

# 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 及 TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的去除力分析

李 泽<sup>1,2</sup>, 高小辉<sup>3</sup>, 贺 锋<sup>1,①</sup>, 胡胜华<sup>1</sup>, 夏世斌<sup>2</sup>, 吴振斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 3. 杭州西湖风景名胜区管理委员会, 浙江 杭州 310013)

**摘要:** 研究了苦草 [*Vallisneria natans* (Lour.) Hara] 和黑藻 [*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle] 对模拟西湖富营养化水体中 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的去除力及其动力学模型, 并对实验期间 (30 d) 2 种植物的株高及单株鲜质量的变化进行了分析。结果表明: 种植 30 d 内, 苦草和黑藻对水体中 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的去除率均表现出前期较小、中期急剧增加、后期缓慢变化的趋势, 且 3 项指标的去除过程均符合一级动力学模型。种植 20 ~ 25 d 后, 苦草和黑藻对水体中 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的去除效果均最佳; 其中, 苦草对 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的最高去除率分别为 66.7%、71.4% 和 68.2%, 去除动力学方程分别为  $C_{\text{COD}_{\text{Mn}}} = 6.96e^{(-0.030t)}$ 、 $C_{\text{TN}} = 7.29e^{(-0.048t)}$  和  $C_{\text{NO}_3\text{-N}} = 5.12e^{(-0.046t)}$ , 降解系数分别为 0.030、0.048 和 0.046; 黑藻对 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的最高去除率分别为 55.0%、61.4% 和 69.0%, 去除动力学方程分别为  $C_{\text{COD}_{\text{Mn}}} = 6.91e^{(-0.043t)}$ 、 $C_{\text{TN}} = 6.55e^{(-0.033t)}$  和  $C_{\text{NO}_3\text{-N}} = 4.69e^{(-0.046t)}$ , 降解系数分别为 0.043、0.033 和 0.046。种植 30 d 后, 苦草和黑藻的株高和单株鲜质量均明显增加, 其中, 苦草平均株高和平均单株鲜质量分别增加了 53.0% 和 170.5%; 黑藻平均株高和平均单株鲜质量分别增加了 120.0% 和 216.7%。研究结果说明: 苦草和黑藻在模拟西湖水体中均能够正常生长, 且对富营养化水体有较好的净化作用, 可用于水环境改善和水生态修复。

**关键词:** 苦草; 黑藻; 富营养化水体; COD<sub>Mn</sub>; 总氮; 动力学模型

中图分类号: Q948.8; X524 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2012)04-0029-06

## Analysis on removal ability of *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata* to COD<sub>Mn</sub>, TN and NO<sub>3</sub>-N in simulated water of West Lake

LI Ze<sup>1,2</sup>, GAO Xiao-hui<sup>3</sup>, HE Feng<sup>1,①</sup>, HU Sheng-hua<sup>1</sup>, XIA Shi-bin<sup>2</sup>, WU Zhen-bin<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Management Committee of Hangzhou West Lake Scenic Area, Hangzhou 310013, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2012, 21(4): 29-34

**Abstract:** The removal ability of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle to COD<sub>Mn</sub>, TN and NO<sub>3</sub>-N in simulated eutrophic water of West Lake and their kinetics models were researched, and also, the change of individual height and fresh weight of two species was analyzed during the experimental period (30 d). The results show that during planted for 30 d, the removal rates of *V. natans* and *H. verticillata* to COD<sub>Mn</sub>, TN and NO<sub>3</sub>-N all appear the trend of lowering in earlier stage, sharply increasing in middle stage and slowly changing in later stage, and the removal processes of these three indexes are all conformed the first-rate kinetics model. After planted for 20-25 d, the removal effects of *V. natans* and *H. verticillata* on COD<sub>Mn</sub>, TN and NO<sub>3</sub>-N in water are the best. In which, the highest removal rate of *V. natans* to COD<sub>Mn</sub>, TN and NO<sub>3</sub>-N is 66.7%, 71.4% and 68.2%, the removal kinetics equation is  $C_{\text{COD}_{\text{Mn}}} = 6.96e^{(-0.030t)}$ ,  $C_{\text{TN}} = 7.29e^{(-0.048t)}$  and  $C_{\text{NO}_3\text{-N}} = 5.12e^{(-0.046t)}$ , and the

