

氨氮与镉单一和复合作用对沉水植物穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响

许秋瑾, 金相灿*, 王兴民, 陈书琴, 颜昌宙

(中国环境科学研究院湖泊研究中心, 北京 100012)

摘要:在水-土环境中, 单一物质引起的污染很少, 绝大多数污染是多种污染物质共存所造成的. 利用碘量法测定溶解氧, 研究了氨氮与镉单一和复合作用对沉水植物穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响. 结果显示, 氨氮浓度在 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对轮叶黑藻有较强的胁迫作用, 表现为光合作用的产氧量与呼吸作用的耗氧量均下降, 而此浓度对穗花狐尾藻没有表现出胁迫作用; 当镉处理浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 镉对 2 种沉水植物都表现出明显的胁迫效应, 且对轮叶黑藻的胁迫作用更强; 当镉与氨氮复合作用时, 对轮叶黑藻产生联合毒害作用, 但对穗花狐尾藻毒害作用较轻, 可能原因是穗花狐尾藻所含的粗纤维比轮叶黑藻少, 细胞壁上能结合重金属的位点较少, 所以吸附的镉相应减少, 毒性较小. 实验结果表明在进行湖泊水生植物修复时, 相对于轮叶黑藻, 穗花狐尾藻更适合作为生态恢复的先导物种.

关键词: 氨氮; 镉; 穗花狐尾藻; 轮叶黑藻; 光合作用; 呼吸作用

中图分类号: X503.23 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)10-1974-05

Effects of Both Single and Combined Pollution of Cd and NH_4^+ on *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum spicatum*

XU Qiujin, JIN Xiang-can, WANG Xing-min, CHEN Shu-qin, YAN Chang-zhou

(Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Combined pollution is more ubiquitous than the single pollution in water and soil environment. Iodine method was used to study the effects of both single and combined pollution of Cd and NH_4^+ on *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum spicatum*. Results came out that *H. verticillata* was distinctly stressed at $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ concentration of NH_4^+ , oxygen production of photosynthesis and oxygen depletion of respiration all declined, but for *M. spicatum*, it was not be stressed. If treated with $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd, *H. verticillata* and *M. spicatum* all were stressed, and *H. verticillata* was stressed more seriously. Combined pollution of Cd and NH_4^+ produced cooperative adverse effects on *H. verticillata*. But for *M. spicatum*, the stress was less severe comparatively. The main reason was that *M. spicatum* made of less crude cellulose. So it had less combined pathway with heavy metal than *H. verticillata*. It demonstrated that *M. spicatum* is suit for pioneer plant comparatively during the process of lake restoration.

Key words: NH_4^+ ; Cd; *Hydrilla verticillata*; *Myriophyllum spicatum*; photosynthesis; respiration

由于人类活动, 使重金属元素(如镉、汞、铅、铬、铜等)在土壤、水体中大量积累. 重金属进入水体后, 大部分被水中各种有机和无机胶体及微粒物质所吸附, 经聚集沉降沉积于水体底部, 小部分在碱金属背景下溶解于水中, 其它部分则被水生动物植物吸收. 重金属在水生动物及水生植物根、茎、叶、籽粒中的累积, 不仅严重影响水生动物及水生植物的生长和发育, 而且可能进入食物链, 危及人类的健康. 国内外有关重金属对环境污染的研究大多只涉及单一污染物的环境效应, 对多种污染物所形成的环境复合污染效应及其机理的认识还远远不够, 已有的复合污染效应研究多注重 2 种重金属对植物的复合作用^[1], 且以农作物为主^[2], 对水生植物的研究不多见, 特别是沉水植物. 在我国, 由于大部分湖泊富营养化问题十分严重, 水体中氮磷营养浓度较高, 因此

水生植物除了可能受重金属胁迫外, 在生长过程中还必然须耐受高浓度营养盐的胁迫, 高浓度营养盐, 特别是氨氮对沉水植物具有胁迫作用^[3]. 但有关氨氮与重金属镉对沉水植物的复合效应未见报道, 本文旨在通过实验研究, 阐明随着富营养化进程, 总氮升高, 特别是 NH_4^+ 浓度增加, 是否和重金属镉污染产生交互作用, 从而影响沉水植物的光合能力.

