

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

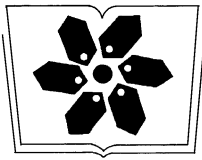
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第1期 Vol.32 No.1 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 1 期

2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

局域种群的 Allee 效应和集合种群的同步性	刘志广, 赵 雪, 张丰盘, 等 (1)
叶片毛尖对齿肋赤藓结皮凝结水形成及蒸发的影响	陶 冶, 张元明 (7)
长江口锋面附近咸淡水混合对浮游植物生长影响的现场培养	王 奎, 陈建芳, 李宏亮, 等 (17)
河流流量对流域下垫面特性的响应	田 迪, 李叙勇, Donald E. Weller (27)
中国中东部平原亚热带湿润区湖泊营养物生态分区	柯新利, 刘 曼, 邓祥征 (38)
基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略	聂泽宇, 梁新强, 邢 波, 等 (48)
滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律探讨	盛 虎, 郭怀成, 刘 慧, 等 (56)
采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响	杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等 (64)
松嫩草原榆树疏林对不同干扰的响应	刘 利, 王 赫, 林长存, 等 (74)
天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应	周德成, 罗格平, 韩其飞, 等 (81)
草原化荒漠草本植物对人工施加磷素的响应	苏洁琼, 李新荣, 冯 丽, 等 (93)
自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异	张华兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等 (101)
晋、陕、宁、蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应	周 伶, 上官铁梁, 郭东罡, 等 (111)
华南地区 6 种阔叶幼苗叶片形态特征的季节变化	薛 立, 张 柔, 奚如春, 等 (123)
河西走廊不同红砂天然群体种子活性相关性	苏世平, 李 毅, 种培芳 (135)
江西中南部红壤丘陵区主要造林树种碳固定估算	吴 丹, 邵全琴, 李 佳, 等 (142)
酸雨和采食模拟胁迫下克隆整合对空心莲子草生长的影响	郭 伟, 李钧敏, 胡正华 (151)
棉铃虫在 4 个辣椒品种上的寄主适合度	贾月丽, 程晓东, 蔡永萍, 等 (159)
烟草叶面积指数的高光谱估算模型	张正杨, 马新明, 贾方方, 等 (168)
不同作物田烟粉虱发生的时空动态	崔洪莹, 戈 峰 (176)
长期施肥对稻田土壤固碳功能菌群落结构和数量的影响	袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等 (183)
新银合欢篱对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用	郭 甜, 何丙辉, 蒋先军, 等 (190)
一株产漆酶土壤真菌 F-5 的分离及土壤修复潜力	茆 婷, 潘 澄, 徐婷婷, 等 (198)
木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局	刘 璐, 宋同清, 彭晚霞, 等 (207)
岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系	徐 琨, 李芳兰, 苟水燕, 等 (215)
黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征	程积民, 程 杰, 杨晓梅, 等 (226)
棉铃发育期棉花源库活性对棉铃对位叶氮浓度的响应	高相彬, 王友华, 陈兵林, 等 (238)
耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响	李 辉, 张军科, 江长胜, 等 (247)
外源钙对黑藻抗镉胁迫能力的影响	闵海丽, 蔡三娟, 徐勤松, 等 (256)
强筋与弱筋小麦籽粒蛋白质组分与加工品质对灌浆期弱光的响应	李文阳, 闫素辉, 王振林 (265)
专论与综述	
蛋白质组学研究揭示的植物根盐胁迫响应机制	赵 琪, 戴绍军 (274)
流域生态风险评估研究进展	许 妍, 高俊峰, 赵家虎, 等 (284)
土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展	汪 青 (293)
研究简报	
青藏高原紫穗槐主要形态特征变异分析	梁坤伦, 姜文清, 周志宇, 等 (311)
菊属与蒿属植物苗期抗蚜虫性鉴定	孙 娅, 管志勇, 陈素梅, 等 (319)
滨海泥质盐碱地衬膜造林技术	景 峰, 朱金兆, 张学培, 等 (326)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 332 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-01



封面图说: 白鹭展翅为梳妆, 玉树临风巧打扮——这是大白鹭繁殖期时的美丽体态。大白鹭体羽全白, 身长 94—104cm, 寿命 20 多年。是白鹭中体型最大的。繁殖期的大白鹭常常在湿地附近的大树上筑巢, 翩翩飞舞吸引异性, 其繁殖期背部披有蓑羽, 脸颊皮肤从黄色变成兰绿色, 嘴由黄色变成绿黑色。大白鹭是一个全世界都有它踪迹的广布种, 一般单独或成小群, 在湿地觅食, 以小鱼、虾、软体动物、甲壳动物、水生昆虫为主, 也食蛙、蝌蚪等。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201011181641

闵海丽, 蔡三娟, 徐勤松, 施国新. 外源钙对黑藻抗镉胁迫能力的影响. 生态学报, 2012, 32(1): 0256-0264.

Min H L, Cai S J, Xu Q S, Shi G X. Effects of exogenous calcium on resistance of *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle to cadmium stress. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 0256-0264.

外源钙对黑藻抗镉胁迫能力的影响

闵海丽, 蔡三娟, 徐勤松*, 施国新

(南京师范大学生命科学学院, 江苏省生物多样性与生物技术重点实验室, 南京 210046)

摘要:以分布广泛的沉水植物——黑藻为实验材料, 对比研究了 Cd 胁迫和施加适宜浓度的外源 Ca 后, 黑藻体内 Cd 积累、矿质营养、光合色素、可溶性蛋白、渗透调节物质、抗氧化能力以及非蛋白巯基 (NP-SH) 和植物络合素 (PCs) 的变化, 以探讨 Ca 缓解水生植物 Cd 毒害的生理生化机制。结果表明: (1) Cd 胁迫使黑藻体内 Cd 含量极显著增加, 并造成明显的矿质营养失衡, 主要表现为显著降低了 P、K、Fe、Cu、Mn 的含量, 而外源 Ca 则削弱了黑藻对 Cd 的蓄积, 并在一定程度上减轻了 Cd 胁迫所造成的矿质元素失衡; (2) Cd 处理使黑藻体内叶绿素含量、叶绿素 a/b 值和可溶性蛋白含量大幅度下降并显著降低了黑藻的总抗氧化能力 (T-AOC) 和小分子保护物质 [谷胱甘肽 (GSH)、抗坏血酸 (AsA)] 的含量, 而外源 Ca 延缓了黑藻的失绿症状, 促进了可溶性蛋白的合成并提高了黑藻的抗氧化能力; (3) Cd 胁迫使黑藻体内脯氨酸积累显著, 而外施 Ca 减缓了其积累, 可溶性糖变化趋势与之相反; (4) Cd 胁迫诱导了 NP-SH 和 PCs 在黑藻体内的大量累积, 外源 Ca 处理后, 其增加幅度减小。以上结果说明外源 Ca 能通过抑制 Cd 的吸收, 促进光合色素、可溶性蛋白和可溶性糖的合成, 维持高的总抗氧化能力和抗氧化物质含量以及矿质营养平衡等途径来增强黑藻对 Cd 胁迫的抗性。

