

四种冬季水生植物组合对富营养化水体的净化效果*

汪秀芳^{1,2,*} 许开平¹ 叶碎高¹ 薛淋淋³ 刘贵华² 尤爱菊¹ 苏飞¹

(¹浙江省水利河口研究院, 杭州 310020; ²中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; ³厦门大学生命科学学院生态研究所, 福建厦门 361005)

摘要 选择 10 种耐低温的水生植物构建 4 种植物组合, 研究了冬季低温环境下不同水生植物组合对富营养化水体的净化效果。结果表明: 组合 1 (常绿水生鸢尾 (*Iris hexagonus* Hybrid) + 羊蹄 (*Rumex japonicus*) + 金叶“金钱蒲” (*Acorus gramineus* “Ogan”) + 反曲灯心草“蓝箭” (*Juncus inflexus* “Blue Arrows”)) 4 种植物均能在试验富营养化水体中茂盛生长, 且对 TN、NO_x-N、NH₄-N 和 TP 的去除率分别为 47.8%、52.2%、32.4% 和 70.1%; 组合 2 (常绿水生鸢尾 + 羊蹄 + 金叶“金钱蒲” + 大苞萱草 (*Hemerocallis middendorfi*)) 4 种植物也都能在试验富营养化水体中存活, 并且有一定量的生长, 对 TN、NO_x-N、NH₄-N 和 TP 的去除率分别为 44.2%、58.5%、34.6% 和 67.8%; 而未种植物的对照对 TN、NO_x-N、NH₄-N 和 TP 的去除率分别为 40.0%、25.9%、27.3% 和 64.5%; 组合 1 和 2 对富营养化水体有较好的净化效果。组合 3 和组合 4 中由于吊兰 (*Chlorophytum comosum*) 和三穗薹草 (*Carex tristachya*) 等植物长势较差, 仅对 NO_x-N 具有较明显去除能力, 对其他指标去除效果不明显。通过这些水生植物在富营养化水体中生长特性和对营养元素的去除能力, 发现冬季组合 1 和 2 的净化效果较好, 是低温条件下适宜的浮床植物组合形式。

关键词 植物修复; 脱氮除磷; 越冬; 浮床

中图分类号 Q948.8; X52 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)2-0401-06

Purification efficiency of four combinations of aquatic macrophytes on eutrophic water body in winter. WANG Xiu-fang^{1,2,*}, XU Kai-ping¹, YE Sui-gao¹, XUE Lin-lin³, LIU Gui-hua², YOU Ai-ju¹, SU Fei¹ (¹Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; ²Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; ³College of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 401-406.

Abstract: Ten species of low temperature-tolerant aquatic macrophytes were chosen to construct four combinations of aquatic macrophytes to study their purification efficiency on eutrophic water body in winter. In non-macrophyte treatment (CK), the removal efficiency of water total nitrogen (TN), nitrite nitrogen (NO_x-N), ammonium nitrogen (NH₄-N), and total phosphorus (TP) was 40.0%, 25.9%, 27.3%, and 64.5%, respectively. Combination 1 (*Iris hexagonus* Hybrid + *Rumex japonicas* + *Acorus gramineus* “Ogan” + *Juncus inflexus* “Blue Arrows”) grew luxuriantly in the test eutrophic water body, and performed best in decreasing water TN, NO_x-N, NH₄-N, and TP, with the removal efficiency being 47.8%, 52.2%, 32.4%, and 70.1%, respectively. Combination 2 (*I. hexagonus* Hybrid + *R. japonicas* + *A. gramineus* “Ogan” + *Hemerocallis middendorfi*) could survive and had definite growth amount in the test eutrophic water, and the removal efficiency of water TN, NO_x-N, NH₄-N, and TP was 44.2%, 58.5%, 34.6% and 67.8%, respectively. In contrast, both the combination 3 (*R. japonicas* + *Lolium perenne* + *Chlorophytum comosum* + *Juncus pallidus* R. Br. “Javelin”) and the combination 4 (*R. japonicas* + *L. perenne* + *C. comosum* + *Carex tristachya*) only had an obvious efficiency in removing NO_x-N but less efficiency in removing TN, NH₄-N, and TP, due to the poor growth of

* 国家自然科学基金项目(50809063)资助。

** 通讯作者 E-mail: wxfhongan@126.com

收稿日期: 2012-08-31 接受日期: 2012-11-29

C. comosum and *C. tristachya*. It was suggested that combinations 1 and 2 had better purification efficiency on eutrophic water body, being the suitable combination forms of aquatic macrophytes floating-bed under low temperature in winter.

