

# 底质中氨氮对沉水植物生长的影响

朱伟<sup>1, 2</sup>, 张俊<sup>1, 3\*</sup>, 赵联芳<sup>1, 2</sup>

1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 上海勘测设计研究院, 上海 200434

摘要: 沉水植物的生长不但与水体营养盐浓度具有十分密切的关系, 也受底泥中营养物质的影响, 尤其是底泥中氨氮的含量对于植物生长具有重要的作用, 因此研究底质中氨氮对高等沉水植物生长的影响, 能够为沉水植被的重建及选种提供科学参考。作者在人工配制的7种含不同浓度铵态氮的底质条件下, 通过测定苦草 *Vallisneria natans* L. 和伊乐藻 *Elodea nuttallii* 两种沉水植物的植株鲜物质量的变化、干物质量、根系的活力、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性, 以期明确这两种沉水植物与水体底质浓度之间的关系。试验结果表明, 氨氮起始质量分数 $<50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $<500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时可以分别促进苦草和伊乐藻鲜物质量、干物质量和根系活力的增加, 大于此范围则会抑制苦草 *Vallisneria natans* L. 和伊乐藻 *Elodea nuttallii* 的生长。

关键词: 沉水植物; 氨氮; 底质; 生长; 生理特性

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2006) 05-0914-07

作为水生生态系统健康的标志之一, 高等水生植物的存在对于湖泊尤为重要。沉水植物不但可以为水生动物提供栖息地, 同时在一定条件下也可以抑制藻类的生长<sup>[1-3]</sup>, 因此, 在湖泊水生生态修复行动中, 从沉水植物着手进行受损系统恢复的实例越来越多<sup>[4-5]</sup>, 沉水植物的恢复也成为湖泊水生生态修复的研究热点。

在满足透明度等其他生境条件的前提下, 营养盐的浓度是影响沉水植物生理特征的一项重要生境条件指标。相对与其他营养盐来说, 氮对植物的生理影响较为显著, 尤其是氨氮, 它即是可被沉水植物吸收、利用的无机氮素, 其浓度过高也会成为抑制沉水植物重要因素。目前国内外对于上覆水中氨氮起始质量浓度对沉水植物的影响研究较多<sup>[6-8]</sup>, 例如, 倪乐意通过室内模拟的方法研究了无机氮对金鱼藻 *Ceratophyllum demersum* 生理的影响, 发现水培条件下 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮促进金鱼藻生长,  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮开始抑制生长<sup>[7-8]</sup>。在很多水体修复实例中发现, 不但是上覆水中, 作为沉水植物根系固着的底质, 除了底泥硬度等物理条件以外营养盐的质量浓度, 也会对其产生重要的影响<sup>[9]</sup>。尤其在污染水体厌氧底质中赋存的氨氮, 其质量浓度势必对沉水植物的生长产生很大的影响, 但是目前这一方面的研究还较少<sup>[10-15]</sup>。

针对这一问题, 我们研究了底泥中氨氮的质量分数对沉水植物生长和生理的影响。结合国家“863”重大科技专项“苏州城市水环境质量改善与

综合示范”项目, 对于劣V类滞流城市河流, 底质严重发黑, 发臭, 氨氮质量分数超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下, 底质对沉水植物恢复的制约进行了探讨。同时得到的底质中氨氮起始浓度对不同沉水植物生长影响, 可为污染水体生态修复提供底质条件方面的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

沉水植物: 苦草 *Vallisneria natans* L., 伊乐藻 *Elodea nuttallii*, 取自东太湖, 在室内培养驯化。

基本底质: 在实验时, 先配制一种基本底质, 然后调整基本底质中氨氮的质量分数, 开展各种质量分数下的实验。基本底质是将2 kg河道底泥加入8 kg黄土, 得到的底质中TN  $204 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , TP  $45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

上覆水: 采用自来水进行自配, 水中TN 浓度 $1.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 忽略 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP质量浓度。

### 1.2 试验设计

由于河道底质长期处于厌氧状况, 底质中溶解态氮主要以铵态氮的形态存在。试验向基本底质中添加 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液, 搅拌均匀。底质中 $\text{NH}_4^+$ 处理质量分数梯度如下:  $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 每个处理组设平行样1个, 在其中种植沉水植物(6株, 每株苦草质量为5~8 g, 伊乐藻为3~6 g), 并观察各处理组中沉水植物各指标的变化情况。试验装置为 $\Phi 30 \text{ cm} \times \Phi 40 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的蓝色

