

3 种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究

聂志丹^{1,2}, 年跃刚^{1,2*}, 金相灿^{1,2}, 宋英伟^{4,5}, 李林锋³, 谢爱军⁴

(1. 中国环境科学研究院湖泊环境创新基地, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012; 3. 湛江海洋大学农学院, 湛江 524088; 4. 华东师范大学环境科学系, 上海 200062; 5. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要: 针对五里湖富营养化水体, 在同等条件下开展了 3 种类型人工湿地处理效果的比较研究, 试验采用现场中试规模, 水力负荷为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。结果表明, 垂直流、潜流和表面流 3 种人工湿地对氨氮的平均去除率分别为 33.2%、27.4% 和 14.1%; 对总氮的平均去除率分别为 52.3%、50.1% 和 19.2%; 对总磷的平均去除率分别为 58.8%、57.9% 和 26.3%; 对锰酸盐指数的平均去除率分别为 37.2%、38.3% 和 14.8%; 对叶绿素 a 的平均去除率分别为 86.9%、96.1% 和 55.3%。可见, 垂直流人工湿地对氨氮、总氮和总磷的去除效果最好, 潜流人工湿地对高锰酸盐指数和叶绿素 a 的去除效果最好, 但垂直流和潜流人工湿地之间的差异较小, 表面流人工湿地对各污染物的去除效果均远低于前两者。从出水水质稳定性来看, 垂直流人工湿地出水水质最稳定, 潜流次之, 表面流最差。

关键词: 垂直流人工湿地; 潜流人工湿地; 表面流人工湿地; 五里湖; 富营养化水体

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1675-06

Pilot-Scale Comparison Research of Different Constructed Wetland Types to Treat Eutrophic Lake Water

NIE Zhi-dan^{1,2}, NIAN Yue-gang^{1,2}, JIN Xiang-can^{1,2}, SONG Ying-wei^{4,5}, LI Lin-feng³, XIE Ai-jun⁴

(1. Research Center for Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Agricultural, Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 4. Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 5. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Comparison research of different constructed wetland types to treat lake Wulihu water was carried out. Under the condition of the loading rates $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, the removal efficiencies of the vertical flow wetland(VFW), subsurface flow wetland(SFW) and free surface wetland(FSW) had the following results: To ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) the average removal rates were 33.2%, 27.4% and 14.1%, respectively; To total nitrogen (TN) the average removal rates were 52.3%, 50.1% and 19.2%, respectively; To total phosphorus (TP) the average removal rates were 58.8%, 57.9% and 26.3%, respectively; To permanganate index the average removal rates were 37.2%, 38.3% and 14.8%, respectively; To chlorophyll a (Chl-a) the average removal rates were 86.9%, 96.1% and 55.3%, respectively. Obviously, VFW and SFW are more effective than FSW at treating eutrophicated water such as Lake Wulihu which with characters of low organically pollution and with high nitrogen and phosphorus pollution, and the VFW is the most effective on the removal of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP. SFW is the most effective on the removal of permanganate index and Chl-a. The effluent stability of VFW is better than SFW, and the SFW is better than FSW.

Key words: vertical flow wetland; subsurface flow wetland; free surface wetland; lake Wulihu; eutrophicated water

人工湿地因其低能耗和易管理等优点, 被广泛应用于各类不同水体的水质净化, 包括城镇生活污水^[1,2]、工业废水^[3,4]、农业污水^[5,6]等方面。按结构不同可将其分为表面流、潜流和垂直流 3 种类型, 并各具优缺点^[7,8]。近几十年来, 人工湿地被引入处理富营养化水体, 如英国伦敦泰晤士河^[9], 美国 Apopka 湖^[10]等均采用了人工湿地技术, 但国外大多采用表面流人工湿地^[11~13]。国内在人工湿地技术应用于富营养化水体方面也作了一些研究工作, 如刘红、代明利等开展了潜流和垂直流人工湿地改善官厅水库水质的研究^[14~16]。吴振斌等运用复合垂直流人工湿地

处理武汉东湖水^[17]。目前关于人工湿地的研究大多局限于单一湿地类型的去除效果研究, 较少进行不同类型人工湿地处理效果的比较。

由于不同类型的人工湿地结构及运行方式不同, 其处理对象、处理效率、应用地点和经济指标都有差异, 因此在实际应用时需结合不同类型人工湿地及应用对象进行选择, 但系统地将 3 种类型人工

