

# 前置库净化系统中水生植物的选择

高松峰<sup>1</sup>, 杨倩琪<sup>2</sup>

(1. 江苏省环境科学研究院, 南京 210036; 2. 南京理工大学, 南京 210094)

**摘 要:**水生植物是前置库水生生态系统中物质与能量流的主要传递者,其种类和种群数量变动会对库区生态及水环境质量产生重要影响。室内水生植物对水质的作用研究结果表明,通过植株相对增长率显著性分析,氮浓度为伊乐藻植株含氮量的第一影响因素,氮形态为菹草植株含氮量的第一影响因素,氮磷比为伊乐藻和菹草植株含磷量的第一影响因素;水芹和伊乐藻相对增长率分别为 48.5%~92.2% 和 43%~94.2%,生长状况最好。伊乐藻和水芹对水质作用分别主要表现为伊乐藻降低浊度(最高净降低率达 87.9%)、富氧(最高净增氧量达 3.3 mg/L)、降低营养盐浓度(TN 最高净降低率达 43.0%)。挺水植物中水芹对总氮、氨氮和总磷的去除效果最好,平均去除率达到 26%以上。综上所述,建议水生植物以水芹和伊乐藻为全年物种,并适当搭配其他植物作为前置库净化系统的植物组合。研究成果可为前置库工程建设提供建议技术支撑。

**关键词:**前置库; 净化系统; 水生植物; 选择

**中图分类号:**X171.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2013)06-0182-06

## Selection of Aquatic Plants in the Purification System of a Pre-dam

GAO Song-feng<sup>1</sup>, YANG Qian-qi<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aquatic plants are the main transmission of material and energy in aquatic ecosystems; the changes of its types and population have the important influence on ecology and water environmental quality. The effect of aquatic plants on the polluted water was studied. Results showed that the N concentration in water column was the first influence factor to nitrogen content containing in *Elodea nuttallii*, and the N form was the first influence factor to nitrogen content containing in *Potamogeton crispus*, the N/P was the first influence factor to phosphorus content containing in *Elodea nuttallii* and *Potamogeton crispus*, the relative growth rate of water dropwort and *Elodea nuttallii* were 48.5%~92.2% and 43%~94.2%, growth was the best. *Elodea nuttallii* showed that the effects were acted as reducing turbidity(the highest pure reduction rate was 87.9%), enriching oxygen(the highest pure increasing quantity was 3.3 mg/L), and reducing nutrients (the highest pure reduction rate of TN was 43.0%). The removal rates of TN, TP 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  by water celery was the best, the average removal rate reached up to more than 26%. Therefore, water celery among the aquatic plants was considered as waterweed for submerged plant species throughout the year, and proper combination with other plants formed the plant community in the purification system. Water celery and *Elodea nuttallii* were regarded as waterweed for submerged plant species of the purification system of a pre-dam in the whole year. The result provides technical support for the construction of the pre-dam.

**Key words:** pre-dam; the purification system; aquatic plants; selection

随着我国对饮用水水源地保护的日益重视,水源地周边的点源污染得到了有效的遏制,但面源污染的影响比例和危害越来越突出,特别是以水库型水源地

为主的中小城镇,其周边的农村生活污水、稻田排水等农业面源污染通过降雨或地表径流的方式对水源地水质造成严重的危害<sup>[1-2]</sup>。该类污染的特点主要体

现在面源污染具有突发性强、污染物种类复杂多变、污染负荷变化大,难采取单一集中处理等特点。初期来水,污染物浓度高,负荷大,需要净化处理,后期来水水量较大,污染程度低可直接排放进入水源地,前置库系统蓄混放清的特点对水源地面源污染防控起着重要作用<sup>[3-4]</sup>。通过在水源地水库前设置前置库,前置库排水廊道内设置植生带,沉水(浮)水植生带,利用这些植物对初期来水中的有机物、氮盐及磷酸盐等营养盐物质,通过截留、沉降、吸附、降解等方式净化后排入水源地水库<sup>[5-7]</sup>。

