

潜流构造湿地去除农田排水中磷的效果

张荣社¹, 周琪^{1*}, 史云鹏¹, 张相锋² (1. 同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092, E-mail: zhrs555@sina.com; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 对潜流构造湿地处理农业面源污水的除磷效果进行了中试研究. 结果表明, 潜流湿地除磷效果在名义水力停留时间(即空床水力停留时间)小于 5 d 时, 除磷效果随水力停留时间的增加而增加, 通过间歇式和连续流试验均证明过长的水力停留时间会引起 pH 值的明显下降, 导致磷的析出或溶解, 降低除磷效率. 芦苇(*Phragmites communis*)和茭草(*Zizania caduciflora*)吸收磷量约占去除磷量的 15.8% 和 9.5%. 温度对除磷效果影响较为明显, 冬季除磷效率较夏季下降 30%.

关键词: 潜流湿地; 农业面源污染; 除磷

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)04-04-0105

Phosphorus Removal of Agriculture Wastewater Through Subsurface Constructed Wetland

Zhang Rongshe¹, Zhou Qi¹, Shi Yunpeng¹, Zhang Xiangfeng² (1. Pollution Control and Resource Reuse Lab, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China E-mail: zhrs555@sina.com; 2. Dept. of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Phosphorus removal in subsurface constructed wetland treating agriculture nonpoint wastewater was studied in pilot-scale. The experimental results showed that the removal rates of TP increased with HRT increasing when the nominal hydraulic retention time was less than 5 days. The pH decreased distinctly when the retention time was too longer in the batch and sequence style, it may bring on a lower removal rate of TP. The amount of TP that can be removed by harvesting were about 15.8% and 9.5% compared to the total quantity of removing in *Phragmites communis* and *Zizania caduciflora* constructed system respectively. Temperature impacted on the removal of TP, the removal rate of TP decreased 30% in the winter compared to summer.

Keywords: subsurface constructed wetland; agriculture nonpoint pollution; phosphorus removal

研究证明, 磷是引起湖泊水体富营养化的限制性因子, 有效地控制入湖水源中磷的含量, 对于控制水体富营养化和延缓湖泊衰老具有重要意义^[1,2]. 近年来, 随着城市点源污染的有效治理, 大面积农业非点源污染已经引起人们的普遍关注, 我国农业生产中大量的磷肥用于增产增效, 土壤贫瘠, 导致土壤固磷能力下降, 大量磷肥和土壤有效磷随暴雨径流和农业排灌进入地表水体. 调查显示, 农业面源所产生的污染已经远远超过城市点源产生的污染量^[3,4]. 但是对于面源污染的控制采用点源的方法显然由于其运行与管理问题而无法实施, 必须采用生态方法进行面源污染治理, 在此基础上, 天然和人工湿地就成为一种有效地控制农业面源污染的

方法^[5~7]. 本文在中试规模上重点研究和分析了潜流砾石湿地除磷效果及其影响因素, 为潜流湿地系统的设计提供参考依据.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置和方法

中试试验系统建在云南省呈贡县大渔乡一片天然湿地中, 共 3 条砾石潜流湿地床, 1 号为无植物对照床, 2 号为芦苇床, 3 号为茭草床, 所选芦苇和茭草为天然湿地中的优势植物, 床体

基金项目: 国家科技部“十五”科技专项资助项目(项目编号: k99-05-35-02)

作者简介: 张荣社(1971~), 男, 博士研究生, 武汉科技大学讲师, 主要研究方向为水污染控制.

收稿日期: 2002-05-22; 修订日期: 2003-01-15

* 联系人

采用聚乙烯膜作底部防渗处理,长 10 m,宽 1.5 m,深 0.6 m,底部填 0.4 m 直径为 3~5 cm 的破碎砾石,上铺 0.2 m 当地土壤.前后各有 0.5 m 的进出水区,采用顶部穿孔管进水和底部穿孔管出水,控制水位 0.4 m.试验系统建成后,植物恢复和系统稳定 2 个月后,开始进行间歇运行除磷效果试验 1 个月,然后进行 2 个月的连续进水,待系统稳定后,开始进行连续流试验,共考察了空床水力停留时间(砾石的空隙率 0.45)为 1 d、3 d、5 d、7 d 时潜流湿地对磷的去除效果,试验共进行 3 个多月.入水总磷分高低浓度 2 个阶段进行.

