

# 铜绿微囊藻与浮萍联合生长对净化水体的影响

孙 焕, 苏稚喆, 冯 婷, 赵 云, 魏 炜

(四川大学生命科学学院生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065)

**摘 要:** 本实验以 1/5 的 Hoagland 溶液为培养液, 设置 0、20、40、60、80、100 mL/L 六个铜绿微囊藻(FACHB 930,  $10^7$  cells/mL)接种梯度与少根紫萍(ZH0051,  $400\text{ g/m}^2$ )共培养. 结果发现, 少根紫萍的生长速率、抗氧化酶活性(SOD、APX 和 CAT)以及培养液中微囊藻毒素含量随着铜绿微囊藻接种量的增加呈现出先升高后降低的趋势, 而少根紫萍体内微囊藻毒素却先降低后升高, 淀粉积累量呈现出逐渐下降的趋势. 铜绿微囊藻的接种量为 20 mL/L 时, 少根紫萍的生长速率达到最大值( $3.64\text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ ). 当接种量在 60~80 mL/L 之间时, 少根紫萍能从培养液中高效的移除氮、磷. 实验结果表明, 当水体中铜绿微囊藻浓度在  $2.0 \times 10^8$  cells/L (接种量为 20 mL/L)左右时, 少根紫萍能够达到最大的生物量、相对高的淀粉积累量、以及高品质的氮磷去除率, 并能有效地抑制铜绿微囊藻的生长.

**关键词:** 铜绿微囊藻; 少根紫萍; 生长; 微囊藻毒素; 污水处理

**中图分类号:** X52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0853-07

## Effect of *Microcystis Aeruginosa* and duckweed combined growth on the purification of waste water

SUN Huan, SUN Zhi-Zhe, FENG Ting, ZHAO Yun, WEI Wei

(Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environment of Ministry of Education,  
College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In this experiment, 0, 20, 40, 60, 80 and 100 mL/L of *Microcystis aeruginosa* (FACHB 930,  $10^7$  cells/mL) were co-cultured with *Spirodela punctata* (ZH0051,  $400\text{ g/m}^2$ ) in Hoagland which was diluted five times. Experimental results showed that the growth rate and the antioxidant enzyme activities (SOD, APX and CAT) of *Spirodela punctata* and the microcystins in the culture medium increased first and decreased with the increase of inoculation volume of *Microcystis aeruginosa*. In contrast, the content of microcystins in *Spirodela punctata* decreased first and then increased, and the accumulation of starch in the *Spirodela punctata* had showed a gradual decline. When the inoculation of *Microcystis aeruginosa* was 20 mL/L, the growth rate of *Spirodela punctata* reached its maximum value ( $3.64\text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ ). When the inoculum size was between 60~80 mL/L, the *Spirodela punctata* was able to remove nitrogen and phosphorus efficiently from the culture medium. It's showed that when the concentration of *Microcystis aeruginosa* in water was about  $2.0 \times 10^8$  cells/L (the inoculation level was 20 mL/L), *Spirodela punctata* can achieve a maximum biomass, relatively high starch accumulation rate, and high quality of nitrogen and phosphorus removal rate, and can effectively inhibit the growth of *Microcystis aeruginosa*.

**Keywords:** *Microcystis aeruginosa*; *Spirodela punctata*; Growth; Microcystin; Sewage disposal

收稿日期: 2017-05-13

基金项目: 四川省科技支撑项目(2017SZ0181)

作者简介: 孙焕(1989-), 女, 河南永城人, 硕士, 研究方向为生物化学与分子生物学. E-mail: sunhuan1325@163.com

通讯作者: 魏炜. E-mail: wwscuwz@163.com

1 引 言

浮萍是最小的水生开花植物<sup>[1]</sup>,生长在温和潮湿的环境中,在全世界广泛分布,有 5 个属(*Spirodela*, *Landoltia*, *Lemna*, *Wolffiella* 和 *Wolffia*)<sup>37</sup> 个种<sup>[2]</sup>. 浮萍主要是进行无性繁殖,繁殖速度相当快,很多种类的浮萍的生物量能够在 2~3 天翻倍<sup>[3]</sup>. 另外浮萍能够在高氮、磷的污水中生存,能够快速降低污水中二氧化碳与污水中 N、P 的含量<sup>[4]</sup>,相比较其它的水生植物,其收集方法相对简单易行. 浮萍可以产生并累积大量的淀粉,据报道,在不同条件下生长的许多浮萍物种的淀粉含量在 3%~75% 之间<sup>[5]</sup>,积累的淀粉可以很容易地转化为乙醇,是生物燃料生产的潜在工业原料<sup>[6]</sup>. 现今,由于其快速增殖、生长周期长、高营养水平的耐受性以及高品质的营养物质吸收能力的特点,浮萍被用来作为处理污水的研究对象,旨在能够令浮萍起到水体修复和物质循环利用的作用.

