

模拟湿地中磷的去除规律初步研究*

刘来胜, 周怀东, 董哲仁, 王雨春

(中国水利水电科学研究院, 北京, 100038)

摘要:通过在人工构建湿地“小宇宙”系统开展受控模拟实验,研究湿地湿生植物对水环境中磷的吸收和去除规律。本次研究,选择对比四种不同类型挺水植物和浮叶植物,在不同体系环境条件下(如溶解氧、pH)对水环境中磷吸收和去除。模拟实验通过对比四种不同类型的水生植物系统,结果显示,不同类型湿生植物对环境中磷的吸收强度和作用方式有较大的差别。总体来看,实验体系水体中正磷酸盐浓度下降趋势大致呈现的“三阶段”变化模式,即:坡降期、陡降期、平台期,不同期内磷去除率分别为:35.53%、29.98%和7.20%。

关键词:模拟湿地;磷去除率;水力停留时间;水生植物

Primary Study on the Rule of Removing Phosphorus in Simulated Wetland

LIU Laisheng, ZHOU Huaidong, DONG Zheren & WANG Yuchun

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China)

Abstract: The rule of removing phosphorus in small-scale simulated wetland system has been studied. Considering the influence of the environmental factors as dissolved oxygen, pH, etc, we chose not only the aquatic plants, but also rooted emergent macrophyte as the experimental macrophytes. By contrasted four kinds of macrophyte systems, we found out that the absorbency and functionary mode of removing phosphorus by macrophytes are different. As a whole, we found out the three stages model of the density dropping of phosphorus, namely: slope lower stage, steep lower stage, steady lower stage, and the removal rate of each stage is: 35.53%, 29.98% and 7.20%.

Keywords: Simulated wetland; the removal rate of phosphorous; hydraulic residence time; macrophyte

湿地污水处理系统不但高效、低耗,同时兼有水源涵养、美化环境、净化空气等生态功能,在最近几年发展迅速并日趋为人们广泛接受。目前国内对湿地污水处理系统的研究,主要集中在对总体除污效率以及工程工艺设计上,而对湿地内部污染物迁移、转化的过程研究相对较少,在研究的系统性和深度上都明显不够,一定程度上限制了湿地系统的实际应用^[1]。国外相关研究的经验表明,由于湿地自身结构性质或环境控制因子的差异,不同湿地污水处理系统的生态功能(如除污效率)可能在很大范围变化。因此,十分需要对湿地系统中一些关键过程开展深入研究。

人工(或天然)湿地系统,被广泛用于降低水环境中的氮磷污染物,以控制水体的富营养化。由于磷的性质稳定而不容易去除,并且它还是水体富营养化的主要控制因子,因此对磷的去除机理进行研究有着极其重要的意义。本次实验,在人工修建的水池中构建湿地“小宇宙”模拟系统,研究不同水生环境条件下水体中磷的去除规律。实验系统通过引种不同类型的水生植物形成不同湿地生境条件,同时人为控制水深、水力停留时间等环境条件。

1 实验方法

1.1 实验场地

本实验的实验场地设在北京玉渊潭公园南侧昆玉河旁边水生生态修复实验区内,一共四个并联方式排

* 水利部重点创新基金资助项目(SCX 2003–02)和国家自然科学基金项目(40103008)联合资助。2004–12–14 收稿;2005–03–31 收修改稿。刘来胜,男,1980年生,硕士研究生;E-mail:liuls@iwahr.com.

列的钢筋混凝土水池,其具体尺寸为:4 m×2 m×1 m. 在四个水池的一侧装有一根配水管,通往每个水池都有一个配水龙头;在另一侧每一个水池装有四根排水管,其安装方法为:底部安装一根,然后向上依次间隔30 cm、30 cm、20 cm再安装三根,可以取不同高度的水样;底部铺有一根穿孔管,便于收集底泥中的间隙水;每个水池装一个用于测定泥位和水位的水尺. 水池旁边建有一圆形配水池(直径:4 m,高:1 m),为四个水池均匀配水.

1.2 实验水体

实验用水由昆玉河抽水入配水池,投配一定量磷酸二氢钾(KH_2PO_4)配制而成. 本次实验中,配水池中供试水体所含总磷浓度为0.968 mg/L. 实验前,先把四个模拟湿地中的水放空,水池底部底泥中孔隙水通过布设有穿孔排水管渗出,从而可以减少底泥间隙水中的磷对实验的影响. 根据不同植物对水深条件的要求,选择实验系统的水体深度. 经过配水后,菖蒲、鸢尾、水葱三个系统中的水位为25 cm,睡莲系统中的水位为50 cm.