1.2 检测分析方法

总磷采用钼锑抗分光光度比色法,植物全磷采用钼锑抗分光光度比色法.

2 试验结果与分析

2.1 潜流湿地除磷效率

试验考察了间歇式和连续流 2 种方式运行情况下潜流湿地的除磷效果.

2.1.1 间歇式试验

间歇式试验采用序批式进水方式,一次进水后,在不同停留时间或称为反应时间时取水样分析其总磷浓度的变化,不同停留时间下总磷的浓度变化如图 1.

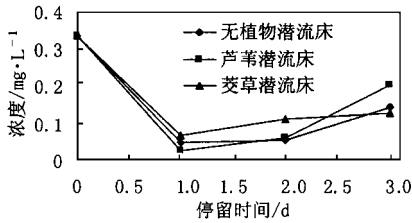


图 1 间歇式反应总磷浓度变化

Fig.1 TP concentration change in batch style

从图 1 可以看出,入水总磷在停留 1 d 时,浓度急剧下降,去除率较高.停留时间 2 d 和 3 d 时,总磷浓度渐渐升高,说明反应后期磷有析出现象.同时说明,过长的水力停留时间对于除磷产生负面影响.

2.1.2 连续流试验

连续流试验分为 2 个阶段进行,第 1 阶段

入水总磷浓度较低,直接采用农田排灌水,试验空床水力停留时间(砾石空隙率为 0.45)为 7 d 和 5 d.第 2 阶段入水配一定 KH_2PO_4 ,浓度较高,空床水力停留时间分别 3 d 和 1 d.2 个阶段的进出水浓度变化见图 2 和图 3.

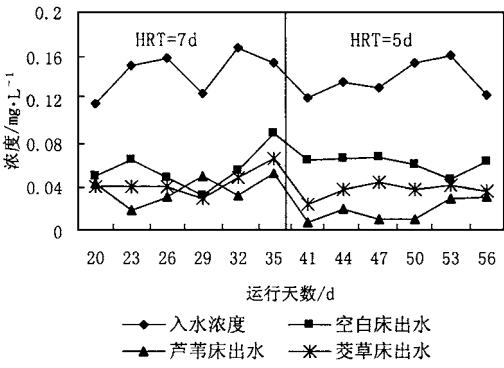


图 2 低浓度总磷进出水浓度变化

Fig.2 Influent vs effluent in low TP concentration

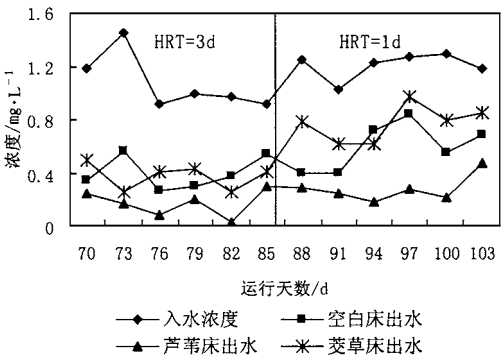


图 3 高浓度总磷进出水浓度变化

Fig.3 Influent vs effluent in high TP concentration

从图 2、图 3 可以看出,2 个阶段的试验入水有一定的波动,出水相对稳定,砾石潜流湿地无论对低浓度还是高浓度入水均有较好的处理效果.其中芦苇湿地出水总磷浓度最低,除磷能力要好于茭草湿地,植物湿地除磷效果明显优于无植物空白床,说明植物能够改善湿地除磷效果.对 4 个停留时间下,总磷进出水浓度进行平均后计算去除效率,结果见表 1.

