

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.05.011

黄炜杰,李秋霞,谢泳杰,等. 利用水生植物净化河涌污水能力的比较研究[J]. 广西植物,2014,34(5):642-650

Huang WJ, Li QX, Xie YJ, et al. Comparative study on the ability which utilized hydrophytes purify polluted water of river[J]. *Guihaia*, 2014, 34(5): 642-650

利用水生植物净化河涌污水能力的比较研究

黄炜杰^{1,2}, 李秋霞^{1*}, 谢泳杰³, 罗佳文¹, 肖玺琴⁴, 黄玉源⁵, 李存福¹, 汪鹏飞¹

(1. 仲恺农业工程学院 城市建设学院, 广州 510225; 2. 广州大学 土木工程学院, 广州 510006; 3. 仲恺农业工程学院 园艺园林学院, 广州 510225; 4. 仲恺农业工程学院 环境科学与工程学院, 广州 510225; 5. 仲恺农业工程学院 生命科学学院, 广州 510225)

摘要:以8种水生植物为材料,在单一、复合种植的组合条件下,对污染物的去除效率及各植物的生长发育状况进行研究。结果表明:总磷、总氮、氨氮、浊度等水质指标的去除速率随着处理时间延长而逐渐升高,而COD_{Mn}的去除效果为开始较高,然后有所降低,后期又提高的波动现象。整体上除个别植物种类外,所有组合单元的处理效果均优于对照。经过植物净化处理,原污水的TP含量约为重污染水V类水的4倍、TN含量为V类水的5~6倍、水中上述污染物有30%~33.3%的种植组合达到Ⅲ类水的水平,其中20%~25%的组合达到了Ⅱ类水的水平。其他20%~30%的种植组合能使TP、TN污染物含量减少2~3倍,污染水水质相当或接近于V类水的水平。原污水氨氮含量为V类水的6~7倍,经过植物各组合的处理,58.3%组合的水平在Ⅲ类水以上,其中50%的组合达到Ⅱ类水的水平。其他约35%的组合使氨氮含量减少4~5倍,接近V类水的水平。在植物形态学指标方面,除个别大藻单元出现负增长及植株坏死外,其余植物根、茎、叶有一定增长,表明植物能适应这样的污水而生长;植物复合种植比单一种植单元的处理表现出更高的净化水平及稳定性,应得到重视;挺水植物比漂浮植物和沉水植物的净化能力强,在水处理实践中可优先考虑。

关键词:水生植物; 污染水体; 净化; 水质改善**中图分类号:** Q948.8; X502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)05-0642-09

Comparative study on the ability which utilized hydrophytes purify polluted water of river

HUANG Wei-Jie^{1,2}, LI Qiu-Xia^{1*}, XIE Yong-Jie³, LUO Jia-Wen¹, XIAO Xi-Qin⁴, HUANG Yu-Yuan⁵, LI Cun-Fu¹, WANG Peng-Fei¹

(1. College of Urban Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. College of Horticulture and Gardens, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 4. College of Environment Sciences and Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 5. College of Life Sciences, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: The paper explored the purify effects to polluted water on 8 hydrophytes: *Acorus calamus*, *Phragmites australis*, *Pistia stratiotes*, *Canna indica*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Alternanthera bettzickiana*, *Eichhornia crassipes* and *Myriophyllum verticillatum*, they were setted up for tow groups which were cultivated in pollution water with single species and several species compound planting, and then formed 12 planting units, thereby carried out the comparative study on these hydrophytes purify ability to pollutants of river and compared the removal efficiency and the situation

收稿日期: 2013-11-21 修回日期: 2013-12-18

基金项目: 广东省大学生创新实验项目(1134711014)

作者简介: 黄炜杰(1990-),男,硕士研究生,从事水环境科学研究。(E-mail)878146401@qq.com。

*通讯作者: 李秋霞,副教授,主要从事给排水科学与工程研究。(E-mail)lqx8886@126.com。

of growth and development. Two groups treatments all had the purification ability to pollutants, with the time extension, the purified efficiency rise gradually to total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and turbidity; the removal efficiency of COD_{Mn} showed that in the initiate period it was higher, then the efficiency had a little drop, and rise again, reached a high purifying efficiency. In all treatments, about 30%—33.3% treatments made the primary polluted water which TP content was 4 times and TN content was 5—6 times as that of V grade water reached III grade water level, among 20%—25% of them reached II grade water level; other treatments, about 20%—30% made TP, TN content dropped 2—3 times, so that the polluted water reached V grade or near V grade water level. In aspect of ammonia nitrogen content, passed through plants purification, the 58.3% planting units (treatments) had made the polluted water that ammonia nitrogen content was 6—7 times as that of V grade water reached III grade water level, among of them, about 50% planting units reached II grade water level; other about 35% units were purified to approach V grade water level. Seen the efficiency in whole, except of exceptional species, the purification efficiency of all group treatments were higher than contrast. In the respect of plant morphology, except of *Pistia stratiotes* presented some leaves lose, their root, stem and leaves of other plants were increase, showed that these plants adapt to these pollution water. The purification level and effect showed that compound species planting were better and more stable than single species planting, the purification ability of emerged aquatic plants were stronger than floating plants and submerged plants. The research results shall provide the theoretical foundation and reference for establishing the hydrophytes communities which is strong ability to purify pollutants, the landscape effect is better and the structures is stable.