水生植物是水体中的初级生产者,也是前置库水生生态系统中物质与能量流的主要传递者,其种类和种群数量变动对库区生态及水域环境有着重大影响,氮和磷的吸收主要受湿地植物生物量的影响<sup>[8]</sup>。Gumbrecht 等<sup>[9]</sup>认为在不收割的情况下,水生植物主要通过促进微生物的硝化与反硝化作用达到去除 N 的效果,而在收割的情况下,或在低温时期,对氮和对磷的去除则主要是通过主动吸收,但传统型前置库的氮磷净化效果欠佳,尤其冬季低温条件下铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总氮(TN)去除速率远低于夏季,仅为夏季的 1/4 左右<sup>[10-12]</sup>。水生植物体内的氮、磷含量受到水体营养状况和植物生长状况的影响,而且由于沉水植物根、茎、叶都沉没于水中,水质对植株营养盐的影响更为敏感。在一些营养盐浓度较低的自然湖泊中,氮和磷成为植物生长的限制性因素<sup>[13-14]</sup>。国内外研究人员已相继筛选出一批能高效去除水中各种污染物质的植物,一些漂浮植物如凤眼莲、浮萍等已大量用于氧化塘等工程中,芦苇等则多用于人工湿地,但这些应用多着重植物根部微生物功能的发挥,主要靠植物自身的吸收功能来进行净化水体的应用还较少,同时并未根据前置库内不同分区的水质情况,确定水生植物的种群结构,特别是冬季低温条件下植物种群,从而提高水中氮磷等营养盐的去除效果<sup>[15-18]</sup>。因此,本文结合溧阳市塘马水库水质安全保障工程背景及水质特征,从技术集成角度出发,因地制宜地构建复合型前置库净化系统,在实验室尺度下探讨确定不同植物组合净化效果及污染物去除规律,确定复合型前置库去处污染物最优的工况参数,为前置库净化系统在溧阳市塘马水库水质安全保障工程中应用提供科学依据。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 夏秋季植物筛选试验

水生植物包括挺水植物、漂浮植物、浮叶植物、沉水植物等。结合示范工程开展地区的气候、水文、植

被等状况和室内试验结果,选择挺水植物:香蒲、千屈菜、水葱、莲藕、水芹、菖蒲、空心菜、西伯利亚鸢尾和沉水植物:伊乐藻、菹草、轮叶黑藻、苦草、狐尾藻,作为前置库的备选植物,部分为冬季低温条件下生长水生植物。本实验采用静态实验方案在夏秋季节进行。试验装置为容量为 40 L 的塑料桶,上部直径(内径)为 39 cm,底部直径(内径)为 31 cm。桶中栽种植物,桶底铺一层洗净的石英砂,以满足挺水植物固根要求。实验从 8 月中旬开始到九月底结束。植物栽种 10 d 后,每隔 3 d 定期取水样测定其中的氮磷营养盐含量,计算氮磷的去除率。定期采用自来水补充水量,以弥补因蒸发、植物吸收、取样造成的水量损失。

实验用水采用人工配水,初始水质指标为:TN 1.67 mg/L、TP 0.41 mg/L、COD<sub>Mn</sub> 6.75 mg/L。根据《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB3838-2002),实验用水属Ⅳ~Ⅴ类。

### 1.2 冬季植物筛选实验

在冬季,大部分植物已经进入凋落期,对水质净化作用不明显,选择合适的适宜于冬季生长的植物并研究其对水质的净化规律是保证前置库冬季长效运行的重要工作。以上述夏秋季植物净化效果的研究为基础,选用苏南地区常见的能够耐受冬季低温的水生植物进行冬季生长试验以及净化效果研究。挺水植物:水芹、西伯利亚鸢尾、香蒲;沉水植物:伊乐藻、菹草以及狐尾藻。