轮叶黑藻 [*Hydrilla verticillata* (L. f.) Rolye], 水鳖科沉水草本, 穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.), 小二仙草科沉水草本, 此 2 种沉水植

收稿日期: 2005-11-09; 修订日期: 2006-01-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412307); 国家“十五”重大科技专项(2002AA601013)

作者简介: 许秋瑾(1970~), 女, 副研究员, 主要研究方向为湖泊生态学, E-mail: xu-qiujin@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: jinxiangcan2004@163.com

物常见于水田、池塘、湖泊或溪流等淡水中, 广布于我国大部分地区, 具有较好的代表性, 而且断枝能繁殖, 是实验室研究的好材料。

1 材料与方法

1.1 材料

穗花狐尾藻和轮叶黑藻均为野生, 取自北京房山区拒马河。

1.2 沉水植物的预处理与培养

沉水植物于铺有湖泥的水槽培养驯化 2 周后, 选取生长良好、形态大小较均一的新鲜顶枝 1g, 进行光合能力的实验, 每组设 3 个平行。

1.3 实验设计

穗花狐尾藻处理浓度: 氨氮设 3 个浓度梯度, 分别是 0、0.2、4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 镉设 4 个浓度梯度, 分别是 0、0.05、0.1、0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。轮叶黑藻处理浓度: 氨氮设 4 个浓度梯度, 分别是 0、0.05、0.2、4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 镉设 3 个浓度梯度, 分别是 0、0.1、0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。培养液均为 1/10 Hoagland's 稀释液。

1.4 光合能力的测定^[4,5]

将植株置于黑白瓶中, 用虹吸法注满培养液, 黑瓶用黑色塑料布包裹, 与白瓶一起置于光照强度为 5 000 lx, 水温为 24 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温水槽中, 12 h 后取出进行溶解氧的测定, 方法为碘量法, 国标法^[6], 用以下公式计算出每 g 湿重植物在单位时间内 (每 h) 的产氧量, 耗氧量 ($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)。

光合作用总产氧量 = (白瓶溶解氧量 - 黑瓶溶解氧量) $\times$ 实验瓶容量 / 时间

光合作用净产氧量 = (白瓶实验溶解氧 - 初始瓶溶解氧量) $\times$ 实验瓶容量 / 时间

呼吸作用耗氧量 = (初始瓶溶解氧量 - 黑瓶实验后溶解氧量) $\times$ 实验瓶容量 / 时间

2 结果与分析

2.1 氨氮对穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响

穗花狐尾藻在本实验处理的浓度范围内, 即氨氮浓度 0~4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时, 其光合能力呈上升趋势, 表现在净产氧量和总产氧量都增加, 并且和氨氮为 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比有显著性差异, $p < 0.05$ (图 1)。随着氨氮浓度的增高, 黑藻的耗氧量、净产氧量、总产氧量有下降趋势, 氨氮为 4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 净产氧量显著性下降, $p < 0.05$ (图 2)。