基金项目: 国家“十五”重大科技专项“863”资助项目(2003AA601100)

作者简介: 朱伟(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事城市水环境与水生生态修复理论与技术研究。E-mail: weizhu@jlonline.com

\*通讯作者, E-mail: hjzhangj@163.com

收稿日期: 2006-04-28

塑料容器，试验时间自2005年6月17日至2005年7月8日，计28 d<sup>[4,6]</sup>。

1.3 分析方法

水中氨氮、总氮、总磷采用常规的水质分析方法<sup>[16]</sup>；植物的分根数、成活率、生物量采用观察称量法<sup>[2,17]</sup>。过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法、过氧化氢酶(CAT)活性采用双氧水法、根系活力采用TTC法<sup>[18]</sup>。

2 结果与分析

2.1 上覆水氨氮浓度的变化

底质中含有高质量分数的氨氮，其必然会对上覆水中氨氮的质量浓度产生影响，表1至表3反映了试验期间各试验组上覆水中氨氮、总氮、总磷质量浓度的变化，其中由于某些原因第28天时上覆水中总氮未能测试。

表1 各试验组上覆水中氨氮起始质量浓度随时间的变化

Table 1 The NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N variety of the water

时 间 /d	氨氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )						
	空 白	5	10	50	100	500	1000
0	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
7	0.98	1.16	0.98	1.08	1.19	5.19	2.03
28	1.36	2.04	0.8	0.92	0.8	1.28	0.8

表2 各试验组上覆水中总氮质量浓度随时间的变化

Table 2 The TN variety of the water

时 间 /d	总氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )						
	空 白	5	10	50	100	500	1000
0	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96
7	0.83	1.38	1.01	1.27	1.01	7.73	3.04

表3 各试验组上覆水中总磷浓度随时间的变化

Table 3 The TP variety of the water

时 间 /d	总氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )						
	空 白	5	10	50	100	500	1000
0	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96
7	0.83	1.38	1.01	1.27	1.01	7.73	3.04

从上表中可以看出，氨氮起始质量分数为500 mg·kg<sup>-1</sup>的试验组上覆水中的营养盐在试验初期(第7天)时高于其它试验组外，其它各试验组同期的营养盐水平差异不显著，可以认为各组中上覆水对沉水植物的作用相似。

同时根据文献[8]显示，在水培条件下：1 mg·L<sup>-1</sup>氨氮可以促进金鱼藻生长，5 mg·L<sup>-1</sup>氨氮开始抑制其生长，在本试验中只发现氨氮起始质量分数为500 mg·kg<sup>-1</sup>的试验组中的上覆水在试验初期(第7天)时超过了5 mg·L<sup>-1</sup>，为5.19 mg·L<sup>-1</sup>。

基于这两个方面的原因，在本试验中可以认为，各试验组中沉水植物生长的差异基本是由底质的异同引起。

2.2 底泥中氨氮质量分数对沉水植物鲜物质量的影响

鲜物质量的变化可以反映植株同化矿物质、制造有机物的能力<sup>[17]</sup>，图1、图2分别为底质不同分数氨氮条件下苦草及伊乐藻鲜物质量的变化率。

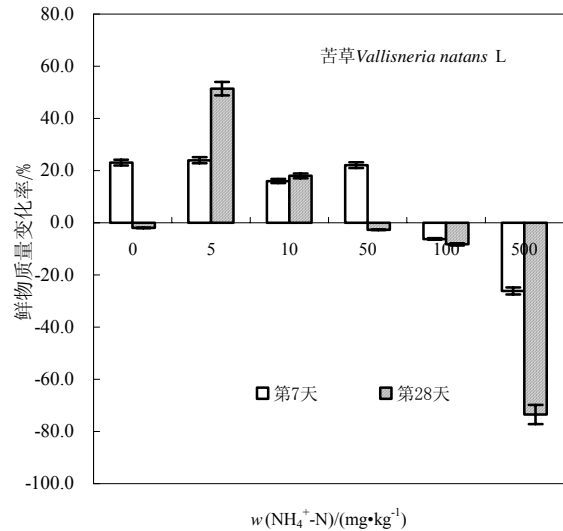


图1 不同质量分数氨氮对苦草生长的影响

Fig. 1 The vegetal variety of Vallisneria natans after (NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> treatments