(1) 冬季植物的生长规律。试验选择在冬季进行,试验时间为 45 d,自然条件下水温的波动范围为 0~5℃。生长的水质条件采用人工配水方式,试验为 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)的正交试验。本试验采用氮磷比、氮浓度、氮形态来表征不同富营养化水体的特征,以上每个因素各设计 3 个水平。氮形态的水平为硝态氮,混合态氮(铵态氮和硝态氮各占 50%)和铵态氮,各处理组的水质情况见表 1。

表 1 不同处理组的水质参数

处理组	氮磷比	氮浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	硝态氮/氨氮
0			
1	2:1	0.5	100/0
2	2:1	1	50/50
3	2:1	2	0/100
4	5:1	0.5	50/50
5	5:1	1	0/100
6	5:1	2	100/0
7	8:1	0.5	0/100
8	8:1	1	100/0
9	8:1	2	50/50

试验装置为容量为 40 L 的塑料桶,上部直径(内

径)为 39 cm,底部直径(内径)为 31 cm。试验开始时,把植物洗净称重,0—9 号桶中栽种植物,0 号桶中不加营养液,底部铺设洗净的石英砂用于固定挺水植物为对照样。试验用氢氧化钠溶液和稀硫酸调节 pH 值,pH 值控制在 7,确保营养盐浓度变化范围不超过 20%,采用相对生长率表征植物生长情况:

相对生长率  $R = (W_t - W_0) / W_0$  (1)

式中: $R$ ——相对生长率; $W_t$ ——试验结束后生物量(湿重); $W_0$ ——试验前生物量(湿重)。

(2) 冬季植物对水质的净化效果。实验用水采用人工配水,初始水质指标为:TN 1.67 mg/L、TP 0.41 mg/L、COD<sub>Mn</sub> 6.75 mg/L。根据《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB3838—2002),实验用水属Ⅳ—Ⅴ类。

采用静态试验,将植物栽种在盛有一定量自来水的大型塑料桶(挺水植物用洗净的石英砂固定),容量为 40 L 的塑料桶,上部直径(内径)为 39 cm,底部直径(内径)为 31 cm。试验用水体积 30 L,植物质量约 100 g。所有试验桶均放在室外自然光照的地方,但

要避免雨淋。试验期间记录每天的水温变化情况,水温是取 3 个时间点的平均值(8:00,12:00,20:00),采样前要按照每个试验组的蒸发量先补充蒸馏水。根据《水和废水监测分析方法(第四版)》<sup>[19]</sup>测定 SS、TN、NH<sub>4</sub>-N、COD、TP、TDP 指标。其中 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TDP 为过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜后测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 夏秋季植物对水质的作用

挺水植物对总氮的去除率为水芹>香蒲>水葱,去除效果较好,平均去除率达到了 26%以上;对氨氮的去除率为水芹>水葱>香蒲,去除效果较好,平均去除率达到了 30%以上;对总磷的去除率为水芹>菖蒲>西伯利亚鸢尾,去除效果较好,平均去除率达到了 30%以上(图 1);沉水植物中对总氮和氨氮去除率大小次序为伊乐藻>狐尾藻>轮叶黑藻,去除效果较好,平均去除率达到了 20%以上;对总磷的去除率为伊乐藻>狐尾藻>轮叶黑藻,去除效果较好,平均去除率达到了 25%以上(图 2)。