2.2 镉对穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响

镉浓度低于 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 镉对轮叶黑藻和穗

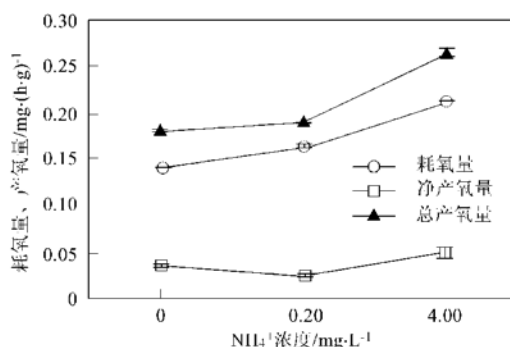


图 1 不同浓度氨氮对穗花狐尾藻光合能力的影响

Fig. 1 Effects of NH_4^+ on photosynthesis of *Myriophyllum spicatum*

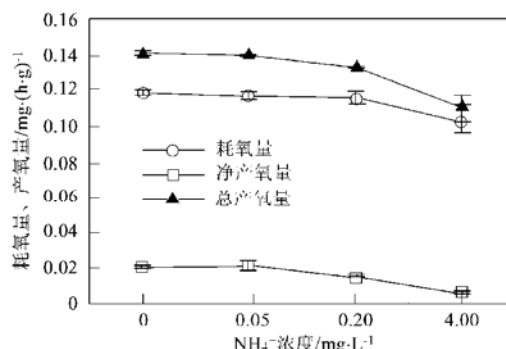


图 2 不同浓度氨氮对轮叶黑藻光合能力的影响

Fig. 2 Effects of NH_4^+ on photosynthesis of *Hydrilla verticillata*

花狐尾藻的胁迫作用不明显, 耗氧量、净产氧量、总产氧量和镉浓度为 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比没有显著性差异。镉浓度为 0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 穗花狐尾藻净产氧量和总产氧量明显下降 ($p < 0.05$), 但耗氧量变化不明显; 轮叶黑藻在此浓度下耗氧量和总产氧量都明显下降, 净产氧量与对照组相比无明显差异 (图 3、图 4)。高浓度镉处理对 2 种沉水植物有较强的胁迫作用, 但对黑藻的胁迫作用更强, 镉浓度为 0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 轮叶黑藻的耗氧量平均只有 0.083 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$, 而穗花狐尾藻是 0.151 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

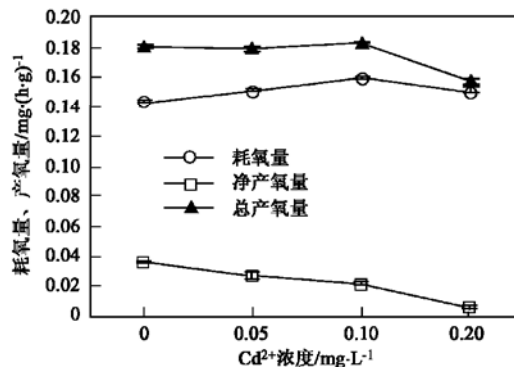


图 3 不同浓度镉对穗花狐尾藻光合能力的影响

Fig. 3 Effects of Cd^{2+} on photosynthesis of *Myriophyllum spicatum*

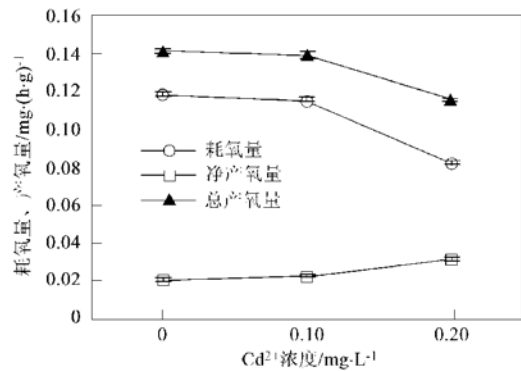


图 4 不同浓度镉对轮叶黑藻光合能力的影响
Fig. 4 Effects of Cd²⁺ on photosynthesis of *Hydrilla verticillata*

2.3 氨氮与镉对穗花狐尾藻光合能力的复合作用

镉浓度一致的情况下, 随着氨氮浓度的升高, 穗花狐尾藻光合能力表现出先下降后升高的趋势, 氨氮为 4.0 mg·L⁻¹ 实验组的总产氧量与对照组相比有明显差异($p < 0.05$), 见表 1.

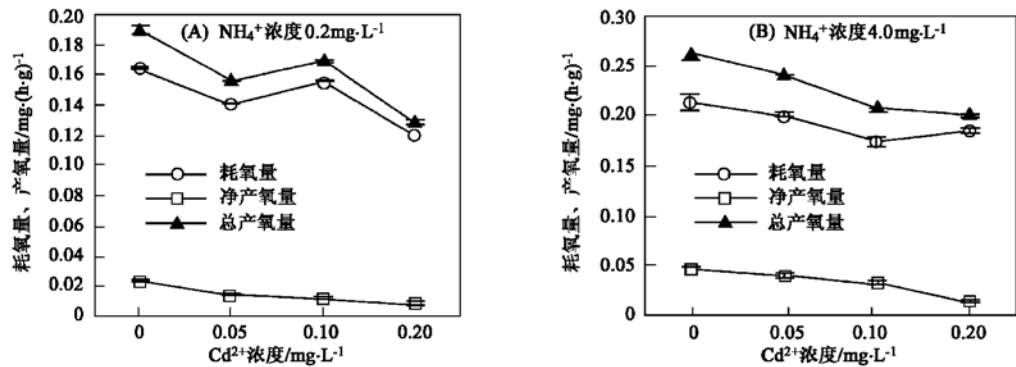


图 5 镉对氨氮胁迫穗花狐尾藻光合能力的影响
Fig. 5 Effects of Cd²⁺ and NH₄⁺ on photosynthesis of *Myriophyllum spicatum*

