

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

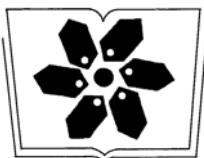
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

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34卷第5期 2014年3月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据..... 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析..... 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....
..... 陈旭飞,张池,戴军,等 (1114)

个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李勇,袁玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡婷,谷洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响..... 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响..... 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李西,王丽华,刘尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....
..... 李倩倩,赵旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周蓉,邓自发 (1224)

种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埕埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓异,蔡立哲,郭涛,等 (1244)

不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响..... 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253)

呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子..... 陆欣鑫,刘 妍,范亚文 (1264)

江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价..... 李 佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)

景观、区域和全球生态

中国自然保护综合地理区划..... 郭子良,崔国发 (1284)

近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应 缪丽娟,蒋 冲,何 斌,等 (1295)

人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302)

2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化 谈永利,王宏志,张 欢,等 (1311)

资源与产业生态

三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布..... 李 芬,吴志丰,徐 翠,等 (1318)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说：插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人 and 大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305060949

王巧玲, 邹金华, 刘东华, 岳洁瑜. 外源钙 (Ca) 对毛葱耐镉 (Cd) 胁迫能力的影响. 生态学报, 2014, 34(5): 1165-1177.

Wang Q L, Zou J H, Liu D H, Yue J Y. Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1165-1177.

外源钙 (Ca) 对毛葱耐镉 (Cd) 胁迫能力的影响

王巧玲, 邹金华, 刘东华, 岳洁瑜*

(天津市动植物抗性重点实验室, 天津师范大学, 天津 300387)

摘要: 以对环境敏感的毛葱 (*Allium cepa* var. *agrogarum* L.) 为材料, 通过水培试验分别研究不同浓度 Ca (0、0.1、1、10 mmol/L) 对 Cd (10 μ mol/L、100 μ mol/L 和 300 μ mol/L) 胁迫下毛葱幼苗生长、叶片光合特性、体内 Cd 积累和矿质营养的变化, 探讨 Ca 缓解敏感植物 Cd 毒害的生理生化机制。结果表明: (1) Cd 显著抑制了毛葱的生长并导致其根端弯曲、发黄, 叶片绿色加深; 外源 Ca 显著削弱了 Cd 的毒害, 缓解了其对毛葱生长的抑制; (2) Cd 导致毛葱叶片光合色素含量大幅度上升却显著降低了毛葱的光合作用; 外源 Ca 延缓了光合色素上升的速度, 提高了毛葱的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率; (3) Cd 胁迫导致毛葱体内 Cd 含量显著增加, 并造成明显的矿质营养失衡, 主要表现为显著降低了毛葱根中 Mg、Mn, 叶中 Ca、Mg、Mn、Zn 等元素的含量, 毛葱根中 Ca、Fe、Zn, 叶中 Fe 元素含量的显著增加, 扰乱了毛葱体内矿质营养的内稳态; 外源 Ca 削弱了毛葱对 Cd 的积累, 减轻了 Cd 胁迫所造成的矿质营养失衡。因此, 外源 Ca 能通过抑制 Cd 的吸收, 促进叶片光合作用及气体交换速率, 维持植物体的含水量、植物叶片光合色素含量及矿质营养的平衡等途径来增强毛葱对 Cd 胁迫的耐性。

关键词: 毛葱; Cd; Ca; 胁迫; 耐性

Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress

WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, YUE Jieyu*

Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Regulation, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Cadmium (Cd) pollution is one of the most extensive and harmful environmental problems worldwide. Recently, coastal water pollution by Cd and other heavy metals have been becoming more serious because of continuous economic development, including mining, urban traffic, burning of fossil fuels, and production of phosphate fertilizers. Calcium (Ca) is an essential macroelement that plays a crucial role in regulating plant growth and development. Moreover, Ca has been shown to alleviate heavy metal toxicity in many plants. *Allium cepa* is well known and commonly used in many laboratories primarily due to its many advantages, such as low cost, short test time, ease of storage and handling, large number of roots, and large cells with excellent chromosome conditions. In the present study, this plant was chosen as the experimental material to investigate whether the application of exogenous Ca can enhance the tolerance of *A. cepa* var. *agrogarum* L. to Cd stress (10, 100 μ mol/L and 300 μ mol/L). In addition, the effects of various concentrations of exogenous Ca application (0, 0.1, 1, and 10 mmol/L) on the vegetative growth, photosynthesis characteristics, Cd accumulation, and nutrient minerals of *A. cepa* var. *agrogarum* L. under various concentrations of Cd stress (10 μ mol/L to 300 μ mol/L) were analyzed. This study showed the following results: (1) Excess Cd significantly inhibited the growth of *A. cepa* var. *agrogarum* L., resulting in changes in morphological characteristics, such as stunted and bent root tips and

基金项目: 天津市高等学校科技发展计划项目 (20100606, 20110603); 天津市应用基础计划项目青年项目 (12JCQNJC09700); 天津师范大学校级基金 (52XB1105, 52XS1210)

收稿日期: 2013-05-06; **修订日期:** 2013-09-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yueshan1982@163.com

darkened green leaves, whereas exogenous Ca significantly decreased the negative effects of Cd and alleviated growth inhibition in *A. cepa* var. *agrogarum* L. (2) Cd treatment greatly increased the chlorophyll contents and significantly decreased net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate, whereas exogenous application of Ca markedly alleviated the increase in photosynthetic pigments and significantly increased the net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate. (3) Cd stress induced substantial Cd accumulation, resulting in serious nutrient imbalance, such as the significant inhibition of absorption of Mg (Magnesium) and Mn (Manganese) in roots and Ca, Mg, Mn, and Zn (Zinc) in leaves and a massive accumulation of Ca, Fe (Iron) and Zn in roots and Fe in leaves, whereas the exogenous addition of Ca significantly decreased Cd accumulation and effectively reversed the Cd-induced imbalance of nutrients in *A. cepa* var. *agrogarum* L. Therefore, supplementing exogenous Ca with an optimal concentration can effectively relieve the phytotoxicity of Cd stress to *A. cepa* var. *agrogarum* L. by decreasing excessive Cd accumulation, maintaining high levels of photosynthesis characteristics, and maintaining the balance of water content, photosynthetic pigments, and nutrient elements, among others.