收稿日期: 2006-08-23; 修订日期: 2006-10-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601013)

作者简介: 聂志丹(1979~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与生态修复, E-mail: niezhidan@163.com

* 通讯联系人, E-mail: nianyg@sohu.com

湿地对富营养化水体处理效果的比较研究鲜见报道,为此,在太湖的五里湖现场进行了针对富营养化水体的3种类型人工湿地处理的中试比较研究,探索不同湿地类型应用于富营养化水体处理效率之间的差异.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

设施位于无锡市东五里湖大桥东侧湖岸边,垂直流和潜流单元都为30 m²(长×宽×深=20 m×1.5 m×0.8 m),分3层依次填充基质,下层约25 cm填充粒径25~35 mm的大砾石,中层约25 cm填充粒径16~25 mm的中号砾石,上层填充约30 cm粒径5~10 mm的小砾石,单元内都种植香蒲(*Typha latifolia*).自由表面流单元为30 m²(长×宽×深=20 m×1.5 m×0.4 m),基质为土壤,植物为香蒲.单元都铺防水布防止渗漏.

植物都按10株/m²的密度定植在湿地单元中,垂直流、潜流和表面流3个单元的植物最大平均生长高度分别为223.4 cm、224.6 cm和221.1 cm.

1.2 进水情况及分析方法

进水为五里湖湖水,水力负荷为0.8 m³/(m²·d).试验时间从2004-08-03~2006-01-15.污染物进水浓度分别为:TN 4.1~7.0 mg/L; NH₄⁺-N 0.9~3.8 mg/L; 高锰酸盐指数 5.0~10.3 mg/L; TP 0.09~0.19 mg/L; Chl-a 40.3~128.9 μg/L.运行期间春夏秋冬进水的平均水温分别为14.7℃、27.2℃、18.3℃和3.7℃.进水pH值为7.33~7.74.

定期采集人工湿地处理各单元进出水水样带回实验室,用Skalar连续流动分析仪(荷兰)测定TN、TP、NH₄⁺-N;按文献[18]方法测定高锰酸盐指数和Chl-a的含量.

2 结果与分析

2.1 3种人工湿地对NH₄⁺-N去除效果比较

图1为垂直流、潜流和表面流3种人工湿地的氨氮进出水浓度变化趋势比较.从图1可知,氨氮的进水浓度波动比较大,冬季浓度明显高于夏季,平均为2.3 mg/L;3种人工湿地出水浓度与进水浓度基本上保持正相关关系.在出水浓度稳定性方面垂直流变化最小,最为稳定;潜流次之;表面流变化最大,冬季表面流人工湿地氨氮的出水浓度接近进水浓度.

图2为3种人工湿地氨氮去除效果比较.从图2可知,3种人工湿地对氨氮的平均去除率均较低,分别为33.2%,27.4%和14.1%.其中垂直流人工湿地处理效果最好,潜流次之,表面流最差.

氨氮的去除主要是通过好氧微生物的降解,由于表面流的土壤基质孔隙度低,水在基质表面流动,复氧能力差,且为微生物生长提供载体的基质仅为表层部分.而垂直流和潜流的基质均为孔隙度较高的砾石,不仅复氧能力优于土壤基质,而且为微生物提供了大量的挂膜空间,因此垂直流和潜流对氨氮的处理效果明显优于表面流.其中垂直流的复氧能力最强,氨氮的去除效果最好.

