

塘-湿地组合处理系统中磷的主导去除机制分析

彭剑峰^{1,2}, 王宝贞¹, 王琳³

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛, 266003)

摘要: 为确定环境差异对磷去除机制影响, 利用组合塘-湿地生态处理系统中各单元环境与磷形态分布的差异, 分析各单元磷的主导去除机制及其对底泥和水体中磷迁移过程的影响。结果表明: 悬浮磷沉积、溶解无机磷的吸附/络合和悬浮磷的截滤依次为各单元磷的主导去除机制。磷主导去除机制的差异决定了各单元底泥中磷分布遵循一定的规律性和特殊性。此外, 低温期悬浮磷的沉积作用除磷效率高; 高温期溶解无机磷的吸收/络合作用除磷效率高。因而, 水环境差异对生态处理系统中磷去除规律影响明显。

关键词: 磷; 形态分布; 去除机制; 沉积物; 组合生态处理

中图分类号: X 52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9830(2005)05-0609-04

Dominant Removal Mechanisms of Phosphorous in Combined Pond-wetland Ecological Treatment System

PENG Jian-feng^{1,2}, WANG Bao-zhen², WANG Lin³

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: In order to determine the influence of environmental variations on phosphorus removal mechanisms in a combined pond-wetland system, the dominant removal mechanisms of phosphorus in different treatment unit and their influence on phosphate transformation between sediment and water column were investigated through analyzing the differences of phosphorus fractionation with water conditions. The results show that the precipitation of particulate phosphorous, the adsorption/complexation of dissolved inorganic phosphorous and the filtration of particulate phosphorous were the dominant removal mechanisms of different units in turn. Variations of dominant removal mechanisms produced there were some similarities and differences existing in sedimentary phosphorous fractionation in each unit. Additionally, it was the precipitation process of suspended phosphorus that played a relative important role in phosphorus removal in cold periods, and that was adsorption/complexation of dissolved inorganic phosphorus in warm periods. Therefore, environmental variations evidently affects the phosphorus removal perfor-

收稿日期: 2004-05-27 修回日期: 2005-07-05

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, 山东泰安人, 博士, 主要研究方向: 污水生态处理技术, E-mail: pjf1995@163.com; 通讯作者: 王宝贞(1932-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 水污染控制, E-mail: baozhen@public.hr.hl.cn。

mance in the ecological treatment system.

Key words: phosphorous; fraction; removal mechanism; sediments; combined ecological treatment

塘-湿地组合生态处理系统中各处理单元间磷的去除规律差异明显,因此研究单元间环境差异与磷去除机制的关系对优化污水生态处理系统除磷效果具有积极意义。多级生态处理系统中磷的去除过程复杂。磷的去除表现为总磷的 4 个组成形态:悬浮无机磷(SIP)、溶解无机磷(DIP)、悬浮有机磷(SOP)和溶解有机磷(DOP)之间的相互转化(图 1),并涉及物理化学吸附、颗粒沉积、细菌的同化、水生植物的吸收等多个机制的共同作用^[1,2]。但进一步研究发现,在一定的环境条件下,某形态磷的特定去除机制在总磷的去除中往往占据主导地位^[3,4],通过对不同单元各形态磷分布规律的研究可以了解生态环境对磷主导去除机制的影响。

目前对污水生态处理系统中磷去除机制的研究主要集中于单个生态环境对总磷的去除效应,而多种生态环境对不同形态磷的综合去除效应鲜有报道。本实验利用组合塘-湿地生态系统各处理单元的环境及其中磷形态分布的差异,分析随污水在各处理单元间流动,磷主导去除机制的变化,并在此基

础上探讨了磷主导去除机制对沉积物中磷的形态分布和水体中磷的去除规律的影响。

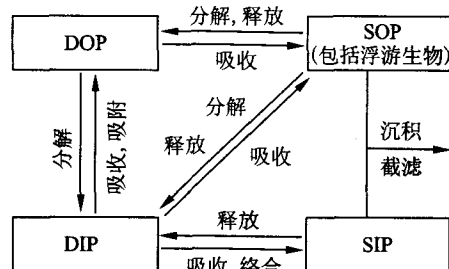


图 1 生态处理系统各种形态磷的去除机制

1 材料与方法

实验地点选择水环境变化复杂的山东东营市塘-湿地组合生态处理系统,水体依次经过厌氧、兼性、好氧和缺氧状态。系统流程为: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),各处理单元运行情况见表 1。

表 1 生态处理系统运行情况 (2002~2003 年均值)