Key Words: *Allium cepa* var. *agrogarum* L.; Cd; Ca; stress; tolerance

镉(Cd)是一种毒性很大的重金属元素,对植物的生长发育造成伤害,如抑制植物对水分的吸收和运输,抑制光合作用和呼吸作用;对能量转化和蛋白质合成造成紊乱;导致营养失衡和超微结构损伤等^[1-5]。植物亦通过不同的生理、生化机制对Cd胁迫作出反应。鉴于此,国内外对如何解除或缓解Cd胁迫的重视程度日益加深。钙(Ca)是植物生长发育所必需的营养元素,而且能够作为第二信使与CaM (Calmodulin)结合偶联胞外信号与胞内生理生化反应,通过稳定细胞壁、细胞膜结构^[6]及诱导特异基因的表达来提高植物对逆境的抗性^[7]。已有研究表明,外源钙可增强植物对许多非生物逆境的适应性,提高植物对重金属毒害的耐性,减轻重金属对植物所造成的伤害^[8-9]。

洋葱(*Allium cepa*)不仅是非常重要的蔬菜作物,而且对环境变化敏感,是环境监测的优选植物^[10]。毛葱(*Allium cepa* var. *agrogarum* L.)作为洋葱的一个变种(百合科葱属),除了具有洋葱易培养,根系粗壮发达,对环境因子敏感,染色体数目较少($2n=16$),形态特征明显等优点外,毛葱还具有体积小,休眠期短的独特优点^[11]。目前,有关钙调节Cd对毛葱胁迫方面的研究鲜有报道。本研究以毛葱为试验材料,探讨外源Ca对Cd胁迫下毛葱幼苗生理生化特性的影响,为缓解重金属Cd对生物的毒害找到经济、有效的方法提供基础数据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 植物材料的培养与处理

试验材料为毛葱(*Allium cepa* var. *agrogarum* L.)。选取100头大小均匀一致、饱满、色泽匀称、表皮光滑、健康无损伤、未萌发根也未长绿叶的毛葱鳞茎为实验材料。剥去外部的干燥膜质鳞叶,洗净,在室温下(25℃)用自来水培养,每隔12h换1次水。经自来水培养至刚长出叶片后,从中选取80头生长一致的毛葱,平均分成16组进行处理。在预试验中,筛选出10、100 $\mu\text{mol/L}$ 和300 $\mu\text{mol/L}$ CdCl₂为适合的Cd胁迫浓度,其中10 $\mu\text{mol/L}$ CdCl₂对毛葱幼苗的生长无明显的胁迫作用,100 $\mu\text{mol/L}$ CdCl₂既对毛葱幼苗产生胁迫作用,又不会造成严重的Cd毒害,300 $\mu\text{mol/L}$ CdCl₂可对毛葱幼苗产生严重的毒害。在3个Cd处理组中,分别加入0、0.1(低钙)、1(中钙)、10 mmol/L(高钙)的Ca,以不施Cd和Ca为对照,具体处理分组见表1。对照及实验组材料均在50% Hoagland营养液中培养,实验组中Cd和Ca是直接溶解于50% Hoagland营养液中,实验周期为12d,整个实验过程中对培养液通气,每4d更换1次培养液。

1.2 实验方法

1.2.1 形态观察及株高、根长测定

实验期内每天记录毛葱幼苗生长状况,第12天时测定毛葱幼苗的株高、根长,每处理组测量5个植株,每个植株测量5组数据。数码相机拍照。

表 1 实验组编号

Table 1 The numbered list of experimental treatment

实验组 Experimental groups		实验处理 Experimental treatment	
		Cd 处理/($\mu\text{mol/L}$) Cd treatment	Ca 处理/(mmol/L) Ca treatment
A	A1(对照)	0	0
	A2	0	0.1
	A3	0	1
	A4	0	10
B	B1	10	0
	B2	10	0.1
	B3	10	1
	B4	10	10
C	C1	100	0
	C2	100	0.1
	C3	100	1
	C4	100	10
D	D1	300	0
	D2	300	0.1
	D3	300	1
	D4	300	10

1.2.2 光合色素含量测定

样品称重后,于研钵中加入 80%丙酮 10 mL,将其充分研磨,移入锥形瓶后用封口膜封口,4℃过夜萃取至材料残渣变白,4000×g 离心 20 min,取上清液,即为色素提取液^[12]。测定提取液在波长 663, 646, 470 nm 处的光吸收值,按 Lichtenthaler^[13]公式计算。

1.2.3 光合速率及气体交换数据的测定

处理 12 d 时,对 16 组毛葱进行光合作用及气体交换指数的测定,净光合速率(P_n , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)及蒸腾速率(Tr , $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)等用 LI-340(CID Co., USA)手持式光合仪进行测定。测定每株毛葱长势最好的功能叶,每组测定 5 株,每株测量 5 个叶片。测量要迅速,测定时间控制在 10:00—12:00。

1.2.4 电感耦合等离子发射光谱(ICP-AES)制样及分析

材料处理 12 d 后收获。分别收集每个实验组毛葱的根系和叶片,共 32 个样品。每个样品分成相同质量的 5 组,称重后,将样品分别置于烘箱中烘干:45℃,4 d;80℃,2 d;105℃,过夜。烘干后的样品称重后研磨至粉末,移入干燥瓶中保存,用于消化分析。称 0.2 g 粉末于小烧杯中,加入 5 mL 浓硝酸

(Analytical Reagent, AR)浸泡过夜;加入 2 mL 高氯酸(AR)后 80℃加热 3 h,温度升至 120℃,将剩余硝酸挥发殆尽。冷却后再加入 3 mL 浓硝酸、2 mL 高氯酸(AR),缓慢加热,待烧杯中溶液呈橙黄色时,再加入 2 mL 高氯酸(AR),温度升至 200℃,至烧杯中有白色晶体析出。样品冷却后,用 10%的硝酸溶液溶解并准确定容至 25 mL,用 ICP-AES (LEEMAN LABS INC., New Hampshire, USA)测定 Cd 在毛葱各器官中的积累量,并测定根系、叶片中 Ca、Mg、Mn、Fe、Zn 的含量。每个样品重复测定 3 次。

1.3 数据统计方法

采用 Sigmaplot 8.0 软件处理除光合特性以外所有数据并作图,用 excel 2003 软件处理光合特性数据,并用 SPSS 13.0 软件进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱生长的影响

2.1.1 对毛葱形态特征的影响

不同浓度外源 Ca 对 Cd 胁迫下的毛葱处理 12 d 后,可明显缓解 Cd 胁迫造成的毒害(图 1)。Cd 对毛葱造成毒害,使其形态发生明显的变化,浓度越高其毒害作用越明显。与对照相比,Cd 处理组的毛葱生长缓慢,植株矮小,叶片绿色加深,根长受到显著抑制,颜色暗黄,变粗变脆(图 1 b, c, d)。在高浓度 Cd(100 $\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$)处理组中,与对照组叶片的黄绿色不同,其叶片呈暗绿色夹杂白色小枯斑,根端极度弯曲,发黄呈腐烂状(图 1 c, d)。

外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱形态的影响不同(图 1):A 组和 B 组毛葱并未因 Ca 的加入表现出明显的形态差异(图 1 a, b);但在 C 组和 D 组中,外源 Ca 对毛葱的毒害有显著的缓解作用,且随外源 Ca 浓度的增加,其缓解效果也越明显(图 1 c, d)。

2.1.2 对毛葱株高、根长的影响

Cd 显著抑制毛葱的株高和根长(图 2)。外源 Ca 对 A、B 组毛葱的株高和根长无明显的影响,但对 C、D 组毛葱表现出明显的缓解作用(图 2)。A、B 组中,施加外源 Ca 后毛葱的株高和根长均无显著性差异($P > 0.05$)(图 2)。C、D 组中,对毛葱株高产生明显影响的外源 Ca 浓度与对根长产生明显影响的外源 Ca 浓度不同:10 mmol/L 的外源 Ca 缓解 Cd 对毛葱株高的毒害作用,C4、D4 组毛葱的株高分别比