随着水体富营养化程度的加重,水体中藻类生物在短时间内快速生长,特别是铜绿微囊藻的生长,导致水体爆发“水华”,严重影响了水生生物的生长以及人类的健康. 据报道,世界上 25%~70% 的水体污染会产生藻类毒素. 微囊藻毒素(MC)是蓝藻水华后出现频率最高、释放量最多、危害最大的藻毒素. 目前,大多数研究集中在微囊藻毒素对动物、植物等生物机体的生长以及生态的影响方面. 微囊藻毒素可以直接或者间接进入动物体内,导致肝脏细胞抗氧化系统紊乱,引发肝癌而致死<sup>[7]</sup>. 微囊藻毒素与重金属的危害性类似,能够抑制光合作用以及改变植物体内一系列抗氧化酶的活性<sup>[8-9]</sup>,导致植物的非正常生长或者死亡. 在富营养化水体中藻类的大量增殖是不可避免的,一些研究专家认为,浮萍用于治理污水时,与某些藻类的混合可以获得更高的生物量,因为在这个混合系统中,浮萍和藻类都能发挥各自的优势<sup>[10]</sup>. 浮萍能够抑制铜绿微囊藻的生长,防止其异常繁殖,并能够在一定程度上抑制铜绿微囊藻释放微囊藻毒素,降低铜绿微囊藻对水体的危害. 因此,将铜绿微囊藻与浮萍共培养,来进行关于浮萍对污水的处理效率、对藻类的抑制作用以及共培养下浮萍的生物量是否优于单独培养浮萍的研究十分必要.

在本实验中,选择高淀粉积累品种浮萍—少根紫萍(ZH0051)、以产毒素铜绿微囊藻 FACHB930 作为材料. 将不同浓度的铜绿微囊藻与少根紫萍共培养,来研究铜绿微囊藻对少根紫萍的生物量、抗

氧化物酶活性淀粉含量、少根紫萍对污水中氮磷的吸收能力、以及对微囊藻毒素的富集能力的变化,为少根紫萍用于污水处理做出科学有效的指导.

2 材料与amp;方法

2.1 材料

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, strain FACHB930),购买于中国科学院野生生物种质库—淡水藻种库,用 BG11 培养液<sup>[11]</sup>培养扩增. 少根紫萍(*Spirodela punctata*, line ZH0051),取自中国科学院成都生物研究所,用 Hoagland<sup>[12]</sup>(表 2-2)培养液进行扩大培养繁殖,以备实验使用.

2.2 方 法

2.2.1 实验设计 实验在四川大学第一理科楼楼顶进行,试验时间为 2016 年 8 月~9 月. 实验进行时,成都的温度为 20~40 ℃,平均气温为 29 ℃. 本实验选用不透光塑料盆(17.5 cm×12.5 cm×5.5 cm)作为实验容器,装入 800 mL 1/5 Hoagland 培养液. 按表 1 向培养盆中加入处于对数生长期的铜绿微囊藻( $10^7$  cells/mL),挑选生长大小基本一致的少根紫萍,经清水漂洗去除污垢杂质,按照 400 mg/m<sup>2</sup> 投入到塑料盆中,达到 100% 覆盖率. 每隔 3 d 测量培养液中的总氮、总磷的含量. 15 d 后,收获少根紫萍用于后续实验,测定少根紫萍生物量的变化以及各项生理生化指标. 在实验期间,使用蒸馏水补充培养盆中蒸发的水分. 每个实验重复三次,数据取其平均值.

表 1 铜绿微囊藻接种量

Tab. 1 The inoculation level of <i>Microcystis aeruginosa</i>						
分组	A	B	C	D	E	F
接种量 (mL/L)	0	20	40	60	80	100

2.2.2 植物生物量的测定方法 少根紫萍和铜绿微囊藻共培养 15 d 后,测浮萍鲜重,将浮萍放置在特制的网袋中,然后用脱水机离心除去其表面水分,再按照 Bergmann 的方法<sup>[13]</sup>进行测量.