2.4 氨氮与镉对轮叶黑藻光合能力的复合作用

镉浓度一致的情况下, 随着氨氮浓度的升高, 轮叶黑藻的净产氧量、总产氧量和耗氧量呈下降趋势(表 2). 氨氮为 4.0 mg·L⁻¹ 实验组的净产氧量, 总产氧量与对照组相比有明显差异($p < 0.05$).

氨氮浓度一致的情况下, 高浓度镉处理组的植物比低浓度镉处理组的植物产氧量与耗氧量都明显下降, 但净产氧量变化不显著(图 6).

3 讨论

氨氮的处理浓度有一定的代表性, 根据地表水质环境质量标准(GB3838-2002), 氨氮浓度为 0.2 mg·L⁻¹ 时, 相当于 I ~ II 类水, 氨氮浓度为 4.0 mg·L⁻¹ 时, 相当于劣 V 类水. 氮素营养是植物需求量最多、质量分数最高的营养元素, 植物干体中氮含

在氨氮浓度一致的情况下, 随着镉浓度的升高, 穗花狐尾藻总产氧量、净产氧量与耗氧量总体呈降低的趋势, 镉为 0.2 mg·L⁻¹, 氨氮为 4.0 mg·L⁻¹ 的处理组, 出现伤呼吸, 即耗氧量增加(图 5).

表 1 氨氮对镉胁迫穗花狐尾藻光合能力的影响 / mg·(h·g)⁻¹

Table 1 Effects of Cd²⁺ and NH₄⁺ on photosynthesis of *Myriophyllum spicatum* / mg·(h·g)⁻¹

NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	Cd ²⁺ /mg·L ⁻¹	呼吸耗氧量 /mg·(h·g) ⁻¹	净产氧量 /mg·(h·g) ⁻¹	总产氧量 /mg·(h·g) ⁻¹
0	0.05	0.151 ± 0.001	0.027 ± 0.003	0.178 ± 0.002
0.2	0.05	0.141 ± 0.001	0.015 ± 0.000	0.156 ± 0.000
4.0	0.05	0.173 ± 0.004	0.033 ± 0.002	0.206 ± 0.003 [*]
0	0.1	0.159 ± 0.001	0.022 ± 0.001	0.183 ± 0.000
0.2	0.1	0.156 ± 0.001	0.012 ± 0.000	0.169 ± 0.000
4.0	0.1	0.174 ± 0.004	0.033 ± 0.002	0.201 ± 0.003 [*]
0	0.2	0.151 ± 0.002	0.006 ± 0.000	0.157 ± 0.002
0.2	0.2	0.120 ± 0.002	0.008 ± 0.000	0.128 ± 0.002
4.0	0.2	0.185 ± 0.003	0.015 ± 0.001	0.200 ± 0.000 [*]

* 表示 $p < 0.05$

表 2 氨氮对镉胁迫轮叶黑藻光合能力的影响 / mg·(h·g)⁻¹

Table 2 Effects of Cd²⁺ and NH₄⁺ on photosynthesis of *Hydrilla verticillata* / mg·(h·g)⁻¹

NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	Cd ²⁺ /mg·L ⁻¹	呼吸耗氧量 /mg·(h·g) ⁻¹	净产氧量 /mg·(h·g) ⁻¹	总产氧量 /mg·(h·g) ⁻¹
0	0.1	0.116 ± 0.003	0.023 ± 0.000	0.139 ± 0.002
0.05	0.1	0.122 ± 0.003	0.018 ± 0.001	0.140 ± 0.002
0.2	0.1	0.118 ± 0.003	0.016 ± 0.001	0.134 ± 0.002
4.0	0.1	0.109 ± 0.009	0.010 ± 0.001 [*]	0.119 ± 0.008 [*]
0	0.2	0.083 ± 0.001	0.032 ± 0.001	0.115 ± 0.000
0.05	0.2	0.081 ± 0.003	0.029 ± 0.001	0.109 ± 0.002
0.2	0.2	0.087 ± 0.006	0.025 ± 0.001	0.112 ± 0.006
4.0	0.2	0.074 ± 0.002	0.014 ± 0.001 [*]	0.088 ± 0.006 [*]

* 表示 $p < 0.05$

量约占 0.3% ~ 5%. 植物缺氮时会表现为生长缓慢, 植株矮小, 植物分枝, 分蘖减少. 但是高浓度的氨

氮会导致植物中毒,甚至死亡^[7].施氮过多会引起植株旺长,还会造成植株的营养生长与生殖生长失调,果实风味品质下降^[8].本实验结果显示随着氮浓度的增高,黑藻的耗氧量、净产氧量、总产氧量有下降趋势,氮浓度为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,净产氧量显著性下降 ($p < 0.05$) (图 2),表现出较明显的胁迫作用.此结果在农作物研究方面也有类似报导,研究氮素营养对小麦根冠协调生长的调控实验中发现不同氮素浓度下,氮肥用量的提高对地上部干重和叶片气体交换参数表现为增效效应,但当用量增至一定程度时,地上部干重和叶片气体交换参数均呈下降趋势^[9];无论是高淀粉玉米还是普通玉米,其淀粉含量、粗蛋白含量,脂肪酸总量以及支链淀粉、醇溶

蛋白、软脂酸、油酸和亚油酸含量,均随施氮量的增加而增加,但过量施氮则其含量下降^[10].穗花狐尾藻在本实验处理的浓度范围内,即氮浓度在 $0 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,其光合能力呈上升趋势,表现在净产氧量和总产氧量都增加,并且和氮浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比有显著性差异, $p < 0.05$ (图 1).说明对于穗花狐尾藻,目前实验处理的氮浓度还未过量,仍在其生长条件的适宜浓度范围之内;和轮叶黑藻相比,穗花狐尾藻更能耐受高浓度的氮,此实验结果也从另一个角度证明了穗花狐尾藻比较耐污,而轮叶黑藻作为演替早期的水生植物,其生长的水质条件相对需要较好,耐污能力不如穗花狐尾藻^[11, 12].

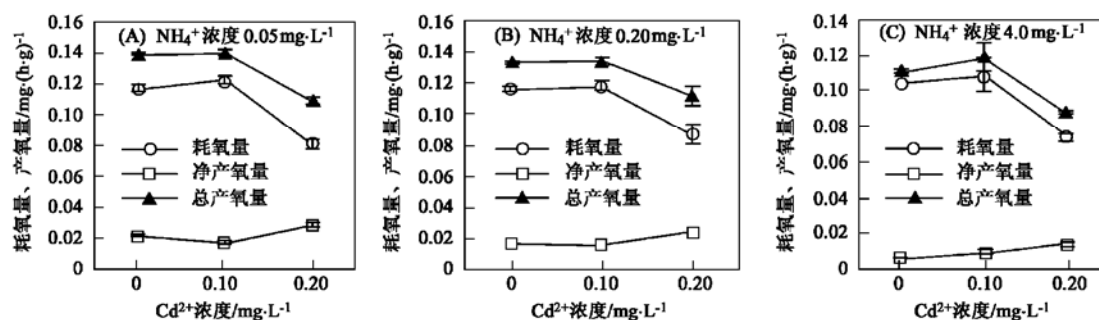


图 6 镉对氨氮胁迫轮叶黑藻光合能力的影响

Fig. 6 Effects of Cd^{2+} and NH_4^+ on photosynthesis of *Hydrilla verticillata*