Key words: hydrophytes; polluted water; purify; water quality improvement

水体污染以及富营养化是全球性的环境问题。水生植物对水体具有净化作用,但不同植物对不同污染物的降解作用存在差异(蒋鑫焱等,2006;陈秋夏等,2008;王金丽等,2011;朱建坤等,2011)。在利用水生植物净化水体污染物方面,不同的物种之间或不同物种的组合之间其净化效率相差甚远,一般来说,结构复杂的组合比结构简单的组合具有更强的去除氮磷的效果(夏汉平,2002;蒋永荣等,2009;李淑英等,2010;田如男等,2011;王金丽等,2011)。以往开展研究的植物种类较少,涉及的水污染物尤其是富营养化主要指标的研究还不够,而针对重金属等污染物的研究则比较多。涉及实验用水污染程度等级的较少,对于植物组合形式的研究,相对于众多水生植物而言显得少一些。对于水中的氨氮、 COD_{Mn} 和浊度的去除率等研究极少,同时对于哪些植物适应何种污染程度的污水生长及其发育状况的研究也极少。

本研究探究哪种植物构建单一植物单元和复合植物单元,对于总磷、总氮、氨氮、 COD_{Mn} 和浊度的吸收净化效果最好及其净化效应的顺序,并通过对这些植物形态学等指标的测定分析,探究哪种植物的适应能力更强。因此,研究植物净化富营养化等污染水的能力及植物组合的效应,对于进一步有效利用植物实施水体净化的生态工程具有重要的应用价值和理论意义,从而为构建景观优美和结构功能稳

定的水生植物群落提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 植物材料

采用的材料有挺水植物菖蒲(*Acorus calamus*)、芦苇(*Phragmites australis*)、美人蕉(*Canna indica*)、锦绣苋(*Alternanthera bettzickiana*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)、漂浮植物水葫芦(*Eichhornia crassipes*)、大藻(*Pistia stratiotes*)和沉水植物狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)等8种植物。水葫芦取自河涌,其余7种植物取自广州市郊区湿地或苗圃。

实验前,在该河涌上游水质污染相对较轻河段取水对植物进行为期57 d的水培驯化,以备实验所用。以单一植物和复合植物形式在透明塑料箱(长×宽×高=52 cm×40 cm×38 cm,体积约79 L)中种植,污水体积为箱体积的70%。单一植物单元有菖蒲、芦苇、美人蕉、大藻、水葫芦、狐尾藻、铜钱草;复合植物单元有菖蒲+大藻、美人蕉+锦绣苋、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、铜钱草+狐尾藻。设置的对照单元未加入任何植物进行处理。凡含有挺水植物或沉水植物的单元,在其底部用干净的沙粒固着其根部,而漂浮植物则不用任何固着物,仅放于水中。

1.2 实验水样

取自广州市仲恺农业工程学院白云校区内的一

条河涌。河涌主要污染源来自沿途的生活污水和河涌上游小部分养殖场排放的养殖污水。见表1。

表1 实验水样主要指标浓度与国标(GB3838-2002)对照表

Table 1 Comparative situation on main indexes of experimental water samples with national standard

对象 Object	浊度 UNT	pH	高锰酸盐指数 COD _{Mn} (mg/L)	总磷 TP (mg/L)	总氮 TN (mg/L)	氨氮 NH ₃ -N (mg/L)
实验水样 Experimental samples	147.8	6.0~6.5	9.78~12.26	1.63~1.79	10.91~12.40	13.14~15.14
Ⅱ类水 Case Ⅱ water	—	6~9	≤4	≤0.1	≤0.5	≤0.5
Ⅲ类水 Case Ⅲ water	—	6~9	≤6	≤0.2	≤1.0	≤1.0
Ⅳ类水 Case Ⅳ water	—	6~9	≤10	≤0.3	≤1.5	≤1.5
Ⅴ类水 Case Ⅴ water	—	6~9	≤15	≤0.4	≤2.0	≤2.0

对比处于轻度污染状态的Ⅲ类水的地表水环境质量基本项目标准限值可知,实验水样的pH在Ⅲ类水要求的范围内,高锰酸盐指数(COD_{Mn})处在较重污染的Ⅳ类水的水平,总磷含量在重污染水Ⅴ类水的4倍以上、总氮为Ⅴ类水的5~6倍,氨氮值为Ⅴ类水的6~7倍。可见该河涌水体污染很严重,尤其是氮、磷超标严重。

1.3 实验方法

2012年7月17日开始,对种植在污染较轻水质中进行驯化和适应期的植物生长进行观察,记录叶片数、株高、根长、冠幅、新芽生长等情况,确保其移栽后的定植达到稳定、正常生长。把定植50多天植物培养箱中的轻污染水吸出,放入污染严重的上述实验用水中进行试验。2012年9月12-30日,对各培养箱及对照的污水取样,在实验室进行水样水质测定实验,总氮、总磷、氨氮、COD_{Mn}等分别按碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)、钼酸铵分光光度法(GB11893-89)、纳氏试剂比色法(GB7479-87)、酸性法(GB 11892-89)等标准方法进行。利用2100P便携式浊度仪、温度计、pH试纸等对水样的浊度、温度、pH值等辅助指标进行测定。实验周期为3~4d检测一次,持续14d,共5次。除水质指标的检测外,还对植物的叶片数、植株高度、冠幅、根系长度、新叶(芽)数等指标进行跟踪测量。

2 结果与分析

2.1 水生植物除磷效果分析

从图1可以看出,总磷去除率0~7d的增加速度较快,基本接近线性规律变化,其中最高的单元是美人蕉、美人蕉+锦绣苋,分别达91.4%和88.3%,最低的是水葫芦,为23.9%。大藻、狐尾藻、铜钱草等单元不足30%。7~14d的去除率增加较慢,并

逐步趋于稳定。11d比7d时对磷的去除率有较多增加,而14d比11d时所有的单元其去除率都有提高,但相对于种植初期去除率增加幅度小些。其中芦苇、菖蒲+大藻、美人蕉、美人蕉+锦绣苋的去除率稳定在90%,对照、菖蒲、大藻在72%~78%之间,而水葫芦、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻、铜钱草、铜钱草+狐尾藻则在50%~60%的低位。总体来看,大藻、水葫芦、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻、铜钱草、铜钱草+狐尾藻等漂浮植物的总磷去除率均在对照之下,而且平均低于对照的20.2%。以挺水植物为主的单元去除率平均高于对照,最终高出对照12%左右。去除率由高到低的排序为美人蕉+锦绣苋>美人蕉>菖蒲+大藻>芦苇>菖蒲>对照>大藻>铜钱草+狐尾藻>水葫芦+狐尾藻>大藻+狐尾藻>狐尾藻>铜钱草>水葫芦。