2.2.3 植物淀粉含量的测定方法 淀粉含量的测定:首先将干燥的浮萍研磨成干粉(0.3 g),加入 3 mL HCl(6 M),在沸水浴中加热 2 h,用 HCl(6 M)或 KOH(6 M)调节到  $7.0 \pm 0.5$ ,然后加入 200  $\mu$ L Pb(COOH)<sub>2</sub> 沉淀蛋白,5000 g 离心 5 min,取上清液,其糖含量用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[14]</sup>. (淀粉含量=葡萄糖含量×0.909).

2.2.4 总氮含量的测定 运用碱性过硫酸钾消解

紫外分光光度法测定总氮含量<sup>[15]</sup>。

2.2.5 总磷含量的测定 采用钼酸铵分光光度法测定总磷含量(中华人民共和国国家环境保护标准 HJ 636-2012-GB 11893-89)。

2.2.6 植物抗氧化酶系统的测定方法 参照 Jiang<sup>[16]</sup>的方法, 取 0.5 g 浮萍(鲜重), 加入 5 mL 磷酸钾缓冲液(50 mM,pH7.0, 1 mM EDTA,1 % PVP)在冰浴中研磨,4℃ 12000 g 离心 20 min,取上清液进行以下酶活力测定。

(1) 植物 SOD 酶活性的测定 采用 Beauchamp<sup>[17]</sup>方法测定。

(2) 植物 APX 酶活性的测定 采用 Nakano and Asada<sup>[18]</sup>方法测定。

(3) 植物 CAT 酶活性的测定 参照 Aebi 的方法<sup>[19]</sup>进行测定。

2.2.7 微囊藻毒素含量测定方法 微囊藻毒素试剂盒 (Microcystin ELISA Kit, 96T, Purchased from Germany)。

2.2.8 数据分析 所有数据采用 SPSS 16.0 软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)进行显著性差异分析,用 Origin 8.0 和 Excel 2003 作图。小写字母字母 a、b 和 c 表示在相同生长时间内不同处理组的显著差异性。

3 结果与分析

3.1 铜绿微囊藻对少根紫萍生长的影响

铜绿微囊藻接种量的改变对少根紫萍的生长速率有很大的影响。随着微囊藻毒素接种量的不断增加,少根紫萍的湿重(图 1 A)与干重(图 1 B)呈现出先升高后降低的趋势。铜绿微囊藻的接种量为 20 mL/L 时,少根紫萍生长速率达到最高(3.64 g/m<sup>2</sup>/d);然而在 20~100 mL/L 之间时,少根紫萍的生长速率逐渐降低。在铜绿微囊藻接种量为 80 mL/L 时,少根紫萍的生长速率与对照组基本一致。在铜绿微囊藻接种量为 100 mL/L 时,少根紫萍的生长速率降到最低(3.28 g/m<sup>2</sup>/d)。

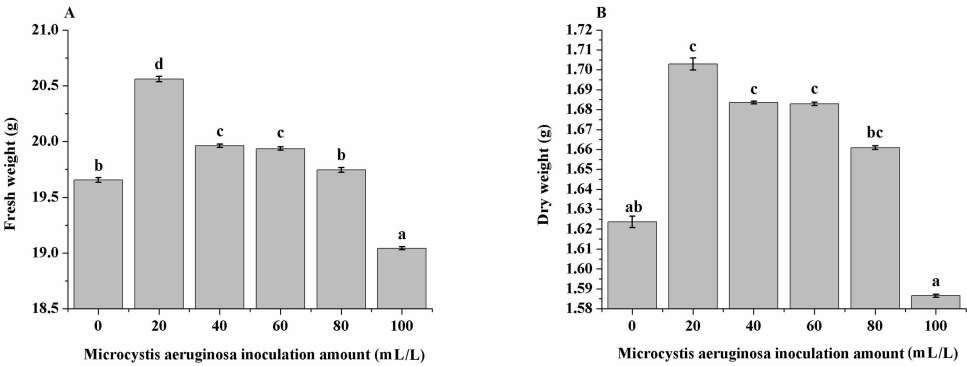


图 1 不同接种量的铜绿微囊藻对少根紫萍生物量的影响  
A:鲜重;B:干重

Fig.1 Biomass of *Spirodela punctata* under different inoculation levels of *Microcystis aeruginosa*  
A. Fresh weight (FW); B. Dry weight (DW)

