

# 螺、蚌对污水处理厂再生水环境的改善稳定作用

李雪娟<sup>1</sup> 和树庄<sup>2</sup> 李 军<sup>3</sup> 陈朝宏<sup>1</sup> 张 薇<sup>1</sup> 徐 露<sup>1</sup>

(1. 云南林业职业技术学院, 昆明 650224; 2. 云南大学生命科学学院, 昆明 650091; 3. 昆明理工大学呈贡校区建设指挥部, 昆明 650500)

**摘 要** 通过选用昆明市第五污水处理厂的一级 A 标出水和水处理厂外排污泥作为静态实验环境, 研究不同混养密度下铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对污水处理厂再生水环境的净化性能, 筛选出净化效果较好的放养密度。结果表明: 放养 30 d, 铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对污水处理厂再生水环境的水质、底质均有一定的净化作用, 扣减空白对照影响, 水中 COD、TP、NH<sub>3</sub>-N 及底泥有机质平均去除率分别为 22.26%、26.10%、25.60% 和 25.69%, 底泥厚度平均减少 3.8 cm; 与对照相比, 放养螺蚌 45 d 内水均能清澈见底, 透明度均 > 70 cm, 能明显稳定水体透明度, 改善水环境。综合螺蚌生长适应性和净化效果考虑: 污水处理厂再生水静态环境中, 螺蚌混养密度应 ≤ 3 000 g/m<sup>3</sup>, 在 2 000 ~ 2 500 g/m<sup>3</sup> 为宜, 其中铜锈环棱螺的最适放养密度在 400 g/m<sup>3</sup>, 椭圆背角无齿蚌为 1 600 ~ 2 100 g/m<sup>3</sup>。

**关键词** 铜锈环棱螺 椭圆背角无齿蚌 污水处理厂 再生水环境 净化效果

中图分类号 X522 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)10-3485-08

## Role of snails and mussels in improving and stabilizing reclaimed water environment of sewage treatment plants

Li Xuejuan<sup>1</sup> He Shuzhuang<sup>2</sup> Li Jun<sup>3</sup> Chen Chaohong<sup>1</sup> Zhang Wei<sup>1</sup> Xu Lu<sup>1</sup>

(1. Yunnan Forestry Technological College, Kunming 650224, China; 2. School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China; 3. Construction Headquarters of Chengong Campus, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract** By using the effluent (Grade A marked) and sludge of the Kunming Fifth Sewage Treatment Plant as a static test, it researched the purification effect on the reclaimed water environment of sewage treatment plant between *Bellamya aeruginosa* and *Anodonta woodiana elliptica* in different stocking density, and selected the best stocking density of purifying effect. The results showed that breeding *Bellamya aeruginosa* and *Anodonta woodiana elliptica* in 30 d had certain purification effect on water quality, sediment in the reclaimed water environment of Kunming fifth sewage treatment plant, deduction of the blank, the average removal rates of COD, TP, NH<sub>3</sub>-N, sediment organic were 22.26%, 26.10%, 25.60%, 25.69%, respectively, and the sediment average thickness reduced by 3.8 cm. Compared with the control, breeding *Bellamya aeruginosa* and *Anodonta woodiana elliptica* in 45 d could clean the water with its transparency more than 70 cm, apparently stabilize water transparency, and improve the water environment. Taking the growth adaptation and purifying effect of the snails and mussels into consideration, in this static environment, the mixed breeding density of *Bellamya aeruginosa* and *Anodonta woodiana elliptica* shall be ≤ 3 000 g/m<sup>3</sup>, preferably in the 2 000 ~ 2 500 g/m<sup>3</sup>, while *Bellamya aeruginosa* optimal breeding density is 400 g/m<sup>3</sup>, and *Anodonta woodiana elliptica* is 1 600 ~ 2 100 g/m<sup>3</sup>.

**Key words** *Bellamya aeruginosa*; *Anodonta woodiana elliptica*; sewage treatment plant; reclaimed water environment; purification effect

在过去几十年中,我国许多城市的河道成为城市排污渠道,由于长期的外源污染输入和水生生物残渣的沉积,水质恶化并产生黑臭现象。在环境问题、城市人居环境质量日益受到重视的今天,消除城市河道黑臭、改善城市水环境质量,对促进社会和谐

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大专项计划 (2009ZX07317-006-03)

**收稿日期:** 2011-06-14; **修订日期:** 2011-08-11

**作者简介:** 李雪娟 (1981~), 女, 理学硕士, 讲师, 主要从事水污染控制研究工作。E-mail: 522959931@qq.com

与经济持续发展具有极其重要的现实意义。

在城市规模较大,水资源匮乏的地区,一旦采取截污措施,通常会引起河道景观水水量不足,尤其是在旱季,污水处理厂再生水成为河道主要的补给水源。由于再生水水质距离环境水体应有的标准仍有较大差距,加之水体底泥中富集大量的污染物,如有机物和氮磷营养物质,这些污染物质不断向水体上层释放,成为水体污染的重要次生污染源<sup>[1-3]</sup>,所以尽管投入了大量资金进行截污、建设城市污水处理厂,但是河道水体生态状况仍不够理想,仍有一定黑臭现象,难以满足水体环境保护的要求,针对这一情况,如何改善再生水环境,促进河道生态系统恢复,显著改善河道景观是类似城市共同面临和关心的问题。