单元类型	HRT /d	水体					沉积物	
		pH	$\rho(\text{DO})$ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP})$ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{SS})$ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{SO})$ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	h/cm	灼烧减重 (%)
进水	—	7.5~7.9	<1.5	1.98	51.2	42.3	—	—
HFPs	1.46	7.6~8.0	<1.0	1.73	25.8	29.8	28.5	35.4
APs	1.29	7.6~8.2	<2.0	1.62	21.9	25.2	8.5	7.5
AFPs	8.30	7.7~9.0	2.8~16.7	1.43	27.5	25.2	7	5.7
FPs	2.40	8.1~9.1	3.7~19.3	1.22	21.5	16.5	7	5.3
HPs	0.76	8.4~9.1	3.3~21.2	1.02	19.6	18.1	6	4.8
CWs	0.90	7.5~8.2	<3.1	0.93	9.5	11.5	6.5	9.8

1.1 样品采集和处理

水样每周于各处理单元的进水口和出水口采集 2~3 次。底部表层泥样(<3 cm)利用柱状采泥器($\varnothing 5$ cm)采集,每单元采集 15~20 个平行样。泥样经充分搅匀,过筛($\varnothing 2$ mm)分离后置于黑色玻璃瓶密封、避光、低温(4℃)保存待用。

1.2 样品提取及分析

水样首先经筛网($\varnothing 2$ mm)过滤除去较大的浮游生物。溶解性水样使用 Whatman GF/F 0.70 μm 滤膜抽滤获得。总磷(TP)、无机磷(IP)、溶解性总磷(DTP)和溶解性无机磷(DIP)的测定采用 APHA (1995)的方法。在数据分析中,总磷另外 3 个组成形态的计算方法为: $\text{SIP} = \text{IP} - \text{DIP}$; $\text{DOP} = \text{DTP} - \text{DIP}$;

$$\text{SOP} = (\text{TP} - \text{DTP}) - (\text{IP} - \text{DIP})^{[1,2]}.$$

底泥中磷的分级提取参照 Psenner 的方法进行^[5],各泥样均作平行提取、测定,控制测定结果偏差小于 $\pm 10\%$ 。沉积底泥磷经多次提取、分离后依次得到易解脱磷,铁磷(Fe-P),铝磷(Al-P),碱可提取有机磷(Org-P_{alk}),钙磷(Ca-P)和残余有机磷。试验发现,易解脱磷和残余有机磷含量较低,因而数据分析中将其忽略。

2 结果与讨论

2.1 各单元磷的主导去除机制

磷的表观去除贡献率是指某形态磷的去除量占

磷总去除量的比率,它反映了某种形态磷对总磷去除的贡献,各处理单元不同形态磷的表现贡献率如图 2。可以看出,从复合兼性塘(HFPs)到水生植物塘(HPs),SIP、SOP 和 DOP 对总磷的表现去除贡献率从 56.1 %、40.1 % 和 35.7 % 逐渐降低到 -13.7 %、-26.0 % 和 1.8 %,而 DIP 对总磷的表现去除贡献率从 -31.8 % 升高到 137.9 %。

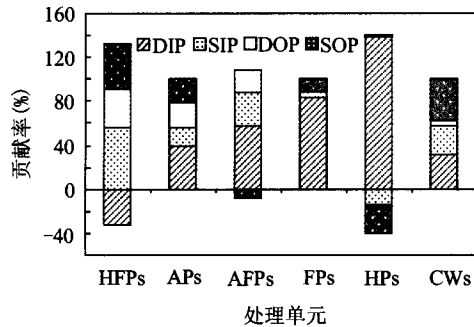


图 2 不同形态磷对总磷的表现去除贡献率

在芦苇湿地中,各种形态磷的表现去除贡献率明显不同于其生态塘的变化趋势。这表明在复合兼性塘中,SIP、SOP 和 DOP 对总磷的表现去除贡献率较高;在曝气塘和曝气养鱼塘中,DIP 和 DOP 的表现去除贡献率较高;在鱼塘和水生植物塘中 DIP 的表现去除贡献率较高;在芦苇湿地中,SOP 和 SIP 的表现去除贡献率较高。

利用环境变化对磷迁移方式的影响,通过对水环境和多种形态磷的表现去除贡献率的分析,可以确定各单元中不同形态磷的实际去除贡献率。

在复合兼性塘,悬浮性有机物和无机物的去除比例均较高,并且沉积物厚度及其有机成分(即灼烧减重)也明显高于其它单元(表 1),因而悬浮物的沉积作用显著,这可以解释 SIP 和 SOP 对总磷的去除贡献率较大^[6]。此外,尽管该单元溶解性有机磷(DOP)的表现贡献率较高,但由于绝大部分溶解性有机磷(DOP)通过分解而为 DIP 去除,这导致了 DIP 的表现负贡献率,因而 DOP 分解对总磷的去除贡献率较小。