Key words: phytoremediation; nitrogen and phosphorus removal; overwintering; floating-bed.

目前,氮磷超标引起的水体富营养化是普遍面临的问题(Fox *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2010)。大量研究显示,利用植物修复富营养化水体是一项效果好、投资省又不存在二次污染的好方法,受到国内外的广泛关注(Schnoor *et al.*, 1995; Li *et al.*, 2008)。近年来,利用植物塘、人工湿地(吴振斌等, 2001)以及水生植物(李文朝, 1997)和陆生植物浮床(刘淑媛等, 1999; 司友斌等, 2003)等植物修复技术,治理富营养化水体已取得一定的效果。然而,已有的植物修复富营养化水体的研究基本上都是在常温环境下进行的,冬季低温环境下浮床植物净化效果研究较少,因为冬季低温环境下大部分植物枯死或休眠,水生植物塘、人工湿地及植物浮床系统在低温环境下处理效率相对也较低(王国祥等, 1999)。仅有少数低温环境下的报道多为研究单一植物的试验效果(王超等, 2007; 周小平等, 2007),利用植物组合处理冬季富营养化水体的研究罕见报道。事实上,不同植物对营养盐的吸收和水体净化效果差异较大,同一种植物可能对水质中某一指标去除效果较好,而对其他指标的效果相对较差,如童昌华等(2003)研究显示,金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)对提高水体透明度的效果既好又快,但在吸收TN、TP、NO_x-N等方面效果差些,狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)在吸收TN、TP及NO_x-N方面效果好,但对降低COD及提高DO方面不理想。单一植物很难起到全面去除各种污染指标的作用,按照不同植物生长特性和吸收营养物质能力以及季节的差异性,合理搭配植物,注重植物组合的景观和生态功能方面的持续性,才可能使植物修复技术常年不间断发挥良好的净化能力。本研究利用10种耐低温水生植物构建4种组合形式,对富营养化水体进行修复试验,研究低温季节不同水生植物组合对富营养化水体中氮和磷去除效果的影响,筛选出适宜长三角地区冬季低温环境下对富营养化水体修复的植物组合形式,以促进植物修复技术进一步的推广应用。

1 材料与方 法

试验区位于浙江省杭州市萧山区(30°09'N,

120°16'E),浙江省水利河口研究院江东南水环境试验基地。在基地西北角修建了一块60 m×11 m水生植物修复试验区,包括1个20 m×11 m的水生植物培育区和15个长4 m、宽1 m、深0.8 m的混凝土水池。试验用水取自当地内河(南垅流化横河),从内河抽水到沉淀池初步沉淀,在沉淀池出口处放置活性炭过滤后注入试验水池,经测定水中各种营养元素的平均浓度为:TN 22.47±2.46 mg·L⁻¹、NO_x-N 2.34±0.04 mg·L⁻¹、NH₄-N 2.69±0.40 mg·L⁻¹、TP 0.28±0.07 mg·L⁻¹,处于超富营养化状态。

2011年12月中旬,从杭州市郊的池塘水边和杭州天景水生植物苗圃采集或购买长势一致的植物幼苗,将这些幼苗放入盛自来水的塑料桶中预培养1周,然后选取大小基本一致的植株用于本试验,试验前仔细清洗植物根部,以避免带入泥土和杂草等其他物质。收集的耐低温植物共14种。综合考虑植物的生长特性,包括高度、叶形、生物量、开花性状、生长的季节性,从收集的14种植物中挑选出10种(表1),按照高与低、阔叶与条形叶、开花与不开花的植物相互搭配等原则组合,尽量增加组合内植物生长在时间和空间上的衔接性和持续性,以期兼顾净化能力和景观观赏性,植物组合配置情况。

组合1:常绿水生鸢尾+羊蹄+金叶“金钱蒲”+反曲灯心草“蓝箭”;

组合2:常绿水生鸢尾+羊蹄+金叶“金钱蒲”+大苞萱草;

组合3:毛茛+黑麦草+吊兰+苍白灯心草“标枪”;