收稿日期: 2011-12-30

基金项目: “十一五”国家水专项项目(2009ZX07106-002-004); 湖北省杰出青年基金项目(2010CDA093)

作者简介: 李 泽(1986—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制与水生态修复的研究。

①通信作者 E-mail: hefeng@ihb.ac.cn

degradation coefficient is 0.030, 0.048 and 0.046, respectively. While the highest removal rate of *H. verticillata* to  $COD_{Mn}$ , TN and  $NO_3-N$  is 55.0%, 61.4% and 69.0%, the removal kinetics equation is  $C_{COD_{Mn}} = 6.91e^{(-0.043t)}$ ,  $C_{TN} = 6.55e^{(-0.033t)}$  and  $C_{NO_3-N} = 4.69e^{(-0.046t)}$ , and the degradation coefficient is 0.043, 0.033 and 0.046, respectively. After planted for 30 d, the height and fresh weight per plant of two species both increase obviously, in which, the average height and average fresh weight per plant of *V. natans* are increased by 53.0% and 170.5%, and those of *H. verticillata* are increased by 120.0% and 216.7%, respectively. It is suggested that both *V. natans* and *H. verticillata* can grow normally in simulated water of West Lake and have better purification effects on eutrophic water, therefore, they can be used for water environment improvement and aquatic ecological rehabilitation.

**Key words:** *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle; eutrophic water;  $COD_{Mn}$ ; TN; kinetics model

近年来,由于工业和城市的发展,大量的氮和磷等营养物质被排入水体中,因此,湖泊富营养化问题逐渐突显,水体逐渐由自净能力强的清水系统(草型湖泊)向以浮游植物为主的混水系统(藻型湖泊)转化<sup>[1-2]</sup>。为解决这一问题,很多学者开始研究沉水植物的退化原理,以寻找适合富营养化水体生态修复的途径和方法<sup>[3-4]</sup>。目前,国内外对富营养化水体的治理主要采用物理、化学及生态修复技术<sup>[5-6]</sup>,其中生态修复技术可利用收获的水生和陆生植物净化富营养化水体,因而颇受研究者的青睐<sup>[7]</sup>。

沉水植物是水环境生态系统中的重要组成部分,是浅水湖泊水体中最重要的初级生产者,能通过营养竞争机制和分泌有机酸类物质抑制藻类的生长<sup>[8]</sup>,且具有减缓风浪、促进水体中营养物质沉积、降低湖泊水体中的营养盐浓度、为水生动物提供觅食和庇护场所等作用<sup>[9-10]</sup>,进而影响湖泊生态系统的稳定性。黑藻 [*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle] 作为长江中下游地区常见的沉水植物,对各种水体环境的适应能力强; Van 等<sup>[11]</sup>发现美洲苦草 (*Vallisneria americana* Michx.) 和黑藻具有生长性较好、水体适应性强、易繁殖等特点,二者已成为众多研究者选择的实验材料<sup>[12-13]</sup>。已有的研究表明<sup>[14-15]</sup>:苦草 [*V. natans* (Lour.) Hara] 和黑藻可去除污染水体中的氮,有效净化水体和抑制藻类爆发,可用于食草渔业生产和富营养化湖泊的修复,具有良好的经济、社会和环境效益。但目前有关苦草和黑藻对水体中  $COD$ 、TN 和  $NO_3-N$  去除力的研究报道则较少<sup>[12]</sup>。

鉴于此,作者模拟杭州西湖水体生境条件,研究了苦草和黑藻在富营养化水体中的生长情况及其对  $COD_{Mn}$ 、TN 和  $NO_3-N$  的去除力,以期对杭州西湖水环境改善工作中植物种类的选择和水体生态系统的修

复提供实验数据,并为其他湖泊的富营养化控制提供借鉴和参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

实验用苦草和黑藻均取自浙江省杭州市西湖西进湖区水生植被恢复示范工程区,洗净后于自来水中预培养 10 d,选择株高较一致的植株备用。底质沉积物为从杭州西湖茅家埠景区疏浚出的底泥,挑除底泥中的动植物残体和石块等杂质后待用;其中,有机质含量为  $34.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , TN 和 TP 含量分别为 1.24 和  $0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。上覆水采用钱塘江引水玉皇山沉淀池的出水(即西湖入水)模拟杭州西湖的水环境;其中,  $COD_{Mn}$  为  $7.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶解氧浓度为  $6.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TN 和 TP 含量分别为 3.30 和  $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