在曝气塘和曝气养鱼塘,通过消除 DOP 分解对 DIP 产生的负影响可以发现 DIP 对总磷的实际去除贡献率最大。生态处理系统中 DIP 的去除主要通过 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等金属离子吸附/络合沉积和藻类吸收这两个途径^[7]。其中藻类不易沉降,它的大量生长必将导致 SOP 较高的表现负贡献率。而这两个单元中 SOP 的表现负贡献率较低,因而可以确定藻类吸收对磷去除贡献率低,DIP 与金属吸附/络合沉积在磷的去除中占主导地位。同理可知,在鱼塘和水生植物塘 DIP 的吸附/络合沉积也是磷的主导去除机制。

芦苇湿地中生长着茂密的芦苇和浮萍。通过根系的截滤作用,在生态塘中不能去除的大粒度浮游生物以及小粒度无机悬浮颗粒易被截留在湿地内^[8],因而 SIP 和 SOP 的截滤作用对总磷的实际去除贡献率较大。

综上所述,从复合兼性塘到芦苇湿地,SIP 和 SOP 的沉积、DIP 的吸收/络合、SOP 和 SIP 的截滤依次是各单元磷的主要去除机制。值得指出的是,此规律在不同季节具有一致性。

2.2 去除机制对沉积底泥中磷分布的影响

研究发现,在多级生态塘-湿地处理系统中,通过各种机制去除的磷绝大部分以沉积物磷的形式在系统底部积累^[9]。为了了解各种形态磷去除机制对沉积底泥的影响,实验中对各单元底泥中磷的分布进行了探讨。

图 3 为各单元不同形态底泥中磷的分布变化。可以看出,各单元底泥中磷的形态分布遵从一定的规律性。首先,底泥中磷主要由无机磷 Ca-P、Fe-P 和 Al-P 构成;其次,除鱼塘(FPs)采用石灰灭菌造成底泥中 Ca-P 所占比率较高外,从系统前端到后端,Ca-P 在沉积底泥磷中所占比重增加,而其余形态的磷所占的比重逐渐减小,并且减小的幅度接近 66 % ~ 73 %。这些规律性可以通过 DIP 的去除机制解释。从曝气塘到水生植物塘,DIP 对总磷的实际去除贡献率最大,并且 DIP 与 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 的络合是水体中磷的主要去除方式,因此底泥中无机磷占绝大部分。此外随着水体的流动, Al^{3+} 、 Fe^{3+} 金属离子和 DIP 浓度都呈现有规律的下降,因此,作为它们反应产物的 Fe-P 和 Al-P 所占比重减小。而在各级处理单元中 Ca^{2+} 和 DIP 的反应速率主要受 pH 的影响^[5],因此其反应产物 Ca-P 随着各单元 pH 的升高而升高。

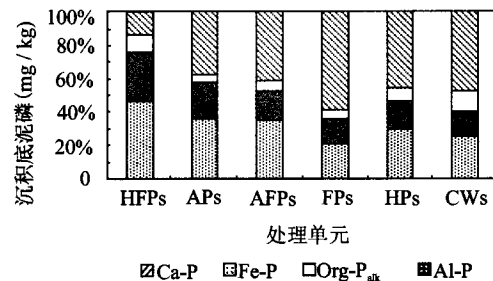


图 3 各单元沉积底泥磷分布

从图 3 还可以看出,各单元底泥中磷具有一些独特的性质。首先,复合兼性塘底泥中磷分布规律与其它单元明显不同;其次,鱼塘 Ca-P 的体积质量高于其余单元;另外在芦苇湿地中,有机磷 Org-P_{alk} 的体积质量略高于其余单元。这些特殊性可以用这几个单元中磷去除机制的差异解释。复合兼性塘

中,沉积底泥磷主要来源于 SIP 和 SOP 的沉积。由于处理系统自身形成的悬浮磷与进水所含悬浮磷的组成差异导致该单元沉积底泥磷的分布特殊性;在鱼塘采用石灰消毒, Ca^{2+} 和 DIP 的反应速率加快是 Ca-P 体积质量增长的主要原因;在芦苇湿地中,浮萍和芦苇对浮游生物和植物残渣等 SOP 的截滤作用导致底泥中积累的 $\text{Org-P}_{\text{alk}}$ 略高^[10]。因此,各单元不同形态磷主导去除机制的差异对沉积底泥磷分布有较强影响。

