溶解性营养盐释放问题。

(3) 本研究直接以富营养化河水为试验对象,且整个试验过程完全在野外自然条件下进行,人为因素影响小,所以与其他以人工配制的模拟富营养化水为研究对象,或是在室内进行的一些研究相比,本试验结果具有更大的参考价值和实用意义。

参 考 文 献

[1] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗. 湖泊科学, **2000**, 12(3): 269～279

[2] 成小英, 王国祥, 濮培民, 等. 凤眼莲腐烂分解对湖泊水质的影响. 中国环境科学, **2004**, 24(3): 303～306

[3] 中国标准出版社第二编辑室. 中国环境保护标准汇编 ——水质分析方法. 北京: 中国标准出版社, **2001**

[4] Wang H., Appan A., Gulliver J. S. Modeling of phosphorus dynamic in aquatic sediments: Ⅰ. Model development Wat Res, **2003**, 37(16): 3928～3938

[5] 相崎守弘,中里[illegible]幸. 富　養化湖水の　化のための水耕生物濾過法を用いた人工湿地の開発. 水[illegible]境学会誌, **1997**, 20(9): 622～628

[6] Coveney M. F., Stites D. L., Lowe E. F., et al Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration. Ecol Eng, **2002**, 19(2): 141～159

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net