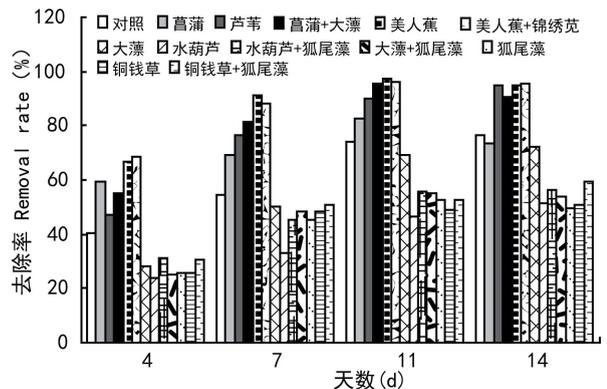


图1 总磷去除率的变化

Fig. 1 Change situation of total phosphorus removal rate

2.2 水生植物除氮效果分析

由图2可知,TN去除率总体呈波动上升趋势,但上升的速率差异很大。上升最快的有美人蕉+锦绣苋、美人蕉、菖蒲、芦苇、菖蒲+大藻,明显高于对

照,其他的 TN 去除率与对照相当,个别出现负值,说明水质净化效果较差,表明不仅没有减少水中的氮含量,反而略有提高。在处理至第 7 天时,去除率以美人蕉最高,达 89.5%,水葫芦最低,为-2.5%,差距较大。在处理至第 14 天时,对照的 TN 去除率为 26.0%,水葫芦、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻、铜钱草、铜钱草+狐尾藻、大藻的 TN 去除率分别为 28.5%、10.49%、4.10%、18.61%、30.17%、35.9%、23.4%,均表现较差。菖蒲、芦苇、菖蒲+大藻、美人蕉、美人蕉+锦绣苳的 TN 去除率分别达 93.4%、89.7%、75.3%、92.5% 和 95.9%,平均为 89.3%,比对照高出 63.3%。可见实验中的挺水植物对 TN 的吸收效果良好,明显高于对照以及其他漂浮植物或沉水植物,进行深入研究和利用的潜力很大。

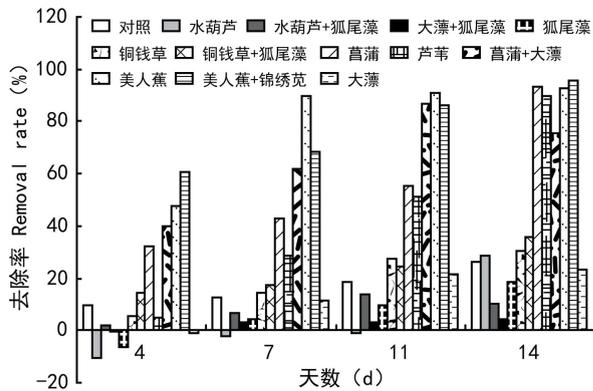


图 2 总氮去除率的变化

Fig. 2 Change situation of total nitrogen removal rate

由图 3 可知,在处理至第 7 天时,芦苇、菖蒲+大藻、美人蕉、美人蕉+锦绣苳等,氨氮的去除率明显高于对照,平均达 81%,其中美人蕉最高,达 96.7%,而此时的对照为 45.6%,大藻、狐尾藻分别为 33.15%、37.9%,低于对照,其余的植物单元则略高于对照。随后各单元的氨氮含量逐渐下降,在处理至第 14 天时,各单元的氨氮去除率均达较高水平,并趋于平衡,其中近半在 97% 以上,水葫芦最低为 70.5%。总体去除率排序为美人蕉+锦绣苳>美人蕉>菖蒲+大藻>芦苇>铜钱草>对照>铜钱草+狐尾藻>菖蒲>狐尾藻>大藻+狐尾藻>大藻>水葫芦+狐尾藻>水葫芦。可见挺水植物稍优于漂浮植物或沉水植物,不过铜钱草也有较好表现,复合植物单元稍优于单一植物单元。