C1、D1 组毛葱增高了 26.5% 和 61.5% (图 2); C 组中, 1 mmol/L 的外源 Ca 显著缓解了 Cd 对毛葱根长

的抑制作用, C3 组毛葱的根长比 C1 组增加 12.1% (图 2)。

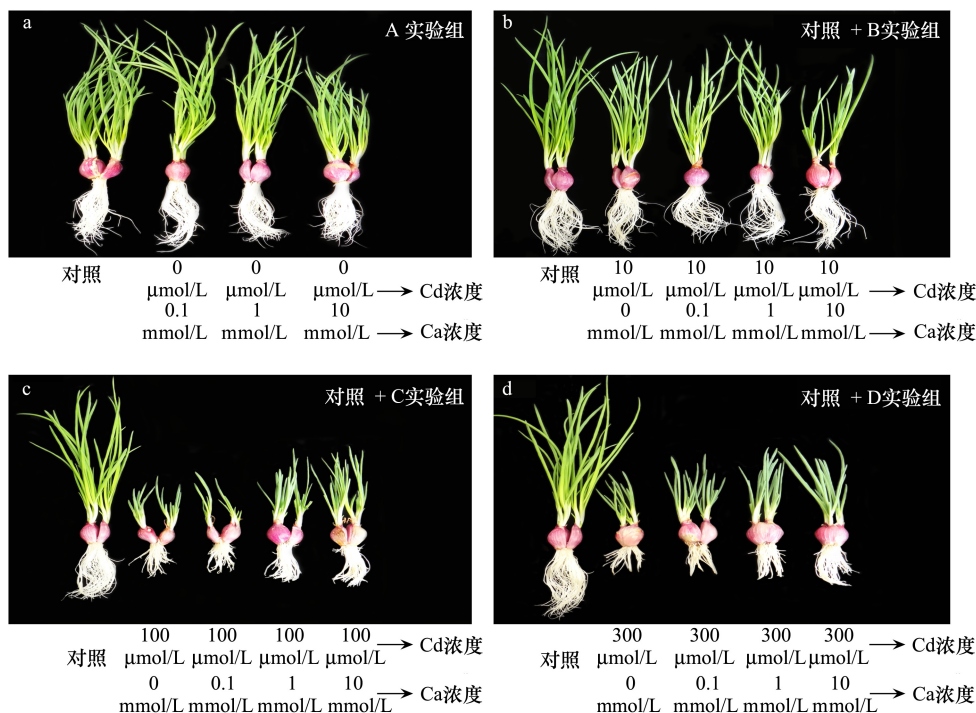


图 1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱生长及形态特征的影响 (12 d)

Fig.1 Effects of exogenous Ca on morphological characteristics of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. under Cd stress over 12 days

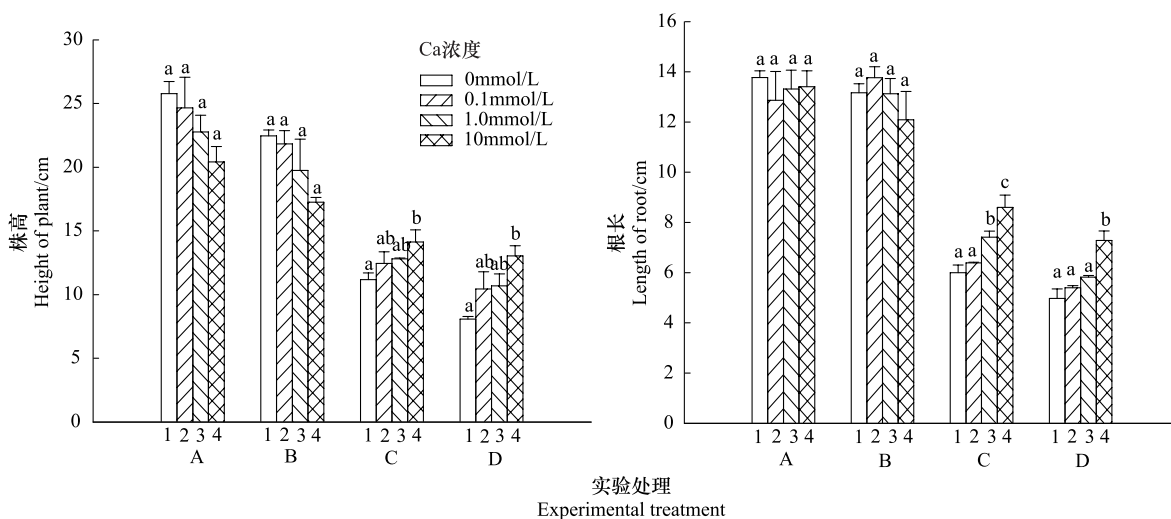


图 2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱株高和根长的影响

Fig.2 Effects of exogenous Ca on plant height and root length of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. under Cd stress

A: A 实验组 (1, 2, 3, 4; A1, A2, A3, A4); B: B 实验组 (1, 2, 3, 4; B1, B2, B3, B4); C: C 实验组 (1, 2, 3, 4; C1, C2, C3, C4); D: D 实验组 (1, 2, 3, 4; D1, D2, D3, D4); 同一实验组中字母完全不同表示差异显著 ($n=15, P<0.05$)

2.2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱叶片光合色素含量的影响

图 3 表明, Cd 胁迫毛葱 12 d 后导致其叶绿素 a 含量的显著增加, 处理组与对照组之间差异显著

($P<0.05$)。不同浓度外源 Ca 对叶绿素 a 的增加幅度有明显的影响。外源 Ca 浓度为 0.1 mmol/L 时, 对叶绿素 a 含量的增加没有明显影响; Ca 浓度至 1 mmol/L 时, 能有效缓解除 10、100 $\mu\text{mol/L}$ 处理组毛

葱叶片叶绿素 a 含量的骤升;外施 Ca 浓度升至 10 mmol/L 时,对 100、300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理组毛葱的缓解作用反而减弱,只对 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理毛葱叶片叶绿素 a 含量的骤升有明显的抑制作用,使其恢复到正常水平。

Cd 对毛葱叶片叶绿素 b 含量的影响与对叶绿素 a 含量的影响明显不同(图 3)。300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理导致毛葱叶片的叶绿素 b 含量显著上升($P < 0.05$),其它浓度的 Cd 处理组与对照组之间无显著性差异($P > 0.05$)。10 mmol/L 外源 Ca 显著抑制

Cd 胁迫毛葱叶片叶绿素 b 含量的上升,使其含量与对照组无显著性差异($P > 0.05$)(图 3)。

类胡萝卜素存在于所有光合生物中,是光合作用的辅助色素,能将吸收的光能传递给叶绿素分子,在捕光色素复合体的组装中承担重要的结构性作用。高浓度的 Cd(100 $\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$)能显著增加类胡萝卜素的含量($P < 0.05$)(图 3)。10 mmol/L 外源 Ca 可缓解 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 毒害,低于此浓度的 Ca 均未对类胡萝卜素的含量产生影响(图 3)。