从磷的去除率看,水力停留时间小于 5 d 时,磷的去除率随停留时间延长而增加,大于 5 d,除空白对照床除磷效率略有增加外,芦苇和

茭草床除磷效率均有不同程度地下降,这与间歇式试验结果基本相符,说明潜流湿地除磷有一个最佳水力停留时间,过长的水力停留时间不利于磷的去除.

表 1 不同停留时间总磷去除率

Table 1 TP removal tare in different HRT

床 型	HRT = 7 d		HRT = 5 d		HRT = 3 d		HRT = 1 d	
	出水浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	去除率 / %	出水浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	去除率 / %	出水浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	去除率 / %	出水浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	去除率 / %
空白床	0.057	61.03	0.061	55.57	0.40	62.35	0.60	50.04
芦苇床	0.038	73.71	0.019	86.57	0.17	83.77	0.28	76.47
茭草床	0.044	69.80	0.037	73.02	0.38	64.45	0.77	35.70

2.2 潜流湿地除磷影响因素

湿地系统中除磷的主要机理包括吸附、沉淀、植物吸收和络合.主要影响因素有 pH、温度和植物的种类^[8].

2.2.1 pH 值的影响

人工湿地中沉淀和吸附是磷的主要去除机理,其决定因素是吸附位点的数量和 pH 值^[7].pH 值不仅影响填料的吸附特性,而且也决定沉淀物的生成.在酸性条件下,无机磷被吸附在铁和铝的水合氧化物上,并可能生成铁盐和铝盐沉淀.碱性条件下,磷以不溶性钙盐沉淀是其主要转化过程.矿物吸附磷大于有机土壤对磷的吸附^[9].因此水质的酸碱度变化对磷的去除有较大的影响.

试验系统填料均为砾石填料,富含钙离子.入水 pH 值 8.5~9.0,这些均有利于磷的吸附沉淀.间歇性试验中,水力停留时间 3 d 后 pH 值减小到 6.5~7.0 左右,这说明在停留时间较短时,入水的碱性条件使得磷在砾石表面较快地吸附沉淀,随着停留时间的延长,pH 值逐渐降低,部分吸附或沉淀的磷发生解析或溶解,导致停留时间 2 d、3 d 时,水中磷的浓度逐渐升高(见图 1).

连续性试验因试验周期较长,每一停留时间出水 pH 值均有一定变化,以空床水力停留时间 7 d 为例,在空白床和芦苇床中进行沿程取样测定沿程 pH 值的变化,结果见图 4.

水流在潜流湿地中基本按推流式前进,试验床的长宽比为 6:7,因此沿程距离的变化实际反应了不同的水力停留时间,图 4 即显示了随着停留时间延长,出水的 pH 值逐渐减小.当

pH 值减小到一定程度,就不利于磷的吸附沉淀发生,甚至导致部分已经吸附或沉淀的磷溶出,从而减小磷的去除效率,可以解释名义水力停留时间为 7 d 时,除磷效率还有所下降,除非 pH 值转变为酸性,磷重新生成铁盐和铝盐沉淀.但是,在水力停留时间不长,pH 值变化不至于严重影响磷的沉淀过程时,随着反应停留时间的延长,吸附沉淀过程进行的越完全,去除率也就越高.这一点在表 1 中反映得较明显,即名义水力停留时间小于 5 d 时,除磷效率逐渐增加.

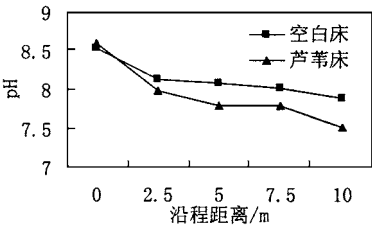


图 4 潜流湿地沿程 pH 值变化

Fig.4 pH in different length of C W

水中 pH 值的变化与植物的作用和氮的去除有关,植物充氧导致根区周围溶解氧水平升高,进而导致碳酸根浓度的降低和 pH 值的升高,有利于磷的去除.另外,植物根区大量的微生物活动也会导致水中 pH 值的变化.氮的去除主要由硝化和反硝化作用导致 pH 值的变化,进而影响磷的去除.