污染水体的修复技术主要物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术等,而生物修复技术具有环境友好、生态节能的优点,是最具发展前景的主体修复技术<sup>[4-6]</sup>,在净化黑臭水体和底泥得到了广泛的重视,目前在水生植物、微生物的净化研究和实际应用方面都取得了明显的进展<sup>[7-11]</sup>。作为水体生态系统的的一个重要组成部分,底栖软体动物长期生活在水底,摄取水环境中的营养物质,有效降低水体中富营养物质的含量,能明显净化水质、改善水环境,同时水体发生的变化直接影响它们的生长、繁殖和存活,是理想的天然监测者,对其在理论和应用上的研究都有着重要的意义。目前国内外已较多采用底栖软体动物进行生物监测,评价水污染状况,并取得了一定的效果<sup>[12-18]</sup>。研究证实,底栖软体动物对污染水体中低等藻类、有机碎屑、无机颗粒物具有较好的净化效果,如蚌、螺等<sup>[19-26]</sup>。通过放养螺、河蚌,既能直观地监测评价水环境质量,更能净化水质,恢复水生生态系统稳定性,实现了水环境污染的防治结合,双管齐下。

笔者选用昆明市第五污水处理厂的出水(一级A标)和该厂外排污泥模拟再生水静态环境,研究在不同放养密度下,铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对水质和底泥的改善和稳定作用,以期为城市河道治理工程的实施、河道生态环境的恢复、提高河道治理效果提供理论依据和技术支持。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验装置

实验采用半透明 pp 板制作水箱作为反应装置

5套,规格为长 120 cm、宽 100 cm、高 100 cm,有效容积为 1 m<sup>3</sup>。螺、蚌用渔网装住在水箱中放养,渔网规格为直径 38 cm、高度 100 cm,见图 1。

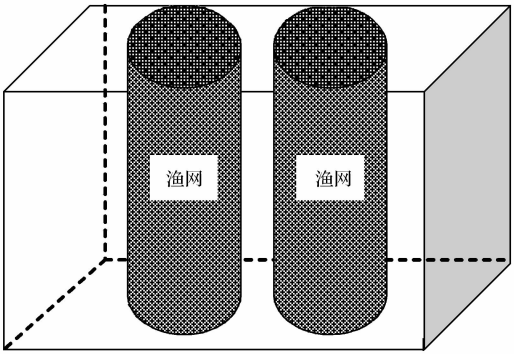


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental installation

1.1.2 螺、蚌

根据盘龙江水环境现状调查,选择滇池流域现有,但在盘龙江少见或未见螺蚌种类:铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、椭圆背角无齿蚌(*Anodonta-woodianaelliptica*),铜锈环棱螺重量约为 2~4 g/只,椭圆背角无齿蚌重量约为 500 g/只,螺蚌在放入水箱前先放入实验用水中驯化,逐只挑选健康的螺蚌个体,再进行静态实验。

1.1.3 实验条件

静态实验用水来自昆明市第五污水处理厂的出水(达一级A标),各项指标的初始值分别是:pH 为 8.23, COD 浓度为 52.8 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 浓度为 0.756 mg/L, TP 浓度为 0.144 mg/L;底泥为第五污水处理厂外排剩余污泥(加药脱水前)和盘龙江河道底泥的混合。盘龙江为滇池流域内径流面积最大的河流,昆明城市就是以盘龙江为依托发展起来的,已基本完成截污,旱季期间,基本没有未经处理的污水进入河道,目前盘龙江已转型为城市排洪和景观河道。

1.2 实验方法

1.2.1 样品投放

本实验设计 4 个不同放养密度、3 个不同的螺、蚌生物量进行生长适应性和净化效果的比较,具体内容如表 1 所示。

1.2.2 实验取样

实验周期为 30 d,每隔 3 d 测定透明度、螺、蚌的成活率及生物量,每周定时测定水中 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP,

表 1 铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌的初始放养

Table 1 Original breeding of *Bellamya aeruginosa* and *Anodontawoodianaelliptica*

| 水箱号 | 螺量<br>(g) | 螺数<br>(只) | 蚌量<br>(g) | 蚌数<br>(只) | 混养密度<br>(g/m <sup>3</sup> ) | 螺重: 蚌重 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|--------|
| 1   | 512       | 173       | 1 085     | 3         | 1 597                       | 1:2    |
| 2   | 412       | 121       | 1 694     | 3         | 2 106                       | 1:4    |
| 3   | 410       | 120       | 2 087     | 4         | 2 497                       | 1:5    |
| 4   | 900       | 301       | 2 153     | 4         | 3 053                       | 1:2    |
| 5   | 0         | 0         | 0         | 0         | 0                           | 对照     |

底泥厚度变化、底泥有机质含量,各个指标每次测定 3 个平行样。各项污染物指标均采用国家标准方法测定<sup>[27]</sup>。

1.2.3 数据统计分析

运用 spss17.0 软件对各项测定指标的平行样数据进行方差分析,判断不同混养密度的铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对各项指标的影响差异是否显著,并在此基础上对 1~5 号箱的数据进行多重比较,判断 1~5 号箱之间对各项指标的影响差异是否显著。

