

潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究

张荣社¹, 李广贺¹, 周琪², 张旭¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:通过潜流湿地的中试,研究了芦苇和茭草在潜流湿地中的氮磷吸收量变化,植物收割对系统的影响以及植物对改善系统流态的作用.结果表明,依靠收割植物去除氮磷是不显著的,氮磷吸收量占去除量在 5% 左右.同时证明植物在进入冬季前开始出现释放氮磷现象,最佳收割期应该在 9~10 月份.植物对维持根系周围微生态环境起着重要的作用,收割会导致系统出水水质的波动.流态试验表明,植物根系能够改善系统的流态,植物床较空白床死区率减少 5%~10%,增加系统的空间利用率,延长系统的水力停留时间.

关键词:潜流湿地;氮/磷;芦苇;茭草;滇池面源污染

中图分类号:X171.4;Q948 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)04-0083-04

Effects of Plants on Nitrogen/Phosphorus Removal in Subsurface Constructed Wetlands

ZHANG Rong-she¹, LI Guang-he¹, ZHOU Qi², Zhang Xu¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Effects of plants on nitrogen/phosphorus removal was studied in pilot-scale in subsurface constructed wetland, the main contents included nutrient uptake, effects of harvesting and roots on hydraulic condition. The result show that the amounts of nitrogen and phosphorous removed by plant harvesting is about 5% of the total removed nutrients in SFS wetlands. The best harvesting periods is between 9~10 month every year. Plant harvesting may induce fluctuation of outflow; aboveground biomass can stabilize micro-environment of roots. The roots can also improve hydraulic condition of SFS system, decreasing dead area 5%~10% and extending hydraulic retention time.

Key words: subsurface constructed wetland; nitrogen/phosphorus; reeds; *Zizania caduciflora*; Dianchi; non-point pollution

植物在潜流人工湿地(SFS)中起着非常重要的作用,植物可以防止表面侵蚀,改善水流渗滤条件和提供微生物附着表面积,同时植物的新陈代谢可以吸收水中营养物,释放氧气和分泌抗菌剂等从而影响水处理过程.另外,植物还有一些特殊的作用,如为野生动物提供栖息地和增加水处理系统的美学价值等^[1,2].从净化污水角度而言,植物的作用可以归纳为 3 个重要的方面^[3]:①直接吸收利用污水中可利用的营养物质,吸附和富集重金属及其它有毒有害物质;②植物根系巨大表面积会附着大量微生物,根际会创造利于各种微生物生长的微环境,所以植物系统应该较无植物系统具有更大的微生物量,通过微生物增加污染物的去除;③增强和维持介质的水力传输,根系的生长有利于均匀布水,延长系统实际水力停留时间^[4,5].本文通过现场中试分别从 3 个方面分析了植物对潜流人工湿地脱氮除磷效果的影响,为人工湿地的进一步研究和设计提供参考.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

中试试验系统建在云南省呈贡县大渔乡一片天然湿地中,于 2001 年 3 月建成,共 3 条砾石潜流湿地床,分别为为无植物空白对照床、芦苇床和茭草床,所选芦苇和茭草为当地天然湿地中的优势植物.床体采用加厚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.试验系统剖面示意图 1.

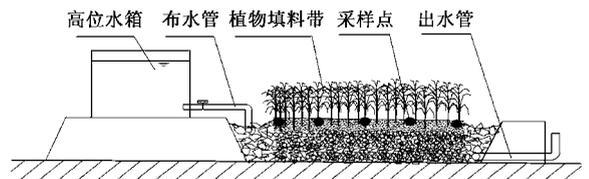


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Pilot experiment system profile chart

收稿日期:2004-10-20;修订日期:2005-01-17

基金项目:国家科技部“十五”科技专项资助(k99-05-35-02)

作者简介:张荣社(1971~),男,博士,主要从事环境工程人工湿地方面的研究.

1.2 监测分析方法

水质指标和植物营养物指标均按照标准测试方法进行。

2 结果与讨论

2.1 植物对氮磷吸收作用

植物氮磷吸收量试验仅仅考虑植物地上部分氮磷的吸收量。植物样品从试验床中选择 5 个点取样,混合后测定其营养物含量,代表整个床内植物的营养物水平,每次取样均在预先选定的 5 个点附近(见

图 1),现场进行称湿重和植物高度的测量。通过植物的湿重、含水率和全氮全磷含量即可计算植物的氮磷吸收量。本试验分别在 2001 年和 2002 年进行,同时为考察收割次数对营养吸收的影响,在 2002 年 7 月和 9 月对芦苇进行了 2 次收割试验,为比较试验床芦苇和野生芦苇氮磷吸收量的差别,在 2002 年 9 月对另外一条运行的芦苇潜流湿地芦苇和野生芦苇的氮磷含量进行了比较,野生芦苇来自试验地周边,试验芦苇种取自该野生地,因此 2 种芦苇属同一种属。不同时期植物生长状况和氮磷吸收量结果见表 1。

