

不同浓度氨氮对轮叶黑藻的生理影响

颜昌宙^{1,2}, 曾阿妍³, 金相灿^{1,*}, 赵景柱², 许秋瑾¹, 王兴民¹

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地/国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012 ;

2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085 ; 3. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130012)

摘要 在实验室条件下, 比较研究了不同浓度 (0.5、1、2、4、8、16 mg/L) 的氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 对沉水植物黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 的生理生化影响, 测定了黑藻生物量、叶绿素、可溶性糖、蛋白质含量和过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD)、谷氨酰氨合成酶 (GS) 的活性变化。实验结果表明低浓度的氨氮 (0.5、1、2 mg/L) 对轮叶黑藻的生长稍有促进作用, 但培养液中氨氮浓度超过 4mg/L 时, 黑藻的相对生长率 (R) 明显下降, 当浓度达到 16mg/L 时, 黑藻在 20 多天内全部死亡。在低浓度氨氮条件下, 黑藻叶绿素和可溶性糖含量随氨氮浓度增加呈上升趋势, 当培养液中氨氮浓度超过 4mg/L 时, 叶绿素和可溶性糖含量在第 24、32、40 天取样时较对照组明显降低。低浓度氨氮处理组 (0.5、1、2 mg/L) 的蛋白质含量先下降后又上升, 而对照组的蛋白质含量一直在上升, 高浓度氨氮处理组 (8、16mg/L) 的蛋白质含量则呈明显下降趋势。POD、SOD 和 GS 活性变化趋势基本一致, 在高浓度氨氮条件下增加显著, 并表现为先上升再下降的格局, 在第 16 天或第 24 天达到最大值。研究结果提示在富营养化条件下氨氮浓度的升高将影响其生理功能, 过高浓度的氨氮对轮叶黑藻是一种逆境胁迫, 可抑制其生长甚至导致植物死亡。轮叶黑藻对氨氮浓度变化虽有一定耐性, 但耐性会随时间延长而变弱。

关键词 : 氨氮; 黑藻; 生理影响; 胁迫

文章编号 : 1000-0933 (2007) 03-1050-06 中图分类号 : Q178 文献标识码 : A

Physiological effects of ammonia-nitrogen concentrations on *Hydrilla verticillata*

YAN Chang-Zhou^{1,2}, ZENG A-Yan³, JIN Xiang-Can^{1,*}, ZHAO Jing-Zhu², XU Qiu-Jin¹, WANG Xing-Min¹

1 State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control / Research Center of Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center of Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (1) 1050 ~ 1055.

Abstract : Physiological effects of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentrations (0.5, 1, 2, 4, 8, 16 mg/L) on *Hydrilla verticillata* cultured in media were investigated at laboratory conditions. The biomass, chlorophyll contents, soluble sugar contents, protein contents, as well as the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and (GS) of *Hydrilla verticillata* were analyzed. The results showed that low $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration (0.5, 1, 2 mg/L) could simulate the growth of *H. verticillata* cultured in media while a $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration of above 4 mg/L would deter the growth of *H. verticillata* markedly. The plants died within three to four weeks when the concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in culture solution reached 16 mg/L. The chlorophyll contents and the soluble sugar contents of *H. verticillata* went up with increase of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

基金项目 : 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB412307) ; 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目 (70325002)

收稿日期 : 2006-01-04 ; 修订日期 : 2006-07-15

作者简介 : 颜昌宙 (1969 ~) 男, 湖南衡阳人, 博士, 副研究员, 主要从事湖泊生态学研究. E-mail : yancz@craes.org.cn

通讯作者 : Corresponding author. E-mail : Jinxiangcan2004@163.com

Foundation item : The project was financially supported by National Key Foundational Research and Development Program (No. 2002CB412307), Outstanding Youth Foundation of National Natural Science Foundation of China (No. 70325002)

