

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.05.013

Cu²⁺ 对水生植物水螵生理特性和光合作用的影响

商海燕, 马 行, 刘 刊, 权俊娇, 陆小平, 王 波

(苏州大学金螳螂建筑与城市环境学院, 江苏 苏州 215123)

摘要:用含不同浓度铜离子的 1/2 Hoagland 培养液培育水生植物水螵, 研究含不同浓度铜离子的培养液对水螵生物量、水螵叶绿素浓度、水螵叶绿素 a/b 值的影响, 以及所引起的水螵净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率的变化情况。结果显示, 随着培养液中铜离子浓度的增加, 水螵生物量呈下降趋势, 水螵生物量在 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 5.0 \text{ mg/L}$ 的培养液内一直呈负增长, 水螵叶绿素浓度也呈下降趋势。说明随着培养液中铜离子浓度的升高, 水螵的正常生长受到影响, 叶绿素的合成减少, 从而使水螵的净光合速率和气孔导度呈下降趋势。

关键词: Cu²⁺; 水螵; 生理特性; 光合作用

中图分类号: Q945.11

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2013)05-0065-04

Effects of Cu²⁺ on physiological properties and photosynthesis of *Hydrocharis dubia* (Bl.)

SHANG Haiyan, MA Xing, LIU Kan, QUAN Junjiao, LU Xiaoping, WANG Bo

(Gold Mantis School of Architecture and Urban Environment, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract: *Hydrocharis dubia* (Bl.) grown in a 1/2 Hoagland growth medium with different Cu²⁺ concentrations was studied to investigate the effects of Cu²⁺ on the biomass gain and photosynthesis of *Hydrocharis dubia* (Bl.). The amounts of chlorophyll, chlorophyll a/b, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, and transpiration rate were also investigated. The results show that the biomass gain decreased with the increase of the Cu²⁺ concentration and a biomass decrease occurred in *Hydrocharis dubia* (Bl.) grown in the medium with $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 5.0 \text{ mg/L}$. The amounts of chlorophyll decreased with the increase of the Cu²⁺ concentration as well, indicating that the synthesis of chlorophyll was impaired by Cu²⁺ due to the effects of Cu²⁺ on the growth of *Hydrocharis dubia* (Bl.), which resulted in the decrease of the net photosynthetic rate and stomatal conductance.

Key words: Cu²⁺; *Hydrocharis dubia* (Bl.); physiological property; photosynthesis

2010 年,我国地表水国控监测断面中, I ~ III 类水质比例为 51.9%, 劣 V 类水质断面比例为 20.8%。而在西南诸河、海河、长江、黄河等水系共有 40 个断面出现铅、汞、铜离子等重金属超标现象。水体污染可导致水资源可利用性降低、水域生态系统退化,因此,迫切需要寻找更合适、更经济的污水处理方式。相较于传统的二级活性污泥处理工艺,利用水生植物修复受污染水体的技术已引起了人们广泛关注。该技术投资少、运行费用低、管理简便,

既可改善和恢复生态环境,又可回收资源,节约能源^[1]。

受污染水体中,重金属不像有机化合物那样可自然降解或生物降解,而是停留在水体中,沉积到水域底部。近年来,大多利用水生植物如香蒲^[2]、水螵^[3-6]、凤眼莲^[7-8]、水生狐尾藻^[9]等来吸收或吸附重金属,但水体中达到一定质量浓度的重金属会对植物产生毒害作用,影响植物的生理特性和光合作用。关于重金属对水螵生理特性影响的研究已有很

作者简介:商海燕(1990—),女,硕士研究生,研究方向为园林植物栽培与生理。E-mail:youan1008@163.com

通信作者:王波,副教授。E-mail:wangb@suda.edu.cn

多,但重金属离子对植物光合作用的影响却鲜有报道。

本研究利用含不同浓度铜离子的 1/2 Hoagland 培养液培养水生植物水鳖,在不同天数下测定水鳖光合作用中的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率,探索不同浓度铜离子影响水鳖光合作用的因素和途径,同时测试水鳖对铜离子毒害作用的抗性强弱,为水鳖能否作为净化铜离子污染水体的水生植物提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料水鳖来源于苏州大学校园内水池。分别选取 5 株生长良好的水鳖洗净后在 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 0 \text{ mg/L}$ (对照组 CK)、 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 1.0 \text{ mg/L}$ (试验组 A)、 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 2.5 \text{ mg/L}$ (试验组 B)、 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 5.0 \text{ mg/L}$ (试验组 C) 的 1/2 Hoagland 培养液(培养液体积为 5 L)中进行培养繁殖。微量元素采用 Arnon 营养液,铜离子用分析纯 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 配置。