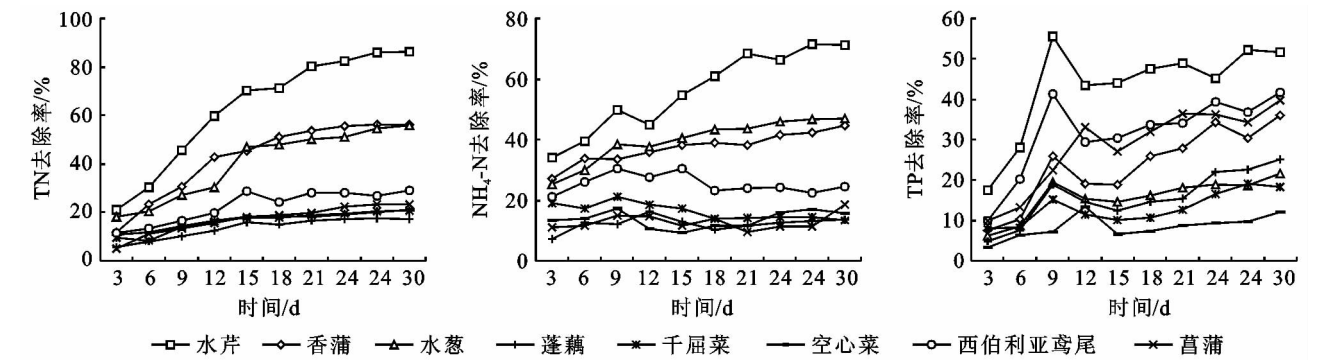


图 1 夏秋季节挺水植物对 TP 的去除率

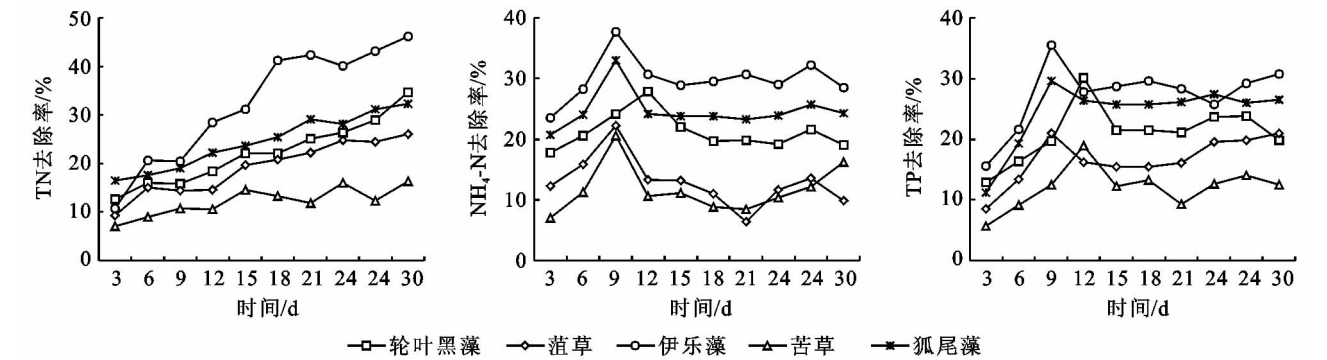


图 2 夏秋季节沉水植物对 TP 的去除率

初期,植物对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效果较 TN 好,这主要是因为水体中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 较少部分通过植物吸收和挥发作用而去除,大部分则是通过硝化作用和反硝化作用的连续反应而去除,这种反应过程会增加水体中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的量,从而使 TN 的降解幅度变小。但随着 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度下降并趋于稳定后,植物开始以吸

收 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为主,从而不断降低水体 TN 含量,导致后期 TN 的去除率逐渐高于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。

植物对磷的去除率表现出先升高,后降低的现象。对磷的去除一方面是以磷酸盐沉降并固定在基质上,另一方面是可溶性磷被植物吸收。在试验初期对磷的去除效果上升非常显著,这是因为磷被底部的

石英砂吸附而使得其浓度大幅度降低,但也有部分磷会逐渐从石英砂中释放出来,造成后期去除率出现下降的现象。综上所述,在夏秋季节可以选择的挺水植物主要为水芹、西伯利亚鸢尾、香蒲;沉水植物主要有伊乐藻、轮叶黑藻、狐尾藻。