Received date 2006-01-04 ; **Accepted date** 2006-07-15

Biography : YAN Chang-Zhou, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in lake environment and ecology. E-mail : yancz@craes.org.cn

concentration in low $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration experiments (0.5 , 1 , 2 mg/L $\text{NH}_4^+ \text{-N}$). However , when $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration was above 4 mg/L the contents of chlorophyll and soluble sugar in the 24th d , 32nd d and 40th d sampling decreased noticeably compared to the control experiment. In low $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration (0.5 , 1 , 2 mg/L) experiments the protein contents of *H. verticillata* decreased initially and increased later ; in control experiments the protein content went up continuously ; in high $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration (8 , 16 mg/L) experiments the protein content decreased remarkably. Overall , the activities of GS , POD and SOD showed no difference in their changing trends ; these enzymatic activities increased noticeably under the condition of high concentration of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and showed a pattern of initial increasing and subsequent decreasing with activities peaking in the sixteenth or the twenty-fourth day. The results indicate that the increased $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentrations were a stress to *H. verticillata* under eutrophic condition. The increased $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentrations could affect the physiological function of *H. verticillata* , by restraining its growth , and even resulting in its death. Although *H. verticillata* could resist the changes in $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentrations to some extent , its tolerance gradually weakened with time.

Key Words : ammonia-nitrogen ; *Hydrilla verticillata* ; physiological effects ; stress

湖泊富营养化已经成为世界范围内一个较为突出的环境问题。富营养化造成沉水植被衰退和消失的现象已经广为人知^[1] ,但有关富营养化过程中沉水植被退化的原因却众说纷纭。目前已有研究表明氮氮对植物生理影响非常明显^[2~4] ,然而至今还很少有关水体氮氮浓度升高对沉水植物直接胁迫效应的研究。氮是植物生长的必需元素 ,其中铵态氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)和硝态氮 ($\text{NO}_3^+ \text{-N}$)是植物利用的主要形式。研究证实 ,植物优先利用 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,但当植物吸收了过多的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 时就会产生氮害^[5] ,而且 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的存在还会抑制 $\text{NO}_3^+ \text{-N}$ 的吸收^[6]。目前 ,我国许多湖泊特别是城市湖泊的总氮和氨氮污染严重^[7] ,如 :在富营养化严重、沉水植物绝迹的西五里湖区 2002 年 10 月 ~ 2003 年 10 月总氮和氨氮的浓度分别达到 4.17 ~ 11.16mg/L 和 1.99 ~ 7.73 mg/L。因此 ,阐明不同浓度氮氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)对沉水植物生理活动的影响 ,对认识沉水植被在富营养化湖泊中衰退的机理以及指导沉水植被在富营养化湖泊中的恢复重建具有重要意义。

轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)是一种多年生沉水植物 ,在我国南北各省的湖泊、池沼及水流缓慢的河流中均有分布。Thai 等人研究发现轮叶黑藻能耐受较高浓度的营养盐^[8] ,具有较强的竞争优势。本文研究了在实验模拟条件下 ,不同浓度 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 对沉水植物轮叶黑藻生物量、叶绿素、可溶性糖、蛋白质含量的影响 ,以及过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD)和谷氨酰胺合成酶 (GS)的活性变化 ,试图阐明 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度变化对轮叶黑藻的生理生化影响 ,为揭示富营养化湖泊沉水植物退化机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

轮叶黑藻属于单子叶植物纲 ,水鳖科 ,黑藻属 ,取自北京房山区拒马河。在温室预培养 2 周 ,选取生长良好、形态大小一致的 10cm 顶枝做实验材料。

培养液采用修改的 1/10 Hoagland 's 稀释液 ,N 浓度按不同的实验组配成 0.5、1、2、4、8、16mg/L ,同时参照湖泊富营养化标准设定 P 浓度为 0.2mg/L。培养液的配方和其它化学成分见表 1。

1.2 实验设计

选用株高 10cm、鲜重约 0.7g 的轮叶黑藻顶枝 ,移栽到底层铺有 3 ~ 4cm 石英砂的无色玻璃水缸 (规格 :长 20cm、宽 20cm、高 30cm)中。每个缸中定植 18 株 ,测定每个缸中的黑藻鲜重 ,保持植物样鲜重基本相等。培养液中的铵态氮设置成 6 个不同水平 0.5、1、2、4、8、16mg/L ,分别以 C1、C2、C3、C4、C5、C6 表示 ,同时设置一