表 1 植物地上部分氮磷吸收量

Table 1 Nitrogen and phosphorus removal by plant harvesting

植物	日期	全氮含量/ %	全磷含量/ %	植物高度/ m	含水率/ %	单位面积氮吸收量/ $g \cdot m^{-2}$	单位面积磷吸收量/ $g \cdot m^{-2}$
芦苇	2001-08-09	1.138	0.187	1.56	0.678	8.234	1.353
	2001-08-29	1.838	0.198	1.75	0.636	16.877	1.818
	2001-09-18	1.631	0.182	1.95	0.562	20.086	2.241
	2001-10-08	2.056	0.193	2.30	0.510	33.411	3.136
	2001-10-25	2.015	0.189	2.50	0.494	36.748	3.447
	2001-11-10	1.825	0.18	2.50	0.483	33.994	3.353
	2002-07-05	1.387	0.197	2.90	0.664	44.102	6.264
	2002-09-04	1.307	0.203	2.07	0.690	12.928	2.008
	2002-09 试验芦苇	1.288	0.164	3.05	0.614	40.296	5.128
	2002-09 野生芦苇	1.291	0.172	2.98	0.651	31.159	4.151
茭草	2001-08-09	1.483	0.181	0.96	0.790	4.164	0.508
	2001-08-29	1.684	0.190	1.20	0.750	7.044	0.795
	2001-09-18	1.914	0.186	1.45	0.710	11.207	1.089
	2001-10-08	1.676	0.186	1.75	0.681	13.017	1.445
	2001-10-25	1.647	0.190	1.85	0.689	13.204	1.523
	2001-11-10	1.651	0.183	1.84	0.654	14.703	1.630

表 1 的试验监测结果显示,芦苇全氮全磷百分含量在 2001 年 10 月 25 日以后开始呈下降趋势,高度已基本停止增长,含水率下降,植株氮磷吸收量已经开始降低,说明在 10 月底芦苇已经开始出现氮磷释放现象。表观现象显示,芦苇在 10 月初开始进入花季,10 月 20 日左右开花结束并开始出现枯萎死亡显现。因此,从去除污染角度讲,芦苇的最佳收割季节应该在 10 月底以前进行。茭草的氮磷百分含量在 9 月 18 日后开始降低,含水率下降,高度仍然增加,总的生产率增加,但增加幅度较小,因此判断,茭草在 9 月底开始氮磷释放现象,其收获季节建议在 10 月初进行。

从氮磷吸收量看,芦苇最佳收获季节的氮磷吸收量分别为 $36.75 g/m^2$ 和 $3.45 g/m^2$,按年收割 1 次计算,平均每天氮磷吸收量为 $100.70 mg/(d \cdot m^2)$ 和 $9.45 mg/(d \cdot m^2)$ 。根据对该试验系统 1a 的氮磷去除效果检测表明,芦苇床氮磷平均去除率为 2 007

$mg/(d \cdot m^2)$ 和 $208.3 mg/(d \cdot m^2)$,可以计算出依靠收割芦苇去除的氮磷量占 5.1 % 和 4.5 %。茭草最佳收获时氮磷吸收量分别为 $14.7 g/m^2$ 和 $1.63 g/m^2$,平均每天氮磷吸收量为 $14.27 mg/(d \cdot m^2)$ 和 $4.66 mg/(d \cdot m^2)$,同时检测的茭草床氮磷去除率为 $1593 mg/(d \cdot m^2)$ 和 $180.02 mg/(d \cdot m^2)$,那么收割茭草去除氮磷量仅占去除量的 1 % 和 2.6 %。综上所述,依靠植物吸收去除的氮磷是非常少的,这与许多资料报道的植物吸收量比例基本相符,建议不用收割湿地植物。芦苇床在 2002-07 和 2002-09 进行了 2 次收割,2 次收割共去除 $N 156.2 mg/(d \cdot m^2)$,去除 $P 22.65 mg/(d \cdot m^2)$,占全年氮磷去除率的约 8 % 和 11 %,说明收割 2 次植物增加了植物氮磷的吸收量。但是氮磷吸收总量仍然太小,而且 2 次收割对系统整体脱氮效率并没太大贡献,同时在短时期会引起系统出水水质的不稳定。

通过在 2002-09 同时对试验床中芦苇和野生芦

苇营养分析表明,2种芦苇氮磷含量差别不大,但是试验床中的芦苇生长量和生长高度均大于野生芦苇,氮磷吸收量也高于野生芦苇,说明芦苇在受污染环境能够增加一定的产量和氮磷吸收量,非常适合作为人工湿地中的植物。