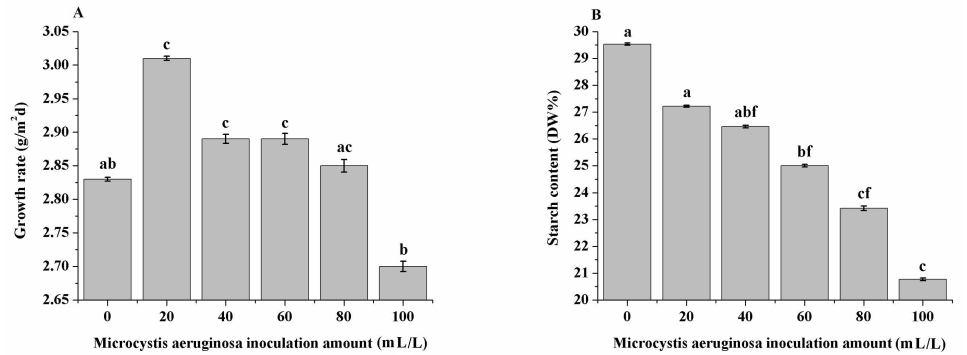


图 2 不同接种量的铜绿微囊藻对少根紫萍淀粉累积的影响  
A:生长速率;B:淀粉累积量

Fig.2 The growth rate and starch content of *Spirodela punctata* under different inoculation levels of *Microcystis aeruginosa*  
A. Growth rate; B. Starch content

3.2 铜绿微囊藻对少根紫萍淀粉积累的影响

随着铜绿微囊藻接种量的不断增加,少根紫萍的生长速率与其鲜重、干重的增长趋势保持一致(图 2A)。但是少根紫萍的淀粉含量随着随着铜绿微囊藻接种量的增加而逐渐降低,与对照相比较,当铜绿微囊藻接种量从 20 mL/L 增加到 100 mL/L 时,少根紫萍的淀粉含量分别降低了 2.31%、

3.07%、4.53%、6.11%和 8.76%(图 2A)。结果表明,铜绿微囊藻的存在抑制了少根紫萍淀粉的积累。

3.3 培养液中 TN、TP 含量的变化

实验结果表明少根紫萍与铜绿微囊藻共培养能从培养液中高效的移除氮、磷。12 d 后,大部分的氮和磷能从培养液中被移除(表 2 与表 3)。

表 2 培养液中的总氮含量(mg/L)  
Tab. 2 The TN content (mg/L) in the culture medium

Time(day)	A	B	C	D	E	F
0	79.87±0.38	79.87±0.38	79.87±0.38	79.87±0.38	79.87±0.38	79.87±0.38
3	70.22±2.20	72.46±0.74	72.88±0.42	72.61±0.31	72.70±0.30	72.92±0.62
6	58.39±0.76	58.91±1.29	59.74±0.44	58.39±0.89	59.94±1.56	59.68±0.21
9	55.83±0.95	54.65±1.30	56.54±0.30	56.78±0.52	56.01±0.52	55.88±0.74
12	53.64±0.23	53.23±0.23	54.96±1.10	54.52±0.25	54.57±0.68	54.26±0.29
15	53.03±0.32	50.95±0.69	49.89±0.52	40.78±1.06	41.12±1.26	43.40±0.52

表 3 培养液中的总磷含量(mg/L)  
Tab. 3 TP content (mg/L) in the culture medium

Time (day)	A	B	C	D	E	F
0	32.37±0.03	32.37±0.03	32.37±0.03	32.37±0.03	32.37±0.03	32.37±0.03
3	22.78±1.8	22.32±1.46	21.25±1.51	21.12±0.80	18.70±1.62	18.88±1.67
6	21.15±1.3	21.80±0.43	20.07±0.47	20.49±0.62	17.18±1.53	17.78±0.95
9	15.51±0.24	16.49±0.89	17.22±0.94	19.15±1.18	15.67±1.71	15.94±0.44
12	14.63±0.63	15.74±0.96	15.11±0.35	15.53±0.59	15.02±0.76	14.94±0.12
15	11.47±0.85	12.86±0.52	11.55±1.35	11.65±0.83	12.38±0.90	14.04±1.13