1.3 植物的选择

本次实验采用的植物为:菖蒲(*Acorus calamus*)、睡莲(*Nymphaea odorata*)、鸢尾(*Iris* sp.)、花叶水葱(*Scirpus tabernaemontani* var. *Zebrinus*). 其植物选择的依据为:由于睡莲,即可为磷的去除创造厌氧环境,又可以起到美化环境的作用,同时还可以作为浮叶植物同挺水植物相比较. 菖蒲为国内外广泛研究的植物,并且为大家公认的去氮、磷效果较好的植物^[2-4],所以本次实验一方面可以用别人的研究结果对本次的实验结果进行验证,另一方面也可以以它为参照,来说明所选择的其他几种植物的去除效果. 鸢尾为适于南方生长的植物,此次实验引种鸢尾的目的在于研究南方植物在北方地区生长情况下的除污能力,同时可以作为一个新思路来引导今后的生态水处理工作,由以北方土著植物为研究重点转移到引种南方植物上来. 花叶水葱作为水葱的一种变异,一方面秉承了水葱的去除污染物的超强能力,另一方面,其可以作为一种观赏植物,在注重处理效果的同时可以起到美化环境的作用,对这种植物的研究有利于今后生态景观建设的开展.

1.4 采样与分析

实验时间定为一周,取样频度为:9月18日于8:00、12:00、18:00三次取样,19、20、21、22日于8:00和18:00两次取样,23、24两天于8:00取样一次. 样品采集后,当天进行水质测试. 所测指标为总磷(TP)、溶解态总磷(TDP)、正磷酸盐,采用的方法为钼锑钒分光光度法,《水和废水监测分析方法》第四版^[5].

实验体系底泥按表层、中层和底层分隔采样,底泥样品干燥后研磨至100目用于分析. 总磷和磷形态分级按《土壤农化分析》第三版^[6].

2 结果分析与讨论

2.1 实验体系底泥中磷的分级分析

本次实验所选用的底泥为河漫滩的沙、土混合物,泥样的磷形态分析显示(表1),底泥总磷中钙磷的含量非常高,占总磷含量的70.99%,相比之下,铝磷和铁磷分别占总磷的6.67%和4.99%. 说明用于实验的底泥组成中吸附能力强的铁铝氧化物或水合物可能较少,底泥对水体溶解磷的直接吸附作用相对较弱^[7,8],底泥的吸附解吸动力学实验结果也支持了同样的结论(有另文叙述). 显然,在试验过程中,人工湿地体系水体中磷酸盐的浓度降低可能主要取决于湿生植物吸收.

表1 供试底泥中磷的形态组成

Tab. 1 Composition of the sediment phosphorus in the trials

类别	弱结合态磷	铝磷	铁磷	闭蓄态磷	钙磷	总磷
含量(mg/kg)	17.63	53.89	40.30	27.42	573.29	807.58
占总磷百分比(%)	2.18	6.67	4.99	4.28	70.99	100.00

2.2 模拟湿地系统水体中磷酸盐浓度的变化规律

从图1可以看出,所用于实验的四个湿地系统均表现出显著的“吸磷”作用.在实验期内(一周),模拟湿地水池水体中溶解正磷酸盐浓度,从起始浓度开始随时间变化明显下降.所有实验体系水体中磷酸盐浓度变化趋势相似,根据其浓度-时间关系大致可以分为三个阶段:缓降期、陡降期、平台期.