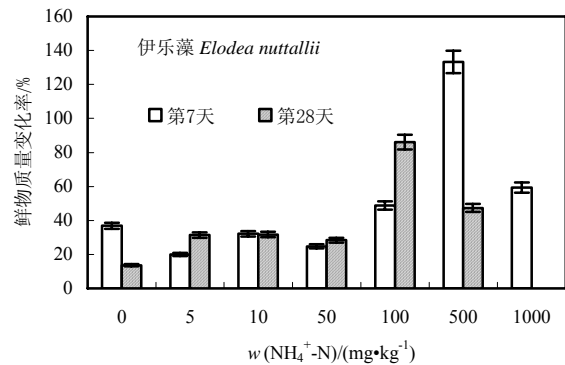


图2 不同质量分数氨氮对伊乐藻生长的影响

Fig. 2 The vegetal variety of Elodea nuttallii after (NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> treatments

从图1中可以发现，氨氮起始质量分数<50 mg·kg<sup>-1</sup>的试验组，在整个试验周期中，苦草的鲜物质量都是增加的，最高值出现在5 mg·kg<sup>-1</sup>的处理组中；氨氮起始质量分数为50 mg·kg<sup>-1</sup>的试验组，在试验初期(7 d)，鲜物质量有正变化，试验后期(28 d)时，苦草鲜物质量不仅没有随生长增加，反而降低，且出现了腐烂的现象；氨氮起始质量分数≥100 mg·kg<sup>-1</sup>的试验组在试验初期(7 d)，就出现了腐烂，鲜物质量降低，并且随着质量分数的增加，

腐烂趋于严重。这说明在底质中氨氮的处理质量分数在 $<50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,苦草可以正常生长。

从图2中可以发现,处理质量分数 $\leq 500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的各组中,在整个试验周期中,伊乐藻的鲜物质量都是增加的。其中,处理质量分数 $<100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的各组,在试验初期(7 d),伊乐藻鲜物质量的增加率在20%~48.9%之间,试验后期(28 d)鲜物质量的增加率都超过了试验初期(7 d);而处理质量分数为 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理组,在试验初期(7 d)时,鲜物质量的增加率达到133.2%,为同期各组中最大,试验后期(28 d)鲜物质量的增加率小于试验初期,且此时伊乐藻发黄,发枯,表明底质中氨氮起始质量分数达到 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时已经开始不适于伊乐藻的正常生长;当处理质量分数达到 $1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,伊乐藻在试验初始(7 d)时鲜物质量还有增加,但是在后期(28 d)伊乐藻已经全部腐烂。因此,以鲜物质量的增加作为衡量指标,当底质中氨氮的处理质量分数在 $<500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,伊乐藻可以正常生长。

比较图1与图2可以发现,如果以鲜物质量的变化率为指标,则伊乐藻比苦草对底泥中氨氮有着更强的耐受性。

### 2.3 底泥中氨氮质量分数对沉水植物干鲜物质量比的影响

干鲜物质量比可以反映植物对营养盐的吸收和积累的程度<sup>[17]</sup>,通过测试不同氨氮质量分数条件下,沉水植物干鲜物质量比的变化,可以分析沉水植物体内干物质的积累情况,进而判断生长情况。不同质量分数氨氮对苦草及伊乐藻干鲜物质量比影响的试验结果见图3、图4。

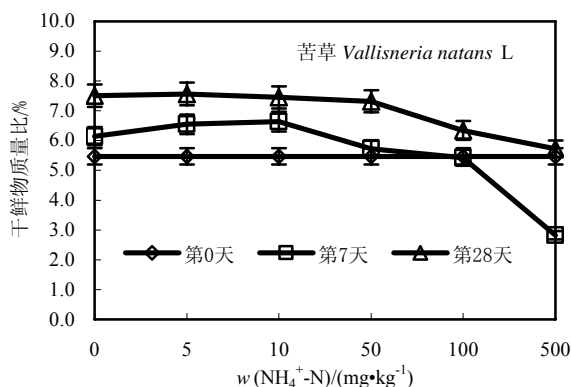


图3 不同质量分数氨氮对苦草干鲜物质量比的影响

Fig. 3 The DW/FW variety of *Vallisneria natans* after  $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$  treatments

从图3中可以看出,氨氮起始质量分数 $\leq 50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的试验组中,在试验时间内苦草的干鲜物质量比均比试验初始(第0天)时高,并且随着试验时间的延长,干鲜物质量比增加。由图中还可以看