少根浮萍对于氮的吸收分为两个阶段:在延迟阶段,吸收 N 的速度非常缓慢;增长阶段,快速吸收 N。在前 12 d,少根紫萍以及它与铜绿微囊藻的混合在移除氮的能力上只有很小的差异。从 12 d 到 15 d,铜绿微囊藻接种量为 60 mL/L 时,氮移除效率其最高为 4.58 mg/L/d,比单独培养的少根紫萍(4.23 mg/L/d)以及铜绿微囊藻接种量为 20 mL/L (0.20 mg/L/d),40 mL/L (0.76 mg/L/d),80 mL/L (4.48 mg/L/d),100 mL/L (3.62 mg/L/d)的要高。结果表明混合能增强氮的净化能力,尤其在 12~15 d。

少根紫萍对于磷的吸收有两个明确的阶段:首先快速吸收,尤其是少根紫萍与铜绿微囊藻的混合(表 3-2)培养。在前 6 d 为快速吸收阶段,铜绿微囊藻接种量为 80 mL/L、100 mL/L 时具更高的 P 移除率,分别为 2.53 mg/L/d、2.43 mg /L/d。当铜绿微囊藻接种量在 20 mL/L,P 的移除率最低为 1.76 mg/L/d。但当 6 d 之后为缓慢吸收阶段,在第 15 d,与共培养相比,少根紫萍单独培养具有最大的移除速率 1.39 mg/L/d。

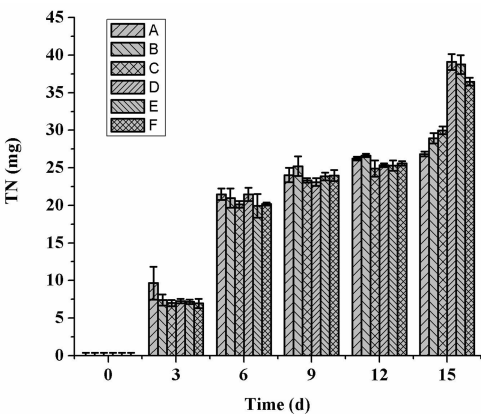


图 3 培养液中总氮去除量  
Fig. 3 Removal of total Nitrogen in culture

3.4 少根紫萍抗氧化酶指标的变化

铜绿微囊藻接种量的增加,使得少根紫萍中 SOD、APX 以及 CAT 的活性呈现出先升高后降低的趋势。在 60~100 mL/L 时,少根紫萍中 SOD 活性逐渐降低。但与对照相比,SOD 的活性在降低。SOD 在生物抗氧化系统中起着重要作用,是超氧化物阴离子清除酶,上述结果说明接种一定量铜绿微囊藻后,在一定程度上影响了 SOD 的活性,使其活性降低。在 0~

60 mL/L 时,少根紫萍中 APX 活性逐渐升高,在 60~100 mL/L 时,少根紫萍中 APX 活性逐渐降低. 在 0~80 mL/L 时,少根紫萍中 CAT 活性逐渐升高,在 80~100 mL/L 时,少根紫萍中 CAT 活性逐渐降低. 实验组少根紫萍 CAT 活性高于对照组.