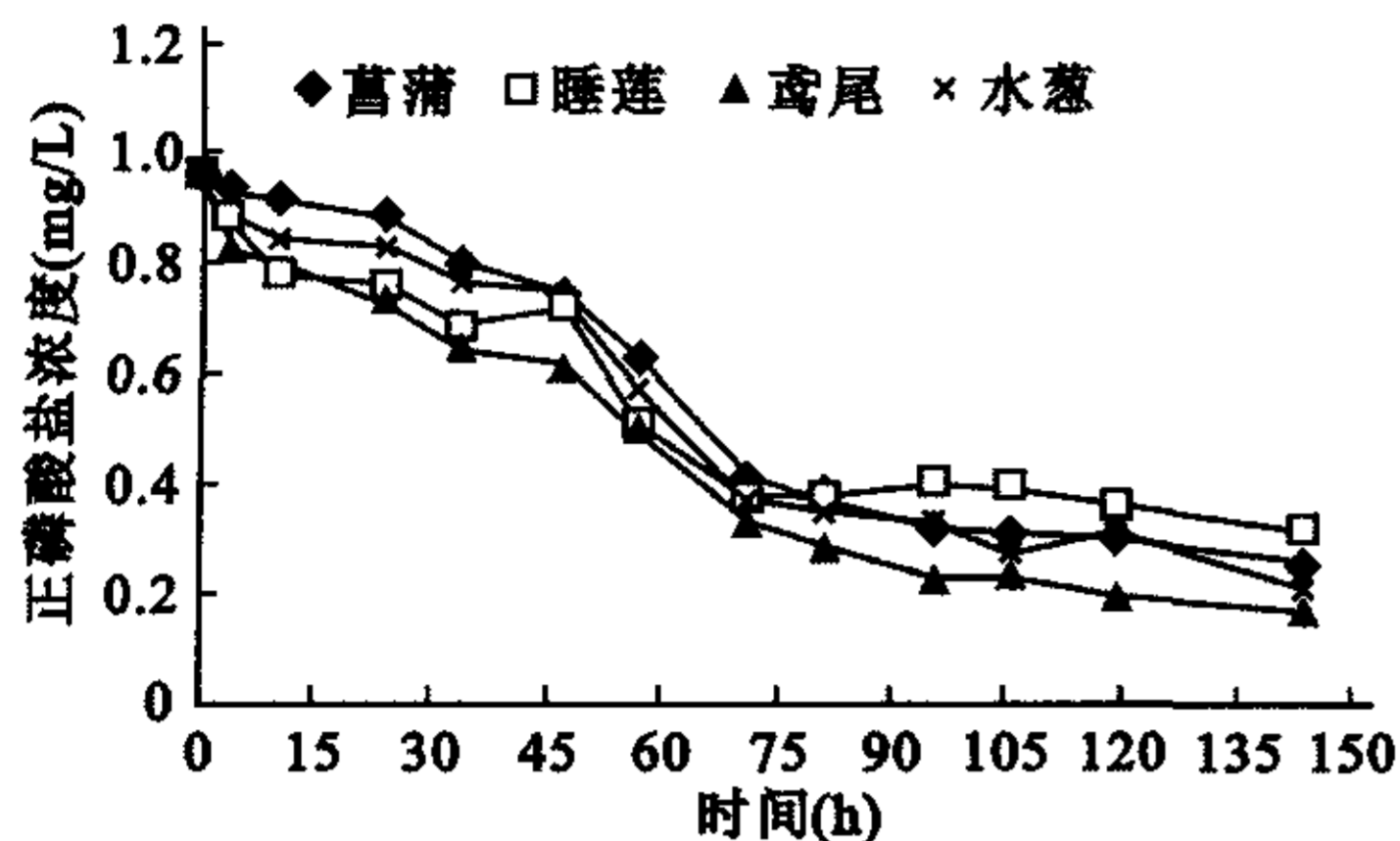


图1 四种水生植物系统去除正磷酸盐的趋势对比

Fig. 1 The contrast of orthophosphate removal between four macrophyte systems

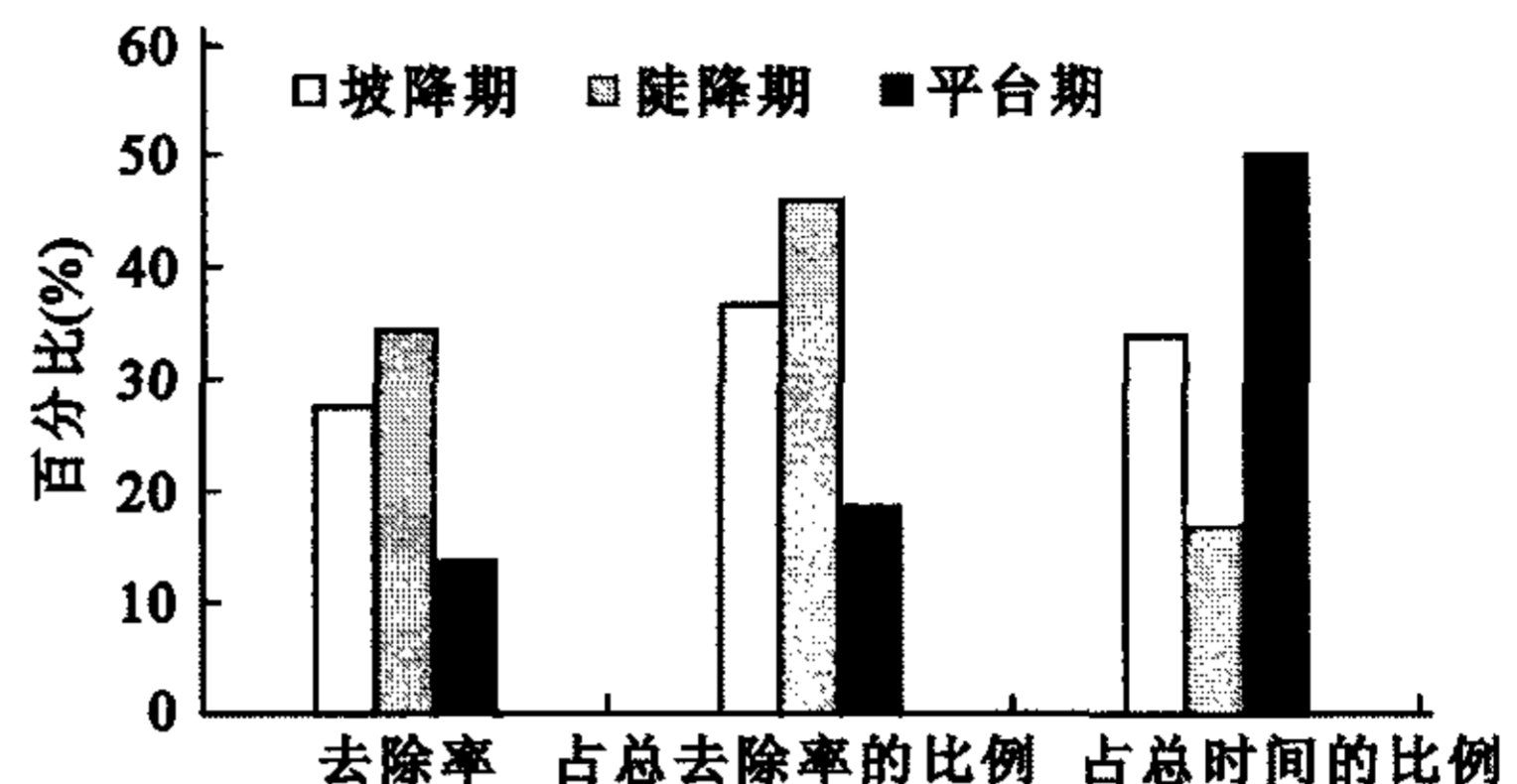


图2 不同阶段正磷酸盐的去除率及其所占比例

Fig. 2 The orthophosphate removal rate and proportion of different stages

如图1,在“缓降期”水体中溶解磷酸盐浓度逐渐下降;随后的“陡降期”中水体中磷酸盐浓度在短时期内显著降低;再随实验时间增加水体磷酸盐浓度变化进入“平台期”,磷酸盐浓度不再随实验时间的延长而显著变化.

由图2可知,在一周的实验期间内,模拟湿地系统平均的磷去除率约为75.6%;而在“缓降期”水体磷平均去除率为27.3%,而实验时间占总时间的33.3%;“陡降期”正磷酸盐去除率的45.7%,但是需要的时间却最短,只占总时间的16.7%;“平台期”在总实验时间的50%内,体系中的磷去出仅占总去出量的13.8%.

2.3 模拟湿地系统磷去出的作用机制分析

2.3.1 缓降期 在缓降期,主要发生絮凝、沉淀作用^[9-11],正磷酸盐吸附到颗粒表面,当颗粒絮凝成较大颗粒后克服自身重力而沉降.