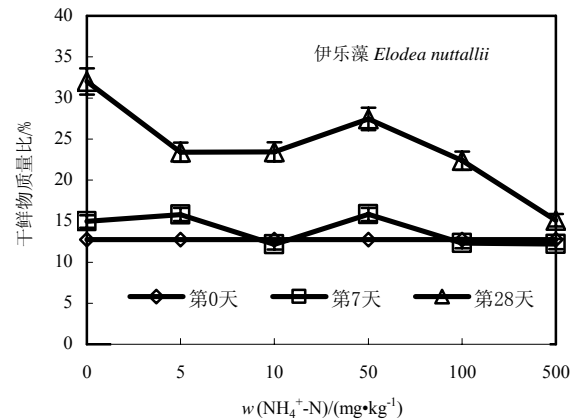


图4 不同质量分数氨氮对伊乐藻干鲜物质量比的影响

Fig. 4 The DW/FW variety of *Elodea nuttallii* after  $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$  treatments

出,在试验初期(7 d),较低质量分数的干鲜物质量比比较高质量分数的高,这是因为在适合植物生长的质量分数下,较高质量分数的氮对苦草生长的促进作用强于较低质量分数,造成植株的生长速度高于干物质积累的速度<sup>[17]</sup>;试验后期(28 d)处理组中苦草对营养物的积累的量相差无几,其干鲜物质量比在7.5%左右,但是 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组中的鲜物质量在降低,说明此组生长受到抑制,这里干鲜物质量比的升高,是因为其植株的膜受到破坏,组织液外渗所致<sup>[19]</sup>。氨氮起始质量分数 $>50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的各试验组,苦草的干鲜物质量比随着底质中氨氮起始质量分数的增加在降低,但随着时间的变化又在增加,这是因为此时底质中起始质量分数的氨氮已经抑制了苦草的生长,未腐烂的部分也已经受到伤害,植株内的膜受到破坏,其组织液外渗<sup>[19]</sup>,这样导致其干鲜物质量比升高。氨氮起始质量分数 $<50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时是利于苦草生长的。

从图4中可以看出对于伊乐藻而言,起始质量分数 $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的试验组中干鲜物质量比要高于除 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 试验组以外其他各组。分析认为,低质量分数时植株对物质的积累速度大于其生长速度,而高质量分数的氨氮刺激其生长<sup>[17]</sup>。对于氨氮起始质量分数为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 试验组出现的异常现象,尚不能合理解释。氨氮起始质量分数为 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 试验组的干鲜物质量比在同期各组中最低,且随时间的延长升高,由于其鲜物质量降低,分析认为这是因为其生长受到抑制,植株的膜受到破坏组织液外渗而导致干鲜物质量比升高<sup>[19]</sup>。氨氮起始质量分数 $<500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时是利于伊乐藻生长的。

比较图3和图4可以发现苦草的干鲜物质量比远小于伊乐藻的干鲜物质量比,表明伊乐藻对底泥中氨氮的耐受性比苦草的效果好。

### 2.4 底泥中氨氮含量对沉水植物根系活力的影响

植物根系是吸收水分和矿质元素的主要器官，具有合成、固着和贮藏等作用。根系的活力是泛指根的吸收能力、合成代谢等等，可以表现其生长速度。因此，根系活力是鉴定植物根系生长的重要指标<sup>[18]</sup>。因为伊乐藻的根系不发达，试验中只讨论苦草的根系活力。

从图5中可以看出，氨氮起始质量分数 $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的各试验组，随着时间的延长其根系活力增

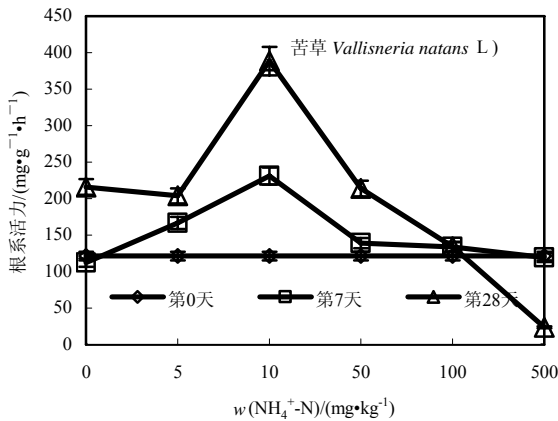


图5 不同质量分数氨氮对苦草根系活力的影响  
Fig. 5 The rooting activities variety of *Vallisneria natans* after  $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$  treatments