### 1.2 方法

1.2.1 处理方法 于 2011 年 5 月至 6 月,将疏浚底泥平铺到水缸底部(水缸厚 10 cm、底径 30 cm、口径 50 cm、高 30 cm),缓慢加入玉皇山沉淀池的出水至水位达 25 cm,将苦草和黑藻移栽至水缸中,再加入玉皇山沉淀池出水至水位 28 cm。苦草平均株高 10.0 cm,平均单株鲜质量 0.61 g;黑藻平均株高 5.5 cm,平均单株鲜质量 0.06 g。每缸均匀栽植 10 株,苦草和黑藻各种植 3 缸,每缸视为 1 次重复;空白组则不种植沉水植物但底质和上覆水与处理组一致,处理及空白共计 7 缸。实验在室外进行,气候条件与杭州西湖区域相同,水温约  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实验时间为 30 d(即 2011 年 5 月 10 日至 2011 年 6 月 10 日)。

1.2.2 各指标的测定方法 实验期间定期测定水缸内的主要水质指标,频率为 5 d 1 次,测定指标包括

COD<sub>Mn</sub>及 TN 和 NO<sub>3</sub>-N 浓度,并测定种植前和实验结束时苦草和黑藻的株高和单株鲜质量。测定方法为:将植株洗净后用滤纸吸干水分,用 Al-104 型电子天平(瑞士梅特勒-托利公司)称量单株鲜质量;用卷尺测量株高;参照文献[16],采用高锰酸钾法测定 COD<sub>Mn</sub>;采用纳式试剂分光光度法测定 NH<sub>4</sub>-N 浓度;采用酚二磺酸分光光度法测定 NO<sub>3</sub>-N 浓度。每个指标重复测定 3 次,结果取平均值。

### 1.3 数据整理和统计分析

假设实验过程中污染物质是可溶的且水质分布均匀并处于完全混合状态,因此进水后,水体污染物的降解速率为 $-(dC/dt) = m \cdot x \cdot t$ ,两边积分后得到公式 $C/C_0 = e^{-m \cdot x \cdot t}$ 。式中, $C$ 为 $t$ 时间某水质指标的质量浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $C_0$ 为初始质量浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $t$ 为实验天数(d); $m$ 为衰减系数; $x$ 为单位时间内单位体积植物的生长量( $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ )。一般认为在较短的时间内单位体积植物的生长量为零,即 $dx/dt = 0$ ,因此降解系数 $k = m \cdot x$ ,所以植物去除水体中 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的时间动力学方程为: $C = C_0 e^{-k \cdot t}$ 。

数据统计分析使用 Excel 2007 和 Origin 7.5 软件完成。

## 2 结果和分析

### 2.1 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 的去除动力学分析

在种植苦草和黑藻的模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 去除率的变化见图 1。由图 1 可以看出:苦草和黑藻对模拟西湖水体中的 COD<sub>Mn</sub> 均具有较强的去除能力。在实验初期(0~5 d),苦草和黑藻对水体中 COD<sub>Mn</sub> 的去除率很低且均为负值;第 5 天到第 20 天,苦草和黑藻对 COD<sub>Mn</sub> 的去除率迅速升高;20 d 后苦草和黑藻对 COD<sub>Mn</sub> 的去除率趋于稳定。整体上看,实验期间(30 d),空白组 COD<sub>Mn</sub> 的去除率最低且变化幅度不大;而黑藻和苦草对 COD<sub>Mn</sub> 的去除率变化幅度较大,其中苦草和黑藻对水体中 COD<sub>Mn</sub> 的去除率最高值分别达到 66.7% 和 55.0%。

根据去除动力学方程对水体中 COD<sub>Mn</sub> 随时间的变化曲线进行拟合,结果见图 2。由图 2 可以看出:总体上,在 0~30 d 内种植苦草和黑藻的模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 随时间延长而逐渐降低,而空白水体中 COD<sub>Mn</sub> 变化不明显;苦草和黑藻对模拟西湖水体中