表 1 培养液的配方和化学成分

Table 1 Chemical composition and formulation of culture solution

化学成分 Chemical composition		配方 Formulation	
参量 Composition	浓度 Concentration (mg/L)	试剂 Reagent	数量 Concentration (mg/L)
Ca	32	CaCl ₂	88.8
K	6	K ₂ SO ₄	13.4
Mg	12	Mg ₂ SO ₄ ·7H ₂ O	123
SO ₄	55.4		
Cl	56.8		

个不加氨氮的对照组 (CK)。实验设置 3 个平行。

将各实验组放置于温室中培养,温室的温度控制在 20 ~ 25℃,光暗时间比为 12h:12h,照度约为 3600lx。实验进行 40d,每隔 5d 换 1 次培养液。培养液更换后,测定 NH₄⁺-N 浓度,以保证缸中培养液的 NH₄⁺-N 浓度维持不变。第 1、8、16、24、32、40 天时,在每个处理组随机分别取相等重量轮叶黑藻的茎和叶共 2.0g,混合样品用于生理生化指标测定。

1.3 分析方法

培养液中氨氮含量测定方法采用纳氏试剂比色法^[9],叶绿素含量的测定采用丙酮提取法^[10],可溶性总糖含量用蒽酮法测定^[10],超氧化物歧化酶 (SOD)活性测定采用氮蓝四唑 (NBT)光化还原法^[10],过氧化物酶 (POD)活性的测定采用愈创木酚氧化法^[11],蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝法^[10],谷氨酰胺合成酶 (GS)活性参照 Magalhaes 等的方法^[12]。每次测定重复 3 次,取平均值。试验结束时,将轮叶黑藻所有的根、茎、叶均收集起来,洗净后迅速用滤纸擦干测量鲜重 (FW),在恒温烘箱中 60℃ 烘 24h,然后测定生物量 (干重, DW)。

相对生长率 (R)
$$R = (W_{t40} - W_{t0}) / W_{t0}$$
式中, W_{t40} 为实验结束后的生物量总量, W_{t0} 为实验前生物量总量。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 NH₄⁺-N 对轮叶黑藻的相对生长率、叶绿素和可溶性糖含量的影响

经过 40d 实验,不同处理组培养的轮叶黑藻的生长状况明显不同。从图 1 中看出,对照和各处理组相对生长率 (R)的大小次序为: C6 < C5 < CK < C4 < C1 < C2 < C3,即轮叶黑藻的相对生长率 (R)在低浓度时 (0.5, 1, 2mg/L)随浓度增加而增大,在高浓度时 (8, 16mg/L)随浓度增大而显著降低 (P < 0.05),其中, 16mg/L NH₄⁺-N 浓度下的轮叶黑藻在培养 20 多天后全部死亡。这与国外报道氨氮对植物生长胁迫的研究结果较一致^[13],报道表明,水培条件下, 1mg/L 氨氮促进金鱼藻生长, 5mg/L 开始抑制生长^[13, 14]。

叶绿素和可溶性糖含量的变化见图 2。从图 2 可以看出,对照和处理组叶绿素、可溶性糖含量的变化趋势基本一致,除 C6 组外均有一个先下降、再升高的趋势。在对照和 C1、C2、C3 处理下,叶绿素和可溶性糖含量随浓度增加呈上升趋势,在 C3 浓度时达到最大值;随着 NH₄⁺-N 浓度的进一步升高 (C4、C5、C6),叶绿素和可溶性糖含量明显降低,直至植物死亡。这说明低浓度 NH₄⁺-N 能促进轮叶黑藻叶绿素和可溶性糖的生成,但 NH₄⁺-N 浓度超过 4mg/L 时,黑藻的叶绿素和可溶性糖含量在第 24 天、32 天、40 天取样时较对照组明显降低 (P < 0.05)。