加，其中 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组在试验初期（7 d），根系的活力为 $230 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，在试验后期（28 d）根系的活力为 $390 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，表明在此起始质量分数范围内的氨氮能增强苦草根系活力；当氨氮起始质量分数 $>10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，根系活力下降，表明底质中起始质量分数过高的氨氮会对根系活力产生一定的抑制作用。由图1的苦草鲜物质重的变化情况也可以看出，当氨氮起始质量分数达到 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，试验末期鲜物质重减小，正是由于根系活力受到抑制导致植株生长变得缓慢。氨氮起始质量分数为 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的试验组中，其根系的活力随着质量分数的增加、时间的延长在下降， $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组中根系的活力只有 $20 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，试验后期处于高质量分数氨氮下的苦草的根系呈现发黄，发枯的状态。对于根系，一方面大量的铵态氮的供应会增加根系活性氧的累积，另一方面，因为根系周围环境长期处于还原状态，导致铁、锰等一些其它化学物质处于高还原状态，这些高还原性的物质也会对根系产生毒害作用，使根系生长受阻，根系活力下降<sup>[20]</sup>，进而影响到了整株植物的生长。因此，氨氮起始质量分数 $<50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时可以促进苦草根系生长，在试验条件下，氨氮起始质量分数为 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 表现出对苦草根系活力最强的促进作用。

### 2.5 底泥中氨氮含量对沉水植物保护酶活性的影响

正常生理代谢过程中，植物体会产生一定量的自由基，破坏生物功能分子，比如引起膜的过氧化。但是，植物的防御系统通过Halliwell - Asada途径可以降低或消除自由基对膜脂的攻击能力，而过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)就是这个防御系统中的两种保护酶，过氧化物酶(POD)与过氧化氢形成一种化合物，在这种化合物中的过氧化物被活化，过氧化氢氧化愈创木酚的量就是过氧化物酶(POD)活性的反映；过氧化氢酶(CAT)能直接催化过氧化氢分解为水和分子氧。正常情况下，自由基的产生和清除处于动态平衡状态，自由基水平很低，不会伤害细胞，但是当植物受到胁迫时，这个平衡就被打破。自由基积累过多，保护酶系统(protective enzyme system)又被破坏，于是积累许多有害的过氧化产物。自由基破坏膜结构，损伤大分子生命物质，引起一系列生理生化紊乱，导致植物死亡<sup>[19-22]</sup>。图6-9分别为不同浓度的氨氮条件下苦草及伊乐藻两种酶活性的变化情况。植物正常生长状况，酶的活性是稳定变化的，当受到不利环境的刺激时，酶的浓度会突然发生变化。

从图6中可以看出，各氨氮起始质量分数条件下的苦草过氧化物酶(POD)的活性在试验初期(7

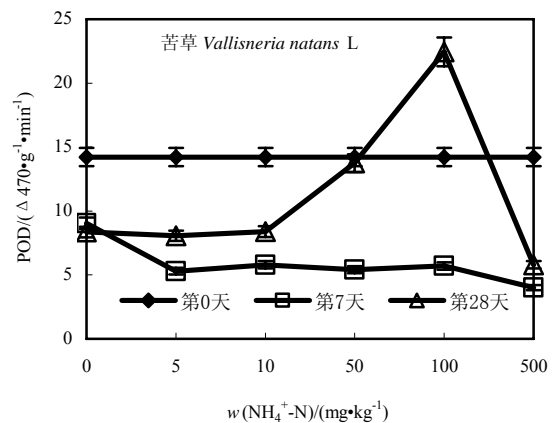


图6 不同质量分数氨氮对苦草 POD 活性的影响  
Fig. 6 The activities of the POD of *Vallisneria natans* after  $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$  treatments

d) 时都较低，当氨氮起始质量分数 $\geq 50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，由图1可以看出随时间延长苦草鲜物质质量降低，表明氨氮对苦草生长产生胁迫作用，由于外界的胁迫作用会导致植株内部自由基的增加，因此随着氨氮起始质量分数的增加，苦草的POD活性增加；在 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组中苦草的POD活性在后期是最低的，由于此质量分数下苦草大量腐烂，分析认为此时苦草的保护酶系统已经受到严重破坏。

从图7中可以看出, 试验初期(7 d), 各氮氮起始质量分数条件下的伊乐藻过氧化物酶(POD)的活性变化规律与苦草类似。在试验后期(28 d), 5~100 mg·kg<sup>-1</sup>处理组中伊乐藻的POD活性相差不大, 说明此质量分数范围对伊乐藻体内能够用于氧化愈创木酚的过氧化氢量相似; 对于氮氮起始质量分数为500 mg·kg<sup>-1</sup>的试验组, 由于随时间延长伊乐藻的鲜物质重降低, 因此其POD活性的升高表明氮氮对伊乐藻的生长产生胁迫。