镉是一种环境污染物,被广泛应用于机械、化工、电镀、印染等部门,这些工业排放的废弃物成为环境中镉的污染源,镉进入生物体内循环,对人和植物都造成很大危害.镉和其它微量金属元素一样其浓度的变化会引起维管束植物一系列生理生化变化^[13].镉是光合作用的一种有效抑制剂^[14].用含不同浓度镉的海水培养石莼 18d,石莼的光合作用、呼吸作用和叶绿素含量受到了明显的影响,光合速率和叶绿素含量明显下降.低浓度的镉对呼吸有促进作用,会出现伤呼吸,高浓度的镉对呼吸有明显抑制作用^[15].本文的研究结果显示镉浓度低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,镉对轮叶黑藻、穗花狐尾藻的胁迫作用不明显,表现在耗氧量、净产氧量、总产氧量和镉浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比没有显著性差异,但镉浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,穗花狐尾藻净产氧量和总产氧量明显下降 ($p < 0.05$),耗氧量变化不明显;而轮叶黑藻在此浓度下耗氧量和总产氧量都明显下降,净产氧量与对照组相比无明显差异 (图 3、图 4).高浓度镉处理对 2 种沉水植物有较明显的胁迫作用,相比而言,穗花狐尾藻耐镉能力较强,相关

的实验研究表明穗花狐尾藻对镉有较强的生物吸附作用,生物吸附量干重为 $1.57 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,远高于挺水植物^[16].穗花狐尾藻 (*M. spicatum*) 又比同科的另一种水生植物 (*M. triphyllum*) 更能耐受高浓度的镉^[17].而轮叶黑藻耐镉的能力较弱,因为镉浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,轮叶黑藻的耗氧量平均只有 $0.083 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$,穗花狐尾藻则是 $0.151 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$.呼吸作用是新陈代谢过程一项最基本的生命活动,它是为生命活动的各项具体过程提供能量 (ATP) 的.所以呼吸作用在一切生物的生命活动过程是一刻都不能停止的,呼吸作用的停止意味着生命的结束.呼吸作用降低,意味生命的衰落.穗花狐尾藻比轮叶黑藻更耐镉的原因可能是由其生理结构决定的. Kapoor 等^[18] 通过化学修改黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 吸附重金属的研究表明,在吸附过程中,细胞壁上的羧基和氨基起重要作用,磷酸基和脂类作用很小.因此,沉水植物细胞壁上的多糖与金属离子的结合可能主要是通过多糖的 $-\text{OH}$ 和 $-\text{CONH}_2$ 与金属离子进行络合作用的,轮叶黑藻的粗纤维素占干物质的比重是穗花狐尾藻的 2 倍多^[19],而粗纤

维素主要由多糖构成,因此可以初步推断轮叶黑藻应比穗花狐尾藻吸附更多的重金属^[20],从而对轮叶黑藻的光合能力的抑制作用更强。

氨氮对轮叶黑藻光合作用的抑制是勿容置疑的,镉浓度一致的情况下,随着氨氮浓度的升高,轮叶黑藻光合作用的净产氧量、总产氧量、耗氧量都下降(表2)。镉对轮叶黑藻的光合作用的抑制也是明确的,氨氮浓度一致的情况下,高浓度镉组的植物比低浓度镉处理组的轮叶黑藻总产氧量与耗氧量都明显下降,净产氧量变化不显著(图6)。对轮叶黑藻来说,镉与氨氮对其有联合毒害作用,特别是在高浓度处理组。镉浓度一致的情况下,氨氮对穗花狐尾藻的产氧量和耗氧量,随着氨氮浓度的升高,表现出低浓度时变化不大,而高浓度时显著升高, $p < 0.05$ (表1)。氨氮浓度一致的情况下,随着镉浓度的升高,穗花狐尾藻总产氧量、净产氧量与耗氧量呈降低的趋势(图5),但在镉为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理组,出现伤呼吸,即耗氧量增加(图5)。镉与氨氮对穗花狐尾藻没有明显的联合毒害作用,原因是 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度氨氮依然能促进光合作用,此外氨氮与镉同属阳离子,与穗花狐尾藻作用时会与镉竞争相同的结合位点,从而减弱镉对其的胁迫作用,轮叶黑藻的实验结果与穗花狐尾藻的实验结果差异很大,可能是轮叶黑藻所含的粗纤维比穗花狐尾藻多^[19],植物细胞壁上能结合重金属的位点相应多,所以这种竞争结合的作用表现不明显,轮叶黑藻仍能结合较多的重金属镉,氨氮又通过影响植物细胞内固有的氧自由基代谢平衡,导致产生过量氧自由基,过量的氧自由基引发或加剧膜脂过氧化反应,造成细胞膜损伤,干扰植物细胞的光合、呼吸以及其它代谢活动^[20]。所以氨氮与镉两者对轮叶黑藻产生了协同的胁迫作用。