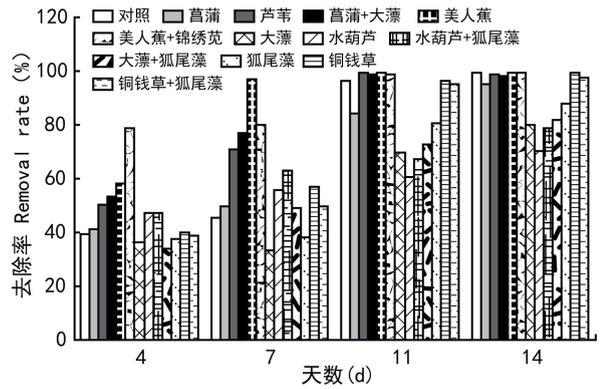


图 3 氨氮去除率的变化

Fig. 3 Change situation of ammonia nitrogen removal rate

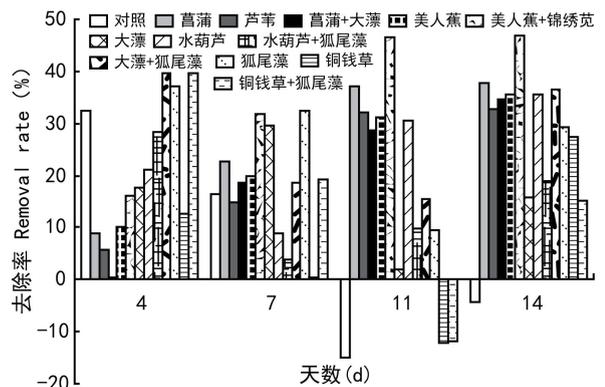


图 4 高锰酸盐指数去除率的变化

Fig. 4 Change situation of COD_{Mn} removal rate

2.3 水生植物对有机物的去除效果分析

由图 4 可知,对 COD_{Mn} 的去除速率均相对较低,不同植物单元的去除率差异较大,局部出现明显波动性。菖蒲、芦苇、菖蒲+大藻、美人蕉、美人蕉+锦绣苳等的 COD_{Mn} 去除率总体保持上升状态,后期趋于平缓。这 5 个单元初期去除率都较低,第 4 天时美人蕉+锦绣苳单元的去除率最高,为 15.9%;菖蒲+大藻单元最低,为 0.35%,较对照 32.3% 的去除率平均低了 24%。随后去除率一直保持上升,最后均在 32% 以上,其中美人蕉+锦绣苳单元的去除率最高,为 46.9%。相反,对照单元随后出现明显下降,在第 11 天时出现-14.7% 的最低值,最后稍有回复,最终去除率为-4.4%,即 COD_{Mn} 不但没有减少,反而有所提高。此外,水葫芦、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻、铜钱草、铜钱草+狐尾藻、大藻等漂浮植物及沉水植物单元具体去除率不一,但同时出现了与对照类似的“高-低-高”的波动。

由图5可知,处理第4天时,对浊度的去除率已很高,多数单元在80%~87%之间,仅两个单元即菖蒲的去除率为76.5%,美人蕉+锦绣苧的为62%,低于对照。这2个单元在第7天时,其对浊度的去除率都大为提升,均超过对照。所有单元在处理的前6d,浊度的去除率在直线上升状态,处理至第7天,浊度去除率都在93%以上,其中菖蒲所在单元最高,达97.5%,并趋于稳定。浊度主要由水中的悬浮物引起,由于实验中的系统相对封闭与静置,无太大扰动,所以随着处理时间的推移,水中主要悬浮物必然沉降,整体水质变澄清并保持相对稳定。

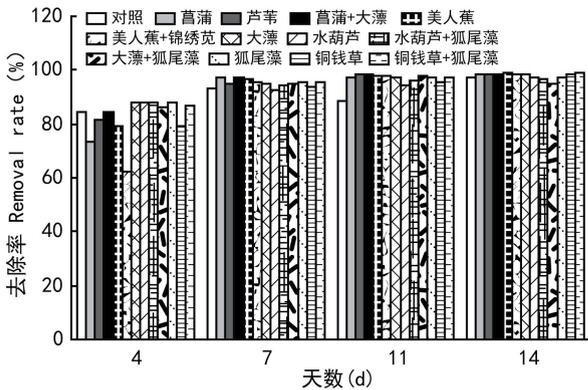


图5 浊度去除率的变化

Fig. 5 Change diagram of turbidity removal rate

2.4 各组合净化污水效果与地表水标准的比较分析

由表2可知,从各单元对COD_{Mn}的处理情况看,挺水植物及具挺水植物的复合组合净化效果较明显,从原来水样的9.78~12.26 mg/L,降到了Ⅲ类水的≤6 mg/L水平,如美人蕉和菖蒲+大藻;漂浮植物与沉水植物的组合大藻+狐尾藻组合的净化效果也较好,接近了Ⅲ类水的标准。

对TP的处理能力,则从原污水的1.63~1.79 mg/L,为Ⅲ类水标准含量0.2 mg/L的8.15~8.95倍,及Ⅴ类水≤0.4 mg/L的4.07~4.5倍的严重污染的状态,大部分已净化至低于Ⅴ类水的水平或仅比Ⅴ类水的含量高出1.8~2倍的水平,明显降低了水中磷的含量。其中的4个单元芦苇、菖蒲+大藻、美人蕉和美人蕉+锦绣苧组合净化水中磷的效果已大幅低于Ⅲ类水的水平,3个单元已达到适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区的Ⅱ类水0.1 mg/L的水平。其中菖蒲的单一植物单元的净化能力基本达到Ⅴ类水的水平,而菖蒲+大藻的复合种植组水体磷含量降低至0.15 mg/L,达到

表2 各组合在种植后14 d水中污染物含量比较

Table 2 The pollutants content of polluted water in each unit after treating 14 days

组合 Species compound	高锰酸盐指数 COD _{Mn} (mg/L)	总磷 TP (mg/L)	总氮 TN (mg/L)	氨氮 NH ₃ -N (mg/L)
水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	7.29	0.81	8.82	4.43
水葫芦+狐尾藻 <i>Eichhornia crassipes + Myriophyllum verticillatum</i>	9.50	0.78	11.10	3.21
大藻 <i>Pistia stratiotes</i>	8.72	0.47	9.19	2.85
大藻+狐尾藻 <i>Pistia stratiotes + Myriophyllum verticillatum</i>	6.64	0.81	11.05	2.56
狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i>	8.46	0.90	9.35	1.67
铜钱草 <i>Glechoma biondiana</i>	7.29	0.88	8.39	0.07
铜钱草+狐尾藻 <i>Glechoma biondiana + Myriophyllum verticillatum</i>	9.24	0.72	7.63	0.32
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	8.07	0.44	0.80	0.63
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	7.03	0.09	1.16	0.18
菖蒲+大藻 <i>Acorus calamus + Pistia stratiotes</i>	6.39	0.15	2.97	0.20
美人蕉 <i>Canna indica</i>	6.39	0.09	0.88	0.09
美人蕉+锦绣苧 <i>Canna indica + Alternanthera bettzickiana</i>	6.52	0.07	0.48	0.07

Ⅲ类水,接近Ⅱ类水的水平。说明这两种植物的复合种植处理净化磷的能力更强。

对TN处理去除能力,25%的单元达到Ⅱ类水的含量标准,如菖蒲、美人蕉和美人蕉+锦绣苧,其中美人蕉的吸收净化能力已经很强,水体中的氮含量为0.88 mg/L,而加入锦绣苧形成复合种植组合后,则能力更强,使水体氮含量达到了0.48 mg/L,说明这两种植物构成的组合,对磷的净化作用比单一的已具备很强净化能力的美人蕉种植单元要强。其他各单元中,芦苇、菖蒲+大藻两个组合的处理净化效果也较好,接近Ⅴ类水的水平。其他7个单元,则对TN都有不同程度吸收减量的作用。