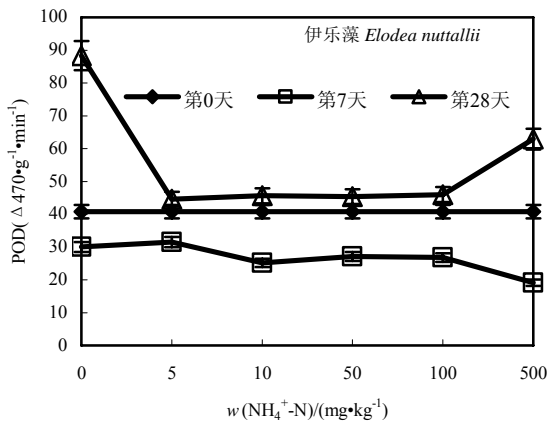


图7 不同质量分数氮氮对伊乐藻 POD 活性的影响  
Fig. 7 The activities of the POD of *Elodea Nuttallii* after (NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> treatments

从图8中可以看出, 氮氮起始质量分数<50 mg·kg<sup>-1</sup>的各试验组, 在试验初期(7 d)时苦草的CAT活性较低, 与POD活性的变化一致, 分析认为由于此时苦草体内的自由基所产生过氧化氢过少,

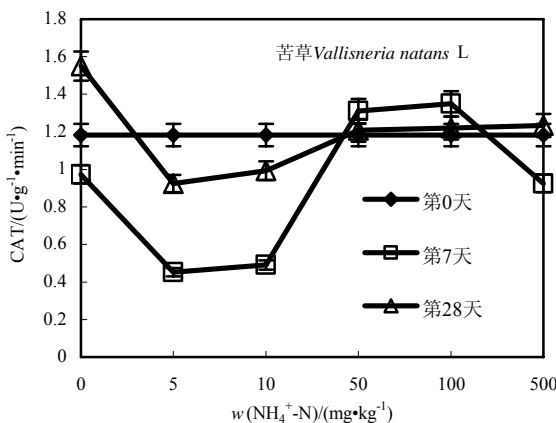


图8 不同质量分数氮氮对苦草 CAT 活性的影响  
Fig. 8 The activities of the POD of *Vallisneria natans* after (NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> treatments

随着时间的延长, CAT活性增强, 综合苦草鲜物质质量、干鲜物质质量比、根系活力的变化情况, 认为此时CAT活性的增强表明苦草生长旺盛; 50 mg·kg<sup>-1</sup>与100 mg·kg<sup>-1</sup>处理组中苦草CAT活性升高, 由于此

时苦草已出现腐烂现象, 因此表明此质量分数对苦草生长产生抑制; 500 mg·kg<sup>-1</sup>处理组中苦草在试验初期(7 d)保护酶系统被破坏, CAT活性较低, 其后期的升高现象尚不能合理解释。

从图9中可以看出, 试验初期(7 d)各处理中伊乐藻的CAT活性较低, 与苦草CAT变化情况类似, 10 mg·kg<sup>-1</sup>处理组中伊乐藻的CAT活性最低, 可能因此浓度对伊乐藻的生长的刺激最小。氮氮起始质

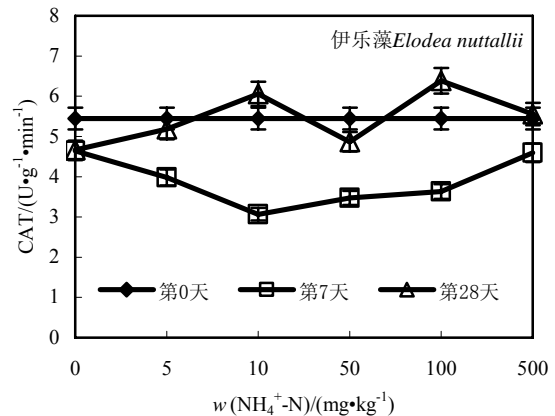


图9 不同质量分数氮氮对伊乐藻 CAT 活性的影响  
Fig. 9 The activities of the POD of *Elodea Nuttallii* after (NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> treatments

量分数<500 mg·kg<sup>-1</sup>各试验组, 伊乐藻的CAT活性在试验后期(28 d)都在升高, 结合伊乐藻鲜物质重、干鲜物质质量比的变化情况, 分析认为此时伊乐藻生长旺盛; 氮氮起始质量分数为500 mg·kg<sup>-1</sup>组中CAT活性降低, 因为此质量分数下伊乐藻的生长受到胁迫, 又由图7可见POD活性高于其他处理组, 分析认为是此时CAT活性的降低是由于POD的作用较强消耗了大量的过氧化氢造成的。氮氮起始质量分数为50 mg·kg<sup>-1</sup>时CAT活性的突然降低的现象尚不能合理解释。