1.2 数据测定

叶绿素的测定参照文献[10]和文献[11]的方法。光合作用的几个指标(均选择第二叶位的光合作用数据,即净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率)采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪进行测定,测定时使用红蓝光源,样品流速设为 $500 \mu\text{mol/s}$,光照强度设为 $1500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度在 $25 \sim 27^\circ\text{C}$ 。每个试验重复 3 次,每隔 2 d 测定 1 次,共测定 4 次(第 2 天,第 4 天,第 6 天,第 8 天),测定时间为早晨 8:30—11:30。

1.3 数据处理

取 3 次试验结果的平均值,试验原始数据的绘图采用 Excel 软件进行,显著性差异分析采用 SPSS 11.5 统计软件开展。将水鳖各指标与培养液铜离子浓度、试验天数作相关性分析, $P \geq 0.05$ 和 $P < 0.05$ 分别表示该指标与培养液铜离子浓度或试验天数间无显著性差异和有显著性差异,本文用字母 a、b、c、d 表示各试验处理组间的差异水平。

2 结果与讨论

2.1 生物量

植物在正常生长时,植物生物量增加;植物受到伤害时,植物的生物量会停止增长甚至减少。本试验中,用水鳖鲜质量表示生物量。在相同天数下,与对照组相比,随着培养液中铜离子浓度的增加,水鳖的生物量均表现出逐渐下降的趋势,并与对照组存在显著性差异(图 1),表明铜离子对水鳖存在毒害作

用,影响了水鳖正常生长。同样的研究结果已有报道^[12]。

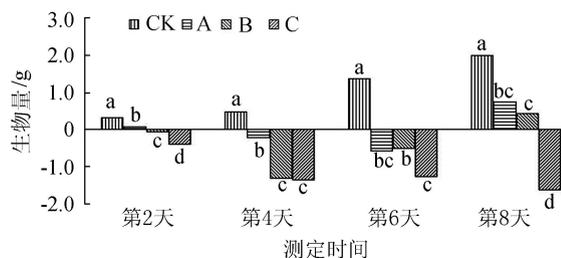


图 1 相同天数下,不同 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 对水鳖生物量的影响

从图 2 中可看出, $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 0 \text{ mg/L}$ 时,水鳖生物量随着天数的增加而增加; $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 1.0 \text{ mg/L}$ 和 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 2.5 \text{ mg/L}$ 时,随着天数的增加,水鳖生物量先下降后增加,说明水鳖在这两种浓度铜离子的培养液中经过一段时间的适应后,可以正常生长,但生长速度受到抑制; $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 5 \text{ mg/L}$ 时,水鳖生物量一直呈现出下降趋势,表明水鳖在该浓度铜离子的培养液中一直处于胁迫状态,最终会因为铜离子的毒害而死亡。

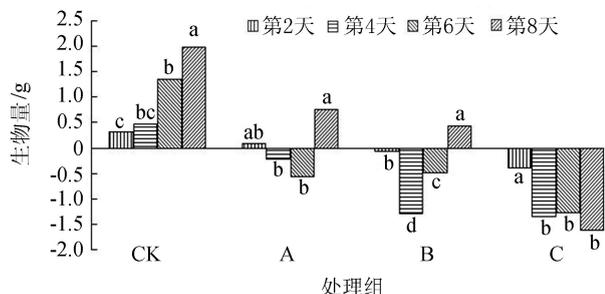
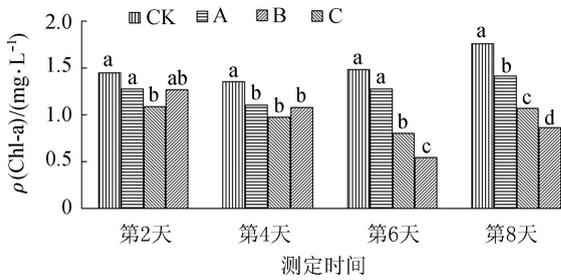