2 结果和讨论

2.1 螺、蚌的生长适应性比较

实验周期为 30 d,每隔 3 d 测定螺、蚌的存活、死亡个数及生物量,具体监测数据如表 2、表 3 所示。

表 2 铜锈环棱螺的生长适应性

Table 2 Growth adaptation of *Bellamya aeruginosa*

| 水箱号 | 投放数(只) | 收获数(只) | 成活率(%) | 投放重量(g) | 收获总重量(g) |
|-----|--------|--------|--------|---------|----------|
| 1   | 173    | 129    | 74.6   | 512     | 378      |
| 2   | 121    | 111    | 91.7   | 412     | 333      |
| 3   | 120    | 99     | 82.5   | 410     | 297      |
| 4   | 301    | 98     | 32.6   | 900     | 282      |
| 5   | 0      | 0      | 0      | 0       | 0        |

表 3 椭圆背角无齿蚌的生长适应性

Table 3 Growth adaptation of *Anodontawoodianaelliptica*

| 水箱号 | 投放数(只) | 收获数(只) | 成活率(%) | 投放重量(g) | 收获重量(g) | 增重(g) |
|-----|--------|--------|--------|---------|---------|-------|
| 1   | 3      | 3      | 100.0  | 1 085   | 1 106   | 21    |
| 2   | 3      | 3      | 100.0  | 1 694   | 1 721   | 26    |
| 3   | 4      | 4      | 100.0  | 2 087   | 2 124   | 37    |
| 4   | 4      | 4      | 100.0  | 2 153   | 2 171   | 18    |
| 5   | 0      | 0      | 0      | 0       | 0       | 0     |

由表 2、表 3 可知:

(1)椭圆背角无齿蚌对静态环境的生长适应性强于铜锈环棱螺。在 1 个月的实验周期里,4 个水箱中蚌的存活率一直保持在 100%,而且生物量也明显增加。

(2)铜锈环棱螺的存活率随着放养密度的增加而逐渐减低。1、2、3、4 号箱的放养密度依次为:1 597、2 106、2 497 和 3 053 g/m<sup>3</sup>,而螺的存活率依次递减,1 号最高为 74.6%、2 号为 91.7%、3 号为 82.5%、4 号仅为 32.6%,说明为了维持螺的正常生长,螺蚌最适的混养密度应≤3 000 g/m<sup>3</sup>,在 1 500~2 500 g/m<sup>3</sup> 为宜。

(3)放养密度对铜锈环棱螺存活率的影响远远大于重量比。1 号箱和 4 号箱虽然螺蚌重量比都是 1:2,但 1 号的放养密度是 1 597 g/m<sup>3</sup>,4 号的放养密度是 3 053 g/m<sup>3</sup>,最终两者的螺存活率就有差异,1 号螺存活率是 74.6%,4 号螺存活率只有 32.6%,说明 4 号的放养密度过大。

(4)综合最终的螺蚌生物量和存活率可知,椭圆背角无齿蚌和铜锈环棱螺最适的混养密度应≤3 000 g/m<sup>3</sup>,在 1 500~2 500 g/m<sup>3</sup> 为宜。铜锈环棱螺的最适放养密度在 300~400 g/m<sup>3</sup>,椭圆背角无齿蚌在 1 000~2 000 g/m<sup>3</sup>。

2.2 螺、蚌对水质净化效果比较

2.2.1 氨氮的净化效果比较

由图 2 可知:1~4 号箱 NH<sub>3</sub>-N 的含量均比 5 号箱(对照)低,说明混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对氨氮有去除效果,扣减 5 号箱的对照影响,投放 30 d 后,1~4 号箱对氨氮的最终去除率分别为 22.75%、34.04%、27.51% 和 18.08%,平均去除率为 25.60%。进一步方差分析的结果表明:

(1)混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对水体中的氨氮的去除效果影响差异显著(*P* 为 0.002<0.05),并且 1~4 号箱均与 5 号(对照)箱差异显著,说明 1~4 号箱对氨氮的净化效果比 5 号箱好,混养螺、蚌对水体中的氨氮有一定的净化效果。

(2)2 号箱与 1、3、4 号箱的 *P* 值分别为 0.009、0.020 和 0.000,均小于显著水平 0.05,差异显著,说明 2 号箱对氨氮的去除效果最好,即螺蚌的混养密度在 2 000 g/m<sup>3</sup>,铜锈环棱螺为 400 g/m<sup>3</sup>,椭圆背角无齿蚌为 1 600 g/m<sup>3</sup> 的条件下对水体中氨氮的净化效果最好。

(3)1、2 号箱中铜锈环棱螺最终存活生物量虽

然相差不大,但由于2号箱的蚌的生物量比1号箱多600 g,两者对氨氮的去除率差异显著,相差近12%,说明椭圆背角无齿蚌对氨氮有较好的净化效果,据杨建恒等<sup>[25]</sup>实验表明, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率在一定条件下与河蚌的放养密度呈正相关,本文研究结论也反映了这一点。