由图6-9还发现一个有趣现象, 氮氮起始质量分数为0 mg·kg<sup>-1</sup>的试验组中, 苦草的POD活性一直较低, CAT活性试验后期(28 d)时却升高了, 而伊乐藻的POD活性试验后期(28d)时升高了, CAT活性一直较低。这说明不同沉水植物体内的酶活性对外界相同环境的响应是不一样的, 但这种响应的机理还需要进一步的研究。

由图6-9还发现, 试验初期(7 d)苦草CAT活性对氮氮起始质量分数的响应强于POD活性的响应, 试验后期(28 d)情况相反; 试验期间, 伊乐藻CAT活性对氮氮起始质量分数的响应强于POD活性的响应。通过苦草和伊乐藻保护酶活性的变化, 发现伊乐藻较苦草能更好的耐受高质量分数氮氮的胁迫。

### 3 结论

(1) 底质氮氮起始质量分数在 $<50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内, 苦草能够较好生长, 并且在本次试验条件下,  $5 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理质量分数更能促进苦草生长。对伊乐藻而言在底泥中氮氮 $<500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下能够较好的生长, 本次试验条件下 $0 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理质量分数, 更能促进伊乐藻生长。

(2) 伊乐藻较苦草对底泥中氮氮有着更强的耐受能力, 在底泥污染较为严重的条件下, 伊乐藻更容易恢复。

(3) 不同沉水植物体内的酶活性对底泥中氮氮的响应是不同的; CAT活性对外界环境的响应先于POD活性的响应。

### 参考文献:

- [1] 马凯, 蔡庆华, 谢志才, 等. 沉水植物分布格局对湖泊水环境N、P因子影响[J]. 水生生物学报, 2003, 27(3):232-237.  
MA Kai, CAI Qinghua, XIE Zhicai, et al. Influences of submerged macrophytes distribution pattern on nitrogen and phosphorous factors of water environment in lakes [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2003, 27(3):232-237.
- [2] 朱伟, 陈清锦, 张兰芳. 伊乐藻在冬季低温条件下对污染水体的净化效果[J]. 生态环境, 2004, 13(4):497-499.  
ZHU Wei, CHEN Qingjing, ZHANG Lanfang. Purification effect of polluted water in low temperature in winter by *Elodea nuttallii*[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(4):497-499.
- [3] 王国祥, 濮培民, 张圣照. 冬季水生高等植物对富营养化湖水的净化作用[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2):106-109.  
WANG Guoxiang, PU Peimin, ZHANG Shengzhao. The purification ability of aquatic macrophytes for eutrophic lake water in winter [J]. China Environmental Science, 1999, 19(2):106-109.
- [4] 邱东茹, 吴振斌. 富营养浅水湖泊的退化与生态恢复[J]. 长江流域资源与环境, 1996, 5(4):355-361.  
QIU Dongru, WU Zhengbin. On the degradation and restoration of shallow eutrophic Chinese lakes [J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 1996, 5(4):355-361.
- [5] 程南宁, 朱伟, 张俊. 重污染水体中沉水植物的繁殖及移栽技术探讨[J]. 水资源保护, 2004, 20(6):8-11.  
CHENG Nanning, ZHU Wei, ZHANG Jun. Reproduction and plantation technique of submerged macrophyte in polluted water [J]. Water Resources Protection, 2004, 20(6):8-11.
- [6] Yonghong Xie, Dan Yu, Bo Ren. Effects of nitrogen and phosphorus availability on the decomposition of aquatic plants [J]. Aquat Bot, 2004, 80:29-37.
- [7] Ni L. Effects of water column nutrient enrichment on the growth of *Potamogeton maackianus* A. Benn [J]. J Aquat Plant Manage, 2001, 39:83-87.
- [8] 曹特, 倪乐意. 金鱼藻抗氧化酶对水体无机氮升高的响应[J]. 水生生物学报, 2004, 28(3):299-303.  
CAO Te, Ni Leyi. Responses of antioxidases of *Ceratophyllum demersum* to the increase of inorganic nitrogen in water column [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, 28(3):299-303.
- [9] 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: 89,127.  
JIN Xiangcan. The Technique of Controlling and Managing Eutrophic Lakes [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 89,127.
- [10] BARKO J W, SMART R M. Sediment relate mechanisms of growth limitation in submersed macrophytes [J]. Ecology, 1986, 67: 1328-1340.
- [11] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果和机理[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):673-676.  
TONG Chuanghua, YANG Xiao'e, PU Peimin. Effects and mechanism of hydrophytes on control of release of nutrient salts in lake sediment [J]. J Agro-Enviro Sci, 2003, 22(6): 673-676.
- [12] 李文朝. 五里湖底质条件与水生高等植物的适应性研究[J]. 湖泊科学, 1996, 8(增刊):30-36.  
LI Wenchao. On the adaptiveness of aquatic macrophyte to the sediment in WULI lake[J]. J Lake Sciences, 1996, 8(sl):30-36.
- [13] 邱东茹, 吴振斌, 邓家发等. 武汉东湖湖水和底泥对黄丝草生长的影响[J]. 植物资源与环境, 1997, 6(4):45-49.  
QIU Dongru, WU Zhengbin, DENG Jiafa. Effects of overlying water and sediment from Donghu Lake of Wuhan on the growth of *Potamogeton maackianus* A. Benn [J]. J Plant Resour & Environ, 1997, 6(4):45-49.
- [14] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999:224-241.  
LIU Jiankang. High-Class Hydrobiology[M]. Beijing: Academic Press, 1999: 224-241.
- [15] Ni L. Stress of fertile sediment on the growth of submersed macrophytes in eutrophic waters[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2001, 25(4):399 ~ 405.
- [16] 国家环境保护总局. 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: 243-284.  
State Environmental Protection Administration of China. Analytical Method of water and waste water [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-284.
- [17] 薛维纳. 水体生态修复中几种沉水植物生理生态研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2005.  
XUE Weina. Study on the response of physiological and ecological of several submersed macrophytes in aquatic ecological restoration [D]. Shaihai: Shaihai Normal University, 2005.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 105, 164-165, 26.  
LI Hesheng. Experimental theory and technology of botanic physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 105, 164-165, 26.
- [19] 潘瑞焱. 植物生理学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 282-285.  
PAN Ruizhi. Plant Physiology [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 282-285.
- [20] 何春娥, 刘学军, 张福锁. 植物根表铁膜的形成及其营养与生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1069-1073.  
HE Chun'e, LIU Xuejun, ZHANG Fusuo. Formation of iron plaque on root surface and its effect on plant nutrition and ecological environment[J]. Chin J Appl Ecol, 2004, 15(6): 1069-1073.
- [20] 曹翠玲, 李生秀, 张占平. 氮素形态对小麦生长中后期保护酶等生理特性的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 295-298.