关键词: 黑藻; Cd; Ca; 缓解; 生理

Effects of exogenous calcium on resistance of *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle to cadmium stress

MIN Haili, CAI Sanjuan, XU Qinsong*, SHI Guoxin

Jiangsu Key Laboratory of Biodiversity and Biotechnology, College of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

Abstract: Heavy metal contamination is an ever-increasing worldwide issue due to its toxic effects on plant metabolism and public health. Cadmium (Cd), an environmental stressor considering its toxicity, persistence and accumulation in biota, is widespread in the aquatic environment. As an essential macroelement, calcium (Ca) plays a crucial role in regulating the growth and development in plants, and also has been shown to alleviate heavy metal toxicity in many plants. *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle, a common submerged macrophyte as a potential accumulator of heavy metals, distributes universally and grows at a rapid rate. In the present study, it was chosen as the experimental material to investigate whether application of exogenous Ca enhanced the resistance of *H. verticillata* to cadmium stress. To address this issue, the effects of exogenous Ca application (20 mmol/L Ca) on the Cd accumulation, mineral nutrition, photosynthetic pigments, soluble protein, osmolytes (proline and soluble sugar), antioxidant capacity, non-protein thiols (NP-SH) and phytochelators (PCs) of *H. verticillata* under 0.01 mmol/L Cd stress were analyzed. The results demonstrated that, (1) Cd stress induced a substantial accumulation of Cd and resulted in serious imbalance of nutrient elements, such as inhibiting the absorption of P, K, Fe, Cu and Mn significantly, whereas exogenous addition of Ca significantly reduced the accumulation of Cd by

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30800055)

收稿日期: 2010-11-18; 修订日期: 2011-06-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuqinsong@njnu.edu.cn.

50.24% and effectively reversed the Cd-induced imbalance of nutrient elements in *H. verticillata*. (2) Cd treatment severely reduced chlorophyll concentration, chlorophyll a/b ratio and soluble protein content, as well as the levels of total antioxidant capacity (T-AOC) and micromolecule antioxidants such as reduced glutathione (GSH) and ascorbic acid (AsA). Exogenous application of Ca markedly retarded the degradation of photosynthetic pigments and promoted the synthesis of soluble protein in Cd-treated *H. verticillata*. It also significantly increased the levels of antioxidant capacity of the tested plants. (3) In comparison with the control, Cd treatment induced a massive accumulation of proline significantly in *H. verticillata*, which was 108.29% higher than that of control. When applied with exogenous Ca, the content of proline displayed 29.39% decline compared with 0.01 mmol/L Cd treatment. However, the effect of Cd on soluble sugar was contrary to that on proline in *H. verticillata*, which showed a significant reduction under Cd stress. Exogenous Ca alleviated the decline in soluble sugar level efficiently. (4) Cd exposure dramatically induced the production of NP-SH and PCs in *H. verticillata* compared with the control. By contrast, the addition of Ca drastically decreased the levels of NP-SH and PCs by 12.52% and 26.01% compared to the treatment with 0.01 mmol/L Cd, respectively. In conclusion, our results have shown that the supplement of exogenous Ca in an optimal concentration effectively relieved the phytotoxicity of Cd to *H. verticillata* by decreasing the excessive accumulation of Cd, retarding the degradation of photosynthetic pigments, promoting the synthesis of soluble protein and soluble sugar, keeping high levels of T-AOC/antioxidants and maintaining the balance of nutrient elements, etc.

Key Words: *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle; Cd; Ca; alleviation; physiology

镉(Cd)是一种毒性较大的重金属元素,它对植物的毒害表现在生理、生化、细胞和分子等水平,如失绿,生长抑制,光合作用、能量转化和蛋白合成紊乱,营养失衡和超微结构损伤等^[1-6]。近年来,国内外对如何解除或缓解重金属胁迫越来越重视。作为一种必需的大量营养元素,钙(Ca)是植物生长发育的重要调节因子,能够维持细胞壁、细胞膜及膜结合蛋白的稳定性,还可作为第二信使调节植物的多种代谢过程^[7]。研究表明,Ca能在一定程度上减轻盐害^[8]、水分^[9]、低温^[10]以及高温^[11]等逆境胁迫对植物的伤害。一定浓度的外源Ca对重金属胁迫条件下藻类和陆生植物等的生长发育、生理代谢、抗氧化系统、超微结构等也都有明显的改善作用,从而增强其对重金属毒害环境的适应性^[12-20],但研究尚不充分,更未见外源Ca缓解水生植物重金属胁迫的报道。

黑藻[*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle]是一种分布广泛的沉水植物,研究表明,它对重金属Cd、Hg、Cu、Zn、As、Ni等有一定的积累作用,其光合作用、呼吸作用、矿质营养、保护系统、细胞形态结构等也都发生明显的改变^[3-5, 21-26]。在前期研究^[3-5]的基础上,继续以黑藻为实验材料,以Cd为胁迫因子,通过分析黑藻体内重金属积累、矿质营养、光合色素、渗透调节物质(脯氨酸和可溶性糖)、蛋白质和植物络合素(PCs)以及总抗氧化能力(T-AOC)的变化,以期更全面揭示Ca提高水生植物重金属毒害耐受性的生理生化机制,为抗性生理研究提供新的素材。

1 材料与方法

1.1 植物材料

黑藻属水鳖科沉水草本植物,茎伸长,分枝少,叶4—8枚轮生,叶片带状披针形,生长于池塘、湖泊、水沟中,我国南北各省均有分布,是世界广布种^[3]。材料采自江苏省南京市琵琶湖,后将其移植于南京师范大学水生植物培育池中培育。2010年9月(20—25℃),选取生长旺盛、长势和大小一致(长度为10 cm左右)的植株作为实验材料。

1.2 实验处理

将实验材料先在实验室无底泥的玻璃缸中用1/10 Hoagland营养液驯化培养3 d后,于8:00将植株分成3组进行处理1(对照组):用1/10 Hoagland营养液培养;2(Cd处理组):用含0.01 mmol/L CdCl₂(此浓度为