组合4:毛茛+黑麦草+吊兰+三穗薹草。

试验植物采用泡沫浮床栽培,试验布置如图1。

试验期间对各处理水体定期取样观测,并详细观察记录池内水生植物生长状况。取样频率为每周1次,在各池中心位置用采水器采集距表面10 cm的表层水样进行测定。由于试验在露天情况下进行,试验期间降雨中的营养物质可能会对试验结果产生干扰,因此对雨水进行了收集测定。根据浙江省杭州市汛情发布系统公布,萧山东站的降雨情况是2011年12月28日—31日降雨0次,2012年1月

表1 供试植物及相关特征

Table 1 Experiment plants and their related characters

| 名称及拉丁名 | 科名 | 主要性状 | 抗寒耐热能力 | 传统用途 |
|---|------|-----------------------------------|---------------------|---------|
| 常绿水生鸢尾 <i>Iris hexagonus</i> Hybrid | 鸢尾科 | 多年生,常绿,条形叶,高50~60 cm,4—5月开花 | 抗寒力极强,夏季高温时处半休眠状态 | 观赏 |
| 羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> | 蓼科 | 多年生,常绿,阔叶,高50~60 cm,花期4—5月 | 耐严寒,高温条件下生长不良 | 根入药 |
| 金叶“金钱蒲” <i>Acorus gramineus</i> “Ogan” | 菖蒲科 | 多年生,常绿,条形叶,高50~60 cm,4—5月开花 | 稍耐寒,长三角地区可露地过冬 | 观赏,根茎入药 |
| 反曲灯心草“蓝箭” <i>Juncus inflexus</i> L. “Blue Arrows” | 灯心草科 | 多年生,常绿,条形叶,高40~100 cm,花期5—6月 | 抗寒性强,能承受气温的剧烈变化 | 观赏 |
| 苍白灯心草“标枪” <i>Juncus pallidus</i> R. Br. “Javelin” | 灯心草科 | 多年生,常绿,条形叶,株高可达150 cm,花期5—6月 | 抗寒性强,能适应气温变化 | 观赏 |
| 大苞萱草 <i>Hemerocallis middendorffii</i> | 萱草科 | 多年生,常绿,条形叶,叶长50~80 cm,5月开花 | 较强的耐寒能力 | 观赏,根入药 |
| 毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i> | 毛茛科 | 多年生,常绿,高30~60 cm,阔叶,花期3—5月 | 日温在25℃左右生长最好 | 全草药用 |
| 黑麦草 <i>Lolium perenne</i> | 禾本科 | 多年生,常绿,叶线形,高30~90 cm,花期3—5月 | 春、秋季生长繁茂,夏季不能生长 | 观赏,牧草 |
| 吊兰 <i>Chlorophytum comosum</i> | 百合科 | 多年生,常绿,叶剑形,长10~30 cm,花期4—6月 | 最适温度为15~25℃,越冬温度为5℃ | 观赏,全草药用 |
| 三穗藎草 <i>Carex tristachya</i> | 莎草科 | 多年生,常绿,茎三棱形,叶线形,高20~45 cm,花果期3—5月 | 能适应低温条件,夏天不能生长 | 观赏 |

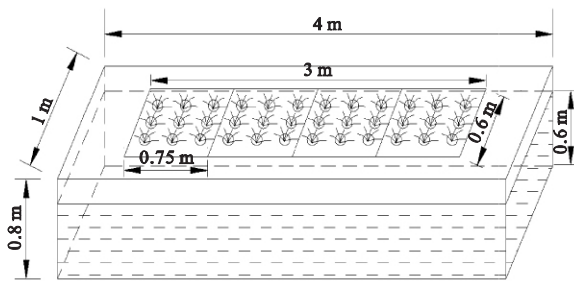


图1 试验布置示意图

Fig. 1 Experimental design

降雨11次、小雪2次,2月降雨18次,3月截至20日降雨15次。利用口径为45 cm的塑料桶收集降雨,一天内收集到的雨水达到400 mL以上的水样进行水质测定,共14次。另外,2月28日和3月6日由于连续强降雨,水池水深过高,进行了2次排水,排水量通过排水前后的水深差与水池的面积计算,排水安排在正常取样的时间,排水的水质参照当天取样的水质。各处理水样、雨水和排水的测定指标均为TN、NO_x-N、NH₄-N、TP,试验仪器为荷兰Skalar公司的SA-4000型N、P流动分析仪等仪器。在计算植物组合对水体N、P的去除率时,以池为单位减去雨水带入的N、P总量,加上排水排出的N、P总量,见公式(1),以反映自然环境下植物组合对N、P的真实去除效果。数据分析通过SPSS 16.0重复测量方差分析实现。