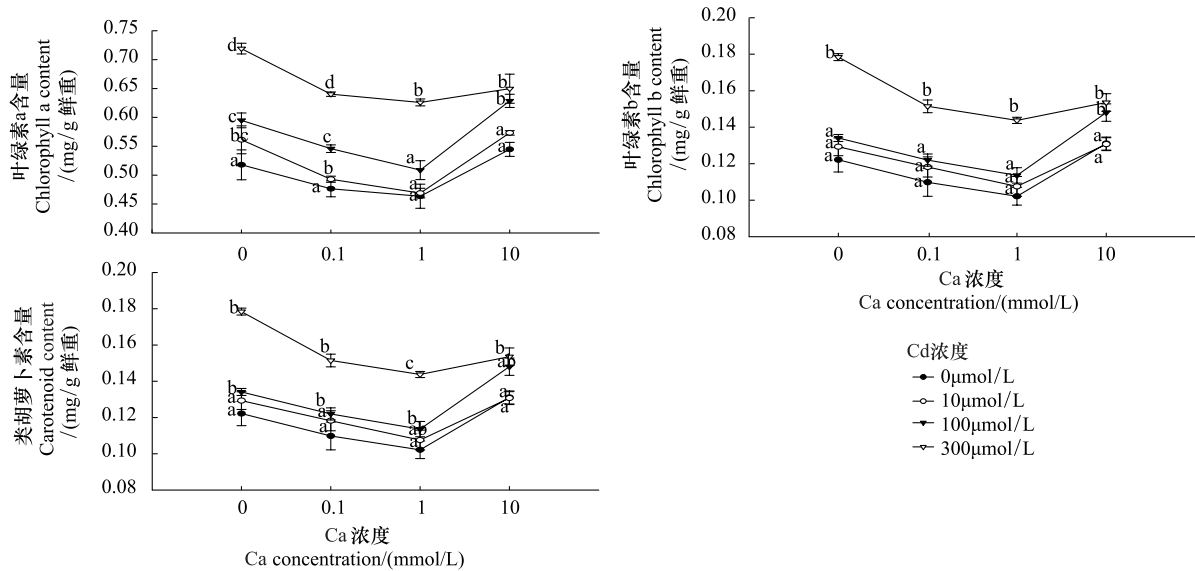


图 3 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱光合色素含量的影响

Fig.3 Effects of exogenous Ca on leaf pigment content of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. under Cd stress

同列字母完全不同表示差异显著($n=15, P<0.05$)

2.3 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱叶片光合特性的影响

2.3.1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱叶片净光合速率的影响

净光合速率(P_n)是反映光合作用强弱的最重要指标,净光合速率越大,植物光合作用的水平越高,反之亦然。Cd 胁迫下毛葱叶片净光合速率受到明显的影响,随 Cd 处理浓度的增加而明显降低(图 4)。Cd 胁迫毛葱 12 d 后,10、100 $\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理组毛葱其叶片净光合速率比对照组分别下降了 24.2%、75.8% 和 85.4%。外源 Ca 对其下降幅度有明显的影响。具体表现为,0.1 mmol/L Ca 对 Cd 的毒害无明显缓解作用;1 mmol/L Ca 显著缓解 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 的毒害($P < 0.05$);10 mmol/L 外源 Ca 比 1 mmol/L Ca 缓解效果更明显,对 100

$\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 毒害均有明显缓解作用(图 4)。

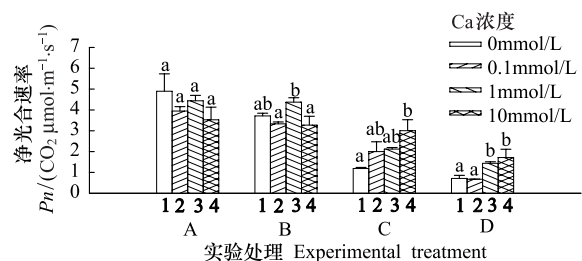


图 4 不同浓度 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱处理 12 d 后净光合速率(P_n)的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of Ca on the net photosynthetic rate (P_n) in *Allium cepa* var. *agrogarum* L. exposed to Cd stress over 12 d

同一实验组中字母完全不同表示差异显著($n=15, P<0.05$)

2.3.2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱叶片气孔导度的影响

气孔导度(G_s , 单位为 $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 影响植物的光合作用和蒸腾作用。不同浓度的 Cd 对毛葱叶片的气孔导度有不同程度的抑制作用(图 5)。10、100 $\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理毛葱 12 d 后, 其叶片的气孔导度比对照组分别下降了 19.8%、42.7% 和 81.3%。施加外源 Ca 显著降低了 A 组叶片的气孔导度($P<0.05$), 但对 B、C、D 组叶片的气孔导度没有明显的影响(图 5)。

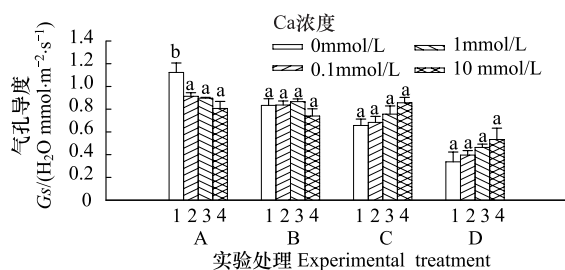


图 5 不同浓度 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱处理 12 d 后气孔导度 (G_s) 的影响

Fig.5 Effects of different concentrations of Ca on the stomatal conductance (G_s) in *Allium cepa* var. *agrogarum* L. exposed to Cd stress over 12 days

同一实验组中字母完全不同表示差异显著 ($n=15, P<0.05$)

2.3.3 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱叶片蒸腾速率的影响

蒸腾作用是植物吸收水分和转运水分的主要动力, 对维持植物各部分的水分饱和, 保持细胞组织的形态, 促进无机盐类在植物体内的分布具有重要的

作用。对比图 6 和图 5 可以看出, 蒸腾速率(Tr) 和气孔导度的变化趋势一致。不同浓度 Cd 胁迫毛葱 12 d 后, 10、100 $\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理后毛葱叶片的蒸腾速率分别比对照下降了 14.2%、43.1% 和 78.0%。施加外源 Ca 显著降低了 A 组叶片的蒸腾速率($P<0.05$); 外源 Ca 显著缓解了 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 对毛葱的毒害($P<0.05$), 提高了毛葱叶片的蒸腾速率, 尤其当 Ca 浓度大于 1 mmol/L 时, 缓解效果尤为明显; 外源 Ca 对 B、C、D 组叶片的蒸腾速率没有明显的影响(图 6)。

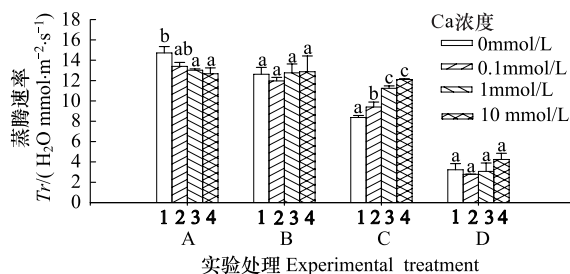


图 6 不同浓度 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱处理 12 d 后蒸腾速率 (Tr) 的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of Ca on the transpiration rate (Tr) in *Allium cepa* var. *agrogarum* L. exposed to Cd stress over 12 days

同一实验组中字母完全不同表示差异显著 ($n=15, P<0.05$)