2.2 植物收割对脱氮除磷效果的影响

植物收割对系统的影响试验目的是为考察植物收割前后系统脱氮除磷效果的变化,通过植物收割前后系统各污染物去除率变化定性反应植物对系统的影响。

该试验于2002-07在芦苇床中进行,水力停留时间为2.25d(HLR:18cm),入水总氮23.5~26.0mg/L、硝氮13.3~15.3mg/L、氨氮10.4~11.0mg/L、COD100~140mg/L。系统先稳定运行7d后开始测试3次,然后收割植物后继续运行3d,再测试其污染物去除效率。该试验主要考察植物地上部分的变化对根系微生物的影响,进而说明植物在维持系统稳定性方面的作用。收割前后各种污染物去除效率变化见图2。

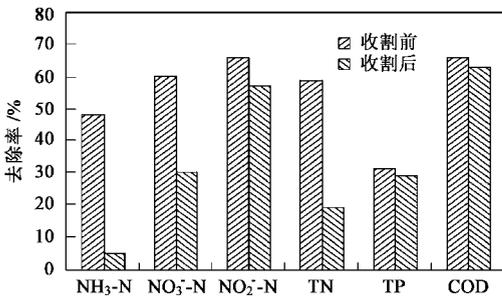


图2 植物收获对系统的影响

Fig. 2 Effect of plant harvesting on system

收割后的污染物去除率明显不如收割前,植物收割对氨氮去除率影响最为明显,下降42%,氨氮在潜流湿地主要通过硝化作用去除,硝化所需氧量主要来自水中溶解氧和植物的根区传氧^[6],植物收割后,氧的传输量迅速减少,导致氨氮去除率显著下降,这也从另一方面证实植物的传氧作用。总氮、硝氮和亚硝氮去除率分别下降38%、25%和12%,硝氮去除率的降低说明反硝化速率降低,说明植物收割后传氧速率降低创造更好的厌氧环境并没有增加硝氮的去除率,可以认为植物收割对系统尤其是植物根区微生物的活性影响较大,同时也减少了反硝化所需碳源的释放,进而降低了系统脱氮效率。植物收割前后对除磷效果影响较小,下降3%,说明植物变化对除磷作用影响较小,进而说明植物吸收和根

系微生物同化作用对除磷作用不大,磷主要依靠填料的作用去除,本试验在砾石填料床中进行,有利于磷的去除。植物收割对COD去除率基本没有影响,仅下降2%。说明植物对有机物的去除影响较小。

2.3 植物对流态影响

植物对流态的影响试验主要研究系统实际HRT和理论HRT的差别,同时对比植物床和无植物床的流态分布特征,考察植物根系对系统流态的影响。试验采用脉冲式示踪法,以NaCl为示踪剂,入水在床体内达到稳定流动后,于某一瞬间加入一定量的示踪物料,然后分析出口处示踪物料浓度随时间的变化,即得到停留时间分布密度函数 $E(t)$ 。以 $E(t)-t$ 作图,即可得到停留时间分布密度的曲线,根据得到的停留时间分布(Residence Time Distribution, RTD)曲线,可以计算反应器的平均停留时间^[7]:

$$t = \frac{\sum t_i E_i(t_i) \Delta t_i}{\sum E_i(t_i) \Delta t_i} \quad (1)$$

通过平均停留时间和理论计算停留时间以及分布密度的曲线可以分析系统流态上的差别。

本试验在系统建成后3个半月后进行,试验所得 $E(t)-t$ 曲线见图3。

理论停留时间按 $t = V/Q$ 计算, $V = n \times V^*$, V^* 为床体可容纳水量表观体积, n 为实验室测得填料孔隙率等于0.45。实际计算停留时间按(1)式计算,计算结果见表2。

尽管空白床和茭草床示踪 $E(t)$ 曲线并不理想,但本次试验结果可以明显看出潜流湿地床流态的复杂性,各床情况不同,都偏离传统的推流假设。各潜流床的实际停留时间明显小于理论值,有效体积大约减少18%~27%,说明系统存在不同程度的死区和短流。床体底部出水使得水流沿底部短流,Breen和Chick的研究证实了湿地底部短流的存在^[8]。空白床 $E(t)$ 曲线有2个明显的峰,说明床内有2股平行流存在,2个植物床的 $E(t)$ 曲线也存在双峰情况,但是效果要明显好于空白床。