2.2 冬季水生植物生长

试验周期内植物的冬季相对生长率如图 3 和 4 所示。从图 3 中可以看出,在相同的水质及温度条件下,挺水植物中水芹相对生长率为 48.5%~92.2% 生长状况最好,香蒲相对生长率为 10.2%~31.5% 生长状况最差;试验期间,水温在 0~5℃,伊乐藻在低温季节仍然继续生长。由图 4 可见,伊乐藻相对生长率为 43%~94.2%,而在同样的试验条件下水温在 0~5℃,菹草普遍生长缓慢,相对生长率为 -23.9%~39.6%,因此沉水植物中伊乐藻的生长状况最好,狐尾藻的生长状况最差。

通过方差分析(表 2),发现氮磷比影响植株含磷量的显著性因素,影响植物相对生长率的因素主次顺序为:氮磷比>氮形态>氮浓度。氮磷比为 2:1 与 8:1 之间存在显著差异( $P<0.05$ ),不同水平的氮浓度与氮形态没有对伊乐藻相对增长率产生显著影响( $P$  分别为 0.320,0.077),氮磷比为 8:1 时植物的相对生长率最大,氮浓度越高,相对生长率越大。混合态氮最能促进伊乐藻的生长,其次为硝态氮,供应混合

态氮与铵态氮的处理组间存在显著差异( $P<0.05$ )。由表 3 知,氮磷比、氮浓度、氮形态都不是菹草相对生长率的主要因素,各因素不同水平之间也不存在显著差异,说明了虽然菹草属于低温生态位,但其最适生长温度范围为 10~15℃,耐低温能力没有伊乐藻强,在 0~5℃ 条件下,菹草基本不生长。

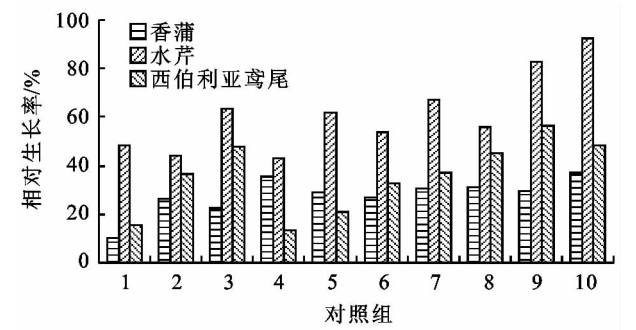


图 3 挺水植物冬季相对生长率对比

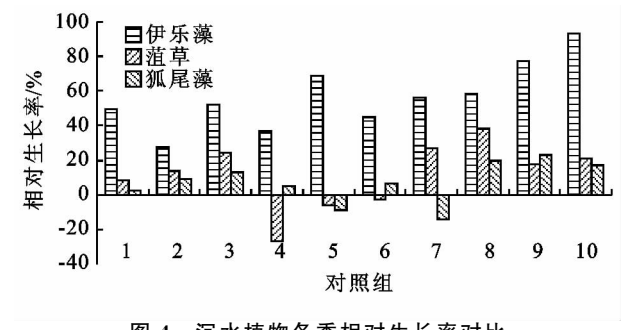


图 4 沉水植物冬季相对生长率对比

表 2 挺水植物植株相对增长率显著性分析

方差来源	差方和	自由度	均方	F 值	$F_{0.05}$	P	显著性
氮磷比	2040.53	2	1020.27	26.82	19.00	0.036	*
氮浓度	161.52	2	80.76	2.12	19.00	0.320	
氮形态	917.04	2	458.52	12.053	19.00	0.077	
误差 $S_E$	76.08	2	38.04				
总和	3195.17	8					

注: \*  $P<0.05$ 。

表 3 沉水植物植株相对增长率显著性分析

方差来源	差方和	自由度	均方	F 值	$F_{0.05}$	P	显著性
氮磷比	872.67	2	436.34	0.506	19.00	0.664	
氮浓度	109.11	2	54.55	0.063	19.00	0.941	
氮形态	354.64	2	177.32	0.205	19.00	0.829	
误差 $S_E$	1724.59	2	862.29				
总和	3061.02	8					