2.2 不同浓度 NH₄⁺-N 对轮叶黑藻蛋白质含量的影响

蛋白质含量随时间的变化见图 3。从图 3 可看出:对照组 CK 和处理组 C1、C2、C3 的轮叶黑藻的蛋白质含量随时间延长呈上升趋势,但蛋白质含量变化不明显

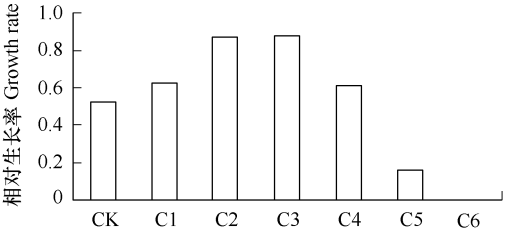


图 1 第 40 天时不同浓度 NH₄⁺-N 培养液处理下的轮叶黑藻相对生长率

Fig. 1 Growth rate of *H. verticillata* in different NH₄⁺-N concentration culture solution on the 40th day

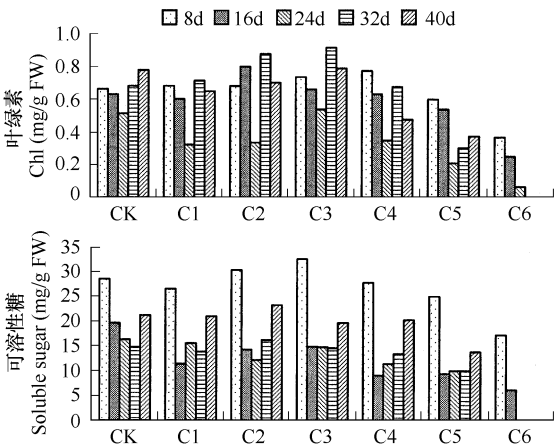


图 2 不同浓度 NH₄⁺-N 培养液处理下轮叶黑藻的叶绿素和可溶性糖含量

Fig. 2 Chlorophyll contents and soluble sugar contents of *H. verticillata* in different NH₄⁺-N concentration culture solution

($P>0.05$) ,其中 C1、C2、C3 组蛋白质含量先下降后又上升 ,而对照组的蛋白质含量一直在上升。C4、C5、C6 组蛋白质含量随时间变化呈下降趋势 ,其中 C4 组蛋白质含量变化不明显 ,而 C5、C6 组蛋白质含量下降明显 ($P<0.05$) 。在实验结束时 ,对照和处理组蛋白质含量的大小次序为 $CK>C2>C1>C3>C4>C5>C6=0$ 。

2.3 不同浓度 NH_4^+-N 对轮叶黑藻抗氧化酶 (SOD、POD)活性的影响

结果见图 4。对照和处理组轮叶黑藻的 POD、SOD 活性随时间变化的趋势基本一致 ,除 C5 组外 ,POD、SOD 值基本上在第 16 天达到最大值 ,在随后的第 32 天和第 40 天取样中 ,对照和处理组的 POD、SOD 值逐渐减低。在图 4 中还可以看到 ,在整个实验期间 ,低浓度处理组 C1、C2、C3 和对照组 CK 的 POD、SOD 值变化基本不大 ,高浓度处理组 C4、C5、C6 的 POD、SOD 值变化较大 ,尤其是 POD 活性较高。

2.4 不同浓度 NH_4^+-N 对轮叶黑藻谷氨酰胺合成酶 (GS)的影响

随着培养时间的延长 ,对照和处理组的 GS 活性都有升高 ,并且基本上在第 16 天达到最大值 ,其中 C5、C6 组的变化显著高于其它处理组和对照组 ($P<0.05$) ,尤其是 C6 组第 16 天达到 $1.47\text{ OD}_{540}/(\text{mg protein}\cdot\text{h})$,远高于其它处理组和对照组 (此后由于该处理组的轮叶黑藻死亡或濒临死亡 ,其 GS 活性迅速衰减为 0) (图 5)。结果表明 ,轮叶黑藻生长在较高浓度的 NH_4^+-N 培养液中 ,其谷氨酰胺合成酶 (GS)活性相对较高。