2.4 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱 Cd 含量及营养元素吸收的影响

2.4.1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱含水量的影响

Cd 显著降低毛葱体内的含水量, 施加外源 Ca 能明显的减缓其降低幅度(图 7)。本研究中毛葱幼

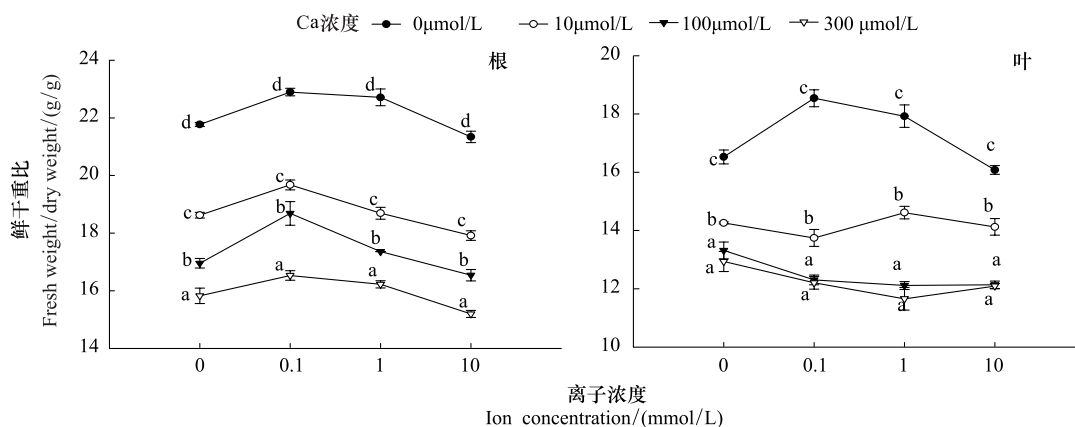


图 7 不同浓度 Ca 对 Cd 胁迫毛葱 12 d 后各器官鲜干重比值的影响

Fig.7 Effects of different concentrations of Ca on the fresh and dry weights ratio in *Allium cepa* var. *agrogarum* L. exposed to Cd stress over 12 days

同列字母完全不同表示差异显著 ($n=15, P<0.05$)

苗根系的鲜干重比与 Cd 浓度呈负相关,B1、C1、D1 组幼苗(10—300 $\mu\text{mol/L}$)根系的鲜干重比始终显著低于 A1 组(对照组)($P<0.05$)且各处理组间差异显著($P<0.05$)。施加外源 Ca 后各实验组毛葱根系的鲜干重比均先升高后随着 Ca 浓度的提高(>0.1 mmol/L)而逐渐降低,在 Ca 浓度为 10 mmol/L 时最低(图 7)。

毛葱叶片鲜干重比的变化趋势与根系不完全一致(图 7)。毛葱叶片的鲜干重比与 Cd 浓度呈现负相关,除 C1 和 D1 组外其它各实验组间差异显著($P<0.05$)。施加外源 Ca 后,A 组中毛葱叶片鲜干重比的变化趋势与根系保持一致。B、C、D 组在 Ca 浓度为 0.1 mmol/L 时比值均下降,与根系的变化趋势相反;当 Ca 浓度为 1 mmol/L 时,B 组比值上升,C、D 组均下降;当 Ca 浓度至 10 mmol/L 时,B、C、D 各组叶片的变化趋势正好与 1 mmol/L Ca 处理组相反(图 7)。

2.4.2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱体内 Cd 含量的影响

Cd 处理后毛葱体内 Cd 含量随 Cd 浓度上升而增加,但 Cd 在毛葱根系中的积累量远远高于叶片中的含量(图 8)。施加外源 Ca 显著降低了 B、C、D 组毛葱根系和叶片中 Cd 的积累量($P<0.05$)。

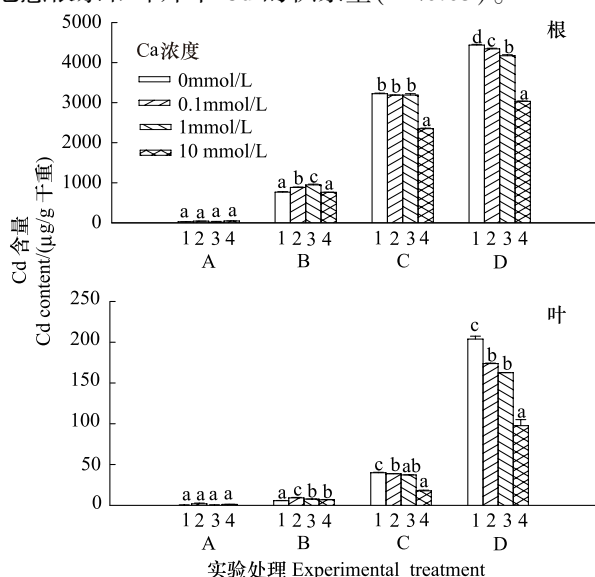


图 8 不同浓度 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱 12 d 后,Cd 在毛葱体内不同器官中的积累和分布

Fig.8 Cadmium uptake and accumulation by *Allium cepa* var. *agrogarum* L. under cadmium stress, after 12 days cultivation with different concentration of Ca

同一实验组字母完全不同表示差异显著($n=5, P<0.05$)

外源 Ca 对毛葱根系中 Cd 的积累量有明显的影 响(图 8)。B 组中,1 mmol/L 外源 Ca 显著促进 Cd 在毛葱根系中的积累($P<0.05$),10 mmol/L Ca 对其 积累量无明显影响。在 C、D 组中,10 mmol/L 外源 Ca 能显著降低 Cd 在根系的积累($P<0.05$);D 组中, 0.1 mmol/L 外源 Ca 能显著降低 Cd 在毛葱根系中的 积累($P<0.05$),随着 Ca 浓度的升高,降低效果更为 显著(图 8)。

与外源 Ca 对毛葱根系中 Cd 的积累的影响一 致,毛葱叶片中 Cd 的积累量随着施加外源 Ca 而明 显降低(图 8)。与根不同的是,0.1 mmol/L 的 Ca 就 能显著降低 C 组叶片中 Cd 的积累量;而在 D 组中, 0.1 mmol/L 和 1 mmol/L 外源 Ca 对毛葱叶片中 Cd 的 积累量没有产生明显的影响($P>0.05$)(图 8)。

2.4.3 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱营养元素吸收的 影响

Cd 胁迫造成毛葱体内明显的矿质营养失衡,主 要表现为显著降低毛葱根中 Mg、Mn,叶中 Ca、Mg、 Mn、Zn 等元素的含量;显著增加毛葱根中 Ca、Fe、 Zn,叶中 Fe 元素的含量,扰乱毛葱体内矿质营养的 内稳态;外源 Ca 削弱了 Cd 胁迫造成的矿质元素失 衡,稳定了毛葱体内矿质营养的内稳态(表 2)。