在这个阶段,菖蒲和水葱系统中正磷酸盐的下降趋势不如鸢尾和睡莲系统中明显,其主要原因是菖蒲和水葱系统中的水位较之睡莲系统中低,而水样采集的都是表层水,随着时间的延长,表层水和底层水的浓度会有一个梯度,睡莲系统中的水位高,所以表层和底层水的浓度梯度大,即在实验数据上显示出其浓度相对于浅水位的系统较低.而鸢尾系统中之所以下降趋势也比较快,是因为这个系统中有浮游生物的存在,当含磷溶液进入鸢尾系统后,一部分絮凝沉降,一部分被浮游生物所吸附、同化.

2.3.2 陡降期 在陡降期,水土界面上以正磷酸盐为主的可溶态磷一部分由于其浓度相对较高,所以在自身的浓度梯度下进入土壤界面;一部分直接吸附在土壤表面的颗粒上;还有一部分随水分作溶质迁移,进入土壤界面,在迁移的同时,不断转化为吸附态磷和各种沉淀态磷^[12],并且一部分可溶态磷在迁移过程中,在植物根区通过植物的吸收进入植物体内,然后经过同化作用变成植物的ATP、DNA及RNA等有机成分而得到去除.一部分吸附态磷由于本身带负电,所以很容易吸附在带正电的粘土颗粒上,进而与粘土颗粒表面水合 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 离子发生离子交换而被结合,并且能够与土壤中的硅酸盐发生置换而进入土壤颗粒的晶格当中,从而不再发生迁移.一部分和可溶态磷一起直接与间隙水中的 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 离子,水合物和氧化物等发生沉淀反应生成沉淀态磷,在土壤中随水分迁移.在本阶段,由于以正磷酸盐为主的可溶态磷的浓度相对较高,所以吸附态磷的生成量较大,从而在图1中表现出了较大的下降幅度.