(4)3、4号箱差异显著( $P$ 为 $0.031 < 0.05$ ),3号箱对氨氮的去除效果比4号箱好,说明螺蚌重量比在400 g:2 000 g对氨氮净化效果优于1 000 g:2 000 g,说明螺的重量越多净化效果反而下降,结合前面的生长适应性分析结论,螺的最适放养密度在300~400  $\text{g}/\text{m}^3$ 为宜。

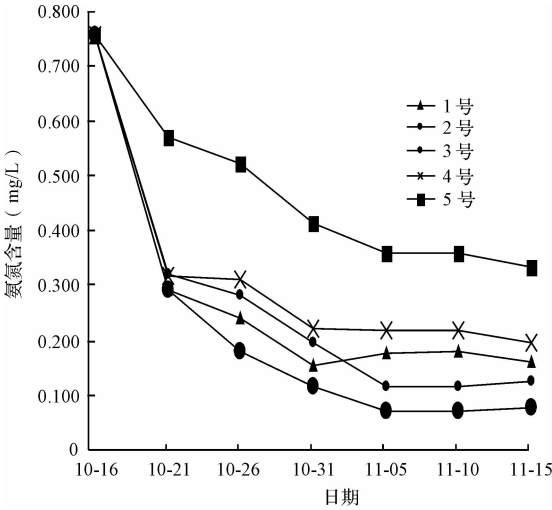


图2 氨氮的浓度比较

Fig. 2 Comparison of  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentrations

2.2.2 TP的净化效果分析

由图3可知:1~4号箱TP的含量均比5号箱(对照)低,说明混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对TP有一定的去除效果,扣减对照影响,投放30 d后,1~4号箱对TP的最终去除率分别为:16.24%、31.79%、38.05%和18.33%,平均去除率为26.10%。通过方差分析的结果可知:

(1)混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对水体中的TP的去除效果影响差异显著( $P < 0.05$ ),并且2、3、4号箱均与5号箱差异显著,说明2、3、4号箱对TP的净化效果比5号箱好,混养螺、蚌对水体中的TP有一定的净化作用;

(2)2、3、4号箱间的差异显著,3号箱对TP的去除效果最佳,即螺蚌的混养密度在2 500  $\text{g}/\text{m}^3$ ,铜锈环棱螺为400  $\text{g}/\text{m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌为2 100  $\text{g}/\text{m}^3$ 的条件下对水体中TP的净化效果最好。由3号

箱净化效果优于2号箱可知,在螺放养密度均为400  $\text{g}/\text{m}^3$ 的情况下,蚌越重对TP的净化效果更强,这也反映出蚌对TP的净化效果优于螺,可能与蚌、螺的滤水率不同有关<sup>[28]</sup>,本实验中,蚌重远大于螺,因此滤水率也较大,净水效果较好。蚌的最佳放养密度可约在2 000~2 500  $\text{g}/\text{m}^3$ 为宜,过小只数太少,过大又会影响螺的生长。

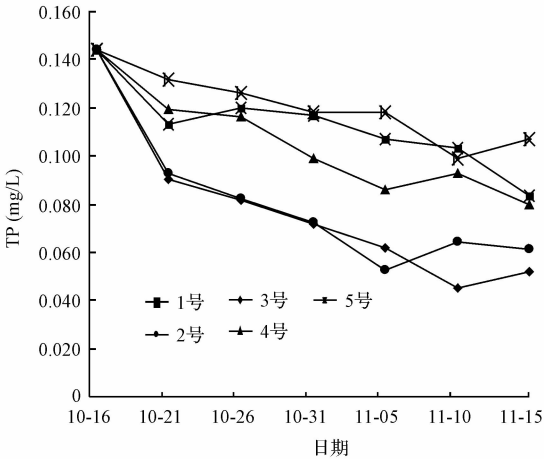


图3 TP的浓度比较

Fig. 3 Comparison of TP concentrations

2.2.3 COD的净化效果比较

由图4可知:1~4号箱COD的含量均比5号箱(对照)低,说明混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对COD有一定的去除效果,投放30 d后,扣减对照影响,1~4号箱对COD的最终去除率分别为:23.83%、19.06%、17.52%、28.64%,平均去除率为22.26%。通过方差分析的结果可知:

(1)混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对水体

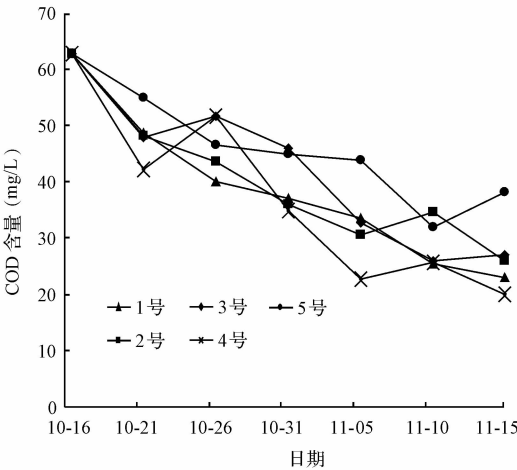


图4 COD的浓度比较

Fig. 4 Comparison of COD concentrations

中的 COD 的去除效果影响差异显著( $P$  为  $0.013 < 0.05$ ),并且 1、4 号箱均与 5 号箱差异显著,说明 1、4 号箱对 COD 的净化效果比 5 号箱好,说明混养螺、蚌对水体中的 COD 有一定的净化作用;