2.2 3种人工湿地对TN去除效果比较

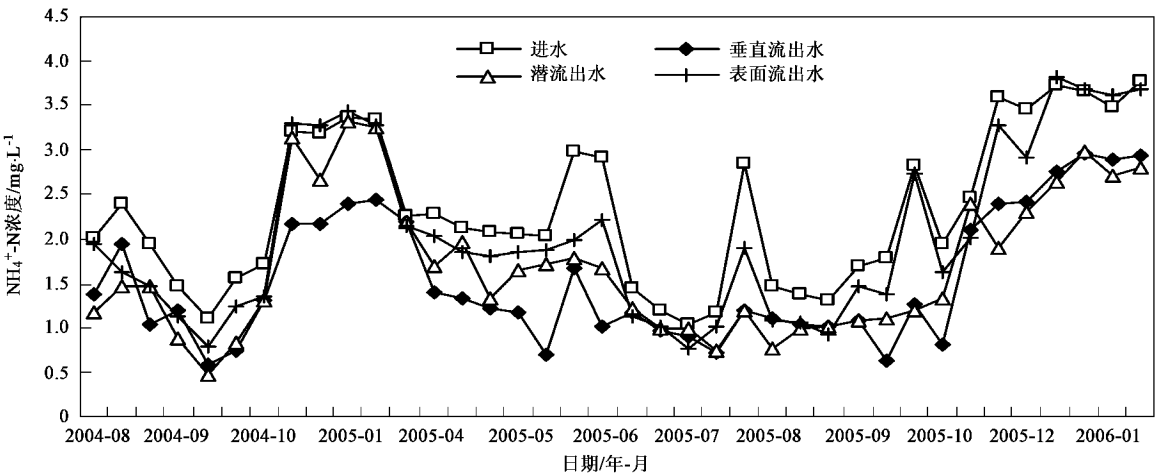


图1 氨氮进出水浓度变化趋势

Fig.1 Inflow and outflow NH₄⁺-N concentrations variation among different wetland types

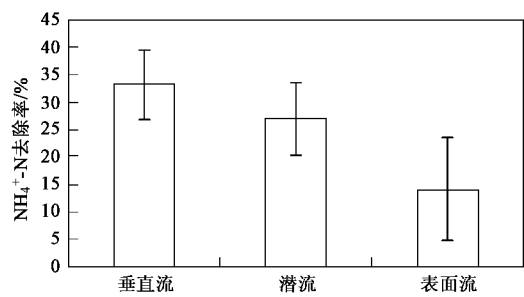


图2 氨氮去除效果比较

Fig.2 Comparison of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal among different wetland types

图3为垂直流、潜流和表面流3种人工湿地总氮的进出水浓度变化趋势比较.从图3可知,五里湖的总氮浓度总体变化趋势为冬季升高、夏季降低,平均为5.3 mg/L.3种人工湿地的总氮出水浓度变化趋势与进水浓度的变化趋势基本一致,夏秋季的

处理效果要稍好于冬春季.这是由于总氮主要是通过硝化和反硝化作用得以去除,微生物是此过程的主要承担者,而冬春季节温度相对较低影响了微生物的活性所致^[19].表面流人工湿地总氮的出水稳定性较差,而垂直流与潜流人工湿地相对比较稳定.

图4为3种人工湿地总氮去除效果比较.从图4可知,垂直流对总氮的平均去除率为52.3%,潜流为50.1%,表面流为19.2%.可见,垂直流和潜流2种人工湿地类型对总氮的去除效果差异不大,但明显好于表面流人工湿地.

总氮的去除效果与氨氮的去除效果成正相关,而氨氮的去除又与人工湿地的复氧能力直接关联,因此对于氮元素的去除,复氧能力强的垂直流人工湿地是最佳选择.

