

文章编号: 1674 - 5566(2012)01 - 0073 - 05

## 冬季苦草与伊乐藻对贡湖水源地水质净化效果研究

王阳阳<sup>1,2</sup>, 吴海龙<sup>1,2</sup>, 霍元子<sup>1,2</sup>, 曲宪成<sup>1,2</sup>, 陈群芳<sup>1,2</sup>, 何培民<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 2009年11月5日至25日在苏州太湖贡湖水源地入湖河道东泾河内设置了10个大型路基围隔, 栽植较耐寒沉水植物苦草(*Vallisneria spiralis*)和伊乐藻(*Elodea canadensis*), 研究了其在冬季低温条件下的净水效果。结果表明: (1) 栽种沉水植物的围隔内氨氮、硝酸盐氮和总氮浓度均显著低于实验前( $P < 0.01$ ), 其中苦草实验组氨氮、硝酸盐氮和总氮浓度分别为实验前的78.76%、70.20%和83.42%, 伊乐藻实验组分别为实验前的81.85%、72.30%、75.55%, 苦草+伊乐藻实验组分别为实验前的88.80%、78.80%、86.21%, 而空白对照组与围隔外水质氮素浓度变化幅度较小, 总氮浓度分别降低37.12%和15.87%; (2) 苦草+伊乐藻实验组对总磷和 $COD_{Mn}$ 的去除效率显著高于其他围隔( $P < 0.01$ ), 分别为86.97%和76.16%; (3) 经驯化后的苦草和伊乐藻在冬季有较好的净化水质效果且净化效果为苦草+伊乐藻 > 苦草 > 伊乐藻, 为冬季湖泊生态修复中沉水植被的恢复, 种类的选取及合理配置提供了理论依据。

**研究亮点:** 沉水植被的恢复已成为现代水体生态系统构建及生态修复工程中的关键技术。在沉水植被的恢复中, 由于大多数沉水植物存在季节性的限制, 在冬季低温条件下表现出较低的生态特性。本研究表明经试验基地耐寒性驯化的苦草和伊乐藻在冬季低温条件下具有一定的氮磷吸收能力, 其中两种沉水植物搭配种植对富营养化河道水质具有很好净化效果, 一个月围隔内 $NH_4-N$ 、 $NO_3-N$ 、TN、TP、 $COD_{Mn}$ 浓度均显著低于对照区和实验前。采用野外原位围隔实验手段, 较实验室可控条件下的水生植物氮磷吸收特性研究能更接近自然水体中的植物对水质的影响。

**关键词:** 苦草; 伊乐藻; 路基围隔; 净化效果  
**中图分类号:** P 342  
**文献标志码:** A

近年来, 富营养化已成为我国水域环境中最为突出、最为普遍的问题之一<sup>[1]</sup>。国内外的研究表明, 营养元素特别是氮和磷的增多是引起蓝藻水华的主要原因<sup>[2-3]</sup>。通过改变食物网结构达到控制富营养化水体藻类数量成为新的研究热点<sup>[4]</sup>。

贡湖水源地位于苏州市高新区西部临湖地带, 为苏州市白洋湾水厂和相城水厂提供原水。受太湖富营养化和水污染的影响, 近年来贡湖水体氮磷浓度与藻类含量呈快速上升趋势, 湖区水

生植被明显退化, 水体自净能力下降。水生植被恢复已经作为浅水富营养湖泊生态调控和内源污染负荷控制的重要手段<sup>[5]</sup>, 其中沉水植物更是起到了不可替代的作用。段国华等<sup>[6]</sup>对大淀湖及周边水系实施综合整治工程, 合理选择大型水生植物和水生动物并配合景观要素, 取得了较好的水质净化效果。然而由于受到水生植物种植季节以及水生动物放养水温的限制, 水质的长效稳定还需建立更加完善的生态系统和进行长期的维护。已有的对沉水植物净化效果的研究多

收稿日期: 2011-03-18 修回日期: 2011-06-13

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大项目(2008ZX07101-012); 上海市科学技术委员会重点科技攻关项目(09391912000); 上海市科学技术委员会应用基础研究项目(09DZ1200903); 上海市水生生物学重点学科建设项目(S30701); 上海海洋大学博士启动基金(B-8201-08-0285)