(2)1 号与 4 号差异显著( $P$  为  $0.022 < 0.05$ ),说明 4 号箱对 COD 的去除效果最佳,即螺蚌的混养密度在  $3\ 000\ \text{g}/\text{m}^3$ ,铜锈环棱螺为  $900\ \text{g}/\text{m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌为  $2\ 100\ \text{g}/\text{m}^3$  的条件下对水体中 COD 的净化效果较好;

(3)1 号、4 号箱对水体中 COD 的去除效果比 2、3 号箱好,这从一个侧面反映了螺蚌重量比 1:2,对 COD 的净化效果均优于其他重量比(1:4、1:5),并且混养密度为  $3\ 000\ \text{g}/\text{m}^3$  的螺蚌对 COD 的去除率优于  $1\ 500\ \text{g}/\text{m}^3$ ,这与螺蚌以水体中的有机物为食<sup>[29]</sup>,螺的数量越多,消耗的有机物越多,对水体中 COD 的去除效果越好。

## 2.3 水体透明度变化比较

### 2.3.1 水体透明度持续稳定

通过 45 d 连续观测试验水体,比较不同放养密度下螺蚌对水体透明度的影响,结果表明:混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌有利于改善水体透明度,对水体透明度有持续稳定作用,与费志良等<sup>[30]</sup>、潘建林等<sup>[31]</sup>的研究结果相似。由图 5 可知:1~4 号箱中透明度均比 5 号箱(空白对照)好,差异显著( $P$  为  $0.002 < 0.05$ ),在 45 d 的观察期内水体均能见底,透明度均大于 70 cm,而对照箱不能见底,其透明度只能达到 50 cm,说明混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对水体透明度有一定的改善和稳定作用。

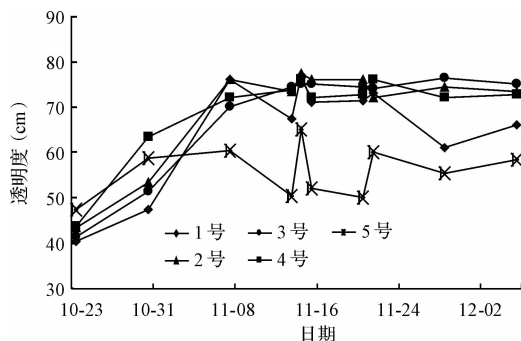


图 5 透明度的变化

Fig. 5 Changes of transparency

### 2.3.2 水体生态恢复条件改善

透明度是反映水体中浮游植物和有机腐屑数量的一个间接的物理指标,透明度低不利于水生植物、水生动物的生长<sup>[11]</sup>。放养螺蚌能明显提高并长期

稳定水体透明度,对河道生态系统恢复起着至关重要的作用。

在实验的第 1~4 天,由于进水搅动,水体浑浊透明度不高,未发现水生生物。从实验的第 5 天开始,水体透明度逐渐升高,水体中开始出现丝状绿藻,第 14 天以后,原生和后生动物种类均出现大幅度增加,大量纤毛游泳型纤毛虫出现,说明此时的微生物群体处于成熟稳定期,水质有所改善,随后出现了钟虫,说明水质明显变好<sup>[11]</sup>。通过 45 d 定期连续观察,1~4 号箱中丝状绿藻的生长较稳定,水能见底,水体透明度高,原生动物和后生动物的种类、数量均大于 5 号箱(空白对照),说明放养螺蚌对水体生态的恢复条件有一定的改善作用。

## 2.4 螺、蚌对底泥净化效果比较

### 2.4.1 底泥厚度的变化

由图 6 可知:铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌混养后底泥的厚度均有减少,扣除对照影响,投放 30 d 后,1~4 号箱底泥厚度最终减少量分别为 1.3、2.0、3.0 和 2.5 cm,平均减少量为 3.8 cm。通过方差分析的结果可知:

(1)1~4 号箱与 5 号水箱的底泥厚度削减量差异显著( $P < 0.05$ ),说明混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对底质厚度有一定的削减效果。

(2)2 号与 3 号箱差异显著( $P$  为  $0.003 < 0.05$ ),也反映出 3 号箱对底泥厚度的消减效果最好,即螺蚌的混养密度在  $2\ 500\ \text{g}/\text{m}^3$ ,铜锈环棱螺为  $500\ \text{g}/\text{m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌为  $2\ 000\ \text{g}/\text{m}^3$  的条件下对底泥体积的消解效果最好。3、4 号箱的底泥厚度削减量差异不显著,这与 3、4 号螺蚌混养密度大有关。