$$P = \left(C_{\text{初始}} \cdot S_{\text{水池}} \cdot H_{\text{初始}} + \sum C_{\text{降雨}} \cdot S_{\text{水池}} \cdot H_{\text{降雨}} - \sum C_{\text{排水}} \cdot S_{\text{水池}} \cdot H_{\text{排水}} \right) / \left(C_{\text{初始}} \cdot S_{\text{水池}} \cdot H_{\text{初始}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中 P 为去除率, C 为浓度, H 为水深或降雨量, S 为面积。

2 结果与分析

2.1 植物生长情况

试验在2011年12月28日—2012年3月20日进行,经过为期84 d的试验处理后,供试的10种植物在低温的富营养化水体中基本都能存活。从试验开始到2月底,尽管在1月出现2次雨雪天气,气温早晚降至零度以下,表面水体结薄冰,10种植物绝大部分仍保持存活状态,但植物生长状况存在较大差异。其中毛茛、羊蹄和黑麦草长势最好,叶片鲜绿,有新芽长出,高度增加明显;其次为常绿水生鸢尾、反曲灯心草“蓝箭”、苍白灯心草“标枪”和金叶“金钱蒲”,虽部分叶尖枯萎,但仍有少量新芽萌发,高度也有所增加;而大苞萱草基本停止生长,不过叶片总体上仍保持绿色状态;生长最差的三穗藎草和吊兰表现为部分出现枯黄和腐烂现象。

进入3月份,气温升高,毛茛迅速生长至成体状态,并逐渐开花;2种灯心草均快速生长,其中苍白灯心草“标枪”虽然植株高大,但分蘖数不多,一株产生2~3颗新芽,反曲灯心草“蓝箭”每株产生10

个左右新芽;羊蹄新叶茂盛,并且叶片数量和面积远大于冬季,大量白根也逐渐变老转黄;黑麦草叶片由红转绿,有少量分蘖;常绿水生鸢尾长出新苗,叶片绿色加深;大苞萱草开始长出新叶,吊兰也长出了一些新芽。

2.2 降雨情况

试验期间总降雨量为 386.8 mm,不同时期降雨的水质差异较大,14 次降雨中营养物质平均浓度为:TN $7.96 \pm 2.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ $0.70 \pm 0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ $0.90 \pm 0.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP $0.24 \pm 0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。降水浓度与试验用水初始浓度(具体值见材料与方)相比较低,但高于试验处理后水体中营养物质的浓度,在所有组合处理的试验水体中 TN、 $\text{NO}_x\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TP 最低浓度分别降至 6.85 ± 0.22 、 0.56 ± 0.21 、 1.50 ± 0.06 和 $0.05 \pm 0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。单个水池中各指标的雨水负荷计算公式为 $W = \sum S_{\text{水池}} \cdot H_{\text{降雨}} \cdot C_{\text{降雨}}$ (式中: S 为水池面积, H 为降雨量, C 为降雨浓度),单个水池各指标的负荷达 TN $12.32 \pm 3.56 \text{ g}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ $1.08 \pm 0.87 \text{ g}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ $1.39 \pm 1.32 \text{ g}$ 和 TP $0.37 \pm 0.24 \text{ g}$,因此,不能忽略降雨对试验造成的影响。据此推测,降雨对自然水体带来的污染也是比较严重的。

2.3 对营养盐的去除效果

试验用水注入水池,植物浮床布置好后,于 12 月 28 日对各池水质进行了一次测定,作为各处理的初始浓度。各池水体中营养元素各指标略有分化,但差别不大。试验一直持续到 3 月 20 日,期间每周采集水样测定一次,不同植物组合对水质几个指标的影响各不相同。