Cd 对黑藻的半效应浓度^[3-4]) 的 1/10 Hoagland 营养液培养;3 (Cd+Ca 处理组): 在含有 0.01 mmol/L CdCl₂ 的 1/10 Hoagland 营养液中加入 20 mmol/L Ca(NO₃)₂ (根据预实验结果选择)。全部培养缸置于 Forma 3744 型 (英国产) 全封闭的培养箱中培养, 光暗温度为 25 °C 和 18 °C, 光周期为 12 h : 12 h (L : D), 光照强度为 70 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验设 3 次重复, 培养 5 d 后, 取材, 用蒸馏水洗净, 吸干, 测定金属元素和生理生化指标。

1.3 实验方法

Cd 和营养元素含量测定: 黑藻植株先用自来水和双蒸水充分清洗, 再用 5 mmol/L 的 EDTA 4 °C 清洗 30 min, 擦干后称取 0.6 g, 加入 5 mL 硝酸和 0.5 mL 高氯酸, 控制温度在 160 °C 左右加热。待硝化完全后, 再加入 0.7 mL 盐酸, 使样品溶解, 定容到 10 mL, 用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES) (美国 Leeman 公司) 测定。

叶绿素和类胡萝卜素含量测定: 称取 0.4 g 叶片, 用 80% 的丙酮冰浴研磨, 离心, 用分光光度计 (Thermo GEN ESYS 10) 记录 470, 647 nm 和 663 nm 吸收值, 按 Lichtenthaler^[27] 的公式计算。

可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝 G-250 法^[28]测定, 以牛血清白蛋白 (BSA) 为标准蛋白。

脯氨酸用磺基水杨酸提取, 酸性茚三酮比色法^[29]测定; 可溶性糖含量用蒽酮比色法^[30]测定。

总抗氧化能力 (T-AOC) 用从南京建成生物工程研究所购买的试剂盒测定, 单位为 U/g 鲜重。

谷胱甘肽 (GSH) 和抗坏血酸 (AsA) 含量测定: 取 0.5 g 黑藻植株, 加 5 mL 5% TCA 冰浴研磨, 10 000 g 4 °C 离心 20 min, 取上清液, 分别用 DTNB 显色法和二联吡啶法测定在 412 nm 和 525 nm 波长下的光吸收值, 根据标准曲线计算 GSH 和 AsA 含量^[31]。

非蛋白巯基 (NP-SH) 和植物络合素 (PCs) 含量测定: 取 0.5 g 黑藻植株, 加入 3 mL 5% 磺基水杨酸冰浴研磨, 10 000 g 4 °C 离心 15 min, 取上清液, 用 Nouairi 等的方法^[32]测定。

1.4 统计分析

实验数据用 Excel 2003 和 SPSS Statistics 分析处理和制图, 实验结果用 3 次重复实验的平均值 $\pm$ 标准差表示。各指标不同处理间进行单因素方差分析, 字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻 Cd 含量的影响

由图 1 可以看出, 外源 Ca 处理显著降低了黑藻对 Cd 的吸收。0.01 mmol/L Cd 处理 5 d 后, 黑藻体内的 Cd 含量达到了 137.00 $\mu\text{g/g}$ 鲜重, 而加入 20 mmol/L Ca 后, 黑藻体内 Cd 含量降至 68.17 $\mu\text{g/g}$ 鲜重, 比单一 Cd 处理降低了 50.24% ($P < 0.01$)。

2.2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻营养元素吸收的影响

外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻各营养元素吸收的影响不同 (表 1)。可以分为 3 类: (1) 单一 Cd 胁迫下黑藻体内 Ca 含量仅比对照增加了 0.84%, 而外源 Ca 处理使 Ca 含量比正常水平提高了 57.98% ($P < 0.01$)。 (2) 与对照相比, Cd 胁迫降低了黑藻对 Fe、Cu、Mn、Na、Zn、B 的吸收, 分别为对照值的 80.85% ($P < 0.05$)、81.34% ($P < 0.05$)、29.96% ($P < 0.01$)、80.88%、74.32%、66.71%。外源 Ca 处理后, 上述各元素含量分别达到正

常值的 88.89%、97.60%、40.56%、94.46%、91.73%、97.17%。统计分析表明, 外源 Ca 对 Cd 胁迫下 Cu 含量的影响较大, 差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。 (3) 单一 Cd 处理使黑藻体内 P、K 含量显著降为对照值的 87.88% ($P < 0.05$)、88.94% ($P < 0.05$), 而外源 Ca 使它们的含量分别达到对照水平的 1.28 倍和 1.14 倍。统

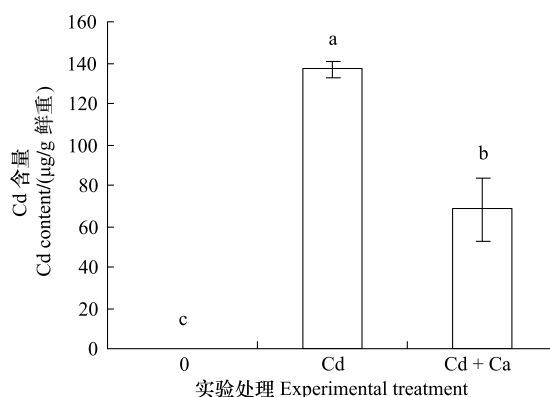


图 1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effect of exogenous Ca on Cd content in *H. verticillata* under Cd stress

字母不同表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 0: 对照; Cd: Cd 处理组; Cd+Ca: Cd+Ca 处理组

计分析表明,Cd 处理组与 Cd+Ca 处理组之间 P、K 含量差异均达到显著水平($P<0.05$)。

表 1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻营养元素吸收的影响

Table 1 Effects of exogenous Ca on nutrient element contents in *H. verticillata* under Cd stress (mean±SD)

营养元素 Nutrients/($\mu\text{g/g}$ 鲜重)	实验处理 Experimental treatment		
	对照 Control	Cd 处理组 Cd treatment	Cd+Ca 处理组 Cd+Ca treatment
Ca	992.33±2.89 b	1000.67±55.34 b	1567.67±174.03 a
P	1158.00±72.64 a	1017.67±56.32 b	1301.50±74.25 a
K	5123.67±314.36 a	4557.00±71.02 b	5191.00±206.48 a
Fe	33.60±2.43 a	27.17±2.71 b	29.87±1.94 ab
Cu	4.02±0.23 a	3.27±0.12 b	3.92±0.48 a
Mn	2.75±0.49 a	0.83±0.05 b	1.12±0.12 b
Na	373.00±61.44 a	301.67±47.51 a	352.33±72.50 a
Zn	8.39±1.52 a	6.23±0.86 a	7.69±0.98 a
B	1.30±0.11 a	0.87±0.41 a	1.26±0.43 a