COD<sub>Mn</sub> 的去除动力学方程分别为  $C_{\text{苦}} = 6.96e^{(-0.030t)}$  ( $R^2 = 0.8936$ ) 和  $C_{\text{黑}} = 6.91e^{(-0.043t)}$  ( $R^2 = 0.8865$ ),降解系数分别为 0.030 和 0.043,说明苦草和黑藻对模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 的去除力均符合一级动力学反应方程。

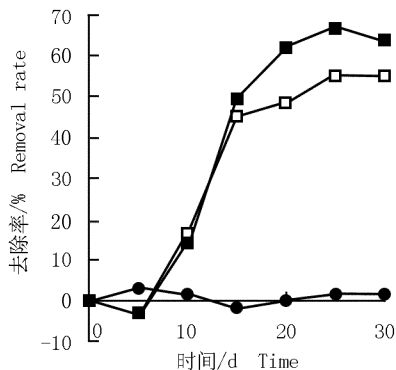
### 2.2 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 TN 的去除动力学分析

在种植苦草和黑藻的模拟西湖水体中 TN 去除率的变化见图 3。由图 3 可以看出:苦草和黑藻对模拟西湖水体中的 TN 均具有较强的去除作用。实验前期(0~10 d),2 种沉水植物对 TN 的去除效果均不明显,TN 去除率仅维持在约 10%,可能是因为植株还未适应水环境条件,不能很快从水体中直接吸收氮类营养盐;到 15 d 后,TN 的去除率迅速增大;第 25 天时苦草和黑藻对模拟水体中 TN 的去除率分别达 69.6% 和 50.8%;此后苦草对模拟水体中 TN 的去除率趋于稳定,达 71.4%,而黑藻对 TN 的去除率则明显增加,至实验的第 30 天达到最高,为 61.4%。整体上看,空白组 TN 的去除率随时间延长逐渐降低且为负值,但变化幅度不大;而黑藻和苦草对 TN 的去除率随时间延长逐渐增大且变化幅度较大。

根据去除动力学方程对水体中 TN 质量浓度随时间的变化曲线进行拟合,结果见图 4。由图 4 可见:总体上,在 0~30 d 内种植苦草和黑藻的模拟水体中 TN 质量浓度随时间的延长而逐渐降低,而空白水体中 TN 质量浓度则逐渐增加但增加幅度不大;苦草和黑藻对模拟西湖水体中 TN 的去除动力学方程分别为  $C_{\text{苦}} = 7.29e^{(-0.048t)}$  ( $R^2 = 0.8580$ ) 和  $C_{\text{黑}} = 6.55e^{(-0.033t)}$  ( $R^2 = 0.9067$ ),降解系数分别为 0.048 和 0.033,表明苦草和黑藻对模拟西湖水体中 TN 的去除力符合一级动力学反应方程。另外,空白水体中 TN 质量浓度逐渐增加也从另一方面证明水生植物能够增加底质稳定性,减少营养物质循环并抑制底质中营养物质的释放。

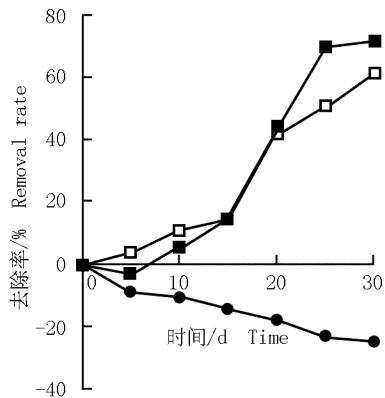
### 2.3 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 NO<sub>3</sub>-N 的去除动力学分析

在种植苦草和黑藻的模拟西湖水体中 NO<sub>3</sub>-N 去除率的变化见图 5。由图 5 可以看出:苦草和黑藻对模拟西湖水体中的 NO<sub>3</sub>-N 具有较强的去除能力。实验前期(0~10 d),2 种植物对水体中 NO<sub>3</sub>-N 的去除率均在 10% 以下;第 10 天至第 20 天,2 种植物对水体中 NO<sub>3</sub>-N 的去除率大幅度增加,至第 20 天时,黑



—●—: 空白 Blank; —■—: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; —□—: 黑藻 *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle.