Cd 造成毛葱根系中钙(Ca)含量显著高于对照 组(A1)($P<0.05$)并随 Cd 浓度的升高而增加;不同 浓度的外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱体内钙(Ca)的代 谢与利用有不同的影响(表 2)。A 组中,外源 Ca 浓 度低于 10 mmol/L 时显著降低毛葱根系中 Ca 的含 量($P<0.05$);当 Ca 浓度升至 10 mmol/L 时,根系中 Ca 的积累量显著高于对照组($P<0.05$)。B、C、D 组 中,外源 Ca 显著降低毛葱根系 Ca 含量。Ca 在毛葱 叶片中的吸收和积累情况与根系中明显不同(表 2)。Cd 显著降低毛葱叶片中的 Ca 含量。A 组中, 外源 Ca 浓度为 0.1、1 和 10 mmol/L 时,叶片中 Ca 的 含量比对照组分别增加了 17.3%、37.8% 和 44.7%; B、C、D 组中,Ca 在毛葱叶片的积累随外源 Ca 浓 度的变化趋势与根系保持一致。A 组施加外源 Ca 后, 毛葱体内 Ca 含量较对照组显著增加($P<0.05$);而 B、C、D 组中毛葱体内 Ca 含量却随着外源 Ca 的施加 而减少。

Cd 显著地抑制了毛葱对镁(Mg)的吸收和积 累;不同浓度外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱体内 Mg 的代

表 2 不同浓度 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱处理 12 d 后, Ca、Mn、Fe、Mn、Zn 在毛葱体内不同器官的分布

实验组 Experimental groups	器官 Organs ($\mu\text{g/g}$ 干重 $\pm\text{SE}$)						叶 Leaves					
	根 Roots			茎 Stems			叶 Leaves			根 Roots		
	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn		Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	
A A1(对照)	2572.64 $\pm$ 16.34c	4719.82 $\pm$ 48.68d	88.15 $\pm$ 4.29a	40.95 $\pm$ 0.34d	183.22 $\pm$ 0.60a	5120.18 $\pm$ 3.81a	1998.21 $\pm$ 15.26b	59.39 $\pm$ 1.20a	52.88 $\pm$ 1.05a	39.29 $\pm$ 0.19b		
A2	2143.86 $\pm$ 51.55a	2415.38 $\pm$ 5.49a	123.22 $\pm$ 8.33b	28.14 $\pm$ 1.05a	237.74 $\pm$ 7.52c	6006.41 $\pm$ 10.00b	2096.52 $\pm$ 29.35c	184.90 $\pm$ 1.98c	83.30 $\pm$ 2.01d	53.11 $\pm$ 2.14c		
A3	2316.45 $\pm$ 93.16b	2968.99 $\pm$ 43.60b	125.69 $\pm$ 2.35b	35.76 $\pm$ 0.49b	223.76 $\pm$ 3.44b	7056.51 $\pm$ 75.10c	2047.73 $\pm$ 72.27bc	155.93 $\pm$ 17.33b	72.13 $\pm$ 0.79c	37.99 $\pm$ 0.57b		
A4	3788.35 $\pm$ 109.30d	3508.90 $\pm$ 18.80c	126.63 $\pm$ 4.41b	37.11 $\pm$ 0.29c	190.29 $\pm$ 11.4b	7407.92 $\pm$ 16.30d	1755.42 $\pm$ 42.39a	141.08 $\pm$ 9.89b	63.66 $\pm$ 0.78b	17.85 $\pm$ 0.67a		
B B1	2835.11 $\pm$ 31.67d	2419.70 $\pm$ 3.50d	117.97 $\pm$ 2.31a	17.05 $\pm$ 0.31c	228.61 $\pm$ 3.00a	4474.69 $\pm$ 20.50d	1794.52 $\pm$ 19.49b	69.19 $\pm$ 0.80a	39.33 $\pm$ 0.08b	27.82 $\pm$ 1.30a		
B2	2012.61 $\pm$ 30.04a	1458.89 $\pm$ 7.71a	146.29 $\pm$ 2.50b	15.27 $\pm$ 0.64b	244.01 $\pm$ 1.65b	3704.73 $\pm$ 25.20a	1865.57 $\pm$ 150.40b	125.24 $\pm$ 5.61b	39.20 $\pm$ 4.84b	43.04 $\pm$ 1.39b		
B3	2455.95 $\pm$ 50.65b	1619.69 $\pm$ 32.62c	154.10 $\pm$ 3.77c	16.42 $\pm$ 1.02bc	279.28 $\pm$ 0.68d	4200.45 $\pm$ 7.58c	1914.61 $\pm$ 14.39b	155.49 $\pm$ 1.16c	35.57 $\pm$ 2.45b	29.68 $\pm$ 4.51a		
B4	2557.31 $\pm$ 43.19c	1532.00 $\pm$ 31.10b	154.13 $\pm$ 2.68c	7.70 $\pm$ 0.19a	250.85 $\pm$ 4.47c	3888.11 $\pm$ 12.8b	1579.26 $\pm$ 4.38a	123.81 $\pm$ 4.98b	29.58 $\pm$ 0.51a	26.18 $\pm$ 4.08a		
C C1	4201.43 $\pm$ 44.95d	1681.79 $\pm$ 6.79c	231.26 $\pm$ 3.62b	11.95 $\pm$ 0.37d	246.07 $\pm$ 3.75bc	2316.21 $\pm$ 24.3d	1670.69 $\pm$ 11.31a	73.42 $\pm$ 2.79a	37.15 $\pm$ 0.10b	27.25 $\pm$ 0.60a		
C2	4032.22 $\pm$ 55.95c	1308.28 $\pm$ 54.75a	247.84 $\pm$ 4.69c	10.68 $\pm$ 0.12c	253.98 $\pm$ 6.06c	1776.08 $\pm$ 19.8a	1893.45 $\pm$ 13.47c	118.53 $\pm$ 5.29c	29.17 $\pm$ 0.25a	34.10 $\pm$ 4.12a		
C3	3538.06 $\pm$ 82.85a	1485.27 $\pm$ 11.77b	225.85 $\pm$ 1.89b	10.17 $\pm$ 0.12b	236.72 $\pm$ 7.98b	1883.65 $\pm$ 9.69b	1750.54 $\pm$ 3.74b	115.62 $\pm$ 0.84c	29.00 $\pm$ 0.69a	31.40 $\pm$ 6.38a		
C4	3903.18 $\pm$ 23.40b	1323.88 $\pm$ 4.34a	197.57 $\pm$ 0.25a	8.17 $\pm$ 0.14a	212.85 $\pm$ 7.94a	2193.18 $\pm$ 59.9c	1680.25 $\pm$ 59.36a	105.23 $\pm$ 0.20b	29.12 $\pm$ 0.17a	25.21 $\pm$ 4.69a		
D D1	4525.22 $\pm$ 17.00d	1500.83 $\pm$ 23.40d	344.29 $\pm$ 9.67c	10.10 $\pm$ 0.13b	279.00 $\pm$ 1.37c	1695.67 $\pm$ 12.50c	1597.98 $\pm$ 6.87a	107.57 $\pm$ 5.42a	35.30 $\pm$ 0.17c	24.41 $\pm$ 0.28a		
D2	2892.37 $\pm$ 10.07a	969.83 $\pm$ 13.58a	409.95 $\pm$ 1.87d	12.05 $\pm$ 0.14c	220.44 $\pm$ 30.31b	1363.97 $\pm$ 15.00b	1814.72 $\pm$ 6.61d	154.85 $\pm$ 11.27b	27.26 $\pm$ 0.39a	45.66 $\pm$ 1.00c		
D3	3115.90 $\pm$ 87.17b	1352.73 $\pm$ 12.03b	318.04 $\pm$ 2.07b	9.83 $\pm$ 0.20b	176.31 $\pm$ 3.66a	1229.85 $\pm$ 25.20a	1671.11 $\pm$ 17.60c	150.04 $\pm$ 19.39b	36.11 $\pm$ 0.83c	43.31 $\pm$ 1.39c		
D4	3398.83 $\pm$ 46.01c	1409.39 $\pm$ 2.08c	207.11 $\pm$ 16.00a	6.84 $\pm$ 0.12a	221.22 $\pm$ 2.47b	1342.05 $\pm$ 28.90b	1641.64 $\pm$ 10.59b	116.62 $\pm$ 3.86a	29.98 $\pm$ 0.50b	34.38 $\pm$ 3.65b		