表2 流态试验结果

Table 2 The results of flow model trial

床型	床体容积/ m ³	流量/ m ³ ·d ⁻¹	理论 HRT/d	实际 HRT/d	质量回 收率/%	死区率 /%
空白床	6.4	2.38	1.54	1.21	92	27
茭草床	6.8	1.63	1.88	1.45	97	23
芦苇床	6.8	1.88	1.63	1.34	87	18

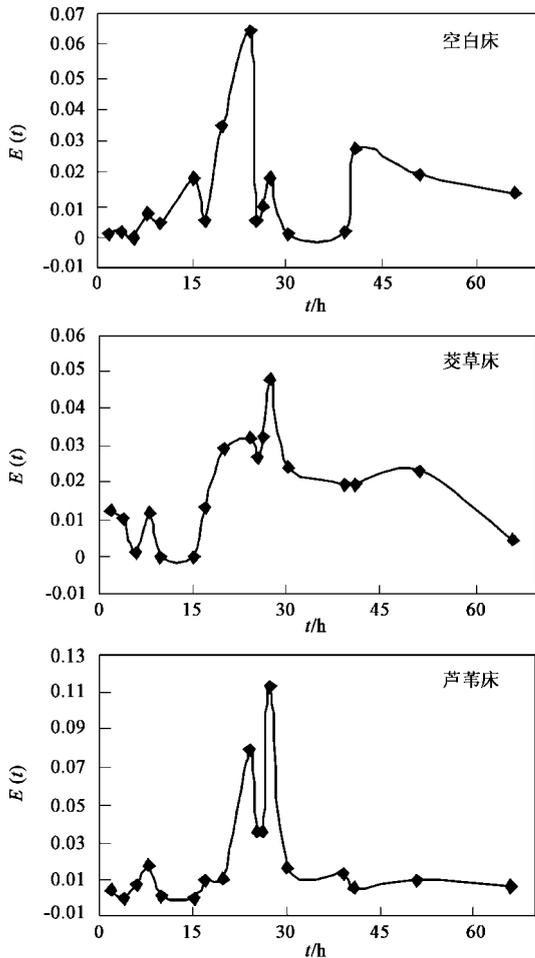


图3 流态试验停留时间分布函数

Fig.3 $E(t)-t$ distribution curve

人工湿地的水力学条件是影响系统处理效果的最为关键的因素之一^[9],这些因素包括系统的建造方式、填料特性、水力负荷以及植物种类等,3个中试系统在结构和建造方式以及运行方式上均相同,因此实际引起实际 HRT 和理论 HRT 差别主要归因于植物的作用。很多研究结果也证明了植物根系能够改善湿地的水力条件,植物根系的生长具有输导和均一布水的作用^[10],使得植物床体的水力条件要优于无植物系统,当然不同的植物种类在湿地水力改善中的贡献量不同,芦苇床的效果要好于茭草床,这与植物根系的特征和生长量有关。

3 结论

(1) 潜流湿地中依靠植物收割去除营养物的作用不显著,对氮磷的吸收量在 5% 左右,芦苇在 10 月底开始出现释放营养物的现象,其最佳收获期建议在 10 月底前。茭草在 9 月底开始出现营养物释放,建议在 10 月初收割。

(2) 植物的收割试验证明,植物地上部分对维持根系微环境起着关键的作用,收割后系统污染物去除效果尤其是氮的去除率下降明显,因此,植物虽然吸收营养物方面贡献较小,但是其在维持微生物生长和系统稳定性方面具有较大贡献。

(3) 通过流态试验表明,植物根系的确能够改善系统的流态,植物系统比无植物系统死区率减少 5% ~ 10%。

参考文献:

- [1] Jan Vymazal, Jiri Dusek, *et al.* Nutrient uptake and storage by plants in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a comparative study [M]. Leiden: Backhuys publisher, 1999.
- [2] Brix H. Plants in constructed wetlands for waste water treatment in Europe [M]. Leiden: Backhuys publisher, 1999.
- [3] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 179 ~ 184.
- [4] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for waste water treatment in the Czech Republic: 10 years experience [J]. Ecological Engineering, 2002, 18(5): 633 ~ 646.
- [5] Andrew Wood. Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding [J]. Wat. Sci. Tech., 1995, 32(3): 21 ~ 29.
- [6] L A Baker. Design Considerations and Applications for Wetland Treatment of High Nitrate Waters [J]. Wat. Sci., 1998, 38(1): 389 ~ 395.
- [7] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [8] Breen P F, Chick A J. Rootzone dynamics in constructed wetlands receiving waste water: A comparison of vertical and horizontal flow systems [J]. Water Science and Technology, 1995, 32(3): 281 ~ 290.
- [9] Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands [J]. Wat. Sci. Tech., 1994, 29: 71 ~ 78.
- [10] Volker Luederitz, Elke Eckert. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2001, 18: 157 ~ 171.