2.3 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻光合色素含量和叶绿素 a/b 值的影响

植物光合色素水平以及叶绿素 a/b 值的大小可以直接反映光合作用能力的强弱。如表 2 所示:Cd 胁迫使叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和叶绿素 a/b 值分别为对照的 36.53% ($P<0.01$)、52.90% ($P<0.05$)、77.64%、66.63% ($P<0.05$),而添加外源 Ca 后,它们分别达到了正常水平的 60.71%、71.48%、79.89%、83.60%。统计分析表明,叶绿素 a 水平在 2 种不同处理条件下差异极显著($P<0.01$)。由此可以看出外源 Ca 在一定程度上缓解了 Cd 胁迫所造成的光合色素的降解。

表 2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻光合色素含量和叶绿素 a/b 值的影响

Table 2 Effects of exogenous Ca on photosynthetic pigment contents and chlorophyll a/b ratio in *H. verticillata* under Cd stress (mean±SD)

实验处理 Experimental treatment	叶绿素 a/(mg/g 鲜重) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg/g 鲜重) Chlorophyll b	类胡萝卜素/(mg/g 鲜重) Carotenoid	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
对照 Control	0.505±0.017 a	0.210±0.042 a	0.149±0.036 a	2.48±0.58 a
Cd 处理组 Cd treatment	0.184±0.043 c	0.111±0.019 b	0.116±0.021 a	1.66±0.18 b
Cd+Ca 处理组 Cd+Ca treatment	0.307±0.036 b	0.150±0.028 ab	0.119±0.026 a	2.08±0.33 ab

2.4 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻可溶性蛋白含量的影响

可溶性蛋白降解是植物重金属胁迫的最明显的特征之一。由图 2 可见,Cd 胁迫降低了黑藻可溶性蛋白的含量,仅为正常水平的 74.40% ($P<0.01$),而外源 Ca 处理显著缓解了这种下降趋势,使其含量达到对照值的 90.77%。统计分析表明,加 Ca 与单一 Cd 处理之间可溶性蛋白含量的差异达到显著水平($P<0.05$)。

2.5 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻脯氨酸和可溶性糖含量的影响

脯氨酸和可溶性糖是植物体内两种重要的渗透调节物质。如图 3 所示,0.01 mmol/L Cd 胁迫极显著地增加了黑藻体内脯氨酸的含量,使其达到对照水平的 2.08 倍($P<0.01$),而外源 Ca 处理后,脯氨酸含量仅为对照的 1.47 倍,说明外源 Ca 在一定程度上缓解了 Cd

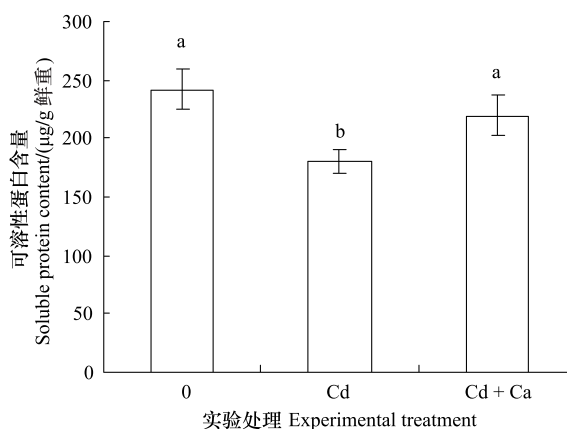


图 2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻可溶性蛋白含量的影响

Fig. 2 Effect of exogenous Ca on soluble protein content in *H. verticillata* under Cd stress

胁迫的强度,使脯氨酸的积累有所下降。统计分析表明,Cd 与 Cd+Ca 2 种处理条件下脯氨酸含量差异极显著

($P < 0.01$)。

由图4可以看出,0.01 mmol/L Cd胁迫使黑藻体内可溶性糖的含量仅为对照的43.43% ($P < 0.01$),施加20 mmol/L Ca则使其达到正常水平的54.28%,这说明外施Ca促进了可溶性糖的合成。统计分析表明,Cd处理与Cd+Ca处理之间可溶性糖含量的差异达到显著水平($P < 0.05$)。

2.6 外源Ca对Cd胁迫下黑藻T-AOC的影响

如图5所示,Cd胁迫显著降低了黑藻的T-AOC,为对照水平的73.46% ($P < 0.05$),而施加20 mmol/L Ca则使其达到正常值的97.69%。统计分析表明,施加外源Ca和单一Cd处理之间T-AOC差异显著($P < 0.05$)。

2.7 外源Ca对Cd胁迫下黑藻GSH和AsA含量的影响

GSH和AsA是植物体内两种重要的小分子抗氧化物质。由图6可以看出,0.01 mmol/L Cd处理5 d后,黑藻体内GSH和AsA含量分别为对照的51.61% ($P < 0.01$)和73.94% ($P < 0.01$),而施加20 mmol/L Ca后,GSH和AsA含量升高,分别达到正常水平的72.14%和91.86%。统计分析表明,Cd与Cd+Ca两种处理条件下GSH和AsA含量差异均达到极显著水平($P < 0.01$)。

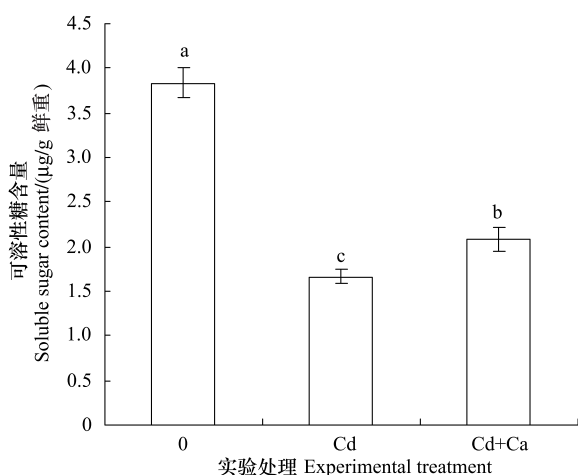


图4 外源Ca对Cd胁迫下黑藻可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effect of exogenous Ca on soluble sugar content in *H. verticillata* under Cd stress