2.3 冬季水生植物对水质的作用

冬季水生植物对营养盐的去除与其生长状况有着较为密切的联系,在保证沉水植物良好生长的前提下,冬季挺水植物中对总氮和总磷去除率大小顺序分别为:水芹>西伯利亚鸢尾>香蒲,香蒲>水芹>西伯利亚鸢尾,去除效果较好;沉水植物对总氮和总磷去除率大小顺序均为伊乐藻>菹草>狐尾藻,去除效

果较好(图 5—6)。沉水植物对污染水体产生的主要效应是降低浊度,稳定水质,促进水中营养盐的降低。这种改善效应主要是通过植物自身对污染物质的吸收和增强水体的自净能力来实现的。沉水植物由于其生境结构的特殊性,其根、茎、叶都能从水中吸收营养盐。伊乐藻对水中氮的吸收主要通过生物量的增

长与富集作用,对磷的吸收主要通过富集作用;菹草对水中氮的吸收主要通过生物量的增长,对磷的吸收主要通过富集作用。沉水植物对营养盐的去除效果

伊乐藻最好,结合植物的生长状况与对营养盐的去除效果,可以在冬季选择水芹作为前置库的净化挺水植物,伊乐藻作为前置库净化的沉水植物。

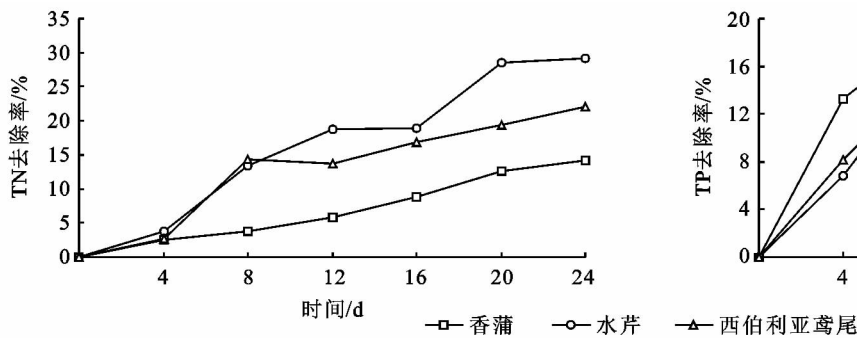


图 5 冬季挺水植物对 TN、TP 的去除率

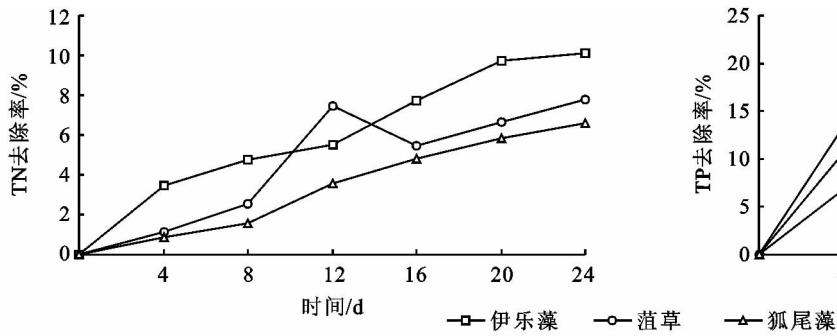


图 6 冬季沉水植物对 TN、TP 的去除率

2.4 伊乐藻对其他水质指标的作用

确定沉水植物伊乐藻,研究其对其他水质指标的影响,伊乐藻生长要求水深小于 2~2.2 倍水体透明度,最适温度为 25℃左右。在水温为 5~30℃都能处于正常的营养生长状态,当温度低于 5℃或高于 30℃时,其生长就会受到抑制。由图 7 可知,有植物的池子,浊度在短期内下降效果明显,但在试验后期,两者的差别减少,这是因为经过长时间的静置,对照样中的悬浮物大部分能沉淀到底泥中。在第 43 小时,两个池子的浊度有较大幅度的上升是由于当天风力很大,水体受到扰动,对照池的浊度较第 19 小时增加了 28NTU,但是有植物的池子浊度却只增加了 15NTU,这说明了伊乐藻具有较好的稳定底质的作用,能降低沉积物质再悬浮的风险。试验结束后采伊乐藻,鲜重为 33.5 g(含水率约 90%),用蒸馏水冲洗茎、叶,将冲洗下来的悬浮态物质烘干,为 0.54 g,即每千克伊乐藻鲜重所吸附的悬浮态物质为 16 g,说明伊乐藻能吸附大量的悬浮物,从而使浑浊的水体较快清澈。伊乐藻水样中的浊度降低效果明显,浊度的最高净降低率达到 87.9%。