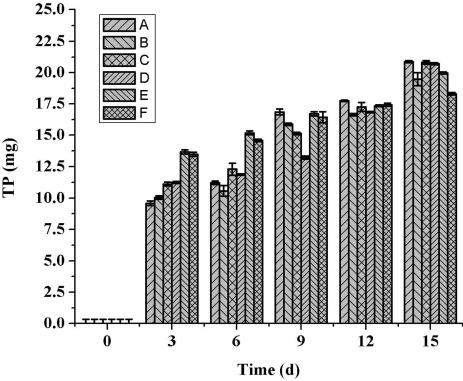


图 4 培养液中总磷去除量  
Fig. 4 Removal of Phosphorus in culture

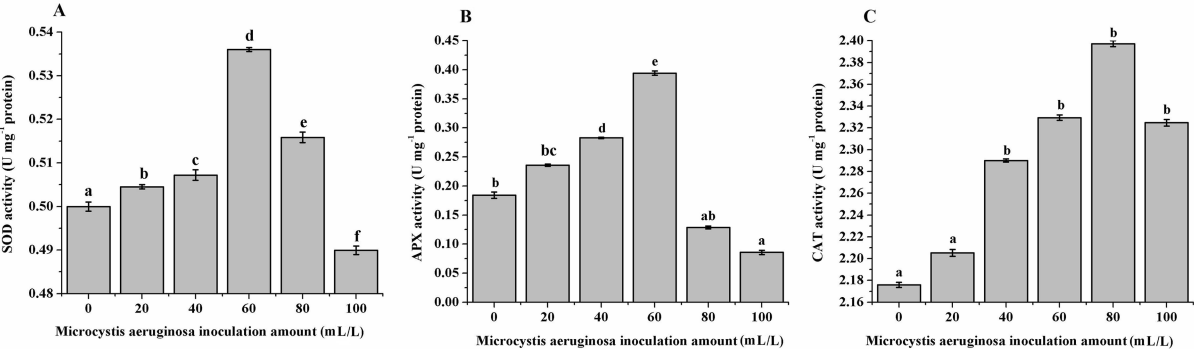


图 5 不同接种量的铜绿微囊藻对少根紫萍抗氧化酶活性的影响  
A. SOD; B. APX; C. CAT  
Fig. 5 Antioxidant enzyme activity of *Spirodela punctata* under different inoculation levels of *Microcystis aeruginosa*  
A. SOD; B. APX; C. CAT

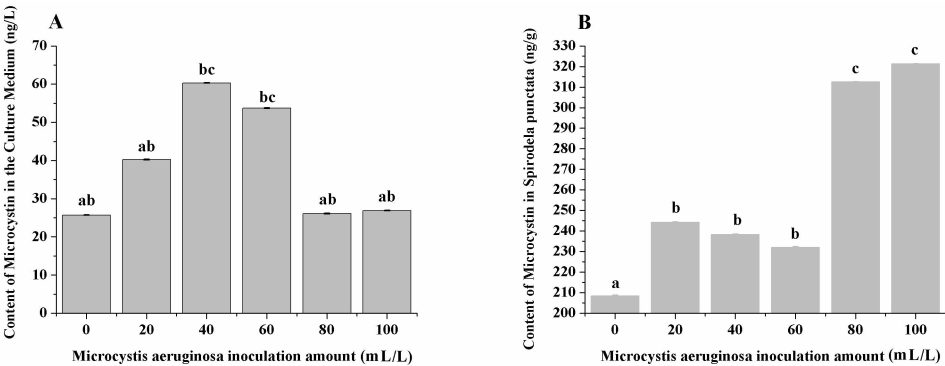


图 6 培养液与少根紫萍体内微囊藻毒素的含量  
Fig. 6 The content of microcystin in culture medium and *Spirodela punctata*

4 讨 论

4.1 铜绿微囊藻对少根紫萍生长的影响

在 15 d 共培养实验中,低浓度的铜绿微囊藻

3.5 铜绿微囊藻释放微囊藻毒素量的变化

与不加铜绿微囊藻的对照组相比,随着铜绿微囊藻接种量的增加,培养液中微囊藻毒素呈现出先升高后降低的趋势(图 6A). 在铜绿微囊藻的接种量为 40 mL/L 时,培养液中微囊藻毒素的量达到最高值(60.31 ng/L). 在接种量为 80 mL/L 时,微囊藻毒素的量达到最低值(10 ng/L). 而少根紫萍体内微囊藻毒素的含量呈现出先降低后升高的趋势(图 6B). 在铜绿微囊藻的加入量为 20~60 mL/L 时,微囊藻毒素的含量逐渐降低到最低值(238.29 ng/L),在 60~100 mL/L 时,微囊藻毒素的含量逐渐升高到最高值(321.29 ng/g).

随着铜绿微囊藻接种量的增加,少根紫萍体内微囊藻毒素呈现出先升高后降低的趋势(图 6A). 在铜绿微囊藻的加入量为 40 mL/L 时,微囊藻毒素的量达到最大.

能够促进少根紫萍的生长,而高浓度会在一定程度上抑制其生长,这与生物界生物间的竞争关系有关. 水生植物与浮游藻类在营养物质和光能利用上是竞争者,前者个体比较大、生命周期相对较长、吸

收和利用营养物质的能力都很强. 当后者的生物量达到一定程度会改变水体环境, 降低水体中的溶氧量, 进一步影响水生生物的生长. 少根紫萍漂浮在水面上生长, 光照与碳源相对比较充足, 水分与营养物质的利用极其便利, 具有明显的竞争优势, 而且对铜绿微囊藻有遮光的效果, 在一定程度上抑制其生长, 防止藻类大量爆发. 污水中的铜绿微囊藻浓度比较低时, 在营养物质的利用上与少根紫萍是竞争关系, 能够在一定程度上刺激少根紫萍加快吸收营养物质. 但是当水体中的铜绿微囊藻浓度比较高时, 不仅会大量消耗水体中的氧, 还会大量附着在少根紫萍的根部与叶背部生长, 影响少根紫萍的呼吸, 进一步影响其生物量.