2.3.3 平台期 在平台期,随着可溶态磷的在底泥表层土壤颗粒表面的吸附,以及进入土壤后吸附态磷的生成,可溶态磷的浓度逐渐降低,而在可溶态磷浓度较低的情况下,可溶态磷与土壤颗粒之间的吸附作用相对较弱,因此吸附态磷的生成量较少,此时土壤和表覆水之间的扩散交换作用达到了一个动态平衡.

从图1可知,在缓降期及陡降期睡莲去除磷的效果比较好,其下降幅度相对比较大,但是在进入平台期后,其去除磷的能力反而成为最弱的了.图3为三个月内间隔监测的四个模拟湿地系统中溶解氧的变化曲

线,从图中我们不难发现睡莲系统中的溶解氧相对较低,只有 2 mg/L 左右,而其他三种植物系统的溶解氧浓度在 8 mg/L 左右,其中鸢尾系统的溶解氧浓度相对较高,在 9 mg/L 左右,而鸢尾系统去除磷的能力在四个系统中最强,并且在平台期也保持着好的去除能力,这说明湿地系统中磷的去除与溶解氧的浓度有关. 湿地土壤一直被公认为是进入湿地系统的磷的最终归宿,并且在好氧环境会加强湿地土壤对磷的吸附、沉淀、蓄积稳定,而厌氧环境中,较低的溶解氧浓度不利于聚磷菌对磷的摄取,因此对睡莲系统对磷的去除也有一定的影响. 所以从溶解氧浓度的影响上可以解释为什么在平台期,睡莲系统中磷的平衡浓度相对比较高,而鸢尾系统中磷的平衡浓度相对较低.