对氨氮的吸收净化,有58.3%的组合其水体达到Ⅲ类水的水平,其中50%的组合达到Ⅱ类水的水平。其他约35%的组合使氨氮含量比原水减少了4~5倍,接近Ⅴ类水的水平。但在同等条件下,有50%的种植植物组合比对照的水体氨氮的含量低,说明这些组合除了水中氨氮的自然挥发外,还有吸收净化氨氮的作用。当然,部分处理其氨氮的含量比对照高一些,这可能是这些植物对氨氮这种形式的氮素吸收作用较差,而且由于氨氮的挥发作用受许多因素影响,如风速、水温、pH值的差异等。

种植物的组合,可能会导致水体温度比对照的低,有植物覆盖的水面,会导致水体表面的风速减小,从而造成水中氨氮含量相对较高。

2.5 水生植物生长性状指标分析

由图 6 可知,测定期间植物的叶片数量总体变化不大。除大藻、水葫芦外,其余各植物都有一定增长,其中芦苇的叶片数量增长最快,平均增长 4.2 片叶子,折算增长率为 31.8%,其余基本上有 1~2 片叶子的增长量,生长状态正常。单一与复合中的水葫芦平均叶片数均有不到 1 片的微量下降,可见其生长态势并不活跃。单一的大藻和与狐尾藻复合组合的大藻叶片数分别下降 4.8 和 3.2 片,个别植株出现较多腐叶和中心腐败现象,并开始死亡,与菖蒲构成复合组合的大藻叶片数较为稳定,有微量的增长,且未出现腐败死亡现象,可见大藻对于该实验污染水体适应能力并不强,但相对于单一的大藻种植而言,与其它植物构成复合组合的则大藻表现较好,尤其是与菖蒲复合种植的大藻,相对表现突出。

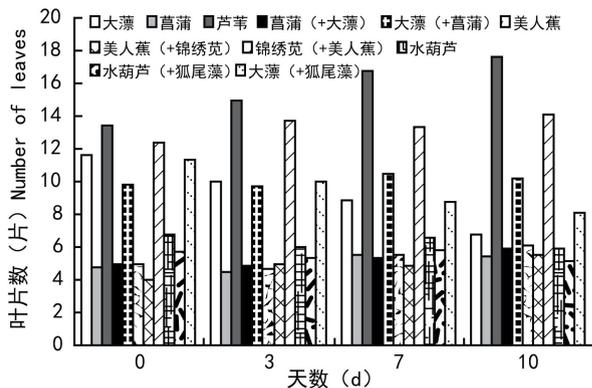


图 6 各植物单元叶片数量的变化

Fig. 6 Change diagram of plant leaves number

从图 7 看出,植物的生长高度变化不大,生长正常,除大藻、水葫芦外,各植株的高度均有增长,增长范围为 2~4 cm,芦苇、美人蕉等大型水生植物的植株高度增长量相对较高。其中单一美人蕉的平均高度增长量最大,为 6.2 cm,其次是芦苇和复合的美人蕉,分别为 4.8 和 4.5 cm。与狐尾藻复合的大藻和单一的大藻在生长过程中出现枯黄死亡,导致其植株高度出现微量下滑趋势,而与菖蒲复合的大藻则未出现枯黄现象,其植株高度也实现 0.4 cm 的微量增长,体现了该复合种植组合对植株生长的互助功能。复合培养箱中的美人蕉和单一培养箱中的美人蕉相比,复合型的植株生长高度增长均匀,接近线

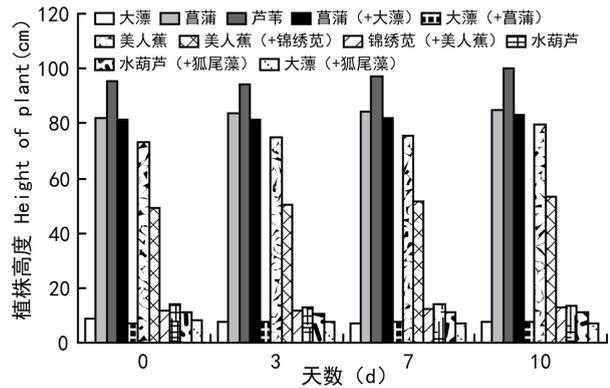


图 7 不同植物单元植株高度的变化

Fig. 7 Change situation of plant height

性变化;单一型的美人蕉有所波动,在后期的植株生长高度明显增快。复合型菖蒲与单一型菖蒲植株高度变化情况基本一致。

由于挺水植物需要在各阶段继续保持其稳定的种植,因此数据来源基本上是根据在水中的浮水植物。图 8 显示,除大藻外,各植株的根系长度均有微量增长,总体变化较小。就大藻而言,单一型、与菖蒲复合及与狐尾藻复合的大藻其平均根系长度最终变化为 -1.4、+0.6、-0.4 cm,即除与菖蒲复合中的大藻根系有微量增长外,其余两个单元的大藻均出现下降,其中单一型下降更为严重,主要原因是这两个单元的大藻中,部分植株的根系出现了不同程度腐败。这说明大藻在本研究中基本不适宜生长在此处污水中,但复合条件下的大藻显示出更强的适应性,尤其是与菖蒲复合种植中的大藻,均能正常存活。这表现出明显的互利共生的现象,但主要以偏利共生现象为主。