2.3.1 TN 的变化

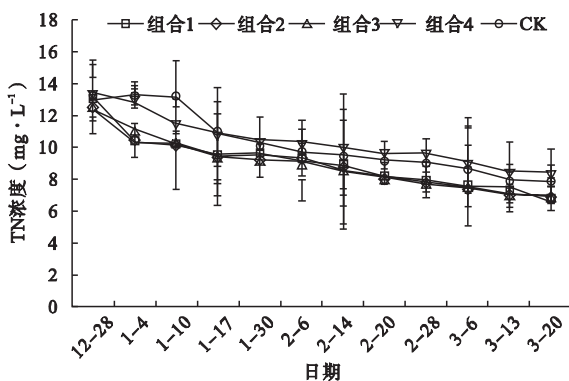


图2 4种水生植物组合对 TN 的去除效果
Fig.2 Removal efficiency of TN by four hydrophyte combinations

间的延长,各处理 TN 浓度均有不同程度下降,组合 1、2、3 处理的水体 TN 浓度始终低于对照组,而组合 4 的 TN 浓度曲线则大部分时间在对照之上,去除 TN 效果较差。比较分析 4 个植物组合最终对 TN 的去除率发现,经过 84 d 的处理后,对照池水体中 TN 的平均浓度从 $14.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $7.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率为 40.0%;组合 1 和 2 对 TN 的去除率分别为 47.8% 和 44.2%,均显著高于对照无植物处理组 ($P < 0.05$),去除能力分别为对照的 1.20 倍和 1.11 倍。组合 3 和 4 对水体中 TN 的去除率分别为 43.0% 和 37.9%,与空白对照的去除效果差异不明显 ($P > 0.05$)。

2.3.2 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的变化 图 3 显示 4 种植物组合和对照处理的水体中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度均有较大幅度的下降,其中组合 1、2 浓度曲线一直远低于对照曲线,对 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的去除效果较好,组合 3 处理的水体 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的浓度也低于对照,但不如组合 1、2 显著,而组合 4 的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度与对照比较接近。处理结束时,组合 1、2、3 和 4 对水体中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的去除率分别为 52.2%、58.5%、34.1% 和 31.1%,分别为对照去除率 (25.9%) 的 2.02 倍、2.26 倍、1.32 倍和 1.20 倍。4 种植物组合对 $\text{NO}_x\text{-N}$ 均具有较高的去除能力,明显高于对照 ($P < 0.05$)。组合 3 和 4 对 $\text{NO}_x\text{-N}$ 去除能力不及组合 1 和 2 ($P < 0.05$)。

2.3.3 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的变化 从图 4 可以看出,对照和几种植物组合处理的水体中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度均有所降低,但最终浓度均在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,仍处于较高水平,可见水体对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的自净能力和植物组合对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的处理能力均有限。组合 1、2、3、4 和对照对水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率分别为 32.4%、34.6%、

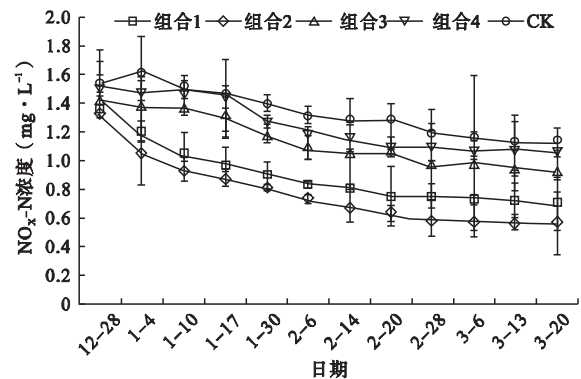


图3 4种水生植物组合对 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的去除效果
Fig.3 Removal efficiency of $\text{NO}_x\text{-N}$ by four hydrophyte combinations

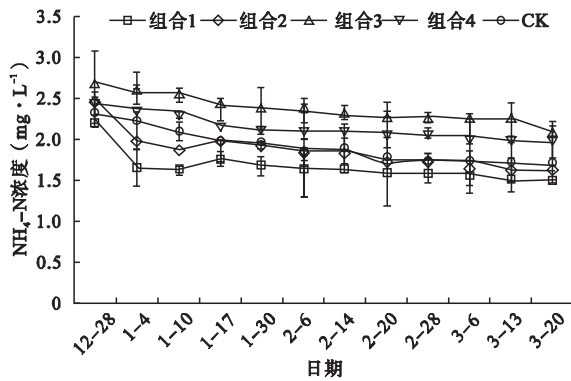


图4 4种水生植物组合对NH₄-N的去除效果
Fig. 4 Removal efficiency of NH₄-N by four hydrophyte combinations