#### 4.2 铜绿微囊藻对少根紫萍淀粉累积的影响

近年来, 一些研究学者尝试进一步利用处理过污水浮萍, 比如将收获的浮萍加工成饲料或者作为生物燃料的原料, 实现物质的循环利用. 铜绿微囊藻在细胞破裂后会向水体中分泌有毒物质, 进入少根紫萍体内, 在一定程度上会抑制淀粉酶的活性, 导致少根紫萍淀粉的累积量逐渐下降.

#### 4.3 铜绿微囊藻对少根紫萍去除 N、P 的影响

氮和磷是富营养化水体中的特征污染物质, 是植物以及微生物所需要的主要营养元素. 国际上一般认为水体中总氮浓度为  $0.2 \text{ mg/L}$ 、总磷浓度为  $0.02 \text{ mg/L}$  是水体富营养化发生的浓度<sup>[20]</sup>. 舒柳<sup>[21]</sup>等分别以凤眼莲、黄花水龙、空心莲子草、水鳖和浮萍 5 种水生植物对总氮超过  $40 \text{ mg/L}$  的生活污水进行了 3 个月的生态修复处理, 结果表明浮萍对培养液中总氮的去除率最高(大于 88%). 本实验中, 当培养液中铜绿微囊藻的浓度在  $(6.0 \times 10^8 \sim 8.0 \times 10^8 \text{ cells/L})$  时, 少根紫萍对培养液中氮的去除率相对较高(图 3). 此浓度下少根紫萍与铜绿微囊藻形成一个稳定的共生环境, 竞争并且促进各自对营养物质氮的吸收转化, 达到最大效率的 TN 去除率. 因此, 可以根据污水中总氮、总磷以及铜绿微囊藻的含量以及想要达到的去除效果, 来进一步设计处理污水时少根紫萍的加入量, 达到最优污水处理效果以及物质的回收再利用.

#### 4.4 铜绿微囊藻对少根紫萍抗氧化酶系统的影响

在富营养化水体中, 铜绿微囊藻在生长到一定阶段后, 细胞破裂会释放微囊藻毒素到水体中. 微囊藻毒素能够抑制植物生长、光合活性、以及改变植物体内一系列抗氧化酶的活性. 在逆境胁迫条件下, 植物体内产生的自由基会引起膜质的脱脂化与

过氧化, 破坏生物膜结构和功能的稳定; 而 SOD、APX 和 CAT 能在一定程度上消除活性氧和过氧化物对植物体造成的不利影响, 维持细胞膜结构与功能的稳定性<sup>[22]</sup>. 所以, 在处理有铜绿微囊藻生长的污水时, 少根紫萍在一定程度上能够通过调节自身的抗氧化酶活性来抵御外界的不良环境, 实现自身的生长, 不过这在一定程度上也取决于铜绿微囊藻的生物量以及释放到水体中的微囊藻毒素含量.

#### 4.5 少根紫萍体内微囊藻毒素浓度变化的原因

微囊藻毒素(Microcystin, MC)是一类具有生物活性的环状七肽化合物, 是分布最为广泛的肝毒素, 结构中存在着环状结构和间隔双键, 具有相当强的稳定性. 中国生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)将饮用水中微囊藻毒素含量限制为  $1 \mu\text{g/L}$ <sup>[23]</sup>. 当用少根紫萍处理污水时, 水体中的微囊藻毒素会进入到少根紫萍体内(图 6B), 影响生物体的正常生长. 在与低浓度铜绿微囊藻( $<60 \text{ mL/L}$ )共培养时, 少根紫萍可以增加自己的抗氧化酶活性(图 5)、降低对微囊藻毒素的吸收来保护自己(图 6B). 在高浓度铜绿微囊藻时, 少根紫萍的生长机制受到抑制与破坏, 大量的微囊藻毒素进入到少根紫萍体内, 反而大大降低了培养液中的微囊藻毒素含量, 而此时收获的少根紫萍体内微囊藻毒素含量很高, 如果要加工成饲料, 必须要进一步检测毒素含量. 因此, 对于加工成家禽或者鱼类饲料的水生植物要严格控制微囊藻毒素的含量, 防止微囊藻毒素进入生物量循环, 进而危害人类的健康.

