

复合塘-湿地系统水生植物时空分布对氮磷去除的影响

彭剑峰¹, 王宝贞¹, 夏圣骥¹, 王琳²

1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266003

摘要: 利用复合生态塘-湿地处理系统水生植物时空格局异质性, 研究了水生植物分布对氮、磷去除影响。结果表明, 水生植物种类和数量的分布差异导致各单元氮、磷去除呈现不同的周期变化; 水生植物主要通过改变硝化/反硝化进程、自身代谢和化学沉降速率影响 NH_3 、 NO_x^- 、有机氮和总磷的去除。系统不同单元中氮、磷去除机制差异决定了 NH_3 和总磷主要在曝气养鱼塘 (去除率分别为 29.5%、30.1%)、鱼塘 (16.9%、17.8%) 和水生植物塘 (24.5%、19.4%) 去除; NO_x^- 主要在芦苇湿地 (出水 $< 0.4 \text{ mg/L}$) 去除; 而有机氮则主要在复合兼性塘 (32.3%) 和鱼塘 (28.1%) 去除。此外, 生态塘出水中水生植物绝大部分被芦苇湿地所截滤, 它们的腐败/释放导致湿地中 NH_3 和总磷的表现去除率偏低 (分别小于 8.5% 和 11.5%)。

关键词: 水生植物; 氮; 磷; 生态塘; 湿地

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2004) 04-0508-04

水环境中氮、磷的富集加剧了水体富营养化, 促进了水生植物滋长, 改变了水生植物的时空分布格局; 另一方面, 各种水生植物也通过多种方式改变水环境, 而水环境的改变又不可避免地影响氮、磷的去除^[1, 2]。水生植物和氮、磷的这种相互影响在复合生态处理系统中表现尤为突出。污水中充足的氮源和磷源加大了水生植物生物量, 加剧了处理单元间生物群落的时空分布差异; 而水生植物的分布差异又影响着水环境变化, 使单元间氮、磷表现出不同的去除规律^[3]。

利用某生态处理单元, 比较不同水生植物对氮、磷去除的影响已成为生态处理研究中的热点。但目前的研究主要集中于生活型(life form)接近的群落间的横向比较, 研究范围较窄。例如对某型湿地, 不同浮叶植物对氮、磷去除效果的模拟比较。本实验主要以实际生产运行的复合生态塘-湿地处理系统为实验平台, 以不同发展水平的水生植物的季节交替为基础, 考察水生植物时空分布与氮、磷去除的关系, 试图进一步了解不同生态处理单元中氮、磷去除的周期性差异。

1 实验方法

1.1 实验地点

实验选择在水环境变化复杂、水生植物时空分布变化显著的山东某生态处理系统进行。该污水处理工艺主要包括生态塘和湿地两部分, 工艺流程依次为: 复合兼性塘(HFPs)? 曝气塘(APs)? 曝气养鱼塘(AFPs)? 鱼塘(FPs)? 水生植物塘(HPs)? 芦苇湿地(CWs)。

1.2 取样与分析方法

实验从 2001 年到 2003 年, 每周采集水样 2~3 次。水温 and DO 分别采用精密温度计和 Hach-16046 溶解氧仪现场检测, pH 利用 PHS-3C 酸度计于实验室检测。样品首先用不锈钢筛(孔直径 2 mm)过滤以去除较大的浮叶植物, 再进行氮磷分析。各种形态氮和磷的测定按照 APHA (1995) 的标准, 其中 NO_x^- -N 采用戴氏合金法测定以消除氯离子的干扰。

在浮游藻类分析中, 水样用有机玻璃采水器于水面下

0.5 m 处采集。取 1000 mL 水样, 加入 15 mL 卢戈氏液固定, 静置 24 h 后吸去上清液, 定容至 30 mL。显微镜检计数时, 充分摇匀, 吸取 0.1 mL 滴入计数框内, 用视野法计数各属的细胞数和个体数。