4 结论

当氨氮浓度在 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对轮叶黑藻有较强的胁迫作用,表现为产氧量与耗氧量均下降,而此浓度对穗花狐尾藻没有表现出胁迫作用;当镉处理浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,镉对2种沉水植物都表现出明显的胁迫效应,且对轮叶黑藻的胁迫作用更强;当镉与氨氮复合作用时,对轮叶黑藻产生协同的毒害作用,但对穗花狐尾藻毒害作用较轻,主要原因可能是穗花狐尾藻所含的粗纤维比轮叶黑藻少,细胞壁上能结合重金属的位点较少,所以吸附的镉相应减少,毒性也较小,但此机理尚需进一步论证。

参考文献:

- [1] Abdelilah C, Salma M, Mohamed H G, et al. Cadmium and Zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Plant Science, 1997, 127: 139~ 147.
- [2] 胡莹,朱永官,黄益宗,等. 钒镉复合污染对水稻吸收积累镉、钒和磷的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 198~ 202.
- [3] 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.
- [4] 陈开宁. 菹荇眼子菜的生物生态学研究及其在滇池生态修复中的应用 [D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2003.
- [5] 周红. 利用净产氧量对沉水植物生态阈值的研究 [D]. 北京: 北京大学, 1995.
- [6] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会编. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境出版社, 2002. 201~ 205.
- [7] 谢林毅. 植物氮素营养与氮素施肥 [J]. 农村实用技术, 2004, 12: 37~ 38.
- [8] 刘松忠,姜远茂,彭福田,等. 不同氮素水平对棚栽草莓果实芳香成分的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 638~ 641.
- [9] 任书杰,张雷明,张岁岐,等. 氮素营养对小麦根冠协调生长的调控 [J]. 西北植物学报, 2003, 23: 395~ 400.
- [10] 金继运,何萍,刘海龙,等. 氮肥用量对高淀粉玉米和普通玉米吸氮特性及产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 568~ 573.
- [11] 严国安,马剑敏,邱东茹,等. 武汉东湖水生植物群落演替的研究 [J]. 植物生态学报, 1997, 21(4): 319~ 327.
- [12] 吴振斌,陈德强,邱东茹,等. 武汉东湖水生植被现状调查及群落演替分析 [J]. 重庆环境科学, 2003, 25: 54~ 62.
- [13] 苏玲,章永松,林咸永,等. 维管植物的镉毒和耐性机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6: 106~ 112.
- [14] 蒋文智. 镉对烟草光合特性的影响 [J]. 植物生理学通讯, 1986, 6: 27~ 31.
- [15] 赵素达,付成秋,朱松龄. 镉对石莼光合作用和呼吸作用及叶绿素含量的影响 [J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30: 519~ 523.
- [16] Cardwell A J, Hawker D A W, Greenway M. Metal accumulation in aquatic macrophytes from southeast Queensland [J]. Australia Chemosphere, 2002, 48: 653~ 663.
- [17] Sivaci E R, Sokmen M. Biosorption of cadmium by *Myriophyllum spicatum* L. and *Myriophyllum triphyllum* orchard [J]. Chemosphere, 2004, 56: 1043~ 1048.
- [18] Kapoor A, Viraraghavan T. Heavy metal biosorption sites in *Aspergillus niger* [J]. Biores. Technol., 1997, 61(2): 221~ 227.
- [19] 魏云,陈源高,刘正文,等. 草鱼、团头鲂对伊乐藻的消化与利用[J]. 湖泊科学, 1996, 8 (Suppl): 63~ 72.
- [20] 颜昌宙,曾阿妍,金相灿,等. 沉水植物轮叶黑藻和穗花狐尾藻对 Cu^{2+} 的等温吸附特征[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1068~ 1072.
- [21] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的损伤 [J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(2): 84~ 90.