**作者简介:** 王阳阳(1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水域环境生态修复研究。E-mail: wangyang0121@hotmail.com

**通讯作者:** 何培民, E-mail: pmhe@shou.edu.cn

选择植物生长的室温条件,冬季寒冷季节沉水植被的恢复效果相对较差,故对其净化效果的研究较少。本实验选择沉水植物苦草和伊乐藻,经实验基地驯化培养后对其在冬季低温条件下的净水效果进行研究,为今后寒冷季节沉水植物恢复工程中沉水植物的选择和合理配置提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与实验材料

实验设在苏州贡湖水源地入湖河道东泾河内(图1)。该河道水体污染较为严重,冬季水质各项指标均较高,水质总体为IV类水,局部为V类。实验材料苦草、伊乐藻为2009年9月采自上海临港实验基地的经驯化培养的耐寒种,实验围隔以竹桩固定,以不透水的聚乙烯塑料薄膜封闭,底部压至河道底泥中,围隔内为河道内河水。



图1 实验区位置示意图

Fig.1 Location of the experimental area

### 1.2 实验设计

本实验共设10个2 m×3 m的围隔,围隔设置如图2所示,其中A:苦草,B:伊乐藻,C:苦草+伊乐藻,D:空白对照,E:围隔外。实验在2009年11月5日开始,11月25日结束,每隔5 d采样一次,监测水中营养盐浓度变化。实验水温低于10℃。

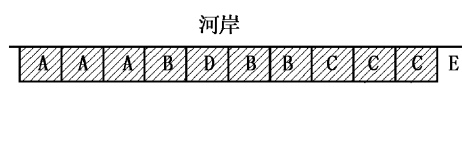


图2 围隔位置示意图

Fig.2 Locations of the ten mesocosms

### 1.3 监测项目与方法

在每个围隔采集表层水样(深度小于0.5

m),采集后立即用0.45 μm的滤膜进行现场减压过滤,低温运回实验室进行硝酸盐氮(NO<sub>3</sub>-N)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)的测定。其他指标TP、TN、COD<sub>Mn</sub>的测定无需过滤水样,所有指标均按照国家地表水质量标准GB3838-2002进行测定。

### 1.4 数据分析与水质评价

根据监测数据,计算平均值、标准差,采用SPSS 13.0软件中单因子方差(ANOVA)及Duncan多重比较对各实验结果进行差异显著性检验和分析。

参照《国家地表水环境质量标准GB 3838—2002》对监测数据进行水质评价。

## 2 结果

### 2.1 各围隔内与围隔外水体中氮浓度的变化情况

图3-图5表明,栽种沉水植物的围隔内氨氮、硝酸盐氮和总氮浓度均显著低于实验前( $P < 0.01$ ),其中苦草围隔内分别降低为实验前的78.76%、70.20%、83.42%;伊乐藻围隔内分别降低为实验前的81.85%、72.30%、75.55%;苦草+伊乐藻围隔内分别降低为实验前的88.80%、78.80%、86.21%。对氨氮和硝酸盐氮的去除在实验的5~10 d效果较明显,而对总氮的去除则在20 d后有较明显效果。空白对照组与围隔外水质氮素浓度变化幅度较小,TN浓度分别降低37.12%和15.87%。实验第5天,苦草与空白对照组,空白对照组与苦草+伊乐藻混合组之间氨氮浓度差异不显著( $P > 0.05$ ),三组有沉水植物种植的实验组之间TN浓度差异也不显著( $P > 0.05$ ),而围隔外氨氮及TN浓度显著高于其他实验组( $P < 0.05$ );20 d后,空白组与围隔外氨氮及TN浓度显著高于其他实验组( $P < 0.05$ )。围隔外和空白对照组硝酸盐氮也呈现下降趋势,但仍显著高于其他实验组( $P < 0.05$ )。

### 2.2 各围隔内与围隔外水体中TP浓度的变化情况

图6表明,空白组与围隔外实验前后总磷浓度变化不大,仅降低29.16%和25.25%。苦草围隔内TP较实验前降低63.60%,伊乐藻围隔内总磷浓度较实验前降低70.63%,而两种植物混合种植的围隔内总磷浓度降低86.97%,净化效率显著高于其他围隔( $P < 0.01$ ),其中苦草+伊乐

藻实验组的 TP 浓度在实验的各个阶段都显著低于其他实验组 ( $P < 0.05$ ), 苦草组与伊乐藻组差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