2 结果与讨论

2.1 水生植物群落时空分布格局

水生植物时空分布格局异质性主要通过各单元浮游藻类数量和分布的季节变化来衡量。从图 1 可以看出, 各单元

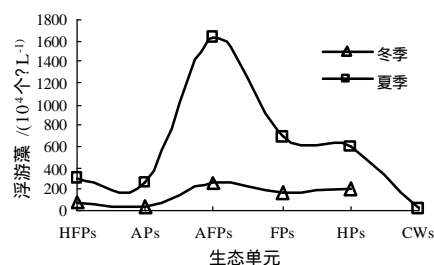


图 1 各单元浮游藻类数量季节差异

浮游藻类的数量季节差异明显。冬季浮游藻类数量增长慢, 而夏季浮游藻类数量在曝气养鱼塘中迅速升高, 但在鱼塘和芦苇湿地中又迅速减小。这是由于冬季低水温、低光照强度和短日照, 浮游藻类活性低, 生长速度慢; 夏季日照增强, 在污染负荷略低的曝气养鱼塘内浮游藻类大量增殖; 由于鱼塘中原生、后生动物的捕食作用, 水生植物塘中浮叶植物的抑制作用, 芦苇湿地中芦苇根系的截滤作用共同导致浮游藻类数量迅速降低。

此外, 镜检发现浮游藻类群落分布也有显著的时空差异。夏季, 浮游藻类以蓝、硅藻为主。其中从复合兼性塘到芦苇湿地, 藻类逐渐从体积较小的小球藻(*Chlorella vulgaris*)、固氮鱼腥藻(*Anabaena azotica*)为主过渡到体积较大的针杆藻(*Synedra acus*)和月芽藻(*Selenastrum*)为主, 此外水

基金项目: 黑龙江省重大科技攻关项目 (GA02C201-01)

作者简介: 彭剑峰 (1977 -), 男, 博士研究生, 研究方向为污水生态处理与回用。E-mail: pjf1995@163.com

收稿日期: 2004-06-07

生植物塘中生长着大量的浮萍(*Duckweed*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*),芦苇湿地中生长着芦苇和浮萍。这就使夏季植物群落呈浮游藻类?沉水植物?浮叶植物?挺水植物的空间分布格局。而冬季,各单元中水生植物仅剩少量浮游藻类,并以颤藻(*Oscillatoria*)和隐藻(*Chroomonas acuta*)为主,植物群落空间格局变化不明显。

受水生植物时空分布异质性影响,各单元环境因子也周期变化。例如从冬季到夏季,复合兼性塘、曝气塘的 pH 和 DO 变化较小;曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘的 pH 明显升高,DO 略升;而芦苇湿地的 pH 和 DO 逐渐降低。这就对各单元氮磷去除产生不同影响。

2.2 水生植物对氨氮去除影响

图 2 为不同月份各生态处理单元出水 NH_3 与原水 NH_3 (虚线)的比值,各曲线间的差值反映了不同单元 NH_3 的

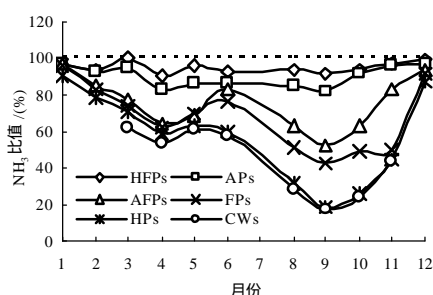


图2 各单元出水 NH_3 与原水 NH_3 比值

去除率变化。可以看出,随温度升高,各单元塘 NH_3 的去除率也相应升高。这是由于在生态塘系统中, NH_3 主要通过挥发、生物硝化/反硝化、生物同化吸收 3 种机制去除,而各去除机制的效率都直接或间接地受浮游藻类的影响。随温度升高,浮游藻类活性和数量增长,生物同化吸收 NH_3 速率加快;同时藻类的代谢活动吸收 CO_2 并释放 O_2 ,提高了水体的 DO 和 pH,这又加强了生物硝化/反硝化和氨氮挥发水平^[4],因此随浮游藻类增长各单元塘 NH_3 的去除速率增加。

从图 2 还可以看出,高温期曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘中 NH_3 去除率升高幅度远高于复合兼性塘和曝气塘。全年 NH_3 主要在曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘中去除,去除率分别为 29.5%、16.9%、24.5%。这是由于在复合兼性塘和曝气塘,浮游藻类含量少,对水环境影响小,水体全年呈厌氧和兼性状态,且 pH 较低,因而 NH_3 去除率低;而曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘中,水生植物季节演替明显,高温期水生植物对水环境影响大。尤其在水生植物塘中,大量生长的浮萍不仅提高了水体的 pH,还为硝化菌的生长提供载体,促进了生物硝化速率。因而这 3 个单元 NH_3 的去除变化幅度远高于复合兼性塘和曝气塘。