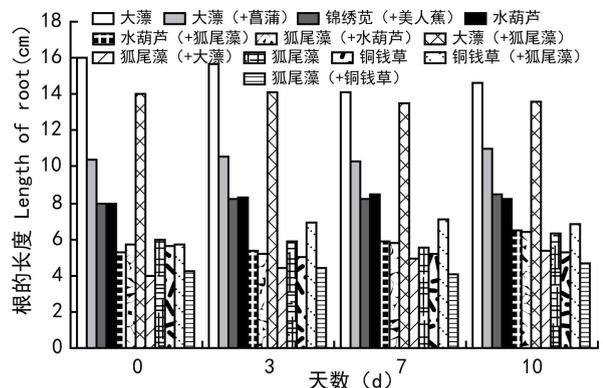


图 8 各植物单元植物根系长度的变化

Fig. 8 Change situation of plant root length

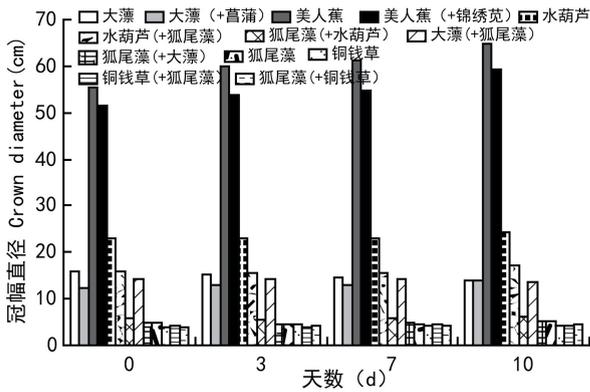


图9 不同植物单元植物冠幅的变化
Fig. 9 Change situation of plant canopy

从图9发现,除大藻外,其他植物的冠幅均有一定增长,其中增长量最大的是美人蕉,单一型和复合型的生长量分别为9.2和7.8 cm,生长态势良好。其余浮水植物增长量较少,在1 cm左右。大藻的冠幅数据与前面类似,出现腐败的单一型及与狐尾藻复合的大藻冠幅分别下降2和0.8 cm,与菖蒲复合的则有0.6 cm的微量增长。结合前面的水质结果,可知美人蕉的净化效果较好,生长量较大,可能是锦绣苧吸收了水中部分营养物,所以复合的美人蕉生长量稍低于单一的美人蕉。

3 讨论与结论

3.1 对磷的去除作用

水中总磷早期去除方式主要通过不溶解的磷沉淀、固结和挥发作用,不种植植物的对照也同样具备对水体中磷的去除作用(夏汉平,2000;岳维忠等,2007)。水中含磷量持续下降主要是可溶性磷通过植物的吸附和吸收作用。本研究表明,复合型植物比单一型植物对水中磷的去除效果好;美人蕉对磷的吸收量大于其他植物,尤其与其它植物构成的复合组合其吸收磷的能力更强。铜钱草、大藻、水葫芦、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻、铜钱草+狐尾藻等漂浮植物及沉水植物总磷去除率均在对照之下,其他以挺水植物为主的单元去除率平均高于对照。部分植物去除磷效果较差的原因可能因为①它们不适宜生长在此类污水的河涌;②漂浮植物自身生长过程中凋落的腐叶较多,造成二次污染。

由于磷是可以沉淀的,对照的水中的磷含量可以在多天以后较多地沉积到底泥或容器底部,但这

并非为河涌、湖泊或河流中磷的真正意义上的去除,因为这些沉淀的以各类化合物形式存在的磷成分,可以经过微生物的分解作用,以游离态进入水中,这是沉积的磷容易形成二次污染的主要原因(岳维忠等,2007;陈肖刚等,2012)。在本研究中,对照由于没有植物在水面,因此扰动极少或不加以扰动,因此测试反映出其磷含量较明显地下降,但这不是磷的消失。而种植有植物的各单元的组合,由于有枝叶或漂浮植物在水面,取水样时会相对比对照容易造成扰动现象,可能会有少量沉积的磷进入水体中。但如果在这种情况下,有植物的单元仍比对照的水中磷含量低的话,则说明植物对水中磷的吸收作用很强,以至于部分原沉积的磷进入水体后,其测定值仍然较低。

在水葫芦对磷的去除率方面,与王智等(2012)的研究结果相似,在水葫芦区的吸收率与近水葫芦区和远水葫芦区相比,开始表现为水中磷含量下降,然后又逐渐上升,达到接近最初种植的水中磷含量的程度,而其磷含量比近水葫芦区和远水葫芦区要高。原因是开始种植水葫芦时,由于生长的需要,吸收了大量的磷,当出现枯叶和旧根腐烂时,则向水中释放磷(王智等,2012),造成水中磷含量增加。本研究中的水葫芦和其他一些植物也有类似现象。而王智等(2013)的研究结果却相反,表现出水葫芦吸收磷的能力比近水葫芦区和远水葫芦区的要高。这表明,水葫芦的吸收磷的能力是不稳定的,如果出现了较多的枯叶和烂根时还不清理的话,就会使得水中磷的含量反而比不种水葫芦的区域高。

植物在种植初期对磷吸收速率较种植后11~14 d时的速率(指单位时间内吸收的量)高,与王智等(2012)的研究结果相似。可能是植物在幼嫩时的吸收能力较强,到生长稳定或成熟时,植物各组织对磷的需要量不会如此高,吸收的速度不会比前期高。当水中的磷被吸收较多时,进一步较高速度地吸收水中有效磷已不可能那么容易,致使水中的磷残存量减少不会发生如前面时期的明显、快速减少的现象。但植物的吸收减少磷的过程还在进行中。

3.2 对氮素的去除作用

①去除率上升最快的有美人蕉+锦绣苧、美人蕉、菖蒲、芦苇、菖蒲+大藻,明显高于对照。这些植物单一种植时处理效果虽已很强,但当加入漂浮植物构成复合组合时,其吸收净化能力则更强,这与磷的吸收净化作用相同。其他水生植物的TN去除率