图 1 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 去除率的影响  
Fig. 1 Effect of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle on removal rate of COD<sub>Mn</sub> in simulated water of West Lake

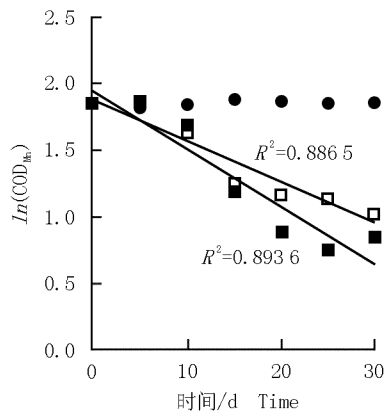


—●—: 空白 Blank; —■—: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; —□—: 黑藻 *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle.

图 3 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 TN 去除率的影响  
Fig. 3 Effect of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle on removal rate of TN in simulated water of West Lake

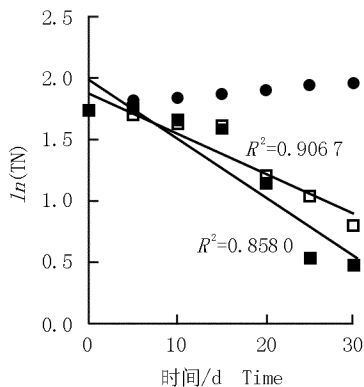
藻和苦草对水体中 NO<sub>3</sub>-N 的去除率分别达 64.3% 和 59.1%; 20 d 后二者对 NO<sub>3</sub>-N 的去除率虽然有所增加但增加幅度均不大, 呈比较稳定的状态, 至第 30 天时苦草和黑藻对 NO<sub>3</sub>-N 的去除率分别达 68.2% 和 69.0%。整体上看, 空白组 NO<sub>3</sub>-N 的去除率随时间延长逐渐降低且为负值, 但变化幅度不大; 而黑藻和苦草对 NO<sub>3</sub>-N 的去除率随时间延长逐渐增大且变化幅度较大。

根据去除动力学方程对水体中 NO<sub>3</sub>-N 质量浓度



●: 空白 Blank; ■: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; □: 黑藻 *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle.

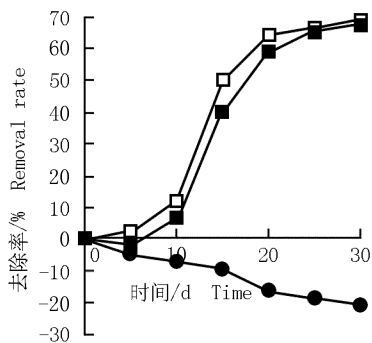
图 2 苦草和黑藻去除模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 的动力学曲线  
Fig. 2 Kinetics curve of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle for removing COD<sub>Mn</sub> in simulated water of West Lake



●: 空白 Blank; ■: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; □: 黑藻 *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle.

图 4 苦草和黑藻去除模拟西湖水体中 TN 的动力学曲线  
Fig. 4 Kinetics curve of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle for removing TN in simulated water of West Lake

随时间的变化曲线进行拟合, 结果见图 6。由图 6 可见: 总体上, 在 0~30 d 内种植苦草和黑藻的模拟水体中 NO<sub>3</sub>-N 质量浓度随时间延长而逐渐降低, 而空白水体中 NO<sub>3</sub>-N 质量浓度则逐渐增加但增加幅度不大; 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 NO<sub>3</sub>-N 的去除动力学方程分别为  $C_{\text{苦}} = 5.12e^{(-0.046t)}$  ( $R^2 = 0.9237$ ) 和  $C_{\text{黑}} = 4.69e^{(-0.046t)}$  ( $R^2 = 0.9149$ ), 二者的降解系数均为 0.046, 表明苦草和黑藻对模拟西湖水体中 NO<sub>3</sub>-N 的去除力均符合一级动力学反应方程。



—●—: 空白 Blank; —■—: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; —□—: 黑藻 *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle.