2.3 3种人工湿地对TP去除效果比较

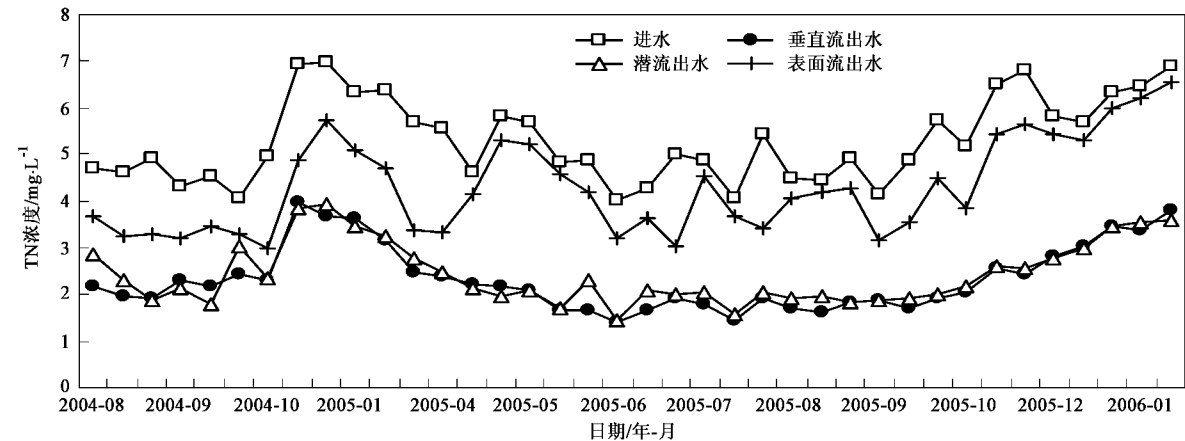


图3 总氮进出水浓度变化趋势

Fig.3 Inflow and outflow TN concentrations variation among different wetland types

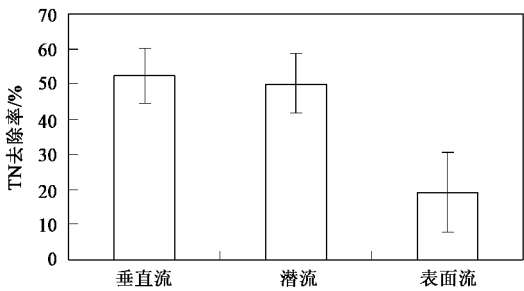


图4 总氮去除效果比较

Fig.4 Comparison of TN removal among different wetland types

图5为垂直流、潜流和表面流3种人工湿地总磷的进出水浓度变化趋势比较.从图5可知,进水总磷的平均浓度为0.14 mg/L.虽然总磷的进出水浓度有所波动,但垂直流与潜流的出水浓度比较平稳.除

2005年冬季出水浓度较高外,其他时间出水浓度基本在0.05 mg/L左右.表面流人工湿地总磷的出水浓度波动较大,与进水浓度成正相关.可见垂直流和潜流人工湿地总磷的出水稳定性较好,并明显优于表面流人工湿地.

图6为3种人工湿地总磷去除效果比较.从图6可知,垂直流和潜流人工湿地对总磷的去除效果相差不大,分别为58.8%和57.9%,表面流人工湿地对总磷的去除效果相对较差,仅为26.3%.

基质的吸附是磷去除的主要过程,其次是植物和微生物的作用^[20].垂直流和潜流2种类型的人工湿地基质相同,植物相同,所以它们对总磷的去除能力也相似.而表面流人工湿地中污染物是随水流从基质表面漫流而过,吸附作用仅发生在基质表层,因

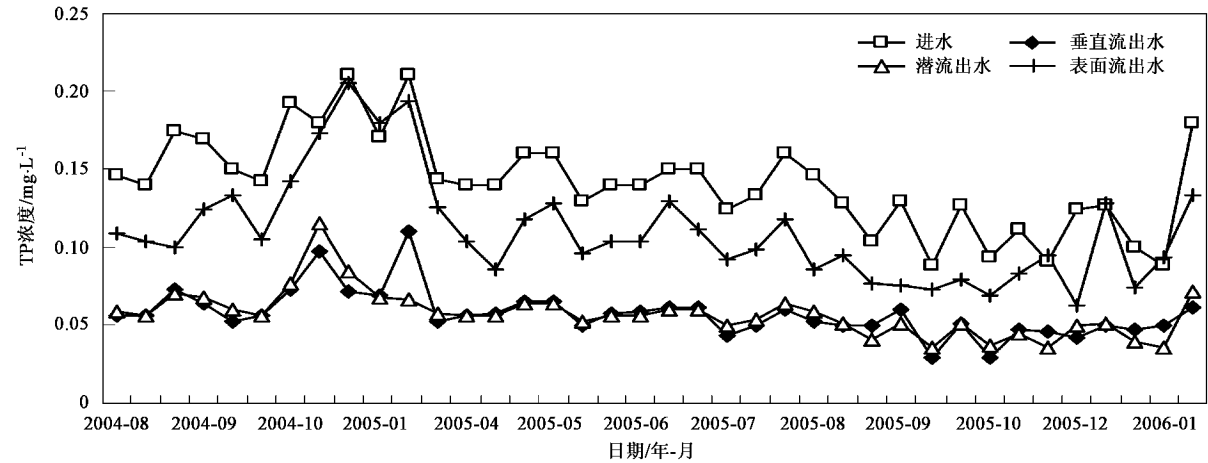


图 5 总磷进出水浓度变化趋势

Fig.5 Inflow and outflow TP concentrations variation among different wetland types