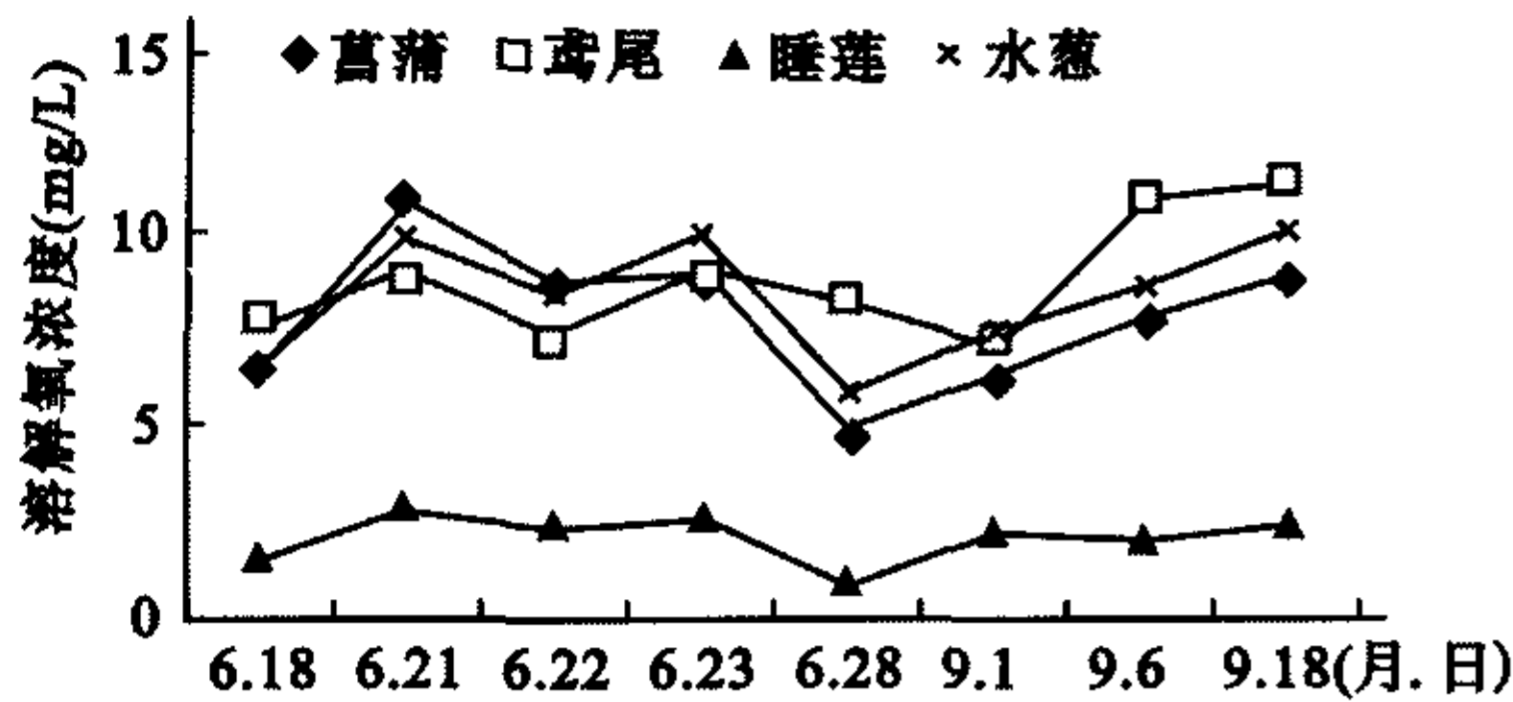


图3 四种植物系统中溶解氧变化对比

Fig. 3 The contrast of dissolved oxygen change in four macrophyte systems

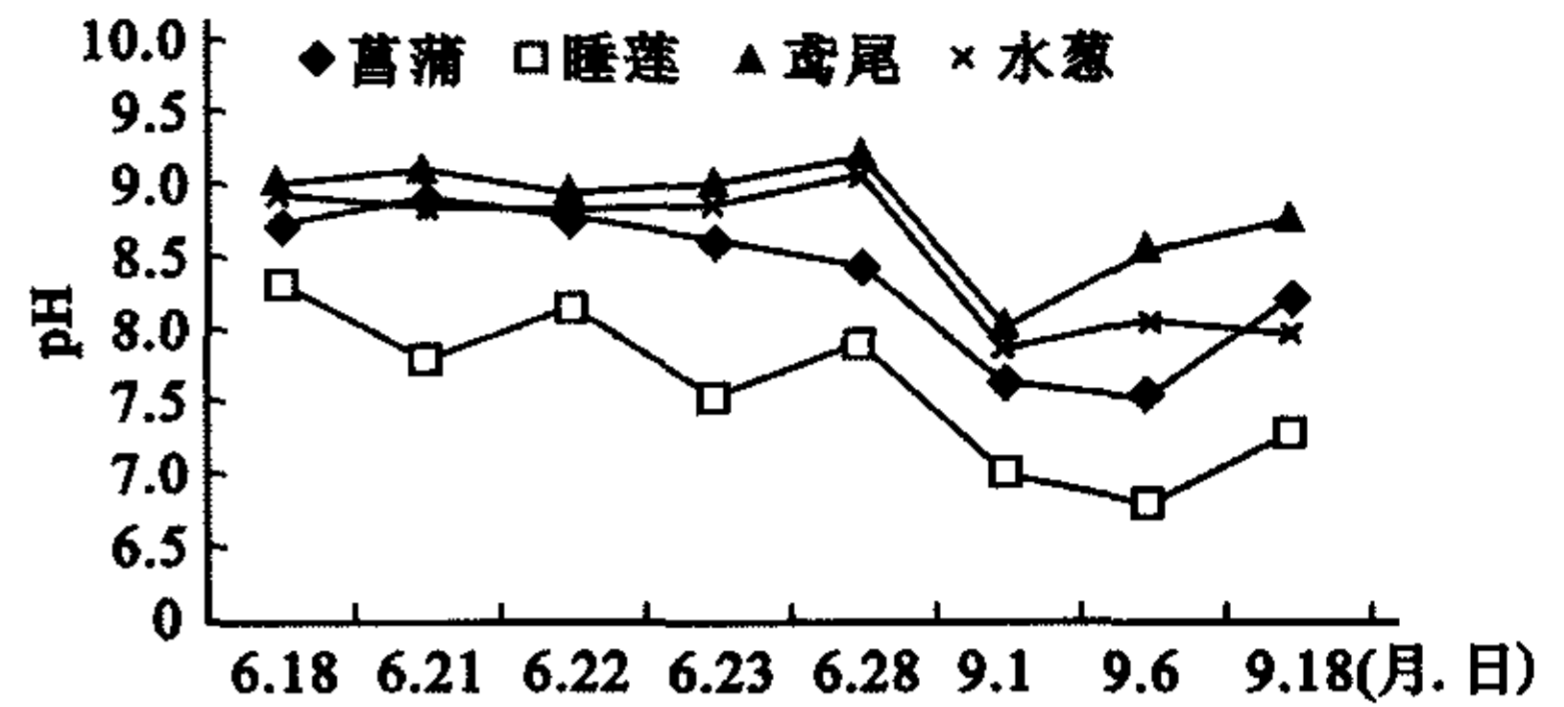


图4 四种植物系统中 pH 的变化对比

Fig. 4 The contrast of pH change in four macrophyte systems

污水中的磷酸盐(H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 、 PO_4^{3-})在土壤中发生专性吸附时,单、双键吸附完成后,产生一个 H_2O 分子和一个 OH^- 离子,可见整个反应取决于 pH 值,所以 pH 值的降低有利于磷的强化固定作用^[13]. 图4为三个月内间隔监测的四个模拟湿地系统中 pH 值的变化曲线,从图中可知,鸢尾系统中 pH 值较高,而睡莲系统中 pH 值较低. 