CAO Cuiling, LI Shengxiu, ZHANG Zhanping. Effect of N form on the activity of protease and wheat yield at the vegetative and reproductive growth stage [J]. Chinese J Soil Science, 2003, 34(4): 295-298.

[21] 马广岳, 施国兴, 徐勤松, 等. Cr<sup>6+</sup>、Cr<sup>3+</sup>胁迫对黑藻生理生化影响

的比较研究[J]. 广西植物, 2004, 24(2): 161-165.

MA Guangyue, SHI Guoxing, XU Qinsong, et al. Comparative studies of toxic effect of Cr<sup>6+</sup>, Cr<sup>3+</sup> stress on the physiological and biochemical characteristics of *Hydrilla verticillata*[J]. Guihaia, 2004, 24(2): 161-165.

## Effect of ammonia in the sediment on the growth and physiological characteristics of submerged macrophytes

ZHU Wei<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, ZHAO Lianfang<sup>1,2</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China

**Abstract:** The growth of submerged macrophytes is related not only to the concentration of nutritional salt, but also to the nutriment in the sediment, especially the ammonia content. It is necessary to study the effect of ammonia in the sediment on the growth of submerged macrophytes, which might provide scientific data for reestablishment and seed selection of submerged macrophytes. In order to investigate the relationship between ammonia in the sediment and the physiological and biochemical characteristics of macrophytes, *Vallisneria natans* L and *Elodea nuttallii* were planted in the sediments of seven different concentrations of ammonia. Fresh weight (FW), dry weight (DW), root activity, peroxides (POD) activity and catalase (CAT) activity were measured. The results showed that FW, DW, root activity, POD activity and CAT activity of *Vallisneria natans* L and *Elodea nuttallii* were improved when ammonia concentrations were less than 50 mg·kg<sup>-1</sup> and 500 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively.

**Key word:** submerged macrophytes; ammonia; sediment; growth; physiological characteristics