(3)通过比较 2、3、4 号箱底泥厚度的变化可知:相同重量(400 g)的铜锈环棱螺,椭圆背角无齿蚌的重量差异对底泥厚度减少产生一定的影响,蚌

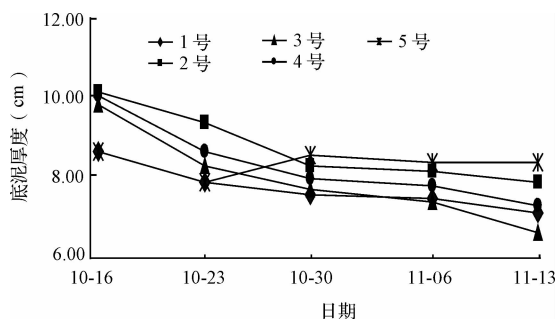


图 6 底泥厚度的变化

Fig. 6 Changes in sediment thickness

越重底泥厚度减少量越多,蚌对底泥厚度的消解作用强于螺。

#### 2.4.2 底泥有机质的净化效果

由图7可知:1~4号箱对底泥有机质的去除率均比5号箱(对照)高,扣除空白影响,投放30 d后,1~4号箱对底泥有机质的最终去除率分别为:16.04%、33.88%、32.10%和20.75%,平均去除率为25.69%。通过方差分析可知:

(1)混养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对底泥有机质去除均有显著的净化作用( $P$ 为 $0.002 < 0.05$ ),而且1~4号箱中底泥有机质的去除率均比5号箱(空白对照)高,差异显著,说明混养螺、蚌的1~4号箱对底泥有机质的净化效果比不放养螺、蚌的5号箱好。

(2)2、3号箱与1、4号箱差异显著,说明2、3号箱对底泥有机质的去除效果最好,即螺蚌混养密度在 $2\,000 \sim 2\,500\text{ g/m}^3$ ,铜锈环棱螺为 $400\text{ g/m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌 $1\,600 \sim 2\,100\text{ g/m}^3$ 的条件下对底泥中有机质的净化效果最好。

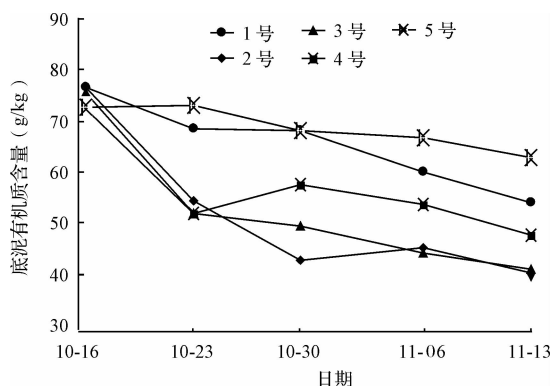


图7 底泥有机质含量的变化

Fig. 7 Changes in sediment organic matter content

### 3 结论

采用静态实验模拟昆明市第五污水处理厂尾水环境,探讨不同放养密度的铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对污水处理厂尾水环境的净化和稳定作用,实验结果表明:

(1)在30 d的实验周期里,椭圆背角无齿蚌对静态环境的生长适应性强于铜锈环棱螺,蚌的存活率一直保持在100%,而且生物量也明显增加。

(2)铜锈环棱螺的存活率随着放养密度的增加而逐渐减低,螺、蚌最适的混养密度应 $\leq 3\,000\text{ g/m}^3$ ,在 $1\,500 \sim 2\,500\text{ g/m}^3$ 为宜,铜锈环棱螺的最适

放养密度约在 $300 \sim 400\text{ g/m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌在 $1\,000 \sim 2\,000\text{ g/m}^3$ 。

(3)椭圆背角无齿蚌对TP、底泥有机质净化效果,对底泥厚度的消解作用均强于铜锈环棱螺。

(4)在30 d的试验周期里,放养铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对昆明市第五污水处理厂尾水静态环境的水体、底质均有一定的净化作用,扣减空白影响,COD平均去除率为22.26%,TP平均去除率为26.10%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为25.60%,底泥有机质含量下降25.69%,底泥厚度平均减少3.8 cm。与对照相比,放养螺蚌能明显提高水体透明度,使水体透明度长期稳定在70 cm以上,改善水环境。

(5)螺蚌的混养密度在 $2\,000\text{ g/m}^3$ ,铜锈环棱螺为 $400\text{ g/m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌为 $1\,600\text{ g/m}^3$ 的条件下对水体中氨氮、底泥有机质的去除效果较好,透明度较好。螺蚌的混养密度在 $2\,500\text{ g/m}^3$ ,铜锈环棱螺为 $400\text{ g/m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌为 $2\,100\text{ g/m}^3$ 的条件下对水体中TP的净化效果、底泥厚度、有机质的消解效果较好,透明度较好。螺蚌的混养密度在 $3\,000\text{ g/m}^3$ ,铜锈环棱螺为 $900\text{ g/m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌为 $2\,100\text{ g/m}^3$ 的条件下对水体中COD的去除效果较好。

(6)、综合螺蚌生长适应性和净化效果考虑:在昆明市第五污水处理厂再生水静态环境中,螺蚌混养密度应 $\leq 3\,000\text{ g/m}^3$ ,在 $2\,000 \sim 2\,500\text{ g/m}^3$ 为宜,其中铜锈环棱螺的最适放养密度在 $400\text{ g/m}^3$ ,椭圆背角无齿蚌为 $1\,600 \sim 2\,100\text{ g/m}^3$ 。

综上所述,混养一定密度的铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌对昆明市第五污水处理厂再生水环境中水质、底泥均有一定的净化和改善稳定作用,对污水处理厂再生水的静水水体生态修复有重要意义。