2.3 去除机制对系统磷去除规律的影响

生态处理系统中总磷的变化规律由不同形态的磷共同决定。随水环境的季节性变化,各形态磷表现出周期性的变化规律,这必将影响各处理单元对磷的去除效果。

图4为不同月份各单元对系统总磷的去除贡献率。可以看出,不同季节各单元对总磷的去除贡献率明显不同。在低温期,复合兼性塘对总磷去除贡献率在 37%~46%之间,远远高于其余单元的 4%~29%。而随着温度的逐渐升高,复合兼性塘的去除贡献率逐渐降低到 6%,而曝气养鱼塘、水生植物塘、芦苇湿地和鱼塘对磷的去除贡献率增大,并依次在磷的去除过程中占主导地位。

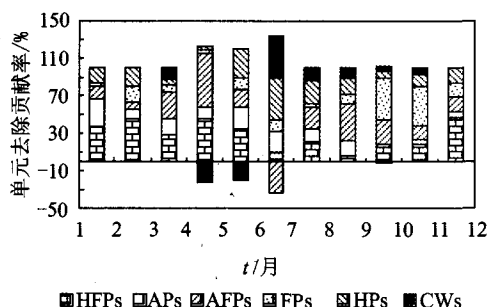


图4 各处理单元对系统总磷去除贡献率

前已述及,各处理单元的环境条件及其磷的主导去除机制存在差异,这就决定了各单元对磷的去除贡献率表现出季节性差异。例如,在复合兼性塘,磷的去除主要依靠悬浮磷(SOP和SIP)的沉积作用,该过程反应时间短,受温度等环境因素的影响小,因而在低温期复合兼性塘除磷效率高。与之比较,高温期曝气养鱼塘、鱼塘和水生植物塘的水温、pH、氧化还原电位、生物量明显升高,DIP与金属离子的络合能力远高于低温期,因而这几个单元高温期除磷效率高。此外,芦苇湿地对磷的去除贡献受芦苇和浮萍活性及生长密度的影响,因而高温期效果较高^[8,11]。

综上所述,低温期以SOP和SIP沉积作为主导去除机制的复合兼性塘除磷效率最高;而在高温期以DIP吸附/络合作为磷主导去除机制的曝气养鱼

塘、鱼塘和水生植物塘除磷效率高。

3 结论

(1) 各处理单元中,不同形态磷的去除途径存在差异。随处理污水流动,SOP/SIP的沉积、DIP的吸附/络合、SOP/SIP的截滤依次在磷的去除过程中占主导地位。

(2) 磷的主导去除机制对沉积底泥磷分布有明显影响。磷去除机制差异导致各单元沉积底泥磷分布遵从一定的规律性和特殊性。

(3) 受水环境季节性变化影响,各单元对磷的去除贡献率呈周期性变化。低温期,SOP和SIP沉积作用除磷效率最高;而在高温期,以DIP吸附/络合作用除磷效率高。

参考文献:

- [1] 王宝贞,王琳. 水污染治理新技术[M]. 北京:科学出版社, 2004.46-50.
- [2] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社, 2000.46-50.
- [3] William A H. Geochemical cycling of phosphorus in rivers [J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(5):739-748.
- [4] Uwe S, Thomas H, Manfred M. Dissolved and particulate phosphorus forms in a eutrophic shallow lake [J]. Aquatic Sciences, 2002, 64:97-105.
- [5] Emil R. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, 34:2 037-2 042.
- [6] Kara L N, Blanca J C, George T, et al. Sludge accumulation, characteristics, and pathogen inactivation in four primary waste stabilization ponds in central Mexico [J]. Water Research, 2004, 38:111-127.
- [7] Maynard H E, Ouki S K, Williams S C. Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance [J]. Water Research, 1999, 33(1):1-13.
- [8] David R T, Harish B, Ronald R, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture [J]. Aquacultural Engineering, 2002, 26:81-109.
- [9] Drizol A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems [J]. Water Research, 1999, 33 (17):3 595-3 602.
- [10] Beck M A, Elsenbeer H. Biogeochemical cycles of soil phosphorus in southern Alpine spondosols [J]. Geoderma, 1999, 91:249-260.
- [11] 崔福义,林涛,马放. 水体治理中鲢鳙生物操纵作用的实验研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2004,28(6):668-671.