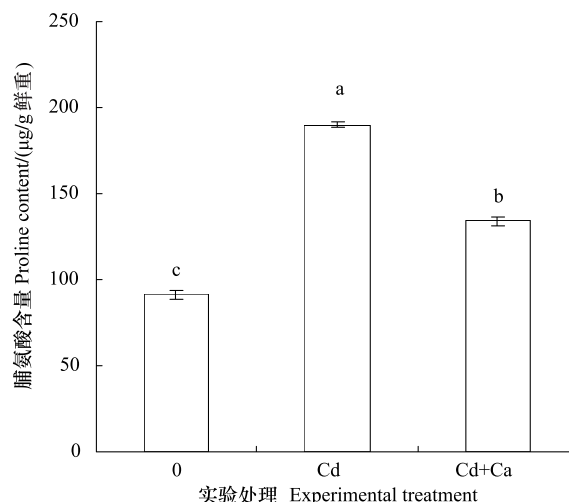


图3 外源Ca对Cd胁迫下黑藻脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effect of exogenous Ca on proline content in *H. verticillata* under Cd stress

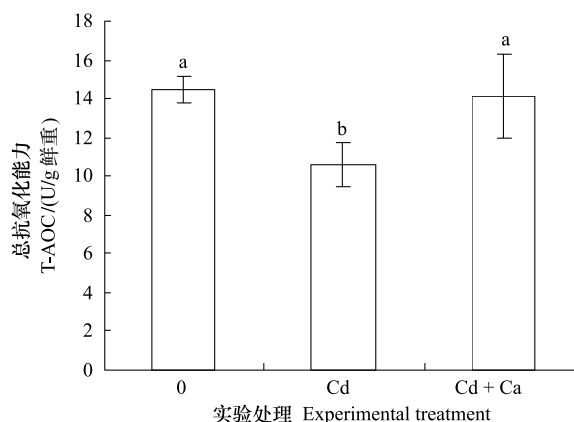


图5 外源Ca对Cd胁迫下黑藻T-AOC的影响

Fig. 5 Effect of exogenous Ca on T-AOC in *H. verticillata* under Cd stress

2.8 外源Ca对Cd胁迫下黑藻NP-SH和PCs含量的影响

由图7可以看出,0.01 mmol/L Cd处理黑藻5 d后,NP-SH和PCs含量均显著高于对照水平,分别为对照的1.18倍 ($P < 0.05$)和1.77倍 ($P < 0.01$),而外施20 mmol/L Ca使NP-SH和PCs含量分别为对照的1.03倍和1.31倍,统计分析表明,PCs含量在2种处理条件下差异达到极显著水平($P < 0.01$)。

3 讨论

Cd对水生植物的毒害是多种反应的综合表现^[1-6, 21, 33]。本实验研究结果表明,0.01 mmol/L Cd处理5 d后,黑藻也呈现出多种毒害症状,如失绿、叶绿素和蛋白质合成下降、氧化胁迫、矿质营养失衡等。而外源Ca

则能在一定程度上缓解这些毒害症状,从而增强黑藻对 Cd 胁迫的耐受性。

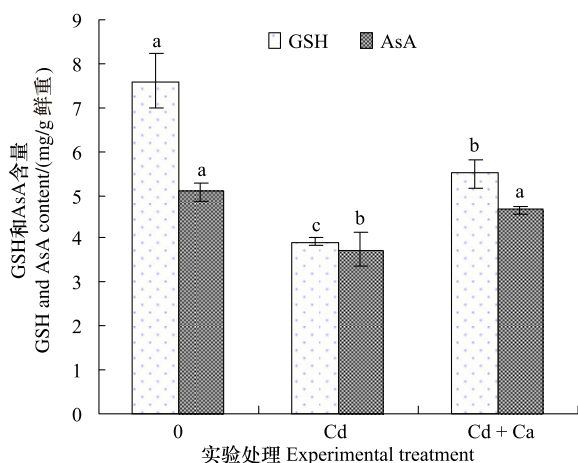


图6 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻 GSH 和 AsA 含量的影响

Fig. 6 Effects of exogenous Ca on GSH and AsA content in *H. verticillata* under Cd stress

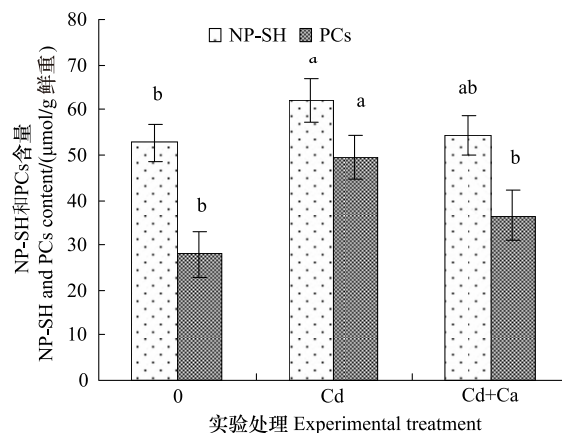


图7 外源 Ca 对 Cd 胁迫下黑藻 NP-SH 和 PCs 含量的影响

Fig. 7 Effects of exogenous Ca on NP-SH and PCs content in *H. verticillata* under Cd stress

作为植物正常生长的非必需元素,黑藻对 Cd 的吸收主要是被动运输,但也不能排除主动吸收^[34]。本实验中,Cd 对其它营养元素的吸收产生明显的抑制作用(表2),原因可以归结为:(1)Cd 毒害对黑藻叶绿体和线粒体的超微结构造成了明显的损伤^[3],削弱了黑藻的生理代谢,从而导致不能满足细胞对它们(如 P 和 K)主动吸收所需要的能量;(2)Cd 和营养元素之间的离子半径相似,如 Cd^{2+} (1.03 Å)、 Zn^{2+} (0.83 Å)、 Na^{+} (1.02 Å),Cd 和这些离子竞争跨膜运输载体和离子通道^[34];(3)膜上 ATPase 和膜蛋白 SH 对 Cd 毒害极度敏感,如导致 K^{+} 含量的下降^[35]。此外,由于 Cd 严重削弱了黑藻的保护能力(图5和图6)并产生明显膜脂过氧化作用,因此 Cd 处理使质膜结构的完整性遭到破坏,扰乱了黑藻对营养元素的吸收。有研究表明, Cd^{2+} 和 Ca^{2+} 可以通过共同的通道进入细胞,两者在吸收和运输时存在竞争^[19]。本实验中,施加适宜浓度的外源 Ca 后,由于 Cd 和 Ca 的拮抗作用以及溶液中 Ca 离子强度的增加,使黑藻对 Cd 的吸收大幅下降和毒性减弱,同时,黑藻的保护系统水平也明显增强(图5和图6),对各营养元素的吸收也更接近于正常水平。