### 参考文献

- [1] 徐祖信. 河流污染治理技术与实践. 北京:中国水利电力出版社,2003
- [2] 颜昌宙,范成新,杨建华,等. 湖泊底泥环保疏浚技术研究. 环境污染与防治,2004,26(3):189-192  
Yan Changzhou, Fan Xin, Yang Jianhua, et al. The research of the lake sediment environmental dredging technology. Environmental Pollution and Control, 2004, 26(3): 189-192 (in Chinese)
- [3] 王英才,刘永定,郝宗杰,等. 上海市几条黑臭河道治理效果的比较与分析. 水生生物学报,2009,33(2):355-359  
Wang Yingcai, Liu Yongding, Hao Zongjie, et al. Compa-

- ring and analyzing the control effect of several black and stinking rivers in Shanghai. *Acta Hydrobiologica Sinica*, **2009**, 33(2):355-359 (in Chinese)
- [4] 顾俊, 刘德启, 陆璐露, 等. 城市内河生物修复及其对底泥氮素转化影响的实验研究. *环境工程学报*, **2008**, 2(6):733-736
- Gu Jun, Liu Deqi, Lu Lulu, et al. Experimental study on bioremediation of city river and its effects on transformation of nitrogen in sediments. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2008**, 2(6):733-736 (in Chinese)
- [5] 钱嫦萍, 王东启, 陈振楼, 等. 生物修复技术在黑臭河道治理中的应用. *水处理技术*, **2009**, 35(4):13-17
- Qian Changping, Wang Dongqi, Chen Zhenlou, et al. Progress of bioremediation for controlling blackening and stink of rivers. *Technology of Water Treatment*, **2009**, 35(4):13-17 (in Chinese)
- [6] 谢丹平, 李开明, 江栋, 等. 底泥修复对城市污染河道水体污染修复的影响研究. *环境工程学报*, **2009**, 3(8):1447-1453
- Xie Danping, Li Kaiming, Jiang Dong, et al. Study on effect of polluted sediments bioremediation on water body remediation of polluted urban rivers. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2009**, 3(8):1447-1453 (in Chinese)
- [7] 黎贞, 卫晋波, 任随周, 等. 生物制剂对城市黑臭河涌的原位修复技术. *环境科学与技术*, **2010**, 33(12F):435-439
- Li Zhen, Wei Jinbo, Ren Suizhou, et al. Recent progress of biological preparations for in situ remediation of urban black-odor river. *Environmental Science & Technology*, **2010**, 33(12F):435-439 (in Chinese)
- [8] 雷恒毅, 余光伟, 刘广立, 等. 珠江流域重污染感潮河道黑臭治理新技术. *中山大学学报(自然科学版)*, **2007**, 46(3):134-136
- Lei Hengyi, Yu Guanwei, Liu Guangli, et al. An integrated technology to control black-odor of heavily polluted tidal river in pearl river delta area. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, **2007**, 46(3):134-136 (in Chinese)
- [9] 余光伟, 雷恒毅, 刘康胜, 等. 治理感潮河道黑臭的底泥原位修复技术研究. *中国给水排水*, **2007**, 23(9):5-9
- Yu Guanwei, Lei Hengyi, Liu Kangsheng, et al. In-situ sediment remediation technology for control of black and odorous water in tidal river. *China Water & Wastewater*, **2007**, 23(9):5-9 (in Chinese)
- [11] 吴光前, 刘倩灵, 周培国, 等. 固定化微生物技术净化黑臭水体和底泥技术. *水处理技术*, **2008**, 34(6):26-29
- Wu Guangqian, Liu Qianling, Zhou Peiguo, et al. Remediation of polluted water and sediment by using immobilized microorganism technology. *Technology of Water Treatment*, **2008**, 34(6):26-29 (in Chinese)
- [12] 吴东浩, 王备新, 张咏, 等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景. *南京农业大学学报*, **2011**, 34(2):129-134
- Wu Donghao, Wang Beixin, Zhang Yong, et al. Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, **2011**, 34(2):129-134 (in Chinese)
- [13] 段学花, 王兆印, 余国安. 以底栖动物为指示物种对长江流域水生态进行评价. *长江流域资源与环境*, **2009**, 18(3):241-247
- Duan Xuehua, Wang Zhaoyin, Yu Guoan. Ecological assessment of the Yangtze River eco-system with benthic invertebrate as indicator species. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **2009**, 18(3):241-247 (in Chinese)
- [14] 朱迪, 郑海涛, 常剑波. 香格里拉岗曲河大型底栖动物群落和水质的快速生物评价. *水生态学杂志*, **2009**, 2(2):56-66
- Zhu Di, Zheng Haitao, Chang Jianbo. Macroinvertebrate community and rapid bio-assessment of the quality of aquatic ecosystem of Gangqu River in Shangri-La Gorge Conservation Area. *Journal of Hydroecology*, **2009**, 2(2):56-66 (in Chinese)
- [15] Claudia Schmitt, Christian Vogt, Bram Van Ballaer, et al. In situ cage experiments with *Potamopyrgus antipodarum*—A novel tool for real life exposure assessment in freshwater ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **2010**, 73(7):1574-1579
- [16] Naima Mahmoud, Mohamed Dellali, Patricia Aissa, et al. The use of *Fulvia fragilis* (Mollusca: Cardiidae) in the biomonitoring of Bizerta lagoon: A multimarkers approach. *Ecological Indicators*, **2010**, 10(3):696-702
- [17] Lisa A. Richman, Greg Hobson, Donald J. Williams, et al. The Niagara River mussel biomonitoring program (*Elptio complanata*): 1983—2009. *Journal of Great Lakes Research*, **2011**, 37(2):213-225
- [18] Marion Gust, Thierry Buronfosse, Olivier Geffard, et al. In situ biomonitoring of freshwater quality using the New Zealand mudsnail *Potamopyrgus antipodarum* (Gray) exposed to wastewater treatment plant (WWTP) effluent discharges. *Water Research*, **2010**, 44(15):4517-4528
- [19] 陈玉霞, 卢晓明, 何岩, 等. 底栖软体动物水环境生态修复研究进展. *净水技术*, **2010**, 29(1):5-8
- Chen Yuxia, Lu Xiaoming, He Yan, et al. Research pro-