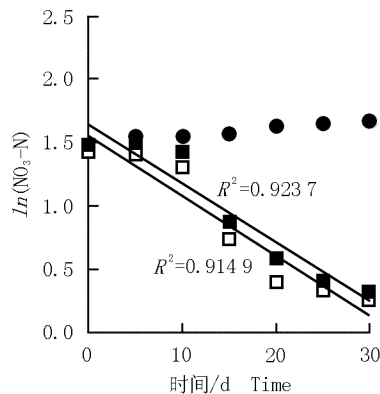
图5 苦草和黑藻对模拟西湖水体中 NO<sub>3</sub>-N 去除率的影响  
Fig. 5 Effect of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle on removal rate of NO<sub>3</sub>-N in simulated water of West Lake

## 2.4 模拟西湖水体中苦草和黑藻的生长变化

对苦草和黑藻的株高和单株鲜质量 2 个生长指标的测量结果表明:在模拟西湖水体中种植 30 d 后,苦草的平均株高从 10.00 cm 增加至 15.30 cm,增加了 53.0%;平均单株鲜质量由 0.61 g 增加至 1.65 g,增加了 170.5%。黑藻的平均株高由 5.5 cm 增加至 12.1 cm,增加了 120.0%;平均单株鲜质量由 0.06 g 增加至 0.19 g,增加了 216.7%。测定结果表明富营养化水体对 2 种植物的生长没有明显的影响。另外,通过比较也可看出,单位体积内苦草的生物量明显大于黑藻,间接反映出苦草生长发育所需的有机物和营养盐明显多于黑藻。

## 3 讨论和结论

上述研究结果表明:在模拟西湖水体中苦草和黑藻对 COD<sub>Mn</sub> 和 TN 的去除能力有较大差异,而二者对 NO<sub>3</sub>-N 去除能力的差异不明显。其中,苦草对 COD<sub>Mn</sub> 的降解系数为 0.030,而黑藻对 COD<sub>Mn</sub> 的降解系数为 0.043,说明黑藻对 COD<sub>Mn</sub> 的去除速率大于苦草;苦草对 TN 的降解系数为 0.048,而黑藻对 TN 的降解系数为 0.033,说明苦草对 TN 的去除速率大于黑藻。苦草和黑藻对 COD<sub>Mn</sub> 和 TN 的降解系数与一般植物对重金属吸收过程中的吸收系数比较类似<sup>[17-19]</sup>。而实际上苦草对模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 和 TN 的去除效果都优于黑藻,这可能与单位体积内苦草生物量大于黑藻



●: 空白 Blank; ■: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara; □: 黑藻 *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle.

图6 苦草和黑藻去除模拟西湖水体中 NO<sub>3</sub>-N 的动力学曲线  
Fig. 6 Kinetics curve of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle for removing NO<sub>3</sub>-N in simulated water of West Lake

有关。

实验初期,种植苦草和黑藻的模拟西湖水体中 COD<sub>Mn</sub> 以及 TN 和 NO<sub>3</sub>-N 质量浓度均有所增加,但随后 COD<sub>Mn</sub> 以及 TN 和 NO<sub>3</sub>-N 质量浓度急剧降低,表现为 3 个指标的去除率快速增加,至实验后期达到较稳定的状态,这一变化趋势可能与 2 种植物移植后的生长状况有关。种植初期,植株还未能适应周围的水体环境,不能发挥植株本身的正常代谢机能,所以对 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 NO<sub>3</sub>-N 的去除效果不佳;经过一定的适应期后,植株能够进行正常的生理代谢活动,根系和茎叶等器官不但可以消耗水体中的富营养物质,同时植物体还能分泌出脂肪酸、羟基酸和酚酸等有机酸以抑制水体中藻类物质的生长<sup>[8]</sup>,从而使水体中 COD<sub>Mn</sub> 降低;当植物根系稳定下来后,能够直接从水体中吸收营养物质,也可以通过根系的微环境条件影响微生物的代谢,进而调节水体中营养物质的循环,使水体中的 TN 浓度不断降低;移栽一段时间后,植株生长逐渐稳定,根系逐渐生长并在根系内部形成好氧微环境,而根系周围形成的好氧、缺氧和厌氧微环境促使硝化菌和反硝化菌生长繁殖,微生物的硝化和反硝化作用有序进行,因此水体环境中 NO<sub>3</sub>-N 的去除率快速增加,直至平衡。