在 115 小时前,伊乐藻水样中 DO 比对照水样低(图 8),这主要与以下两点有关:(1)测定时间,试验值都是在早上的 10:00 测定的,此时,植物的光合作用

用不强烈;(2)原水状态,原水表面有大量的油污,油污阻碍了光线和氧气的进入,使水面下的水体处于缺氧状态,从而使伊乐藻的光合作用受阻。当植物适应了这种生境后,水中的 DO 开始大幅度上升,远高于对照样,在 216 h 和 235 h 监测到的溶氧接近饱和值,并伴有小气泡的逸出。因此只有当伊乐藻经过一段时间适应了没有超过其生长阈值的逆境后,才会对水体产生明显的富氧效果,在本试验中,从 115 h 开始,有伊乐藻的池子开始表现出明显的富氧效果。

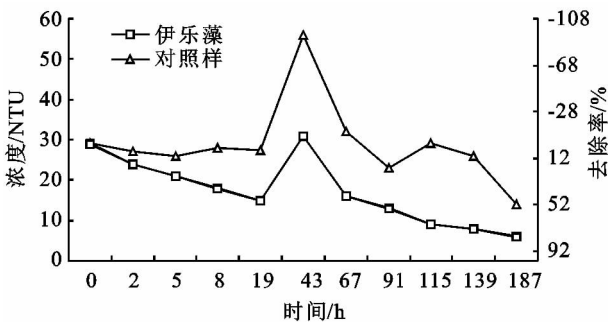


图 7 不同处理组浊度的变化

3 结论

沉水植物对总氮、氨氮和总磷的去除率伊乐藻最好,平均去除率达到了 20%以上,同时伊乐藻能吸附大量的悬浮物,水质的浊度降低效果明显,最高净降

低率达到 87.9%,并对水体产生明显的富氧效果。

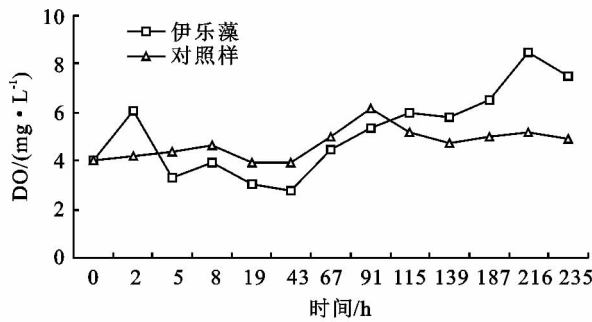


图8 不同处理组 DO 的变化

冬季挺水植物中水芹相对生长率为 48.5%~92.2%生长状况最好,香蒲相对生长率为 10.2%~31.5%生长状况最差,冬季挺水植物对总氮、氨氮和总磷的去除率水芹最好;通过植株相对增长率显著性分析,发现氮磷比是影响植株含磷量的显著性因素,影响植物相对生长率的因素主次顺序为:氮磷比>氮形态>氮浓度。冬季伊乐藻相对生长率为 43%~94.2%,同等试验条件下菹草生长缓慢,相对生长率为-23.9%~39.6%,伊乐藻的生长状况最好,狐尾藻的生长状况最差,对总氮、氨氮和总磷的去除率伊乐藻最好,平均去除率达到了 20%以上。