值得注意的是芦苇湿地在单独使用时 NH_3 的去除率通常较高,但与水生植物塘连用的湿地主要用来降低出水 SS 和 BOD_5 ,对 NH_3 的去除能力通常较低(图 1),这一点已被 Senzia 和 Kemp 的实验所证实^[5,6]。这是由于水生植物塘出水中含有大量的浮萍和浮游藻类,这部分水生植物绝大部分被截滤在湿地内,它们的腐败和分解必将释放出相当量的

NH_3 。此外芦苇湿地中茂密的芦苇和浮萍不仅抑制了藻类进一步生长,也通过降低水体的 DO 和 pH 减弱生物硝化/反硝化和挥发对 NH_3 的去除贡献,导致了芦苇湿地 NH_3 的低去除率。

综上可知,水生植物的时空分布格局异质性对各单元 NH_3 的去除机制和去除规律影响明显。

2.3 水生植物对有机氮去除影响

从图 3 可以看出,不同季节各处理单元有机氮的去除规律也明显不同。低温期有机氮主要在复合兼性塘去除

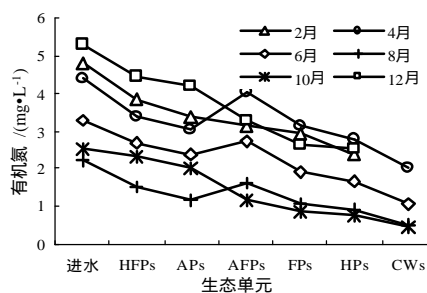


图3 各单元有机氮逐月变化

(39.7%),高温期复合兼性塘和鱼塘中有机氮的去除率明显升高,分别为 32.3%和 28.1%;而曝气养鱼塘表现为负去除,去除率与叶绿素含量相关性较高($r^2=0.71$)。

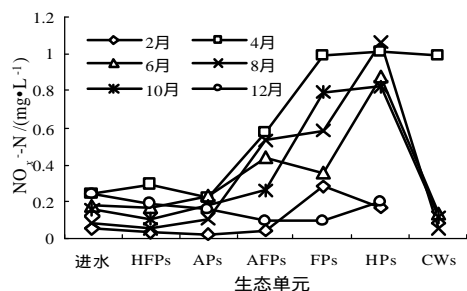
在生态处理系统中,有机氮不仅来源于原水中的有机物,系统内部大量生长的微生物及其释放产物也是有机氮的重要来源^[7]。在复合兼性塘和曝气塘,水生生物对水体的影响少,有机氮主要通过氨化作用去除,这与这两个单元有机物的去除率较高一致。而从曝气养鱼塘到芦苇湿地,有机氮的变化受水生植物的种类和季节演替影响增强。高温期,曝气养鱼塘中浮游藻类的大量生长和分解促进了有机氮的增长;而鱼塘中枝角类对藻类的捕食又迅速降低了这种负影响;水生植物塘中藻类的自沉降作用促使有机氮进一步缓慢减小;芦苇湿地中植物根系的截滤作用能有效地去除绝大部分悬浮有机物(包括藻类),因而也能有效地去除水中的有机氮。与之比较,低温期植物群落各单元间分布差别小,对有机氮的影响低,因而各单元有机氮去除主要受污水携带有机颗粒影响,并随有机物在复合兼性塘的大量降解而迅速减小,其余单元有机氮变化较缓。

综上,原水有机氮负荷和植物群落共同影响有机氮的组成和去除。在系统前端,原水有机氮的分解对系统有机氮去除的贡献较大;而系统后端,高温期水生植物分布对有机氮去除的影响较大。

2.4 水生植物对 NO_x^- 去除影响

从图4可以看出,各单元 NO_x^- 的变化规律明显不同。复合兼性塘和曝气塘,全年 NO_x^- 稳定。而从曝气养鱼塘、鱼塘到水生植物塘,低温期 NO_x^- 增长缓慢,高温期 NO_x^- 增长迅速,并在鱼塘或水生植物塘达到最大值。