水体中的氮是植物生长发育必不可少的营养物质,苦草和黑藻均为沉水植物,其根、茎和叶等器官完全沉没在水中,起着“营养泵”和“营养库”的作用;一方面对水体中的污染物有较好的吸收作用,另一方面

能抑制底质沉积物中营养盐的释放(由于底泥的释放作用,空白水体中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  水平以及 TN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量增加),减少富营养物质的循环,从而达到有效防止和控制水体富营养化的目的。从另一个角度来说,对富营养化水体也具有一定的生态修复作用。

研究表明:经苦草和黑藻的生态修复后,模拟西湖水体的富营养化程度得到明显改善。常温条件下,移栽 20~25 d 后苦草和黑藻对模拟西湖水体中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除率均达到最高,其中,苦草对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除率分别为 66.7%、71.4% 和 68.2%,黑藻对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除率分别为 55.0%、61.4% 和 69.0%,并且它们对模拟西湖水体中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除过程均符合一级动力学模型。另外,经过 30 d 后 2 种植物的株高及单株鲜质量均明显增加。结果显示:在模拟西湖水体中,苦草和黑藻均能够正常生长,并对富营养化水体具有较好的净化效果,因此,它们可作为水环境改善和水生态修复物种。

#### 参考文献:

- [1] 项斯端,吴文卫,黄三红,等. 近 2000 年来杭州西湖藻类种群的演替与富营养化的发展过程[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 219-225.
- [2] 廖胜林. 水体富营养化的产生和应对[J]. 科技资讯, 2008(14): 155.
- [3] 姜翠玲,范晓秋,章亦兵. 农田沟渠挺水植物对 N、P 的吸收及二次污染防治[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 702-706.
- [4] 王沛芳,王超,王晓蓉,等. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 890-895.
- [5] BELTMAN B, VAN DEN BROEK T, BARENDRECHT A, et al. Rehabilitation of acidified and eutrophied fens in The Netherlands: effects of hydrologic manipulation and liming [J]. Ecological Engineering, 2001, 17(1): 21-31.
- [6] HEALY M G, RODGERS M, MULQUEEN J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(12): 2268-2281.
- [7] ABE K, OZAKI Y. Comparison of useful terrestrial and aquatic plant species for removal of nitrogen and phosphorus from domestic wastewater[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1998, 44(4): 599-607.
- [8] 鲜启鸣,陈海东,邹惠仙,等. 3 种沉水植物水浸提液中有机酸成分分析[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(3): 57-58.
- [9] ORTH R T, MOORE K A. Chesapeake Bay: an unprecedented decline in submerged aquatic vegetation[J]. Science, 1983, 222: 51-53.
- [10] LIVINGSTON R T, MCGLYNN S E, NIU X F. Factors controlling seagrass growth in a gulf coastal system: water and sediment quality and light[J]. Aquatic Botany, 1998, 60(2): 135-159.
- [11] VAN T K, WHEELER G S, CENTER T D. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria spiralis* as influenced by soil fertility[J]. Aquatic Botany, 1999, 62(4): 225-233.
- [12] 陈中义,雷泽湘,周进,等. 梁子湖六种沉水植物种群数量和生物量周年动态[J]. 水生生物学报, 2000, 24(6): 582-588.
- [13] 王传海,李宽意,文明章,等. 苦草对水中环境因子影响的日变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 798-800.
- [14] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1351-1353.
- [15] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究, 2001, 19(4): 299-303.
- [16] 国家环境保护局《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: 246-268.
- [17] SCHNEIDER I A H, RUBIO J. Sorption of heavy metal ions by the nonliving biomass of freshwater macrophyte [J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(13): 2213-2217.
- [18] KESKINKAN O, GOKSU M Z L, BASIBUYUK M, et al. Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*) [J]. Bioresource Technology, 2004, 92(2): 197-200.
- [19] AKSU Z, SAG Y, KUTSAL T. The biosorption of copper (II) by *C. vulgare* and *Z. ramigera* [J]. Environmental Technology, 1992, 13(6): 579-586.

(责任编辑:佟金凤)