- gress of benthic mollusks for water environmental ecological restoration. *Water Purification Technology*, **2010**, 29 (1):5-8 (in Chinese)
- [20] 屈铭志, 屈云芳, 任文伟, 等. 铜锈环棱螺控制微囊藻水华的机理研究. *复旦学报(自然科学版)*, **2010**, 49(3): 301-308
- Qu Mingzhi, Qu Yunfang, Ren Wenwei, et al. The mechanism of controlling *Microcystis* bloom by *Bellamya aeruginosa*. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, **2010**, 49(3):301-308 (in Chinese)
- [21] Ing-Marie Gren, Odd Lindahl, Martin Lindqvist. Values of mussel farming for combating eutrophication: An application to the Baltic Sea. *Ecological Engineering*, **2009**, 35 (5): 935-945
- [22] Marinho-Soriano E., Azevedo C. A. A., Trigueiro T. G., et al. Bioremediation of aquaculture wastewater using macroalgae and *Artemia*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **2011**, 65(1):253-257
- [23] 徐海军, 凌去非, 杨彩根, 等. 3种淡水贝类对藻类消除作用的初步研究. *水生态学杂志*, **2010**, 3(1):72-75
- Xu Haijun, Ling Qufei, Yang Caigen, et al. Preliminary studies on the elimination effect of algae by three species of freshwater bivalve. *Journal of Hydroecology*, **2010**, 3 (1):72-75 (in Chinese)
- [24] 朱苗骏, 柏如法. 不同密度铜锈环棱螺对水体环境影响效果的研究. *淡水渔业*, **2004**, 34(6):31-33
- Zhu Miaojun, Bai Rufa. Effect of different density of *Bellamya aeruginosa* on water environment. *Freshwater Fisheries*, **2004**, 34(6):31-33 (in Chinese)
- [25] 杨建恒, 张永. 河蚌的水质净化试验. *安徽农业科学*, **2003**, 31(4):680-681
- Yang Jianheng, Zhang Yong. Experiment in the purity of water quality for clam growth. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, **2003**, 31(4):680-681 (in Chinese)
- [26] 赵沐子, 费志良, 郝忱, 等. 不同贝类对水质净化效果的比较. *水产科学*, **2006**, 25(3):133-135
- Zhao Muzi, Fei Zhiliang, Hao Chen, et al. Short-term purification of water by different Mollusks. *Fisheries Science*, **2006**, 25(3):133-135 (in Chinese)
- [27] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [28] 卢晓明, 金承翔, 黄民生, 等. 底栖软体动物净化富营养化河水实验研究. *环境科学与技术*, **2007**, 30(7):7-9
- Lu Xiaoming, Jin Chengxiang, Huang Minsheng, et al. Purification of eutrophic river water with benthic mollusks. *Environmental Science & Technology*, **2007**, 30(7):7-9 (in Chinese)
- [29] 朱苗骏, 柏如法. 不同密度铜锈环棱螺对水体环境影响效果的研究. *淡水渔业*, **2004**, 34(6):31-33
- Zhu Miaojun, Bai Rufa. Effect of different density of *Bellamya aeruginosa* on water environment. *Freshwater Fisheries*, **2004**, 34(6):31-33 (in Chinese)
- [30] 费志良, 潘建林, 徐在宽, 等. 三角帆蚌对水体悬浮物和叶绿素a消除量的研究. *海洋湖沼通报*, **2005**, 7(2):40-45
- Fei Zhiliang, Pan Jianlin, Xu Zaikuan, et al. Study of the elimination of suspended substances and chlorophyll in water by *Hytiopsis cumingii* (lea). *Transactions of Oceanology and Limnology*, **2005**, 7(2):40-45 (in Chinese)
- [31] 潘建林, 徐在宽, 唐建清, 等. 湖泊大型贝类控藻与净化水质的研究. *海洋湖沼通报*, **2007**, (2):69-79
- Pan Jianlin, Xu Zaikuan, Tang Jianqing, et al. Study on the effects of large mollusks on algae control and water quality at Meiliang gulf in Taihou Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, **2007**, (2):69-79 (in Chinese)