通常认为,植物细胞膜是重金属毒害作用的主要位点,且可归因于膜脂过氧化作用^[33]。本实验中,0.01 mmol/L Cd 处理 5 d 后,黑藻对 Cd 的吸收显著增加(图1),黑藻植株总抗氧化能力(图5)和小分子保护物质(GSH 和 AsA)(图6)水平都显著下降,这意味着增加了黑藻遭受氧化胁迫的风险,同时叶绿素(表2)和蛋白质含量(图2)的下降也说明此浓度 Cd 已对黑藻造成明显的氧化损伤^[33]。而外源 Ca 处理后,黑藻对 Cd 的吸收显著降低,同时提高了植物体内的小分子保护物质含量(图6)和总抗氧化水平(图5),从而增强了对膜的保护作用,这与对油菜^[17]和白车轴草^[18]等的研究结果一致。叶绿素和蛋白质含量的回升也说明膜脂过氧化程度在减弱。

大量资料表明,脯氨酸作为渗透调节物质,各种逆境因子都能诱导其在植物体内的积累^[36],包括重金属胁迫^[37]。研究表明,除了清除活性氧外,它在维持细胞渗透平衡、NADH/NAD⁺比例、细胞 pH 值以及保护酶活性等方面也起重要作用^[37]。本研究中,作为对 Cd 胁迫的响应,黑藻体内的脯氨酸也大量累积(图3)。而外源 Ca 处理后,脯氨酸含量上升的幅度有所减弱,这也从另一个角度说明外源 Ca 在一定程度上减轻了 Cd 对黑藻的胁迫强度。作为另外一种重要的渗透调节物质,黑藻体内可溶性糖含量在 Cd 胁迫条件下大幅下降(图4),研究认为这是 Cd 胁迫使光合色素降解、光合器官结构受损以及光合作用系统受到破坏,从而使光合产物减少造成的^[38],已往的研究结果也为之提供了生理学和细胞学依据^[3, 5]。而施加适宜浓度的外源 Ca 后黑藻体内可溶性糖含量显著增加。El-Naggar 等也发现,施加外源 Ca 缓解了 Cd 处理造成的小球藻可溶性糖

含量的降低^[12]。可溶性糖在黑藻体内的累积能提高细胞的渗透调节能力,保持细胞结构和功能的完整性,从而提高黑藻对重金属 Cd 逆境的适应能力。

为了清除活性氧,植物在长期的适应过程中形成了一套防御体系,包括酶促抗氧化系统和非酶促抗氧化系统(GSH, NP-SH 和 PCs 等)^[32]。本实验中,黑藻体内 NP-SH 含量在 Cd 胁迫下显著增加(图 7), Nouairi 等认为这是由于 Cd 胁迫促进了硫酸盐还原途径中的 APS 还原酶和丝氨酸乙酰转移酶的活性^[32],这也与 Mishra 等的结果相符^[39]。此外,单一 Cd 处理使 GSH 含量降低(图 6),这是因为 GSH 作为 PCs 生物合成的前体参与了 PCs 的合成^[40]。PCs 是植物体内由重金属诱导的能络合重金属的富含 Cys 的多肽^[40], PCs 通过其巯基与重金属离子络合形成无毒的化合物,减少细胞内游离的重金属离子的浓度,从而减轻重金属的毒害作用^[32]。很多研究认为诱导 PCs 合成是高等植物对重金属胁迫的一种响应机制^[24, 32, 40-41],本实验结果也证明 Cd 胁迫能诱导 PCs 在黑藻体内的大量累积(图 7),这与 Tripathi 等的研究结果一致^[41],这是由于 Cd 胁迫诱导植物络合素合酶(PCS)基因的活化^[42]和促进 PCS 基因(*LsPCS1*)的表达^[16]。施加 20 mmol/L Ca 后,黑藻体内的 NP-SH 和 PCs 含量都低于单一 Cd 处理,这与适宜浓度的 Ca 削弱黑藻对 Cd 的蓄积和毒害作用有关。由此可见, Cd 对 PCs 的诱导能力和 Cd 对黑藻的毒性变化之间有一定的相关性,建议将 PCs 作为 Cd 胁迫的生物标记物,值得进一步研究。

综上所述,外施适宜浓度的 Ca 可以缓解 Cd 对黑藻的毒害作用,其可能机理为:(1) Ca 通过竞争细胞膜上 Cd 吸收位点,减少黑藻对 Cd 的吸收。(2) Ca 通过稳定膜结构,维持细胞内外的离子平衡。(3) Ca 不仅作为一种植物必需的大量营养元素,更重要的是作为胞内的第二信使,启动了一系列的生理生化过程,激活了植物体内的多种抗性机制,包括促进黑藻体内光合色素、可溶性蛋白和可溶性糖的合成以及维持高水平的抗氧化能力等。

References:

- [1] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1): 29-36.
- [2] Wahid A, Arshad M, Farooq M. Cadmium phytotoxicity: responses, mechanisms and mitigation strategies: a review//Lichtfouse E, ed. *Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants*. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 371-403.
- [3] Xu Q S, Shi G X, Zhou Y M, Wu G R, Wang X. Distribution and toxicity of cadmium in *Hydrilla verticillata* (L. F.) Royle. *Acta Biologicae Experimentalis Sinica*, 2004, 37(6): 461-468.
- [4] Xu Q S, Shi G X, Wang X, Wu G R. Generation of active oxygen and change of antioxidant enzyme activity in *Hydrilla verticillata* under Cd, Cu and Zn stress. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 107-112.
- [5] Shi G X, Du K H, Xie K B, Ding X Y, Chang F C, Chen G X. Ultrastructural study of leaf cells damaged from Hg²⁺ and Cd²⁺ pollution in *Hydrilla verticillata*. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(4): 373-378.
- [6] Xu Q S, Ji W D, Yang H Y, Wang H X, Xu Y, Zhao J, Shi G X. Cadmium accumulation and phytotoxicity in an aquatic fern, *Salvinia natans* (Linn.). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3019-3027.
- [7] Hirschi, K D. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiology*, 2004, 136(1): 2438-2442.
- [8] Bonilla I, El-Hamdaoui A, Bolaños L. Boron and calcium increase *Pisum sativum* seed germination and seedling development under salt stress. *Plant and Soil*, 2004, 267(1/2): 97-107.
- [9] Nayyar H, Kaushal S K. Alleviation of negative effects of water stress in two contrasting wheat genotypes by calcium and abscisic acid. *Biologia Plantarum*, 2002, 45(1): 65-70.
- [10] Nayyar H, Bains TS, Kumar S. Chilling stressed chickpea seedlings: effect of cold acclimation, calcium and abscisic acid on cryoprotective solutes and oxidative damage. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 54(3): 275-285.
- [11] Larkindale J, Knight M R. Protection against heat stress-induced oxidative damage in *Arabidopsis* involves calcium, abscisic acid, ethylene, and salicylic acid. *Plant Physiology*, 2002, 128(2): 682-695.
- [12] El-Naggar A H, El-Sheekh M M. Abolishing cadmium toxicity in *Chlorella vulgaris* by ascorbic acid, calcium, glucose and reduced glutathione. *Environmental Pollution*, 1998, 101(2): 169-174.
- [13] Zaki F T, Fathi A A. Impact of copper on some physiological aspects of *Nostoc muscorum* with special references to the detoxifying role of calcium.