2.2.2 植物的影响

无机磷也是湿地植物必需的养分,废水中无机磷在植物吸收及同化作用下可变成植物的 ATP、DNA 及 RNA 等有机成分,通过植物的收割而去除.植物通过根部吸收磷运送到其它组织,但不是所有形式的无机磷均能被植物吸收,

为了从湿地中去除磷,植物定期收割是必需的^[9,10],一般通过植物吸收去除的磷仅有湿地去除的总磷的一小部分.在连续流试验前后对植物的全磷含量进行了分析和植物生长量的监测,根据试验前后植物的生长量、含水率和干物质全磷含量,可以计算出植物对磷的吸收量.同时根据进出水浓度和流量值可以计算出系统的去除总量.结果表明,在试验阶段内芦苇吸收的磷量约占去除磷量的15.8%,茭草吸收量约占去除量的9.5%,同时分析了试验前中后期湿地上层土壤中磷含量的变化,结果表明土壤磷含量基本不变,说明植物吸收的磷主要来源于水中,证明依靠植物吸收除磷量是不显著的.对表1的数据分析表明,芦苇床和茭草床除磷效率平均高出空白床的23%和3%,这说明植物除吸收磷外,还可以通过其它途径改善除磷效果,例如植物对水中pH值的改变和根系生长对流态的改变等.

2.2.3 温度的影响

温度是影响除磷效果的另一因素,温度除影响吸附沉淀反应速率外,对植物的生长影响较大,因为随着温度的降低,往往伴随着植物的衰老,如果植物不及时收割,植物吸收的磷会缓慢释入水中,影响磷的去除效率^[10].为证明温度对除磷效果的影响,在冬季对水力停留时间为5d时的除磷效果进行了考察,空白床、芦苇床和茭草床除磷效率分别为22.7%、41.6%和37.5%,试验时平均气温为10℃.与连续流试验水力停留时间5d(见表1)时相比较,平均气温为18℃,除磷效果明显下降.说明温度对磷的去除影响较大,这主要表现在温度对化学反应速度和植物生长的影响.

3 结论

(1)潜流湿地具有较强的除磷能力,设计水力负荷建议在空床水力停留时间5d较为合适,

较长的水力停留时间不会增加磷的去除率,反而部分吸附或沉淀的磷会释放出来降低磷的去除效率.

(2)植物对磷吸收量仅占去除量的一小部分,芦苇和茭草吸收磷量约占去除磷量的15.8%和9.5%,但植物对磷的去除效果有明显地改善作用.

(3)温度和pH是影响除磷效果的主要因素,停留时间5d时,冬季除磷效果较夏季降低30%以上.引起系统pH值变化因素较多,过长的水力停留时间会导致系统pH值的降低,会导致磷的析出或溶解,降低磷的去除效果.

参考文献:

- 1 高振民,李宪法等.城市污水土地处理利用设计手册.北京:中国标准出版社,1991.
- 2 Andrea S Brooks. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate. *Ecological Engineering*, 2000, 15:121~132.
- 3 汤承彬,施甘霖.滇池水源地农田径流污染控制工程研究. *云南环境科学*, 1997, 2:3~9.
- 4 Alabama Department of Public Health. Rules of the State Bpard of Health Bureau of Environmental and Health Service Standards Division of community Environmental Protection. Amend, 1992, 420(3-1).
- 5 张荣社等.潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究. *环境科学*, 2003, 24(1):113~116.
- 6 KAO M, WU M J. Control of Non-point Source Pollution by a Nature Wetland. *Wat. Res.*, 1999, 20(3):47~54.
- 7 Pant H K, Reddy K R, Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2001, 17:345~355.
- 8 Andrew Wood. Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. *Wat. Sci. Tech.*, 1995, 32(3):21~29.
- 9 Vymazal J, H Brix, P F Cooper, R Haberl, R Perfler, J Laber. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. Leiden:Backhuys Publishers, 1998. 17~66.
- 10 Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 1994, 29:71~78.