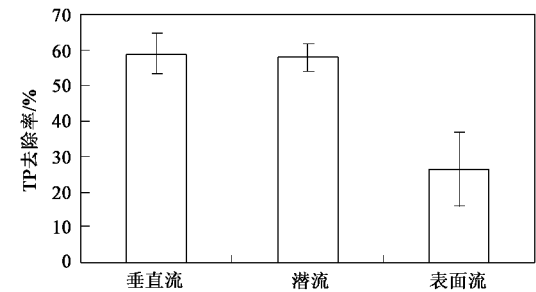


图 6 总磷去除效果比较

Fig.6 Comparison of TP removal among different wetland types

此处理效果相对较差.

2.4 3 种人工湿地对高锰酸盐指数去除效果比较

图 7 为垂直流、潜流和表面流 3 种人工湿地高锰酸盐指数进出水浓度变化趋势比较,从图 7 可知,垂直流人工湿地的高锰酸盐指数出水浓度相对最稳定,潜流次之,表面流最差.

图 8 为垂直流、潜流和表面流 3 种人工湿地高锰酸盐指数去除效果比较.从图 8 可知,3 种人工湿地对高锰酸盐指数的去除率分别为 37.2%、38.3% 和 14.8%.可见,对于五里湖这类低有机污染的富营养化水体,3 种人工湿地对其有机物的进一步去除效率不高.这是由于进水高锰酸盐指数的负荷低 (10.3 ~ 5.0 mg/L, 平均为 6.9 mg/L.),可生化性不强所致.垂直流和潜流人工湿地对高锰酸盐指数的去除效果差异不明显,但明显优于表面流人工湿地.

2.5 3 种人工湿地对藻类去除效果比较

图 9 为垂直流、潜流和表面流 3 种人工湿地叶绿素 a 进出水浓度变化趋势.从图 9 可知,五里湖夏季气温高时的藻类含量较高(以叶绿素 a 含量为指标),2005-06-16 和 2005-07-14 进水叶绿素 a 含量分别达到 128.9 $\mu\text{g/L}$ 和 102.1 $\mu\text{g/L}$.从出水水质的稳定性看潜流人工湿地出水最稳定,叶绿素 a 含量小于 5 $\mu\text{g/L}$,其次是垂直流人工湿地,叶绿素 a 含量小于

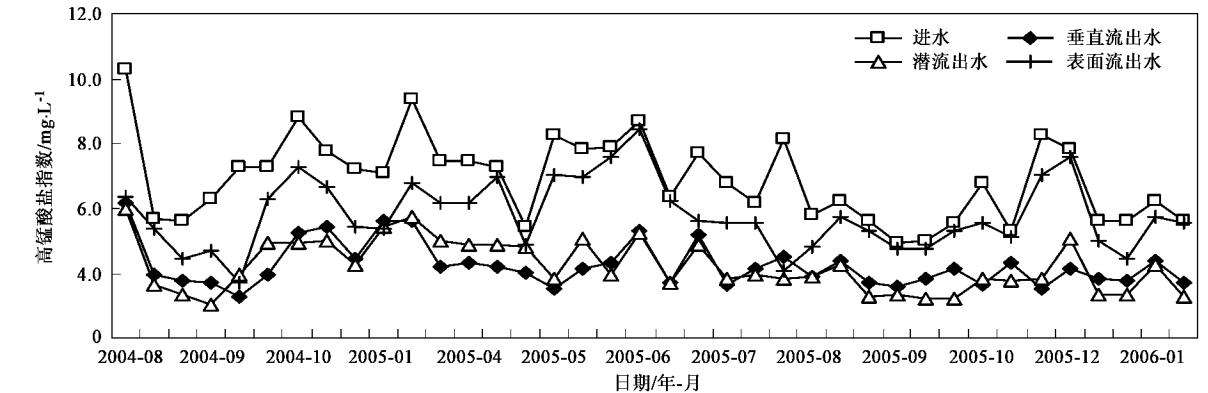


图 7 高锰酸盐指数进出水浓度变化趋势

Fig.7 Inflow and outflow permanganate index concentrations variation among different wetland types