虽然鸢尾系统中的 pH 值较高,不利于磷的去除,但是除磷效果却比较好,这说明一方面好的去除效果与较高浓度的溶解氧有关,另一方面也与鸢尾的生物量相对较大有关,因为四个植物系统中鸢尾是生长的最为旺盛的. 同时,睡莲系统中虽然溶解氧浓度较低,不利于磷的去除,但是其对磷的去除效果和菖蒲、花叶水葱系统差不多,这与其 pH 值较低也有一定的关系.

2.4 水力停留时间与磷的去除关系

水力停留时间作为湿地污水处理系统设计参数之一,有着十分重要的意义,因为停留时间的长短直接影响到污水的净化效果. 如果停留时间过短,则起不到好的去除效果,出水水质不达标;如果停留时间过长,一方面,随着时间的延长,污染物质被植物吸收、微生物降解或者底泥吸附,从而增加去除量;另一方面,过长的停留时间只能成为一种浪费,因为当污染物的浓度下降到一定程度后就会达到一个动态平衡,去除效果变得不明白了. 甚至,湿地系统也可能由污染物的“汇”变为“源”,吸收的污染物质重新释放,去除效果反而下降;

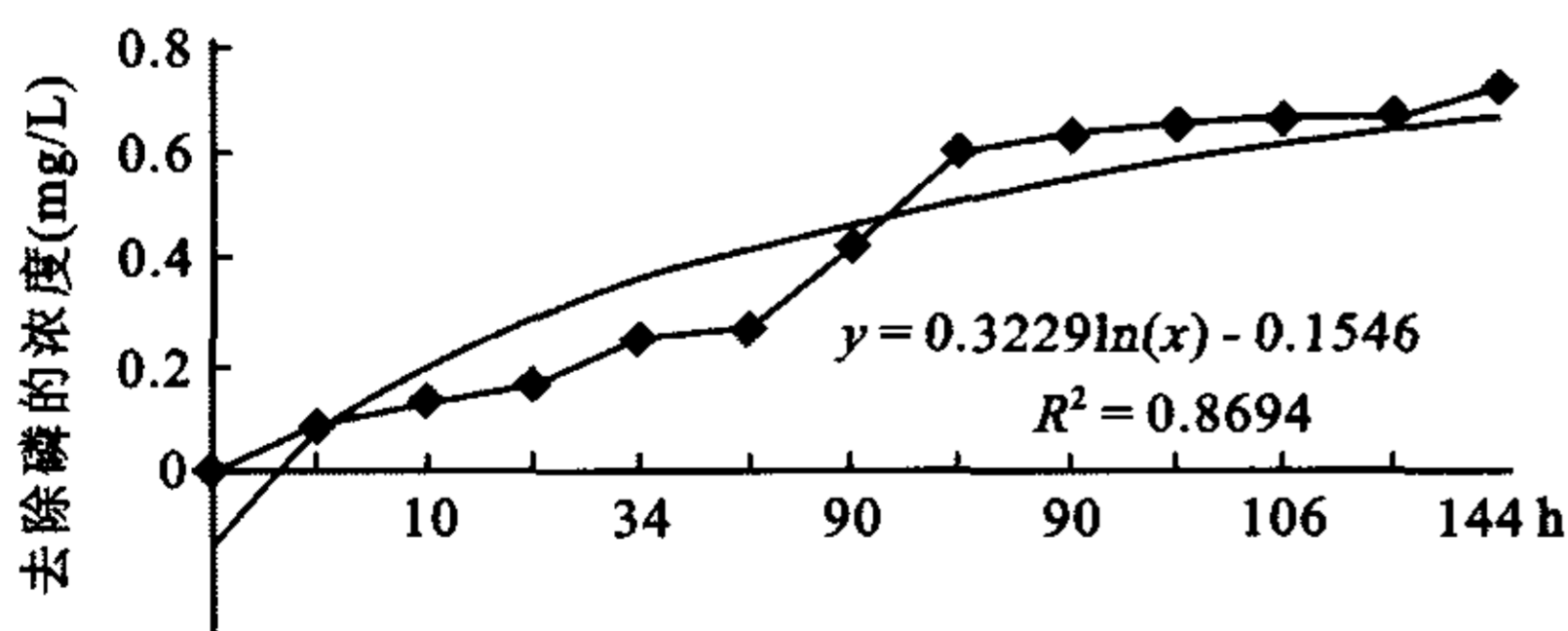


图5 水力停留时间与磷去除效果的关系

Fig. 5 Relationships between hydraulic residence time and orthophosphate removal.