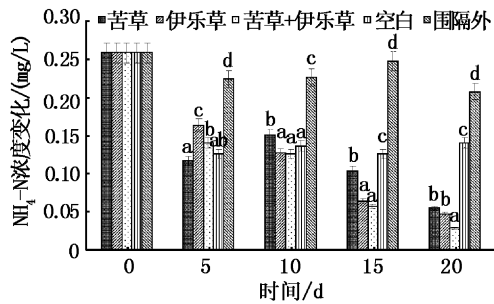


图 3 各围隔及围隔外氨态氮浓度

Fig. 3  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentrations of the inner mesocosms and outer mesocosms

a, b, c, d 代表同一时期不同处理间的显著性差异; 标注字母不同者之间表示存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

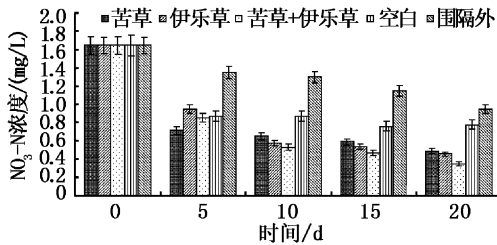


图 4 各围隔及围隔外硝态氮浓度

Fig. 4  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations of the inner mesocosms and outer mesocosms

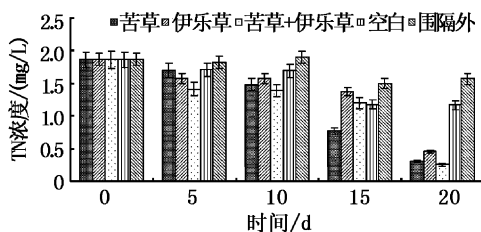


图 5 各围隔及围隔外总氮浓度

Fig. 5 TN concentrations of the inner mesocosms and outer mesocosms

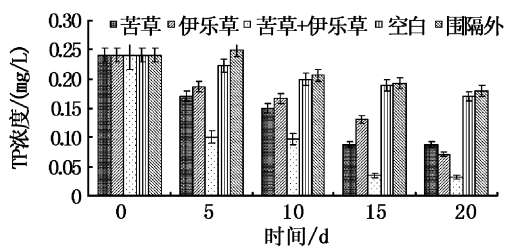


图 6 各围隔及围隔外总磷浓度

Fig. 6 TP concentrations of the inner mesocosms and outer mesocosms

### 2.3 各围隔内与围隔外水体中 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度的变化情况

图 7 显示, 实验进行 5 d 时, 各实验组之间  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 10 d 后, 苦草组显著低于其他实验组 ( $P < 0.05$ )。苦草 + 伊乐藻混合种植的围隔与种植伊乐藻围隔内  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度降低速率相当, 分别降低了 76.16% 和 77.08%, 显著高于其他围隔 ( $P < 0.01$ ); 苦草围隔  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度降低 68.09%, 空白组与围隔外相比,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度差异不大, 且围隔外  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度较实验前未明显变化。

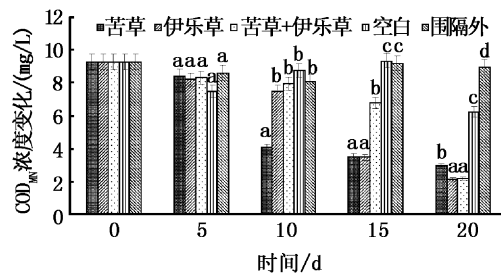


图 7 各围隔及围隔外  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度

Fig. 7  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  concentrations of the inner mesocosms and outer mesocosms

a, b, c, d 代表同一时期不同处理间的显著性差异; 标注字母不同者之间表示存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

本实验研究了低温条件下经耐寒性驯化培养的苦草和伊乐藻对围隔内氮、磷等营养盐及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度变化的影响。结果表明低温季节, 实验苦草和伊乐藻对富营养化水体中的氨氮、硝氮、总氮及总磷都有一定的去除能力, 且去除率高于对照组 80% 左右, 苦草对氮、磷的吸收能力高于伊乐藻。有沉水植物栽培的围隔内  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度下降显著, 可见在秋冬季节, 此两种沉水植物仍具有较高的改善水环境能力。

实验期间, 水体的自净能力常常受到水流、紫外线及浮游植物数量的影响。由于围隔外存在一定的水体流动, 对污染仍有一定的稀释作用, 这可能是围隔外水体营养盐浓度有小幅降低的原因之一。恢复以沉水植物为主的水生植被, 可以有效地降低氮、磷营养盐的循环速度, 控制浮游植物过度增长。对苦草和伊乐藻野外生态围隔沉水植物恢复试验发现, 在植被恢复后围隔