3 讨论

沉水植物对富营养化的反应机理一直存在分歧^[5] ,Chamber 等^[6,17]认为沉水植物对富营养化的敏感性主要受水体透明度下降引起的光衰减 (包括与藻类的光竞争)和植物生长型的影响 ,而不受水体中氮、磷浓度变化所直接引起的生理反应的影响。但也有研究表明水体中较高的 N、P 浓度对沉水植物而言 ,与盐胁迫、环境污染物胁迫一样是一种逆境胁迫 ,影响其正常生理活动^[15,18,19] ,可能是湖泊富营养化过程中影响沉水植物退化的机制之一。

氨氮是富营养化水体重要的氮形态之一。虽然氨氮是可被植物直接利用的氮 ,但高浓度的非离子态氨和铵根离子会对植物产生毒害作用 ,影响植物的生长 ,因此大部分的植物不能耐受高浓度的氨氮。本实验中 ,发现沉水植物轮叶黑藻在培养液 NH_4^+-N 浓度达到 4mg/L 时 ,随着 NH_4^+-N 浓度的升高 ,叶绿素、可溶性糖和蛋白质含量明显降低。可以认为 ,当水体里的 NH_4^+-N 浓度升高 ,对轮叶黑藻形成逆境胁迫 ,产生氨害 ,影响了轮叶黑藻正常生理活动 ,抑制了它的正常生长。

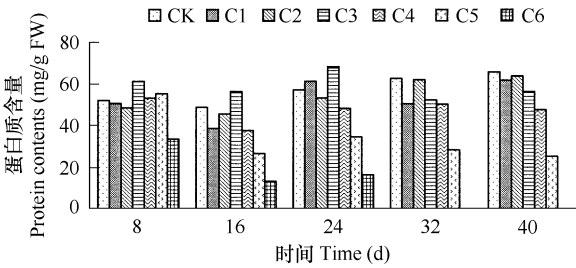


图 3 不同浓度 NH_4^+-N 培养液处理下轮叶黑藻的蛋白质含量
Fig. 3 Protein contents of *H. verticillata* in different NH_4^+-N concentration culture solution

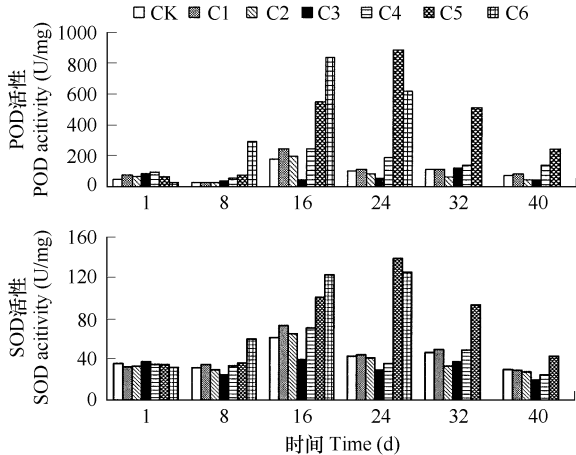


图 4 不同浓度 NH_4^+-N 培养液处理轮叶黑藻的 POD 和 SOD 活性
Fig. 4 POD and SOD activities of *H. verticillata* in different NH_4^+-N concentration culture solution

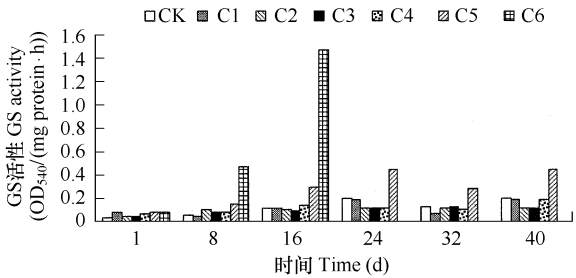


图 5 不同浓度 NH_4^+-N 培养液处理下轮叶黑藻的 GS 活性
Fig. 5 GS activities of *H. verticillata* in different NH_4^+-N concentration culture solution