## 5 结 论

在处理污水时, 水体中生长的铜绿微囊藻会在一定程度上影响少根紫萍的生长. 当水体中铜绿微囊藻浓度在  $2.0 \times 10^8 \text{ cells/L}$  ( $20 \text{ mL/L}$ ) 左右时, 加入少根紫萍并使其覆盖率达到 100% 时, 少根紫萍能够达到最大的生物量、相对高的淀粉累积率、以及高品质的氮磷去除率, 并能最大程度的抑制铜绿微囊藻的生长. 所以得出结论: 在污水中存在低浓度藻时, 运用少根浮萍来处理污水能够达到最高的效率.

#### 参考文献:

- [1] Xu J L, Cui W H, Cheng J J, *et al.* Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol [J]. *Biosyst Eng*, 2011, 110: 67.
- [2] Appenroth K J, Sree K S, Böhm V, *et al.* Nutri-

- tional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food [J]. Food Chem, 2017, 217: 266.
- [3] Stomp A M. The duckweeds: A valuable plant for biomanufacturing [J]. Biotechnol Annu Rev, 2005, 11:69.
- [4] Alaerts G J, Mahbubar R, Kelderman P. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon [J]. Water Res, 1996, 30: 843.
- [5] Fujita K, Chaudhary M I, Fujita A, *et al.* Photosynthesized carbon translocation and distribution of crops adapted to low-nutrient environments [A] //Food security in nutrient-stressed environments: Exploiting plants' genetic capabilities. London: Springer Netherlands, 2002: 91.
- [6] Suppadit T, Jaturasitha S, Sunthorn N, *et al.* Dietary *Wolffia arrhiza*, meal as a substitute for soybean meal: its effects on the productive performance and egg quality of laying Japanese quails[J]. Trop Anim Health Pro, 2012, 44: 1479.
- [7] Zhang J, Zhang H, Chen Y. Sensitive apoptosis induced by microcystins in the crucian carp (*Carassius auratus*) lymphocytes in vitro [J]. Toxicol in Vitro, 2006, 20: 560.
- [8] Hu Z Q, Liu Y D, Li D H, *et al.* Growth and antioxidant system of the cyanobacterium *Synechococcus elongatus*, in response to microcystin-RR [J]. Hydrobiologia, 2005, 534: 23.
- [9] 王亭亭, 王中浩, 熊方建, 等. 铊胁迫对油菜的生长及抗氧化酶的影响[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2014, 51: 171.
- [10] Su Y, Mennerich A, Urban B. Coupled nutrient removal and biomass production with mixed algal culture: impact of biotic and abiotic factors [J]. Biore-source Technol, 2012, 118: 469.
- [11] Wu H, Huang L. *Chlamydomonas Starain* and uses thereof: WO, WO/2011/085642 [P]. 2011.
- [12] 刘杰, 黄辉, 赵浩, 等. 浮萍生长及其除磷效率的影响因素的研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29: 521.
- [13] Bergmann B A, Cheng J, Classen J, *et al.* In vitro selection of duckweed geographical isolates for potential use in swine lagoon effluent renovation[J]. Bioresour Technol, 2000, 73: 13.
- [14] 刘宪华, 鲁逸人. 环境生物化学实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 卫红. 碱性过硫酸钾消解·紫外分光光度法测定废水中总氮[J]. 现代科学仪器, 1999(5): 64.
- [16] Jiang M, Zhang J. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings[J]. Plant Cell Physiol, 2001, 42: 1265.
- [17] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels [J]. Anal Biochem, 1971, 44: 276.
- [18] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in *Spinach* chloroplasts[J]. Plant Cell Physiol, 1981, 22: 867.
- [19] Aebi H. Catalase in vitro [J]. Methods in Enzymol, 1984, 105: 121.
- [20] 胡中意, 欧阳. 富营养化水体中的氮磷及其去除研究[J]. 中国市政工程, 2006(3): 39.
- [21] 舒柳. 5种水生植物对净化生活污水的效果研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40: 161.
- [22] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Plant Physiol, 1993, 101: 7.
- [23] 刘秀梅, 高鹤娟. 食物中有害物质及其防治[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

#### 引用本文格式:

中 文: 孙焕, 苏稚喆, 冯婷, 等. 铜绿微囊藻与浮萍联合生长对净化水体的影响[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 853.

英 文: Sun H, Sun Z Z, Feng T, *et al.* Effect of *Microcystis Aeruginosa* and duckweed combined growth on the purification of waste water [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2018, 55: 853.