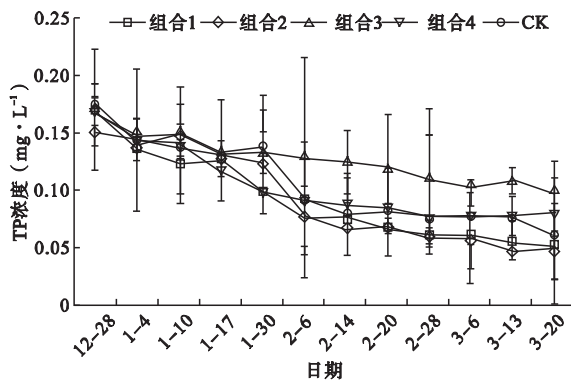


图5 4种水生植物组合对TP的去除效果
Fig. 5 Removal efficiency of TP by four hydrophyte combinations

21.4%、19.1%和27.2%。其中组合1和2的去除能力高于对照($P < 0.05$)，组合3和4处理对水体中NH₄-N的去除能力较差，最终浓度甚至高于对照。

2.3.4 TP的变化 从图5可以看出，各处理TP浓度在试验初期下降较快，后期可能由于浓度已较低，呈平缓下降趋势，其中组合1和2多次取样时测定的浓度均低于对照，而组合4的TP浓度与对照十分接近，组合3处理的水体中TP浓度下降较少，后期浓度甚至高于对照。比较组合1、2、3、4和对照的最终去除率发现，经过84 d的处理后，它们对TP的去除率分别70.1%、67.8%、42.4%、53.2%和64.5%。组合1、2与对照差异显著($P < 0.05$)，对TP去除能力较强，而组合4相对对照没有明显的去除优势($P > 0.05$)，组合3效果较差，去除率甚至低于空白对照($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

在为期84 d的试验结束时，组合1(常绿水生鸞

尾+羊蹄+金叶“金钱蒲”+反曲灯心草“蓝箭”)4种植物都生长良好，对TN、NO_x-N、NH₄-N和TP均有较好去除效果，去除率分别为47.8%、52.2%、32.4%和70.1%；组合2(常绿水生鸞尾+羊蹄+金叶“金钱蒲”+大苞萱草)对TN、NO_x-N、NH₄-N和TP的去除效果也较好，分别为44.2%、58.5%、34.6%和67.8%，其中其他植物生长良好，而大苞萱草虽保持常绿，但生长量较少；组合3和4由于部分植物生长状态不佳，仅对NO_x-N具有一定的去除能力，且对NO_x-N的去除率低于组合1和组合2。

研究发现，低温环境下，植物生长状况好的组合对富营养化水体的净化能力强，对TN、TP、NH₄-N和NO_x-N等均有较好的净化效果，其中对NO_x-N的处理效果最好，而对NH₄-N的处理则相对较差，这与董昌华等(2003)的研究一致，一方面是由于植物本身对NO_x-N的吸收偏好，对NH₄-N的利用能力相对较差，另一方面可能与低温导致对NH₄-N去除能力影响较大的微生物活动下降有关(Wen & Recknagel 2002)。周小平等(2007)报道，黑麦草等植物浮床系统对富营养化水体中TN和TP的去除率分别在50%和60%左右，TN去除率比本研究低，而TP去除能力高于本试验。刘淑媛等(1999)研究显示，多花黑麦草(*L. multiflorum* Lam.)对富营养化水体的TN和TP去除率分别高达80%和90%，均高于本试验，这可能与其试验中水体TN和TP原始浓度较高(分别为11.55和1.59 mg·L⁻¹)有关。

冬季植物及其组合对水体有一定的净化作用，但相比夏季效果仍存在一定差距。董昌华等(2003, 2004)报道夏季微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)对水中TN、TP和NO_x-N的去除效率分别为77.54%、90.65%和91.7%，冬季分别为71.5%、70.4%和84.5%。李文朝(1997)、王超等(2007)和李金中等(2011)的研究也显示了相似的结果。这一方面是由于温度高，植物代谢迅速，吸收能力更强(高冲等, 2008)，另一方面也可能与低温导致微生物的活动下降有关(Wen & Recknagel, 2002)。另外，李寒娥等(2006)研究表明，夏季凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、大藻(*Pistia stratiotes*)和水龙(*Ludwigia adscendens*)两种或两种以上的植物组合对TN的去除能力比单独任何一种植物强；而在冬季各组合没有呈现明显的优势，以单独生长的凤眼莲对TN的去除能力最好。这可能是由于大部分植物在夏季均生长旺盛，各种植物对不同指标的吸