超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 是防御过氧化系统的重要保护酶, 在消除自由基、减轻脂质过氧化物作用和膜损伤方面起重要作用^[20]。本研究发现, 高浓度 NH_4^+ -N 处理下轮叶黑藻的 SOD 和 POD 活性逐渐升高, 并在第 16 天或第 24 天达到最大值 (见图 4), 以保护膜的正常结构和功能, 抵抗氮的逆境胁迫。随着培养时间的延长, 胁迫使黑藻生长受到抑制, 其 SOD 和 POD 活性又有所下降。这一现象说明在高浓度 NH_4^+ -N 处理下, 黑藻具有一定的抗逆性能和适应能力, 但长期胁迫使生长受抑制, 抗逆性能也受到抑制, 严重时甚至导致植物死亡。此外, 已有研究发现高浓度的铵处理使植物的耗氧量增加 41%, 并据此推测把 NH_4^+ 从细胞内运出细胞时要耗费巨大的能量^[3]; 更传统的研究认为植物避免氮害可能是通过在植物体内合成谷氨酰胺途径进行解毒^[3, 21]。这两种产能途径都会大量增加活性氧。在本实验中, POD 活性较 SOD 活性高出许多, 说明 POD 在氮胁迫下发挥着重要作用。由此推测出植物体内产生了大量的过氧化物和少量的超氧化物。而随后 POD 与 SOD 活性逐渐消失, 可能是因为植物体内的碳水化合物已逐渐消耗殆尽, 因而无法维持酶的响应活力。

谷氨酰胺合成酶 (GS) 是植物体内氮同化的关键酶之一。植物中蛋白质的形成, 在很大程度上与碳水化合物的供应有关。当 N 源充足时, 在 ATP 和 Mg^{2+} 存在下, 植物体内的氨基酸会在谷氨酰胺合成酶的作用下进一步胺化, 形成酰胺, 以避免游离的氨中毒。 NH_4^+ -N 浓度对谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性具有一定的影响, 本实验中高浓度处理组 (4.8, 16 mg/L) 的蛋白质和可溶性糖 (碳水化合物) 含量较对照组 CK 明显降低, 表明在此环境中, 植物体内含有一定的游离氨, 氮代谢较多停留在酰胺的阶段, 不能进一步合成蛋白质, 影响了轮叶黑藻的正常生理活动和生长。

通过本研究发现, 沉水植物轮叶黑藻对水体富营养胁迫有较高的耐性, 即抗逆性。即使在 N、P 浓度达到超富营养的水平 (4.0 mg/L NH_4^+ -N, 0.2 mg/L TP), 表观上看轮叶黑藻仍生长良好, 这说明轮叶黑藻可以长期忍受超富营养水平 N、P 浓度的胁迫。但水体中较高的 NH_4^+ -N 浓度已经影响到轮叶黑藻的生理活动, 在该条件下轮叶黑藻是否仍能完成正常的生活史需要进一步的研究。

References :