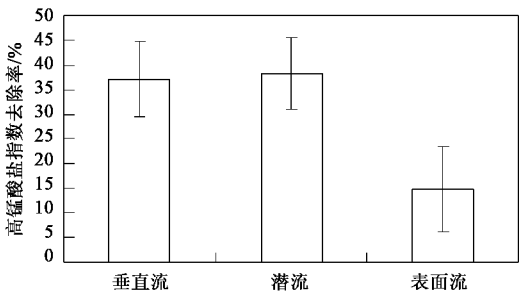


图 8 高锰酸盐指数去除效果比较

Fig. 8 Comparison of permanganate index removal among different wetland types

16 $\mu\text{g/L}$, 表面流出水水质最不稳定, 叶绿素 a 含量在 24 ~ 60 $\mu\text{g/L}$ 之间波动.

图 10 为 3 种人工湿地叶绿素 a 去除效果比较. 从图 10 可知, 潜流人工湿地对叶绿素 a 去除效果最好, 为 96.1%; 垂直流次之, 为 86.9%; 表面流去除效果较前两者差, 但平均去除率亦达到 55.3%.

藻类的去除主要是通过其自身的沉淀以及基质和植物的吸附和拦截作用. 由于水流是在潜流和垂直流人工湿地的基质间流动, 所以对藻类有很好地过滤作用, 其处理效果要优于漫流状态的表面流人工湿地.

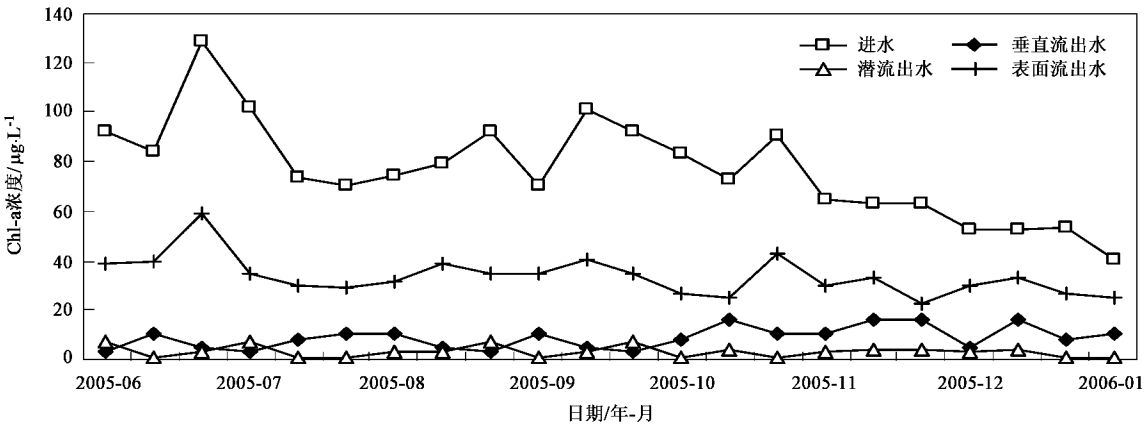


图 9 Chl-a 进出水浓度变化趋势

Fig. 9 Inflow and outflow Chl-a concentrations variation among different wetland types

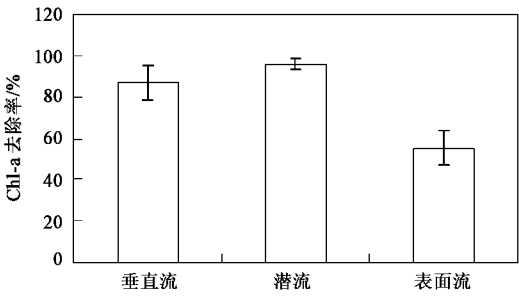


图 10 Chl-a 去除效果比较

Fig. 10 Comparison of Chl-a removal among different wetland types

3 结论

(1)垂直流、潜流和表面流 3 种人工湿地对氨氮的平均去除率分别为 33.2%、27.4%和 14.1%;对总氮的平均去除率分别为 52.3%、50.1%和 19.2%;对总磷的平均去除率分别为 58.8%、57.9%和 26.3%;对高锰酸盐指数的平均去除率分别为 37.2%、38.3%和 14.8%;对叶绿素 a 的平均去除率分别为

86.9%、96.1%和 55.3%.