综上,建议水生植物以水芹和伊乐藻为全年物种并适当搭配其他植物作为前置库净化系统的植物组合。研究结果可为前置库工程建设提供技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 李仰斌,张国华,谢崇宝.我国农村饮用水源现状及相关保护对策建议[J].中国农村水利水电,2007(11):1-4.
- [2] 柴世伟,斐晓梅,张亚雷,等.农业面源污染及其控制技术[J].水土保持学报,2006,20(6):192-195.
- [3] Uhlmann D, Benndorf J. The use of primary reservoirs to control eutrophication caused by nutrient inflows from non-point sources[C]// Land Use Impact on Lake and Reservoir Ecosystems Proceedings of a Regional Work Shop on MAB project 5. Warsaw Facultas Wien, 1980: 152-188.
- [4] Nyholm N, Sorensen P E, Olrik K, et al. Restoration of lake nakskov indrefjord denmark, using algal ponds to remove nutrients from inflowing river water[J]. Prog wat Technol, 1978,10(6):881-892.
- [5] 常会庆,王世华,徐晓峰,等.两种水生植物对重富营养化水体修复效果研究[J].水土保持研究,2012,19(5):

161-165.

- [6] 黄玉洁,张银龙,李海东,等.太湖人工恢复湿地地区植物群落建群对沉积物中氮、磷空间分布的影响[J].水土保持研究,2011,18(5):262-265.
- [7] Budd R, O'geen A, Goh K S, et al. Removal mechanisms and fate of insecticides in constructed wetlands [J]. Chemosphere 2011,83(11):1581-1587.
- [8] 南楠,张波,李海东,等.洪泽湖湿地主要植物群落的水质净化能力研究[J].水土保持研究,2011,18(1):228-231.
- [9] Gumbrecht T. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte system[J]. Ecological Engineering,1993,2(1):1-30.
- [10] Paul L. Nutrient elimination in pre-dams: results of long term studies[J]. Hydrobiologia,2003,504(1/3): 289-295.
- [11] 段伟,刘昌明,黄炳彬.官厅水库入库口复合湿地系统对入库水质的净化[J].北京师范大学学报:自然科学版,2009,45(5/6):595-601.
- [12] 田猛,张永春.用于控制太湖流域农村面源污染的透水坝技术试验研究[J].环境科学学报,2006,26(10): 1665-1670.
- [13] Carr G M. Macrophyte growth and sediment phosphorus and nitrogen in a Canadian prairie river[J]. Freshwater Biology,1998,39(3):525-536.
- [14] Fernández-Aláez M, Fernández-Aláez C, Bécares E. Nutrient content in macrophytes in Spanish shallow lakes[J]. Hydrobiologia,1999,408:317-326.
- [15] 阎自申.前置库在滇池流域运用研究[J].云南环境科学,1996,15(6):33-35.
- [16] Muñoz A R, Trevisan M, Capri E. Sorption and photo degradation of chlorpyrifos on riparian and aquatic macrophytes[J]. J Environ Sci Health Part B,2008,44(1): 7-12.
- [17] Paul L, Putz K. Suspended matter elimination in a pre-dam with discharge dependent storage level regulation [J]. Limnologia,2008,38(3/4):388-399.
- [18] Salvia-Castellvi M, Dohet A, Vander Borgh P, et al. Control of the eutrophication of the reservoir of Esch-sur-Sûre (Luxembourg): evaluation of the phosphorus removal by predams[J]. Hydrobiologia,2001,459(1/3):61-71.
- [19] 国家环保局.《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002:16-30.