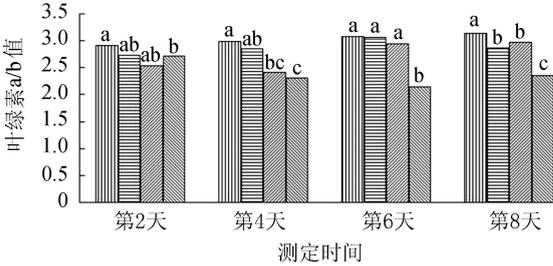
图 2 相同 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 下,不同天数对水鳖生物量的影响

2.2 叶绿素

叶绿素中主要的光合色素是叶绿素 a 和叶绿素 b。由图 3(a)可以看出,在相同试验天数下,与 CK 对照组相比,随着培养液中铜离子浓度的增加,叶绿素浓度逐渐减少。经过统计分析,在第 8 天时,各试验组与 CK 对照组之间均存在显著性差异,说明铜离子对水鳖的危害需要经过一段时间才可表现出来,铜离子对叶绿素起了破坏作用,影响了叶绿素的合成与分解代谢,从而导致叶片失绿。图 3(b)中叶绿素 a/b 值也随着培养液中铜离子浓度的增大而呈现下降趋势。经过统计分析,与 CK 对照组相比,生长在 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 5.0 \text{ mg/L}$ 培养液中的水鳖叶绿素 a/b 值一直显著下降,到第 8 天时,各试验组之间均存在显著性差异。究其原因,是因为铜离子通过水鳖的根系吸收后进入水鳖体内,对水鳖产生了毒害作用,随着铜离子浓度在水鳖体内升高,这种毒害作用会越来越明显,水鳖的正常生长受到抑制,水鳖叶绿素的正常合成受到影响。



(a) 叶绿素浓度



(b) 叶绿素 a/b 值

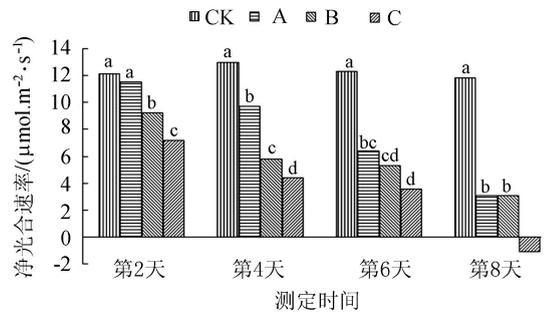
图3 相同天数下,不同 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 对水鳖叶绿素浓度和叶绿素 a/b 值的影响

2.3 光合作用

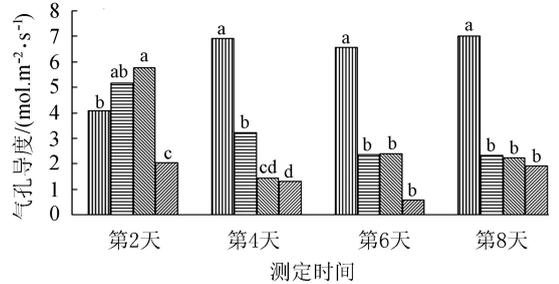
光合作用是植物维持生命的基础。本试验通过测定水鳖的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率来衡量不同浓度的铜离子对水鳖光合作用的影响。在相同天数下,随着培养液中铜离子浓度的增加,水鳖的净光合速率呈下降趋势(图4(a))。经过统计分析,除了在第2天 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 1.0 \text{ mg/L}$ 时,水鳖的净光合速率与CK对照组不存在显著性差异外,其他各试验组水鳖的其他指标与CK对照组均存在显著性差异。第8天,在 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 5.0 \text{ mg/L}$ 时,水鳖的净光合速率已呈负值,说明水鳖呼吸作用的消耗已经大于光合作用所产生的能量,水鳖将会因消耗过度而死亡。在 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 1.0 \text{ mg/L}$ 和 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 2.5 \text{ mg/L}$ 的培养液中,虽然水鳖的净光合速率与CK对照组相比明显降低,但是光合作用产生的能量可以满足水鳖的消耗,水鳖可在这两种铜离子浓度的培养液中生长。