(2)总体来看垂直流人工湿地对氨氮、总氮和总磷的去除效果最好, 潜流人工湿地对高锰酸盐指数和叶绿素 a 的去除效果最好, 但垂直流和潜流人工湿地之间的差异较小, 表面流人工湿地对各污染物的去除效果均远低于前两者.

(3)从出水水质稳定性来看, 垂直流人工湿地的氨氮、总氮、总磷和高锰酸盐指数出水浓度最稳定, 潜流次之, 表面流最差. 而对于叶绿素 a 的去除潜流人工湿地的出水最稳定, 垂直流次之, 表面流最差.

(4)结合去除效果和出水水质稳定性考虑, 对于类似于五里湖的富营养化水体, 选择垂直流和潜流人工湿地较为合适.

参考文献:

[1] Huang J, Reneau R B, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater[J]. Water Research, 2000, 34(9): 2582 ~ 2588.
[2] 刘超翔, 胡洪营, 张建, 等. 不同深度人工复合生态床处理农村生活污水的比较[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 92 ~ 96.

[3] Mays P A, Edwards G S. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage[J]. *Ecological Engineering*, 2001, **16**(4): 487 ~ 500.

[4] 籍国东,孙铁珩,常士俊,等.自由表面流人工湿地处理超稠油废水[J].*环境科学*,2001,**22**(4):95 ~ 99.

[5] Comin F A. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff[J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(5):255 ~ 261.

[6] 张荣社,周琪,张建,等.潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究[J].*环境科学*,2003,**24**(1):113 ~ 116.

[7] 尹炜,李培军,尹澄清,等.潜流人工湿地的局限性与运行问题[J].*中国给水排水*,2004,**20**(11):36 ~ 38.

[8] 梁继东,周启星,孙铁珩.人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析[J].*生态学杂志*,2003,**22**(2):49 ~ 55.

[9] David R T, Mark T B. Wetland networks for stormwater management in subtropical urban watersheds[J]. *Ecological Engineering*, 1998, **10**(2): 131 ~ 158.

[10] Coveney M F, Stites D L, Lowe E F, *et al.* Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration [J]. *Ecological Engineering*,2002,**19**(2):141 ~ 159.

[11] Moustafa M Z, Chimney T D, Fontaine G, *et al.* The response of a freshwater wetland to long-term ‘low level’ nutrient loads-marsh efficiency[J]. *Ecological Engineering*,1996,**7**(1):15 ~ 33.

[12] Naiming W, William J M. A detail ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands[J]. *Ecological Modelling*, 2000, **126**(2):101 ~ 130.

[13] James M H, Miriam L D. Use of constructed wetlands for urban stream restoration: A critical analysis [J]. *Environmental Mangement*,1997,**21**(3):329 ~ 341.

[14] 刘红,代明利,欧阳威,等.潜流人工湿地改善官厅水库水质试验研究[J].*中国环境科学*,2003,**23**(5):462 ~ 466.

[15] 代明利,欧阳威,刘培斌,等.垂流式人工湿地处理官厅水库入库水研究[J].*中国给水排水*,2003,**19**(3):4 ~ 7.

[16] 刘红,代明利,刘学燕,等.人工湿地系统用于地表水水质改善的效能及特征[J].*环境科学*,2004,**25**(4):65 ~ 69.

[17] 吴振斌,成水平,贺锋,等.垂直流人工湿地的设计及净化功能初探[J].*应用生态学报*,2002,**13**(6):715 ~ 718.

[18] 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[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.82 ~ 284.

[19] Kadlec R H. Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands[J].*Water Science and Technology*, 1999, **29**(4): 71 ~ 78.

[20] Reddy K R. Fate of Nitrogen and Phosphorus in waste water Retention Reservoir Containing Aquatic Macrophytes [J]. *Environmental Quality*, 1983, **12** (1): 137 ~ 141.