收差异可以形成优势互补(徐希真等 2012; 张培丽等 2012) ,因此总体效果较好 ,而在冬季不同的植物生长状态相差很大 ,少数生长较好的植物净化效果好 ,其他植物效果不佳 ,甚至腐烂造成负作用 ,因此冬季植物修复时植物种类及其组合的选择更为重要。

从植物生长特性、景观效果和生态效应等方面综合考量 ,在冬季富营养化水体植物修复中可优先考虑组合 1(常绿水生鸢尾+羊蹄+金叶“金钱蒲”+反曲灯心草“蓝箭”)和组合 2(常绿水生鸢尾+羊蹄+金叶“金钱蒲”+大苞萱草) ,它们具有能在冬季正常生长、景观效果好、对营养物质去除率较高且稳定等优点 ,是低温环境下适宜的浮床系统植物组合形式。本研究结论对长三角及类似气候带地区冬季乃至全年富营养化水体的植物修复具有一定的指导意义 ,但本研究只是相对稳定环境中的短期试验 ,在实际应用时还需对其进行进一步观察。

参考文献

- 高 冲,杨肖娥,向律成,等. 2008. pH 和温度对薹苳植物床去除富营养化水中氮磷的影响. 农业环境科学学报, 27(4): 1495-1500.
- 李寒娥,李秉滔,黄耀丽,等. 2006. 漂浮植物净化污水试验研究. 水处理技术, 32(8): 46-49.
- 李金中,李学菊,刘学功,等. 2011. 人工沉床技术在城市景观河道中的应用及其对总磷去除效果研究. 环境科学, 32(5): 1279-1284.
- 李文朝. 1997. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究. 中国环境科学, 17(1): 53-57.
- 刘淑媛,任长久,由文辉. 1999. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究. 北京大学学报(自然科学版), 35(4): 518-522.
- 司友斌,包军杰,曹德菊,等. 2003. 香根草对富营养化水体净化效果研究. 应用生态学报, 14(2): 277-279.
- 董昌华,杨肖娥,濮培民. 2003. 低温季节水生植物对污染水体的净化效果研究. 水土保持学报, 17(2): 159-162.
- 董昌华,杨肖娥,濮培民. 2004. 富营养化水体的水生植物净化试验研究. 应用生态学报, 15(8): 1447-1450.
- 王 超,张文明,王沛芳,等. 2007. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究. 环境科学, 28(5): 975-981.
- 王国祥,濮培民,张圣照,等. 1999. 冬季水生高等植物对富营养化湖水的净化作用. 中国环境科学, 19(2): 106-109.
- 吴振斌,邱东茹,贺 锋,等. 2001. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究. 武汉植物学研究, 19(4): 299-303.
- 徐希真,黄承才,徐青山,等. 2012. 模拟人工湿地中植物多样性配置对硝态氮去除的影响. 生态学杂志, 31(5): 1150-1156.
- 张培丽,陈正新,裘 知,等. 2012. 模拟人工湿地中植物多样性对铵态氮去除的影响. 生态学杂志, 31(5): 1157-1164.
- 周小平,徐晓峰,王建国,等. 2007. 3种植物浮床对冬季富营养化水体氮磷的去除效果研究. 中国生态农业学报, 15(4): 102-104.
- Fox LJ, Struik PC, Appleton BL, et al. 2008. Nitrogen phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). *Water, Air, and Soil Pollution*, 194: 199-207.
- Li EH, Li W, Liu GH, et al. 2008. The effect of different submerged macrophyte species and biomass on sediment resuspension in a shallow freshwater lake. *Aquatic Botany*, 88: 121-126.
- Wen L, Recknagel F. 2002. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: Preliminary results from growth chamber experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90: 9-15.
- Lu Q, He ZL, Graetz DA, et al. 2010. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 17: 84-96.
- Schnoor JL, Licht LA, McCutcheon SC, et al. 1995. Phytoremediation of organic and nutrient contaminations. *Environmental Science and Technology*, 29: 318-323.

作者简介 汪秀芳,女,1980年生,博士后。主要从事湿地生态学与水环境方向研究。E-mail: wxfhongan@126.com
责任编辑 王 伟