本实验的结果表明,当磷负荷在 0.968 mg/L,水力停留时间为 2-3 d 左右时,湿地系统发生大量的絮凝、沉降作用以及植物吸收、土壤吸附作用,正磷酸盐的浓度在短时间内迅速下降,去除率能够达到 70% 左右. 当停留时间延长时,正磷酸盐的浓度下降缓慢,并且趋于平衡. 同时,一些学者的研究也表明:2-3 d 的水力停留时间能够保证客观的反硝化作用^[14]. 在 2-3 d 停留时间的基础上延长一两天可以一定程度上增加污染物的去除效果,但是,通过实际实验观测,当停留时间延长时,挺水植物,尤其是本实验中的鸢尾系统中容易滋生藻类.

所以,兼顾考虑其他因素,利用湿地污水处理系统的水力停留时间以 3-5 d 为宜. 由图 5 可知,正磷酸盐的去除效果和水力停留时间两者有着较好的相关性,这与 Gearheart 的研究结果基本相

同^[14],不同之处在于,Gearheart只是简单地得出了两者的线性关系,而本实验基于实验数据给出了两者的对数相关性,其对数方程为: $y = 0.3229 \ln(x) - 0.1546$,并且 $R^2 = 0.8694$,可见两者之间有着较好的相关性.事实上,结合目前的研究现状,两者之间的对数相关性比线性相关性更合理一些.

3 结论

(1) 本次实验得出了正磷酸盐浓度下降的三阶段模型,直观反应了磷的去除主要发生在坡降期和陡降期;而在平台期,降解缓慢,所以在以后的工程设计中,可以采取一定的工程措施充分利用前两个阶段,减少利用后一个阶段.

(2) 由于溶解氧和pH值对于磷的去除有一定的影响,所以对于不同酸碱性和溶解氧含量的水体净化时也要采取不同的方法,并且也可以采取一定的工程措施人为的调节溶解氧和pH值.

(3) 通过实验可以得出,当高负荷的含磷污水进入湿地系统后,经过一定时间磷浓度逐渐达到平衡,如果继续延长水力停留时间并不能增加磷负荷的去除,因此,水力停留时间的提出为以后工程的设计给出了参考.

4 参考文献

- [1] 崔保山,刘兴土. 湿地生态系统设计的一些基本问题探讨. 应用生态学报,2001,12(1):145-150.
- [2] 吴振斌,陈辉蓉,贺 锋等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果. 水生生物学报,2001,25(1):28-35.
- [3] 袁东海,任全进,高士祥等. 几种湿地植物净化生活污水COD、总氮效果比较. 应用生态学报,2004,15(12):2337-2341.
- [4] 张笑一,史 莉,彭润芝等. 地沟式污水土地处理和人工湿地中植物对磷去除的效果研究. 农业环境科学学报,2004,23(1):151-153.
- [5] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002:243-248.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社,2000:90-97.
- [7] Lindsay W L, Vlek P L G, Chen S H. Phosphate minerals. In: Dixon J B, Weed S B. Minerals in soil environments(2nd edition). Madison, Wis. Soil Sci Soc Am J, 1989:1089-1130.
- [8] Axt J R, Walbridge M R. Phosphate removal capacity of palustrine forested wetlands and adjacent uplands in Virginia. Soil Sci Soc Am J, 1999, 63:1019-1031.
- [9] 张 军,周 琦,何 蓉. 表面流人工湿地中氮磷的去除机理. 生态环境,2004,13(1):98-101.
- [10] 彭进平,逢 勇,李一平等. 水动力条件对湖泊水体磷素质量浓度的影响. 生态环境,2003,12(4):388-392.
- [11] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E et al. Phosphorus retention in streams and wetland: a review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1999, 29(1):83-146.
- [12] 王亚男,王红旗,舒 艳. 含磷污水淋滤条件下土壤中磷迁移转化模拟实验. 环境科学学报,2001,21(6):737-741.
- [13] 蔡满成,杨 颖. 污水人工土壤植物床处理. 给水排水,2002,28(9):13-19.
- [14] 华 涛,周启星,贾宏宇. 人工湿地污水处理工艺设计关键及生态学问题. 应用生态学报,2004,15(7):1298-2393.