表中数据表示平均数 $\pm$ 标准误差;同一实验组中同列字母完全不同表示差异显著($n=5, P < 0.05$)

谢与利用有不同的影响(表2)。毛葱根系 Mg 含量显著受到外源 Ca 的影响。A 组中,施加外源 Ca 后,毛葱根系中 Mg 含量较对照组显著降低($P<0.05$),0.1 mmol/L Ca 对其降低效果最明显仅为对照组(A1)的 83.3%;B、C、D 组中 0.1 mmol/L 外源 Ca 施加组(B2、C2、D2),毛葱根系中 Mg 含量仅为其无 Ca 组(B1、C1、D1)含量的 71.0%、96.0%和 63.9%(表2)。毛葱叶片中 Mg 含量也明显受到外源 Ca 的影响(表2)。与根系中 Mg 含量不同的是,A 组中,0.1 mmol/L 外源 Ca 处理下毛葱叶片中 Mg 含量高于对照组及其它 Ca 处理组($P<0.05$)。随着 Ca 浓度的升高,叶片中 Mg 的积累量逐渐下降,10 mmol/L 时达最低且显著低于对照组($P<0.05$);B、C、D 组与 A 组变化趋势一致。0.1 mmol/L 外源 Ca 能显著降低毛葱根系中 Mg 含量并随外源 Ca 浓度的增加降低幅度减小;叶片中 Mg 含量在 0.1 mmol/L 外源 Ca 组中显著增加,但其增加幅度随外源 Ca 浓度的升高而减小(表2)。

Cd 显著促进了毛葱对铁(Fe)的吸收($P<0.05$);不同浓度外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱体内 Fe 的代谢与利用有不同的影响(表2)。根系中:A、B 组 Fe 含量随外源 Ca 浓度的升高而增加,其中 A4、B4 组 Fe 含量分别为 A1、B1 组的 143.7% 和 130.6%;C、D 组 Fe 含量在外源 Ca 浓度为 0.1 mmol/L(C2、D2 组)时最大,其值分别为 C1 组、D1 组的 107.2% 和 119.1%,当外源 Ca 浓度大于 0.1 mmol/L 时,毛葱根系中 Fe 含量逐渐减少(表2)。叶片中:A、C 和 D 实验组均在外源 Ca 浓度为 0.1 mmol/L(A2、C2、D2 组)时叶片中 Fe 含量最大,其值分别比 A1、C1 和 D1 组增加了 111.3%、61.5%和 44.0%,外源 Ca 浓度大于 0.1 mmol/L 时,毛葱叶片中 Fe 含量逐渐减少;B 组中,毛葱叶片中 Fe 含量在 Ca 浓度为 1 mmol/L 最大,为 B1 组的 124.7%。因此,施加外源 Ca 能显著增加毛葱体内 Fe 的积累量,0.1 mmol/L Ca 效果最明显。

Cd 显著抑制了毛葱对锰(Mn)的积累($P<0.05$);不同浓度外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱体内 Mn 的代谢与利用有不同的影响(表2)。A 实验组中,外源 Ca 会显著降低毛葱根系中 Mn 的积累量($P<0.05$),Ca 浓度为 0.1 mmol/L 时含量达最低,为对照组的 68.7%;B、C、D 实验组中,外源 Ca 也会显著降

低毛葱根系中 Mn 的积累量($P<0.05$),但只有当 Ca 浓度升至 10 mmol/L 时才会使毛葱根中 Mn 的积累量达到各组的最低含量(表2)。与根系不同的是,外源 Ca 会显著增加 A 组中毛葱叶片中 Mn 的含量($P<0.05$),在 Ca 浓度为 0.1 mmol/L 时叶片中 Mn 含量达最高为 A1 组的 157.5%;B、C、D 实验组中,毛葱叶片中 Mn 含量随外源 Ca 浓度的施加而降低(表2)。因此,外源 Ca 能显著降低 Cd 胁迫下毛葱体内 Mn 的积累量。

Cd 显著促进了毛葱根系对锌(Zn)的积累却显著抑制了叶片对 Zn 的积累($P<0.05$);不同浓度外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱体内 Zn 的代谢与利用的影响不同(表2)。A 组中,外源 Ca 能显著促进毛葱根系对 Zn 的吸收($P<0.05$),0.1 mmol/L Ca 处理组比对照组增加了 29.8%;B 组中,外源 Ca 显著增加毛葱根系中 Zn 的含量($P<0.05$),当 Ca 浓度为 1 mmol/L 时达到 Zn 积累量的最大值,为 B1 组的 122.1%;C 组中 10 mmol/L Ca 对根中 Zn 的含量产生显著抑制作用($P<0.05$),低于此浓度的 Ca 对其均无明显影响;D 组中,外源 Ca 能显著抑制毛葱根中 Mn 含量($P<0.05$),Ca 浓度为 1 mmol/L 时含量最低,比 D1 组下降 36.8%(表2)。毛葱叶片中 Zn 的积累与根系的变化趋势不同(表2)。A 组中,当外源 Ca 浓度为 0.1 mmol/L 时可显著促进 Zn 在毛葱叶片的积累($P<0.05$),而 10 mmol/L 的 Ca 显著抑制 Zn 在毛葱叶片的含量($P<0.05$),1 mmol/L Ca 对其无明显影响($P>0.05$);B 实验组,0.1 mmol/L Ca 显著地促进 Zn 在毛葱叶片中的积累($P<0.05$),但当 Ca 浓度上升时,其对 Zn 在毛葱叶片的积累量与 B1 组无显著差异($P>0.05$);C 实验组中外源 Ca 未对 Zn 在毛葱叶片的积累产生明显影响;D 实验组中,外源 Ca 能显著增加毛葱根中 Mn 的含量($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱生长的影响

株高根长是水培模拟试验中最易观测的植株外观指标,并能反映植物所受胁迫的强度^[14]。Cd 胁迫严重影响了毛葱的形态特征,使其株高、根长也受到明显的抑制,外源 Ca 能有效缓解 Cd 对毛葱幼苗产生的毒害,使其形态得到有效恢复、对其生长的抑制也明显减弱(图1,图2)。因为 Ca 作为植物必需的