- Acta Botanica Hungarica, 2004, 46(3/4): 423-433.
- [14] Ouzounidou G, Moustakas M, Symeonidis L, Karataglis S. Response of wheat seedlings to Ni stress: effects of supplemental calcium. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2006, 50(3): 346-352.
- [15] Lock K, Criel P, De Schamphelaere K A C, Van Eeckhout H, Janssen C R. Influence of calcium, magnesium, sodium, potassium and pH on copper toxicity to barley (*Hordeum vulgare*). Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 68(2): 299-304.
- [16] He Z Y, Li J C, Zhang H Y, Ma M. Different effects of calcium and lanthanum on the expression of phytochelatin synthase gene and cadmium absorption in *Lactuca sativa*. Plant Science, 2005, 168(2): 309-318.
- [17] Liu L L, Feng T, Xiang Y C, Xiao L, Yan M L. Effect of exogenous calcium on seedling growth and physiological characteristics of *Brassica Juncea* under cadmium stress. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(5): 978-983.
- [18] Wang C Q, Song H. Calcium protects *Trifolium repens* L. seedlings against cadmium stress. Plant Cell Reports, 2009, 28(9): 1341-1349.
- [19] Lu L L, Tian S K, Zhang M, Zhang J, Yang X E, Jiang H. The role of Ca pathway in Cd uptake and translocation by the hyperaccumulator *Sedum alfredii*. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1/3): 22-28.
- [20] Österås A H, Greger M. Interactions between calcium and copper or cadmium in Norway spruce. Biologia Plantarum, 2006, 50(4): 647-652.
- [21] Garg P, Tripathi R D, Rai U N, Sinha S, Chandra P. Cadmium accumulation and toxicity in submerged plant *Hydrilla verticillata* (L. F.) Royle. Environmental Monitoring and Assessment, 1997, 47(2): 167-173.
- [22] Gupta M, Chandra P. Bioaccumulation and physiological changes in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle in response to mercury. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1996, 56(2): 319-326.
- [23] Srivastava S, Mishra S, Dwivedi S, Tripathi R D, Tandon P K, Gupta D K. Evaluation of zinc accumulation potential of *Hydrilla verticillata*. Biologia Plantarum, 2009, 53(4): 789-792.
- [24] Srivastava S, Mishra S, Tripathi R D, Dwivedi S, Gupta D K. Copper-induced oxidative stress and responses of antioxidants and phytochelatin in *Hydrilla verticillata* (L. F.) Royle. Aquatic Toxicology, 2006, 80(4): 405-415.
- [25] Srivastava S, Mishra S, Tripathi R D, Dwivedi S, Trivedi P K, Tandon P K. Phytochelatin and antioxidant systems respond differentially during arsenite and arsenate stress in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle. Environmental Science and Technology, 2007, 41(8): 2930-2936.
- [26] Sinha S, Pandey K. Nickel induced toxic effects and bioaccumulation in the submerged plant, *Hydrilla verticillata* (L. F.) Royle under repeated metal exposure. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, 71(6): 1175-1183.
- [27] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology, 1987, 148: 350-382.
- [28] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [29] Bates L S, Waldren R P, Teare, I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil, 1973, 39(1): 205-207.
- [30] Li H S, Sun Q, Zhao S J. Experiment Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry. Beijing: Higher Education Press, 2000: 194-197.
- [31] Chen J X, Wang X F. Experimental Guidance of Plant Physiology. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 119-127.
- [32] Nouairi I, Ben Ammar W, Ben Youssef N, Ben Miled D D, Ghorbal M H, Zarrouk M. Antioxidant defense system in leaves of Indian mustard (*Brassica juncea*) and rape (*Brassica napus*) under cadmium stress. Acta Physiological Plantarum, 2009, 31(2): 237-247.
- [33] Singh S, Eapen S, D'Souza S F. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L.. Chemosphere, 2006, 62(2): 233-246.
- [34] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, Dushenkov V, Ensley B D, Chet I, Raskin I. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Nature Biotechnology, 1995, 13(5): 468-474.
- [35] Monteiro M S, Santos C, Soares A M V M, Mann R M. Assessment of biomarkers of cadmium stress in lettuce. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(3): 811-818.
- [36] Verbruggen N, Hermans C. Proline accumulation in plants: a review. Amino Acids, 2008, 35(4): 753-759.
- [37] Mehta S K, Gaur J P. Heavy-metal-induced proline accumulation and its role in ameliorating metal toxicity in *Chlorella vulgaris*. New Phytologist, 1999, 143(2): 253-259.
- [38] Costa G, Spitz E. Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus*. Plant Science, 1997, 128(2): 131-140.
- [39] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, Govindarajan R, Kuriakose S V, Prasad M N V. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during

cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44(1): 25-37.

- [40] Cobbett C, Goldsbrough P. Phytochelatins and metallothioneins: roles in heavy metal detoxification and homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, 2002, 53(4): 159-182.
- [41] Tripathi R D, Rai U N, Gupta M, Chandra P. Induction of phytochelatins in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle under cadmium stress. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1995, 56(3): 505-512.
- [42] Heiss S, Wachter A, Bogs J, Cobbett C, Rausch T. Phytochelatin synthase (PCS) protein is induced in *Brassica juncea* leaves after prolonged Cd exposure. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(389): 1833-1839.