- [1] Middleboe A L, Markager S. Depth limits and minimum light requirements of freshwater macrophytes. *Freshwater Biology*, 1997, 37 : 553 — 568.
- [2] Britto D T. Futile transmembrane NH_4^+ cycling : a cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. *Pro Natl Acad Sci*, 2001, 98 : 4255 — 4258.
- [3] Litav M, Lehrer Y. The effects of ammonium in water on *Potamogeton lucens*. *Aquatic Botany*, 1978, 5 : 127 — 138.
- [4] Chong Y X, Hu H Y, Qian Y. Studies on the effect of inorganic nitrogen compounds and pH on the growth of *Spirodela polyrrhiza*. *China Environmental Science*, 2003, 23 (4) : 417 — 421.
- [5] Serna M D, Legaz B F, Primomillo E. The influence of nitrogen concentration and ammonium/nitrate ratio on N-uptake, mineral composition and yield of citrus. *Plant and Soil*, 1992, 147 : 13 — 23.
- [6] Peuke D A, Tischner R. Nitrate uptake and reduction of aseptically cultivated spruce seedlings. *J. Exp. Bot.*, 1991, 239 : 723 — 728.
- [7] Jin X C, Liu S K, Zhang Z S, *et al.* Lakes in China : research of their environment. Beijing : China Ocean Press, 1995.
- [8] Thai K V, Greg S W, Ted D C. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria americana* as influenced by soil fertility. *Aquatic Botany*, 1999, 62 : 225 — 233.
- [9] Commission Editorial of Monitoring & Analysis Methods for Water and Wastewater, State Environmental Protection Administration of China. Monitoring & Analysis Methods for Water and Wastewater. Beijing : China Environmental Science Press, 2002. 276 — 281.
- [10] Zhang Z L, Qu W J. Experimental guidance of plant physiology. Beijing : Higher Education Press, 2003.
- [11] Chen J X, Wang X F. *Experimental guidance of plant physiology*. Guangzhou : South China University of Technology Press, 2002. 120 — 121.
- [12] Magalhaes J R, Huber D M. Response of ammonium assimilation enzymes to nitrogen form treatments in different plant species. *Journal of Plant Nutrition*, 1991, 14 (2) : 175 — 185.
- [13] Best E P H. Effects of nitrogen on the growth and nitrogenous compounds of *Ceratophyllum demersum*. *J. Aquat. Bot.*, 1980, 8 : 197 — 206.
- [14] Cao T, Ni L Y. Responses of antioxidases of *Ceratophyllum demersum* to the increase of inorganic nitrogen in water column. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28 (3) : 299 — 303.

[15] Wang B , Li W. Physiological reactions of *Potamogeton malaianus* to different N and P concentrations in the growth medium. *Acta Ecologica Sinica* , 2002 , 22 (10) : 1616 — 1621.

[16] Chamber P A , Kalf J. Light and nutrients in the control of aquatic plant community structure I . *in situ* experiments. *Journal of Ecology* , 1987 , 75 : 611 — 619.

[17] Chamber P A. Light and nutrients in the control of aquatic plant community structure II . *in situ* observations. *Journal of Ecology* , 1987 , 75 : 621 — 628.

[18] Wang J , Gu Y F , Zhu Z Y , *et al.* Physiological responses of *Ceratophyllum demersum* under different nutritional concentrations. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2005 , 16 (2) : 337 — 340.

[19] Mantai K E and Newton M E. Root growth of *Myriophyllum* : sediment or lake water as the source of nitrogen and phosphorus. *Ecology* , 1978 , 59 : 1075 — 1080.

[20] Elstner E F. Oxygen activation and oxygen toxicity. *Ann. Rew. Plant Physiol* , 1982 , 33 : 73 — 76.

[21] Beck T , Feller U. Ammonium-stimulated potassium release from *Lemna minor* L. grown on a medium containing nitrate as N-source. *Aquatic Botany* , 1991 , 39 : 255 — 266.

参考文献：

[4] 种云霄 , 胡洪营 , 钱易. 无机氮化合物及 pH 值对紫背浮萍生长的影响. *中国环境科学* , 2003 , 23 (4) : 417 ~ 421.

[7] 金相灿 , 刘树坤 , 章宗涉 , 等编著. *中国湖泊环境* , 北京 : 中国海洋出版社 , 1995.

[9] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会 , *水和废水监测分析方法*. 北京 : 中国环境科学出版社 , 2002. 276 ~ 281.

[10] 张志良 , 瞿伟菁. *植物生理学实验指导*. 北京 : 高等教育出版社 , 2003.

[11] 陈建勋 , 王晓峰. *植物生理学实验指导*. 广州 : 华南理工大学出版社 , 2002. 120 ~ 121.

[14] 曹特 , 倪乐意. 金鱼藻抗氧化酶对水体无机氮升高的响应. *水生生物学报* , 2004 , 28 (3) : 299 ~ 303.

[15] 王斌 , 李伟. 不同 N、P 浓度条件下竹叶眼子菜的生理反应. *生态学报* , 2002 , 22 (10) : 1616 ~ 1621.

[18] 王珺 , 顾宇飞 , 朱增银 , 等. 不同营养状态下金鱼藻的生理响应. *应用生态学报* , 2005 , 16 (2) : 337 ~ 340.