在好氧生态塘中,硝化菌主要分布在好氧底泥表层、塘壁以及水生生物表层,水中硝化菌含量低;又由于硝化菌世

图4 各单元 NO_3^- -N 逐月变化

代期长,因而硝化过程是生物硝化/反硝化过程的限制因子;所以提供硝化菌生存的有效载体将是促进水体中硝化作用增长的有效方式^[8]。在好氧的曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘,水生植物和微生物都可以作为硝化菌的有效载体,并能提供硝化菌生长必需的DO,因而高温期 NO_x^- 含量增加较快。而复合兼性塘和曝气塘全年呈厌氧和兼性厌氧状态,硝化菌难以大量存活,因而生物硝化作用弱, NO_x^- 质量浓度缓降。

图4还可以看出,全年芦苇湿地出水 NO_x^- 基本上小于0.4 mg/L,其中4月份芦苇湿地出水的 NO_x^- 较高,但6~10月芦苇湿地的 NO_x^- 迅速降低,出水 NO_x^- 小于0.2 mg/L。这是由于芦苇和浮萍在不同生长阶段对水环境的影响不同。4月份芦苇和浮萍生物量低,对水环境影响小;而随温度升高,整个湿地逐渐被芦苇和浮萍覆盖,水体处于缺氧状态,反硝化速率加强,硝化受到进一步抑制,因而6~8月出水 NO_x^- 的含量低。

2.5 水生植物对总磷去除影响

图5为不同月份各生态处理单元出水总磷(TP)与原水TP(虚线)的比值,各曲线间的差值反映了不同处理单元TP去除率变化。可以看出在低温期(1~4月)TP去除率较低,TP主要在曝气养鱼塘去除;高温期(7~11月)TP去除率明显升高,TP主要在曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘去除,去除率分别为30.1%、17.8%、19.4%。此外,与常规的生态塘和湿地系统不同,该处理系统TP的最低去除率不是出现在低温期,而是出现在5~6月,这与TP负荷的突然降低以及底泥磷的释放有关。

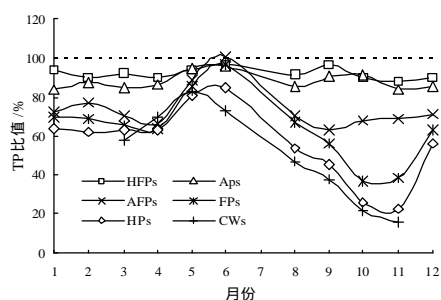


图5 各单元出水TP与原水TP比值

各生态单元TP去除也受水生植物时空分布影响。生态处理系统中,TP主要通过化学沉淀、藻类细菌的合成代谢、水生植物的吸收去除,其中与水 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等金属离子的化学沉淀是磷的主要去除方式。前已述及,高温期曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘水体pH和DO在一定范围内升

高,这能促进金属离子与磷的化合沉淀。在复合兼性塘和曝气塘,水生藻类含量少,对水环境影响小,磷酸盐分级实验显示悬浮磷沉降是TP的主要去除途径。由于沉降作用受温度影响小,因而复合兼性塘中TP去除率全年保持稳定。此外,芦苇湿地中TP去除率较低,这也应与芦苇所截滤的浮游藻类的腐败、释放有关。

3 结论

(1) 复合生态塘-湿地处理系统水生植物时空分布差异导致氮、磷去除规律的周期性变化。此外,各处理单元水生植物对水环境的影响幅度不同,其中对复合兼性塘和曝气塘影响较小;而对曝气养鱼塘、鱼塘、水生植物塘、芦苇湿地影响较大。

(2) 受水生植物种类影响,不同形态氮、磷在各单元的去除效率不同。 NH_3 和TP主要在曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘去除;有机氮在复合兼性塘和鱼塘去除; NO_x^- 在芦苇湿地去除。

(3) 芦苇和浮萍的大量生长,导致湿地的水环境与生态塘明显不同,氮磷的去除规律也与生态塘不同。此外受生态塘出水浮游藻类和浮萍影响,芦苇湿地对 NH_3 和TP去除率较低。

参考文献:

- [1] KATRIN T. Phytoplankton, pelagic community and nutrients in a deep oligotrophic alpine lake: ratios as sensitive indicators of the use of P-resources (DRP DOP :PP and TN TP SRSi) [J]. Water Research, 2003, 37(7): 1583-1592.
- [2] 吴生才, 陈伟民. 太湖浮游植物生物量的周期性变化[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 151-154.
- [3] CANOVAS S, PICOT B. Seasonal development of phytoplankton and zooplankton in a high-rate algal pond [J]. Water Science Technology, 1996, 33(7): 199-206.
- [4] KIM Y, KIM W. Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds [J]. Water Research, 2000, 34(13): 3285-3294.
- [5] SENZIA M A, MASHAURI D A. Suitability of constructed wetlands and waste stabilization ponds in wastewater treatment: nitrogen transformation and removal [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(3): 1117-1124.
- [6] KEMP M C, GEORGE D B. Subsurface flow constructed wetlands treating municipal wastewater for nitrogen transformation and removal [J]. Water Environmental Research, 1997, 69(7): 1254-1262.
- [7] BURFORD M A, LORENZEN K. Modelling nitrogen dynamics in intensive shrimp ponds: the role of sediment remineralization [J]. Aquaculture, 2004, 229(1): 129-145.
- [8] MICHAL G, ERAN F. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland utilizing a passive air pump [J]. Water Research, 1998, 32(12): 3513-3520.

Effect of spatiotemporal patterns of hydrophytes on N and P removal in a multistage ponds-wetlands treatment system

PENG Jian-feng¹, WANG Bao-zhen¹, XIA Sheng-ji¹, WANG Lin²

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: The effects of variations in hydrophytes on nitrogen and phosphorus removal were evaluated in different units of a combined pond-wetland wastewater treatment facility, based on the heterogeneity of spatiotemporal patterns of hydrophytes in these systems. Variations in species and biomass of hydrophytes led to periodic variations in nitrogen and phosphorus removal in each unit. Hydrophytes affected the removal of NH_3 , NO_x^- , total phosphorus and organic nitrogen through influencing rates of various mechanisms, especially nitrification-denitrification, chemical precipitation and metabolism of algae. Different mechanisms involved in nitrogen and phosphate removal determined that different species of nitrogen and phosphate are mainly removed in different unit. Briefly, the removal of NH_3 and total phosphorus mainly occurred in aeration-fish ponds (29.5%, 30.1%), fish ponds (16.9%, 17.8%) and hydrophyte ponds (24.5%, 19.4%); the removal of NO_x^- mainly occurred in the constructed wetland (<0.4 mg/L in final effluent); and the removal of organic nitrogen mainly occurred in hybrid facultative ponds (32.3%) and fish ponds (28.1%). Additionally, constructed wetland exhibits relatively low potential of removing NH_3 and total phosphate, less than 8.5% and 11.5% respectively, owing to its high capacity of filtrating algae and subsequent mineralization of algae biomass.

Key word: hydrophytes; nitrogen; phosphorus; eco-pond; constructed wetland

(上接第 507 页)

- [4] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 (第 3 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [5] FUKASE T, SHIBATA M, MIYAJI Y. Factors affecting biological removal of phosphorus[J]. Water Science and Technology, 1985, 17: 187-198.
- [6] WARANGKANA PUNRATTANASIN. Investigation of the effects of COD/TP ration on the performance of a biological nutrient removal system[D]. Blacksburg Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [7] 郝晓地, 刘壮, 刘国军. 欧洲水环境控磷策略与污水除磷技术(上) [J]. 给水排水, 1998, 24(8): 69-73.

Influencing factors of anaerobic-oxic biological phosphorus removal process

LI Jie¹, XIONG Bi-yong², ZHANG Jie^{1, 2}

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Key Lab of Water Quality Science and Water Environment Rehabilitation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract: The anaerobic-oxic biological phosphorus removal process was employed to investigate the influence and control strategy of two major factors, the influent ?(COD)/?(TP) ratio and the BOD load. The results indicated that the high ratio of influent ?(COD)/?(TP) was in favor of the phosphorus removal. P-release had a positive correlation with COD-uptake in anaerobic condition. The influent ?(COD)/?(TP) ratio had no significant influence on the removal of COD. The data suggested that PHB production was not completely dependent on utilization of energy from poly-phosphate bonds, and the higher influent ?(COD)/?(TP) ratio resulted in the higher P-release. To achieve high efficient phosphorus removal, the BOD load should be controlled in the range of 0.21~0.5 kg/(kg·d).

Key words: anaerobic-oxic process; biological phosphorus removal; ?(COD)/?(TP) ; BOD load