参考文献:

- [3] 徐勤松, 施国新, 周耀明, 吴国荣, 王学. 镉在黑藻叶细胞中的亚显微定位分布及毒害效应分析. *实验生物学报*, 2004, 37(6): 461-468.
- [4] 徐勤松, 施国新, 王学, 吴国荣. 镉、铜和锌胁迫下黑藻活性氧的产生及抗氧化酶活性的变化研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 107-112.
- [5] 施国新, 杜开和, 解凯彬, 丁小余, 常福辰, 陈国祥. 汞、镉污染对黑藻叶细胞伤害的超微结构研究. *植物学报*, 2000, 42(4): 373-378.
- [6] 徐勤松, 计汪栋, 杨海燕, 王红霞, 许晔, 赵娟, 施国新. 镉在槐叶苹叶片中的蓄积及其生态毒理学分析. *生态学报*, 2009, 29(6): 3019-3027.
- [17] 刘丽莉, 冯涛, 向言词, 肖璐, 严明理. 外源钙对镉胁迫下芥菜型油菜幼苗生长和生理特性的影响. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5): 978-983.
- [30] 李合生, 孙群, 赵世杰. *植物生理生化实验原理和技术*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 194-197.
- [31] 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: 119-127.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.1 January ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Allee effects of local populations and the synchrony of metapopulation	LIU Zhiguang, ZHAO Xue, ZHANG Fengpan, et al (1)
Effects of leaf hair points on dew deposition and rainfall evaporation rates in moss crusts dominated by <i>Syntrichia caninervis</i> , Gurbantunggut Desert, northwestern China	TAO Ye, ZHANG Yuanming (7)
The influence of freshwater-saline water mixing on phytoplankton growth in Changjiang Estuary	WANG Kui, CHEN Jianfang, LI Hongliang, et al (17)
The responses of hydrological indicators to watershed characteristics	TIAN Di, LI Xuyong, Donald E. Weller (27)
Lake nutrient ecosystems in the east-central moist subtropical plain of China	KE Xinli, LIU Man, DENG Xiangzheng (38)
The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis	NIE Zeyu, LIANG Xinqiang, XING Bo, et al (48)
Reversion and analysis on cyanobacteria bloom in Waihai of Lake Dianchi	SHENG Hu, GUO Huaicheng, LIU Hui, et al (56)
Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of <i>Larix principis-rupprechtii</i>	YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang, et al (64)
Responses of elm (<i>Ulmus pumila</i>) woodland to different disturbances in northeastern China	LIU Li, WANG He, LIN Changcun, et al (74)
Impacts of grazing and climate change on the aboveground net primary productivity of mountainous grassland ecosystems along altitudinal gradients over the Northern Tianshan Mountains, China	ZHOU Decheng, LUO Geping, HAN Qifei, et al (81)
Response of herbaceous vegetation to phosphorus fertilizer in steppe desert	SU Jieqiong, LI Xinrong, FENG Li, et al (93)
Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities	ZHANG Huabing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (101)
Response of species diversity in <i>Caragana Korshinskii</i> communities to climate factors and grazing disturbance in Shanxi, Shaanxi, Ningxia and Inner Mongolia	ZHOU Ling, SHANGGUAN Tieliang, GUO Donggang, et al (111)
Seasonal change of leaf morphological traits of six broadleaf seedlings in South China	XUE Li, ZHANG Rou, XI Ruchun, GUO Shuhong, et al (123)
Correlation analysis on <i>Reaumuria soongorica</i> seed traits of different natural populations in Gansu Corridor	SU Shiping, LI Yi, CHONG Peifang (135)
Carbon fixation estimation for the main plantation forest species in the red soil hilly region of southern-central Jiangxi Province, China	WU Dan, SHAO Quanqin, LI Jia, et al (142)
Effects of clonal integration on growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i> under simulated acid rain and herbivory	GUO Wei, LI Junmin, HU Zhenghua (151)
Difference of the fitness of <i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner) fed with different pepper varieties	JIA Yueli, CHENG Xiaodong, CAI Yongping, et al (159)
Hyperspectral estimating models of tobacco leaf area index	ZHANG Zhengyang, MA Xinming, JIA Fangfang, et al (168)
Temporal and spatial distribution of <i>Bemisia tabaci</i> on different host plants	CUI Hongying, GE Feng (176)
Abundance and composition of CO ₂ fixating bacteria in relation to long-term fertilization of paddy soils	YUAN Hongzhao, QIN Hongling, LIU Shoulong, et al (183)
Effect of <i>Leucaena leucocephala</i> on soil organic carbon conservation on slope in the purple soil area	GUO Tian, HE Binghui, JIANG Xianjun, et al (190)
Isolation and the remediation potential of a Laccase-producing Soil Fungus F-5	MAO Ting, PAN Cheng, XU Tingting, et al (198)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area	LIU Lu, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al (207)
Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River	XU Kun, LI Fanglan, GOU Shuiyan, et al (215)
Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China	CHENG Jimin, CHENG Jie, YANG Xiaomei, et al (226)
Effect of nitrogen concentration in the subtending leaves of cotton bolls on the strength of source and sink during boll development	GAO Xiangbin, WANG Youhua, CHEN Binglin, et al (238)
Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil	LI Hui, ZHANG Junke, JIANG Changsheng, et al (247)
Effects of exogenous calcium on resistance of <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle to cadmium stress	MIN Haili, CAI Sanjuan, XU Qinsong, et al (256)
Comparison of grain protein components and processing quality in responses to dim light during grain filling between strong and weak gluten wheat cultivars	LI Wenyang, YAN Suhui, WANG Zhenlin (265)
Review and Monograph	
Salt-responsive mechanisms in the plant root revealed by proteomic analyses	ZHAO Qi, DAI Shaojun (274)
The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment	XU Yan, GAO Junfeng, ZHAO Jiahu, et al (284)
A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments	WANG Qing (293)
Scientific Note	
Variation in main morphological characteristics of <i>Amorpha fruticosa</i> plants in the Qinghai-Tibet Plateau	LIANG Kunlun, JIANG Wenqing, ZHOU Zhiyu, et al (311)
Identification of aphid resistance in eleven species from <i>Dendranthema</i> and <i>Artemisia</i> at seedling stage	SUN Ya, GUAN Zhiyong, CHEN Sumei, et al (319)
Research of padded film for afforestation in coastal argillaceous saline-alkali land	JING Feng, ZHU Jinzhao, ZHANG Xuepei, et al (326)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 1 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 1 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元