水体自净能力可大大加强<sup>[7]</sup>。吴振斌等<sup>[8]</sup>也通过建立大型实验围隔系统对武汉东湖的富营养化水体进行治理。结果表明,水生植物围隔 COD<sub>Cr</sub>和 BOD 一般分别为 20 mg/L 和 51 mg/L 左右,对照围隔和太湖水体则分别约为 40 mg/L 和 10 mg/L。

本实验中沉水植物对总氮的去除效果较氨氮和硝酸盐氮好,监测开始阶段(5~10 d),沉水植物围隔内氨氮下降,这主要是因为水体中大部分氨氮通过硝化作用和反硝化作用的连续反应而去除<sup>[9]</sup>,这种反应过程会增加水体中的硝氮,从而使总氮下降幅度变小。试验后期,植物对总氮的吸收率逐渐高于氨氮,主要是由于随着氨氮的下降并趋于稳定后,氨氮转变为硝氮的量减少,植物开始以吸收硝酸盐氮为主,从而不断降低水体中的总氮浓度。苦草和伊乐藻对硝氮的去除效果也较明显。周婕和曾诚<sup>[10]</sup>研究表明,因为水生植物优先吸收硝态氮,同时由于硝态氮是氮循环中微生物等作用的直接底物,是最活跃的氮形式,可以通过反硝化的过程被去除。对不同形态氮的去除,不同研究得出了不同的结论,故有待于进一步探讨。

在天然富营养化条件下,磷元素多因其易于沉积而成为浮游植物生长的限制因子,也成为难以去除的营养物质<sup>[11]</sup>。磷极易被底部基质吸附,这可能是试验开始几天总磷浓度大幅度降低的原因,但下降到一定值后也有少量磷会逐渐从地质中被释放出来<sup>[12]</sup>。这与围隔内观测到的总磷变化情况一致。富营养化水体的底泥或沉积物中存在着一系列具有交换吸附能力的成分,这些成分在金属、有毒有机物以及营养性污染物等的迁移变化中,起着极为重要的作用<sup>[13-16]</sup>。通过图表的比较可以看出苦草和伊乐藻对氮的去除能力强于对磷的去除能力。已有的研究表明,植物摄取对总磷的去除率只有 1%~3%,微生物同化作用为 50%~65%,其余为物理作用、化学吸附和沉淀作用。尽管植物对磷去除的直接贡献不大,但研究表明,植物表面附着的微生物对磷的同化作用其实间接来自植物的贡献,沉水植物富集 TP 的能力要好于挺水植物<sup>[17]</sup>。

苦草和伊乐藻混合栽植的围隔内相比其单独栽植的围隔,水体营养盐浓度降低较快,说明它们适合在水质净化工程中搭配种植。这可能

是因为不同的植物的净化优势不同,实验表明苦草对 TN 去除效率高于伊乐藻,而伊乐藻对 TP 有较高的去除效率。

水域生物修复的关键是寻找理想的修复物种和合理的栽种条件,并及时收获,避免二次污染。秦伯强等<sup>[18]</sup>在太湖北部梅梁湾牵龙口水厂水源地实施了净化水质的生态工程试验,并取得了较好的效果。霍元子等<sup>[19]</sup>对滴水湖的生态修复工程研究表明,冬季沉水植物群落中以耐寒品系的苦草和伊乐藻为优势种类,以苦草和伊乐藻为主的沉水植物群落对高营养负荷的流水水体净化效果极其显著。种云霄等<sup>[20]</sup>研究指出,植物的生理代谢活动直接关系到污染物的降解。即便同一种沉水植物在不同的研究背景和试验条件下,表现出的净化能力也不同。

#### 参考文献:

- [1] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2001:23-25.
- [2] 金相灿,郑朔方. 有机磷和无机磷对铜绿微囊藻生长的影响及动力学分析[J]. 环境科学研究,2006,19(5):40-44.
- [3] AKIRA K, TATSUO M. Effects of ammonium supply rates on competition between *Microcystis novacekii* (Cyanobacteria) and *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyta): simulation study[J]. Ecological Modelling, 2000,135(2):81-87.
- [4] 刘春光,邱金泉,王雯,等. 富营养化湖泊治理中的生物操纵理论[J]. 农业环境科学学报,2004,23(1):198-201.
- [5] JANSSON M, ANDERSON R, BERGGREN H, et al. Wetlands and lakes as nitrogen traps[J]. Ambio, 1994, 23(6):320-325.
- [6] 段国华,胡云,朱雪生,等. 水生态修复在大淀湖整治中的应用[J]. 上海水务,2007,23(2):23-26.
- [7] 邱东茹,吴振斌. 富营养化浅水湖泊沉水水生植物的衰退与恢复[J]. 湖泊科学,1997,9(1):82-88.
- [8] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等. 沉水植物重建对富营养化水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(8):13.
- [9] REDDY K R, PATRICK W H, LINDAU C W. Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands[J]. Limnology and Oceanography, 1989, 34(6):1004-1013.
- [10] 周婕,曾诚. 水生植物对湖泊生态系统的影响[J]. 人民长江,1996,39(6):88-92.
- [11] JAMES F R. Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge[J]. Ecological Engineering, 2000, 14(2):33-47.