由图4(b)可知,水鳖的气孔导度从第4天到第8天的变化趋势同净光合速率一样。经过统计分析,相同天数下(除了第2天),3种铜离子浓度的培养液中水鳖的气孔导度与CK对照组之间均存在显著性差异,即各试验组的气孔导度明显降低。气孔导度的大小说明气孔的闭合程度,气孔的闭合将会影响水鳖体内 CO_2 浓度的变化,从而影响其净光合速率。

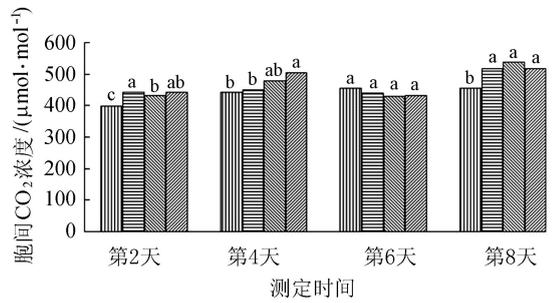
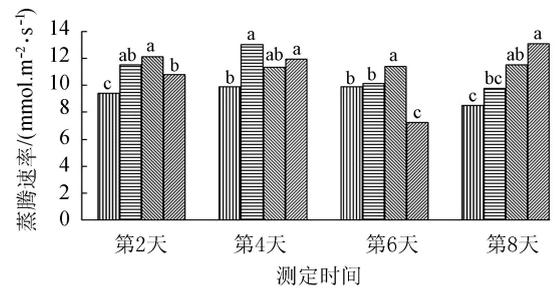
但在本试验中,水鳖的胞间 CO_2 浓度的变化情况(图4(c))与净光合速率间的趋势不同,说明在本试验下水鳖的胞间 CO_2 浓度不是影响水鳖光合作用的主导因素。究其原因,试验环境中的 CO_2 浓度很



(a) 净光合速率



(b) 气孔导度

(c) 胞间 CO_2 浓度

(d) 蒸腾速率

图4 相同天数下,不同 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 对水鳖净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率的影响

高,各试验组水鳖的胞间 CO_2 浓度对于水鳖光合作用的需要已经绰绰有余,不存在 CO_2 不足的情况。

气孔影响蒸腾作用中水分的运输,从而影响植物的蒸腾速率。在本试验中,相同天数下,3种铜离子浓度的培养液中水鳖的蒸腾速率与CK对照组之间均存在显著性差异(图4(d))。说明在含有铜离子的培养液中,水鳖的蒸腾速率明显升高,除了在第6天时,生长在 $\rho(\text{Cu}^{2+}) = 5.0 \text{ mg/L}$ 的培养液中的水鳖蒸腾速率明显降低。总体看来,铜离子可影响水鳖的蒸腾速率。

3 结 论

铜离子通过水螿的根系进入水螿体内后累积,对水螿产生毒害作用,从而影响水螿的正常生长,导致水螿生物量降低、叶绿素浓度和叶绿素 a/b 值降低,进而导致水螿净光合速率下降。影响水螿净光合速率的还有气孔导度,一般气孔导度越大,净光合速率也越大。

本试验表明,在低浓度铜离子的培养液中,水螿经过一段时间的适应后,可以继续生长存活,但在高浓度铜离子的培养液中,水螿无法生长,最终死亡。在选用水螿作为净化含铜离子污染水体的水生植物时,应当在铜离子浓度较低的水体中种植水螿,高浓度铜离子的水体不适宜水螿生长。

参考文献:

- [1] SHUTES R B E. Artificial wetlands and water quality improvement [J]. *Environment International*, 2001, 26: 441-447.
- [2] 黄永杰,刘登义,王友保,等. 八种水生植物对重金属富集能力的比较研究 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25 (5): 541-545. (HUANG Yongjie, LIU Dengyi, WANG Youbao, et al. Heavy metals accumulation by hydrophytes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (5): 541-545. (in Chinese))
- [3] 郝怀庆,施国新,杜开和,等. 镉污染对水螿的毒害影响 [J]. *西北植物学报*, 2001, 21 (6): 1237-1240. (HAO Huaiqing, SHI Guoxin, DU Kaihe, et al. Toxic effect of cadmium on *Hydrocharis dubia* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, 21 (6): 1237-1240. (in Chinese))
- [4] 郝怀庆,施国新. Zn²⁺对水螿的毒性作用 [J]. *应用与环境生物学报*, 2001, 7 (6): 526-531. (HAO Huaiqing, SHI Guoxin. Toxic effect of zinc on *hydrocharis dubia* [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7 (6): 526-531. (in Chinese))
- [5] 丁春霞,施国新,徐勤松,等. 水螿叶片对不同浓度 Pb²⁺胁迫的生理和结构响应 [J]. *广西植物*, 2009, 29 (6): 768-773. (DING Chunxia, SHI Guoxin, XU Qinsong, et al. Physiological and structural responses of *hydrocharis dubia* leaves to different [J]. *Guihaia*, 2009, 29 (6): 768-773. (in Chinese))
- [6] 杨顶田,施国新,尤文鹏,等. Cr⁶⁺污染对水螿的叶绿素含量和几种酶活性的影响 [J]. *南京师范大学学报:自然科学版*, 1999, 22 (2): 92-96. (YANG Dingtian, SHI Guoxin, YOU Wenpeng, et al. The study of Cr⁶⁺ pollution affecting chlorophyll and activity of enzymes in *hydrocharis dubia* (B. 1) backer [J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science*, 1999, 22 (2): 92-96. (in Chinese))
- [7] 谭彩云,林玉满,陈祖亮. 凤眼莲净化水中重金属的研究 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2009, 4 (1): 47-52. (TAN Caiyun, LIN Yuman, CHEN Zuliang. The use of *eichhornia crassipes* for the removal of heavy metals from aqueous solutions [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2009, 4 (1): 47-52. (in Chinese))
- [8] 张冬冬,肖长来,梁秀娟,等. 植物修复技术在水环境污染控制中的应用 [J]. *水资源保护*, 2010, 26 (1): 63-65. (ZHANG Dongdong, XIAO Changlai, LIANG Xiujian, et al. Application of phytoremediation in water environmental pollution control [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26 (1): 63-65. (in Chinese))
- [9] HUSSNER A. Growth and photosynthesis of four invasive aquatic plant species in Europe [J]. *European Weed Research Society Weed Research*, 2009, 49: 506-515.
- [10] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学试验指导 [M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2003: 67-70.
- [11] 高俊凤. 植物生理学试验指导 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 74-77.
- [12] 李红敬,谢素霞,李天煜. 铜对紫背浮萍的影响 [J]. *广西植物*, 2003, 23 (4): 362-366. (LI Hongjing, XIE Suxia, LI Tianyu. Effects of enriched-copper *Spirodela polyrhiza* [J]. *Guihaia*, 2003, 23 (4): 362-366. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013-03-01 编辑: 彭桃英)
- (上接第 19 页)
- [11] 杨靖,叶淑君,吴吉春. 生物膜对饱和多孔介质渗透性影响的实验和模型研究 [J]. *环境科学*, 2011, 32 (5): 1365-1371. (YANG Jing, YE Shujun, WU Jichun. Study on the influence of bioclogging on permeability of saturated porous media by experiments and models [J]. *Environmental Science*, 2011, 32 (5): 1356-1371. (in Chinese))
- [12] 郑西来,钱会,杨喜成. 地下水含水介质的弥散度测定 [J]. *西安工程学院学报*, 1998, 20 (4): 33-36. (ZHENG Xilai, QIAN Hui, YANG Xicheng. Measurement on the dispersivity of porous medium in groundwater [J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 1998, 20 (4): 33-36. (in Chinese))
- [13] 余国忠,高长海,贾昌虎,等. 一种异养生物膜密度分布的分形特征 [J]. *信阳师范学院学报:自然科学版*, 2008, 21 (1): 61-72. (YU Guozhong, GAO Changhai, JIA Changhu, et al. Fractal characteristics of the density distribution in heterogeneous biofilms [J]. *Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition*, 2008, 21 (1): 61-72. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013-01-24 编辑: 高渭文)