与对照相当。个别的去除率为负值,即原水中氮含量不仅未减少反而有所提高。水葫芦、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻、铜钱草、铜钱草+狐尾藻、大藻等漂浮植物及沉水植物单元的 TN 去除率均表现相对较差。水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻和大藻的组合低于对照的 26.0%,其他的水葫芦及含铜钱草的组合效果均比对照高。无植物时,水体中氮通过本身的降解、沉淀、固结、去除、挥发等均能降低自身的浓度,尤其是一些非游离状态的氮,早期的沉淀作用更为明显(岳维忠等,2007)。这是早期氮去除率较高的重要原因,也是对照实验中 TN 去除的主要部分。此外,水体中原有微生物的影响,有机物中的氮能在微生物作用下,先转化成氨,并进一步氧化成亚硝酸盐及硝酸盐,从而使有机物中的氮变成游离状进入水中,提高水中的含氮量,不过这个过程相对滞后于前者(顾夏声等,2006)。种入植物后,植物根系及其附属微生物能吸附并吸收水中的氮,满足自身生长需要,这是水中含氮量能持续下降的主要原因。因不同植物对氮的吸附与吸收能力存在差异,所以水中氮的去除率也不同。

②氨氮的去除作用:处理初期,芦苇、菖蒲+大藻、美人蕉、美人蕉+锦绣苜等单元,氨氮去除率明显高于对照,大藻、狐尾藻低于对照,其他的植物单元则略高于对照。随后各单元的氨氮含量均不断下降,处理至第 14 天时,各单元氨氮去除率均达较高水平,并趋于平衡。说明含漂浮植物及沉水植物的单元,对氨氮均有较好的去除作用,但挺水植物或挺水植物与部分漂浮植物的组合单元去除效果更好。

3.3 对 COD_{Mn} 的去除作用

在菖蒲、芦苇、菖蒲+大藻、美人蕉、美人蕉+锦绣苜单元中,初期去除率均较低,随后一直保持上升,最后均在 32%以上。相反,对照单元随后出现明显的下降,在第 11 天时出现-14.7%的最低值,最后稍有回复,最终去除率为-4.4%。说明在没有植物的这类污水环境中,滋生了许多从外界传播进来的各类生物和与其相关的其他有机物,它们的代谢、腐烂等作用,使水中的 COD_{Mn} 升高。说明上述各单元的植物对于 COD_{Mn} 有较好的去除作用。此外,水葫芦、水葫芦+狐尾藻、大藻+狐尾藻、狐尾藻、铜钱草、铜钱草+狐尾藻、大藻等漂浮植物单元及沉水植物虽具体去除率不一,但也同时出现了“高-低-高”的波动现象,多数都具有减少 COD_{Mn} 的作用。水中的 COD_{Mn} 主要靠自身沉降和微生物分解来去除,但

植物衰败及微生物死亡等会增加水中的有机物含量,这可能是水中 COD_{Mn} 去除率波动变化的原因。因此,哪类微生物与哪些植物更容易形成好的互利组合关系,就影响到对 COD_{Mn} 的去除效果。

3.4 植物的生长情况

大多数试验植物在供试的污水中能正常及较正常地生长,叶片数、植株高度、根系长度及植株冠幅均有所增加,极少数植物适应力相对较差。极少数漂浮植物当单一种植时,适应能力差,但是当与挺水植物复合种植时,则明显表现出生长状态较好的,这表现出明显的互利共生、相互促进作用的现象。由于对于这方面的指标仅实际测定了 10 d 的数值,因此,上述指标的变化还是相对较小的,如进行更为长期的观测和记录才能更好地反映此方面的情况。但从本研究的实验开始到测定的时间,已在污水中生长达 2 个多月,说明这些植物大多能较好地适应这样浓度的污水环境。研究还表明,吸收净化磷、氮等污染物能力越强的植物其生长发育得更好,两者为相辅相成的关系。

3.5 两种植物的合理搭配能产生比单一植物更好的净化效果

菖蒲+大藻的搭配无论是总磷、总氮、还是氨氮去除率都明显高于菖蒲、大藻的单一植物单元,同时发现,单一系统中个别大藻植株出现坏死和枯萎,但在与菖蒲的复合单元中却无此现象。美人蕉+锦绣苜的复合净化效果较为突出,相对于单一的美人蕉单元,处理效果略有提升,更重要的是,这种复合注入了立体种植的理念,通过提高对不同层次空间的利用效率,进而优化植物系统的搭配组合。通过对水质净化效果较好的水生植物进行合理的配置,构建水生植物群落,对进一步提升水处理效果,提高水生生态系统稳定性意义重大,值得进一步深入探讨。

参考文献:

- Chen QX(陈秋夏), Zheng J(郑坚), Jin C(金川), et al. 2008. Nitrogen and phosphorus uptake of 18 aquatic plant species in Sanyang Wetland (水生植物对 N、P 的富集作用研究) [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi* (江西农业大学学报), 30 (3): 437-442
- Chen XG(陈肖刚), Li YJ(李雅静), Li XY(李欣益). 2012. A Comparative analysis of pollutants in the sediments in southern and northern rivers(南北方河流沉积物中污染物含量的对比分析)[J]. *Chin Rural Water Hydropower* (中国农村水利水电), (10): 35-39
- Gu XS(顾夏声), Hu HY(胡洪营), Wen XH(文湘华), et al. 2006. *Water Treatment Biology* (水处理生物学) [M]. China