- [12] 李科德,胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. 中国环境科学,1995,15(2):140-144.
- [13] 杨燕红,傅家谟,盛国英,等. 水中多氯代芳香化合物(PCAs)在自然沉积物及活性污泥中的吸附特征[J]. 中国环境科学,1999,17(3):203-207.
- [14] ALBERT A K. Sorption of 1, 2, 3, 4- terachlorobenaene and Cadmium to sediments and suspended solids in lake Uolkerk/ zoom [J]. Water Research, 1992, 26(3):327-337.
- [15] 安德森 M A,鲁宾 A J. 水溶液吸附化学 - 无机物在固 - 液界面上的吸附作用[M]. 刘莲生,等,译. 北京:科学出版社,1989:44-46.
- [16] 金相灿. 有毒有机物污染化学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:86-88.
- [17] 蒋鑫焱,翟建平. 不同水生植物富集氮磷能力的试验研究[J]. 环境保护科学,2006,32(6):13-16.
- [18] 秦伯强,胡维平,刘正文,等. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报,2007,27(1):5-12.
- [19] 霍元子,何文辉,罗坤,等. 大型溇引导的沉水植被生态修复对滴水湖水质的净化效果[J]. 应用生态学报,2010,21(2):495-499
- [20] 种云霄,胡洪营,钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2003,4(2):36.

## Study of the depuration effect of *Vallisneria spiralis* and *Elodea Canadensis* in water sources area of Gong Hu in winter

WANG Yang-yang<sup>1,2</sup>, WU Hai-long<sup>1,2</sup>, HUO Yuan-zi<sup>1,2</sup>, QU Xian-cheng<sup>1,2</sup>, CHEN Qun-fang<sup>1,2</sup>, HE Pei-min<sup>1,2</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Water Environment & Ecology Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** This paper studied the depuration effect of two kinds of submerged macrophytes *Vallisneria spiralis* and *Elodea Canadensis* in winter, after cold acclimation in laboratory. From 5 to 25 November 2009, ten large embankment enclosures were set up in Dong Jing River of the water source area in Gong Hu, Suzhou. *Vallisneria spiralis* and *Elodea Canadensis* were planted in the enclosures. Experiments were made in 4 groups: *Vallisneria spiralis*, *Elodea Canadensis*, *Vallisneria spiralis* + *Elodea Canadensis* and control group. Each treatment had three replicates. Sampled once every five days, to test the water quality inside of the enclosure and the outside enclosure. The results showed that: (1) In the enclosures grown submerged macrophytes: concentrations of  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TN, were significantly lower than those before the experiment ( $P < 0.01$ ), and the concentrations in *Vallisneria spiralis* control, *Elodea Canadensis* control, *Vallisneria spiralis* + *Elodea Canadensis* control are reduced to 78.76%, 70.20%, 83.42%, 81.85%, 72.30%, 75.55%, 88.80%, 78.80%, 86.21%, respectively, while the control group and the water outside the enclosures have a lesser extent nitrogen concentrations, in which TN concentrations decreased 37.12% and 15.87%; (2) The control of *Vallisneria spiralis* + *Elodea Canadensis* have high reduction rate in decreasing the TP and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , which were 86.97% and 76.16%, significantly higher than other controls ( $P < 0.05$ ). (3) The effect of purifying water of *Vallisneria spiralis* and *Elodea Canadensis* is better in winter, and the purifying effect: *Vallisneria spiralis* + *Elodea Canadensis* > *Vallisneria spiralis* > *Elodea Canadensis*. This paper provides a theoretical basis for the recovery of submerged plants of lake ecological restoration, species selection and reasonable allocation.

**Key words:** *Vallisneria spiralis*; *Elodea canadensis*; subgrade mesocosms; depuration effect