- Building Industry Press(中国建筑工业出版社),208—212
- Jiang XY(蒋鑫焱),Zhai J(翟建),Huang L(黄蕾),*et al.* 2006. Experimental study on enrichment of nitrogen and phosphorus in several hydrophytes(不同水生植物富集氮磷能力的试验研究)[J]. *Sci Environ Protec*(环境保护科学),**32**(6):13—16
- Jiang YR(蒋永荣),Mo DQ(莫德清),Duan JY(段钧元),*et al.* 2009. A comparison of treatment of sanitary wastewater in winter by different plants in constructed wetlands(不同植物配置人工湿地冬季生活污水净化效果比较)[J]. *Water Resour Protec*(水资源保护),**(3)**:25—28
- Li SY(李淑英),Zhou YQ(周元清),Hu C(胡承),*et al.* 2010. Water purification of rhizosphere microorganism in mosaic community of macrophytes(水生植物组合后根际微生物及水净化研究)[J]. *Environ Sci & Tech*(环境科学与技术),**33**(3):148—153
- Tian RN(田如男),Zhu M(朱敏),Sun XX(孙欣欣),*et al.* 2011. Nitrogen and phosphorus removal effects of different hydrophyte combinations under simulated eutrophic conditions(不同水生植物组合对水体氮磷去除效果的模拟研究)[J]. *J Beijing For Univ*(北京林业大学学报),**33**(6):191—195
- Xia HP(夏汉平). 2000. Uptake efficiency of *Vetiveria zizanioides* and *Althernanthera philoxeroides* to garbage leachates(香根草和水花生对垃圾污水中 N、P、Cl 的吸收效果)[J]. *Acta Phytocool Sin*(植物生态学报),**24**(5):613—616
- Xia HP(夏汉平). 2002. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetlands(人工湿地处理污水的机理与效率)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志),**21**(4):51—59
- Wang JL(王金丽),Yan XQ(颜秀勤),Ning B(宁冰),*et al.* 2011. Effect of floating-island plant on water purification(浮岛植物净化水质效果研究)[J]. *Environ Sci & Tech*(环境科学与技术),**34**(10):14—18
- Wang QH(王庆海),Duan LS(段留生),Li RH(李瑞华),*et al.* 2008. Comparison of nutrient uptake from rural domestic sewage of aquatic plants(几种水生植物净化能力比较)[J]. *Acta Agric Bor-Sin*(华北农学报),**23**(2):217—222
- Wang Z(王智),Zhang ZY(张志勇),Han YP(韩亚平),*et al.* 2012. Effects of large-area planting water hyacinth(*Eichhornia crassipes*) on water quality in the bay of Lake Dianchi(滇池湖湾大水域种养水葫芦对水质的影响分析)[J]. *Chin J Environ Engin*(环境工程学报),**6**(11):3 827—3 832
- Wang Z(王智),Zhang ZY(张志勇),Zhang JJ(张君倩),*et al.* 2013. Water quality effects of two aquatic macrophytes on eutrophic water Lake Dianchi Caohai(两种水生植物对滇池草海富营养化水体水质的影响)[J]. *Chin Environ Sci*(中国环境科学),**33**(2):328—335
- Yue WZ(岳维忠),Huang XP(黄小平),Sun CC(孙翠慈). 2007. Distribution and pollution of nitrogen and phosphorus in surface sediments from the pearl river estuary(珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价)[J]. *Oceanol Limnol Sin*(海洋与湖沼),**38**(2):111—116
- Zhu JK(朱建坤),Zhu WJ(竺维佳),Shi LD(施练东),*et al.* 2011. Effect of plant growth on source of drinking water(大型饮用水源水面植物生长效果应用研究)[J]. *Environ Sci & Tech*(环境科学与技术),**34**(2):125—128
- Zhang YY(庄源益),Dai SG(戴树桂),Zhang MS(张明顺). 1995. A preliminary study on factors influenced the volatilization of Ammonia from water(水中氨氮挥发因素探讨)[J]. *Environ Chem*(环境化学),**14**(4):343—346

(上接第 656 页 Continue from page 656)

- dron plants in hunan botanical garden(湖南省 4 种杜鹃属植物土壤特性分析)[J]. *J Cent S Univ For Technol*(中南林业科技大学学报),**31**(5):219—222
- Lu RK(鲁如坤). 2000. The analysis method of Soil Agricultural Chemistry(土壤农业化学分析方法)[M]. Beijing(北京):China Agriculture Scientific and Technical Press(中国农业科技出版社):168—169
- Nina Wurzburger, Ronald L. Hendrick. 2007. Rhododendron thickets alter N cycling and soil extracellular enzyme activities in southern Appalachian hardwood forests[J]. *Origin Res Art Pedobiol*,**6**(50):563—576
- Tang CQ. 2006. Forest vegetation as related to climate and soil conditions at varying altitudes on a humid subtropical mountain, Mount Emei,Sichuan,China [J]. *Ecol Res*,**21**(2):174—180
- Wang Z(王镇),Jing YF(荆永锋),Bai G(白刚),*et al.* 2011. The analysis of soil nutrients difference at different altitudinal and soil type in badong tobacco growing areas(巴东烟区不同海拔和类型土壤养分差异分析)[J]. *Chin Agric Sci Bull*(中国农学通报),**27**(29):251—256
- Yan F,Schubert S,Menge IK.1996. Soil pH changes during legume growth and application of plant material[J]. *Bio Fert Soils*,**23**(3):236—242
- Zha FS(查凤书),Feng JM(冯建孟). 2008. Spatial patterns of species diversity of *Rhododendron* in Yunnan,China(云南杜鹃属植物多样性的空间分布格局)[J]. *J Dali Univ*(大理学院学报:综合版),**7**(12):15—18
- Zhai HJ(翟红娟),Cui BS(崔保山),Zhao XS(赵欣胜),*et al.* 2006. Spatial variability and distribution of soil nutrient contents along different environmental gradients of yilong lake shore(异龙湖湖滨带不同环境梯度下土壤养分空间变异性)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报),**26**(1):61—69
- Zhu SR(朱三荣),Li DP(李大鹏),Tian F(田峰),*et al.* 2009. Fertility characters of tobacco planted soil at different altitudes in longshan county(龙山县不同海拔高度植烟土壤肥力特征研究)[J]. *Hunan Agric Sci*(湖南农业科学),**(11)**:52—53,56
- Zhang YD(张远东),Liu SR(刘世荣),Ma JM(马姜明). 2006. Water holding capacity of surface cover and soil of alpine and sub-alpine shrub in Western Sichuan,China(川西高山和亚高山灌丛的地被物及土壤持水性能)[J]. *Acta Eco Sic*(生态学报),**26**(9):2 775—2 782