营养元素之一,参与植物的多种生命活动与多种酶的代谢过程^[15],可在一定程度上缓解 Cd 的毒害,促进植物体的生长。

植株的生理代谢活性能够反映环境对植物的适宜程度,含水量的高低是衡量植物生理活性的一个重要指标。采用植株鲜重(FW)与干重(DW)的比值代表植株的含水量。Cd 造成毛葱体内含水量的显著下降,造成体内水分失衡(图 7)。植物对这一失衡关系的调节主要是通过相应有机物的合成和无机离子的积累两条途径来实现^[16-19]。外源 Ca 促进了毛葱根系的生长,保持了毛葱体内水分的相对平衡(图 7),可能是由于外源 Ca 对根尖部位离子关系有明显的改善,从而有利于根系生长^[18,20](图 1)。Ca 作为植物必需的营养元素之一,是多种酶的组成成分和激活剂,能调节细胞的充水度及渗透性,维持细胞正常的生理状态,从而维持植物体的正常生理代谢,因此,Ca 对于降低植物对 Cd 的吸收,及减轻 Cd 对植物的毒害具有重要作用^[21]。

3.2 外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱生理特性的影响

Cd 毒害造成植物的生理代谢紊乱,加速植物的衰老。有研究表明,叶片衰老过程中伴随着叶绿素酶活性提高,叶绿素降解加剧。唐蕾等^[22]采用反相高效液相色谱,结合光电二极管阵列和荧光检测技术,发现在衰老的银杏叶中主要存在叶绿素 a、叶绿素 b 和脱镁叶绿素(暗橄榄褐色),脱植基叶绿素(鲜绿色)。在液泡膜上也发现了一种依赖 ATP (Adenosine Triphosphate, ATP) 的特异运载蛋白,负责叶绿素代谢物在液泡中转运^[23]。由上可知,叶绿素的许多卟啉衍生物在叶片衰老过程中从衰老叶绿体转运到液泡中贮存起来,这些叶绿素代谢物如脱植基叶绿素等的光谱性质和叶绿素原体基本相同,可在同一波长下被检测到,但这些叶绿素的代谢产物均不能行使正常叶绿素的功能,从而降低了叶片的光合特性。毛葱受 Cd 毒害后其色素含量上升但其光合作用却严重受到了抑制。叶绿素降解除了影响光合作用外还具有其它的意义。例如,衰老时叶绿素降解启动蛋白质的水解,利于氮的释放利用;一些叶绿素降解产物或衍生物可以提高细胞对重金属毒害的耐受力^[24]。外源 Ca 对毛葱幼苗色素含量产生较大影响。毛葱叶片色素含量受外源 Ca 水平的限制,当外源 Ca 浓度为 0.1 mmol/L 时毛葱叶片叶绿

素和类胡萝卜素含量与 Ca 对照组相比均显著下降,Ca 浓度升至 1 mmol/L 时,色素含量继续下降,但当 Ca 浓度为 10 mmol/L 时,其含量反而上升(低于无施加 Ca 组)。这可能与外源 Ca 促进了毛葱的快速生长,其生长量增大导致的“稀释效应”有关^[25],但高浓度外源 Ca (10 mmol/L) 对毛葱幼苗来说可能是一种营养胁迫,在这种营养胁迫下,Ca 可能会造成强光胁迫,这与邱栋梁^[26]的研究结果是一致的,即 Ca 能减少叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量的下降。类胡萝卜素是叶绿体内的天线色素,与光合作用中的光系统 I (PS I) 和光系统 II (PS II) 相联结,一方面阻止激发态叶绿素分子的激发能从反应中心向外传递,另一方面又能保护叶绿素分子的激发能免遭光氧化损伤,是单线态氧重要的猝灭剂^[27],能够在一定程度上保护光合机构,调节过剩光能的耗散,减轻过剩光能对光合机构的破坏。因此,毛葱叶片在 10 mmol/L 外源 Ca 处理下保持了较高的类胡萝卜素含量^[25]。这也是其耐 Cd 的一种有效措施。

Cd 能使毛葱叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)持续降低,外源 Ca 明显减小了其降低幅度,使 P_n 维持在较高的水平(图 4)。这可能是由于 Cd 造成毛葱体内矿质营养失衡所致。Mn 和 Ca 都是光合放氧复合物中的重要组成成分。Mn 是植物必需营养元素,与其体内许多酶的活性和氧化还原体系有关,并直接参与光合作用^[28]。Mn 含量的下降而使叶绿体的放氧活性下降,从而抑制了毛葱的光合效率^[26]。而外源 Ca 能适当提高毛葱的净光合速率主要是因为 Ca 能提高叶绿体二氯酚吡啶酚(Dichlorophenol Indophenol, DCPIP)光还原活性。在 PS II 膜中,每个 PS II 含有一个高亲和性及两个低亲和性的 Ca 的结合位点;这些位点上含有 2—3 个结合态 Ca,并且非常靠近 Mn 复合物^[29],Ca 能提高叶绿体 DCPIP 光还原活性可能是因为 Ca 促进 Mn 簇电子向原初氧化剂传递。已有研究证明 Ca 的作用位于 Mn 的 S1—S4(不同氧化还原状态的放氧复合体)状态之后,接近原初氧化剂 Y^+ ,且促进 Y^+ 的还原^[30]。Handreck^[31]认为,Ca 供应过多会引起植物出现缺 Mg 的症状,这与本文的研究结果是一致的(表 2)。肖细元等^[27]也指出 Ca 处理显著限制 Mg 的吸收,高钙处理使蜈蚣草羽片中镁浓度含量极低,几乎为对照处理的一半。Mg 和 Mn 一样在植物的光

合作用中发挥着重要的作用,Mg 是叶绿素的重要组成部分,同时 Mg 也是催化磷酸化过程酶的关键辅助因子之一,在磷酸盐的代谢过程中起着重要的作用^[32]。因此,Mg 的缺乏也可造成植物净光合速率的显著下降。

在 Cd 胁迫下毛葱体内 Zn、Fe 和 Ca 等半径与 Cd 相似的离子含量均有所上升,因为 Fe 是植物体某些酶的组成成分,在氧化还原过程中起着重要的电子传递作用,而 Zn 与植物蒸腾作用有关,Zn 还参与植物生长素的形成,促进光合作用和蛋白质合成^[27]。这些离子与 Cd 竞争毛葱细胞表面有限的离子通道,进而减少毛葱对 Cd 的吸收,从而减轻 Cd 毒害,另一方面,Fe、Zn 含量的增加进一步保证了毛葱的正常生理,从而有利于毛葱光合作用的提高。另外有研究报道,Zn 含量的上升还可能是因为 Zn 与 Ca 之间存在共积累关系^[33-34]。Cd 胁迫所造成的矿质营养失衡,影响植物正常的生理代谢^[35-36],导致植物生物量下降^[37]。外源 Ca 能缓解 Cd 的毒害,因为 Ca 与 Cd 具有相似的化学性质,是 Cd 吸附位点的主要竞争者,当溶液中 Ca 和 Cd 同时存在时,Ca 可显著地降低植物对 Cd 的吸收和积累,从而减轻 Cd 的毒害。植物所处环境中的离子的物理性质(化学价、离子半径)的相似性会影响植物对离子的吸收及分配,如 Cd 能够利用 Ca^{2+} 通道被植物运输,运 Fe 载体也参与 Cd 的运输^[38-40]。另有研究指出,在 Cd 胁迫下,外源 Ca 使细胞内游离 Ca 常常显著增加,以便于启动特定基因的表达,激活一系列生化反应,从而使植物适应环境中的胁迫因子^[39-48]。

4 结论

(1)不同浓度外源 Ca 对 Cd 胁迫下的毛葱处理 12 d 后,对 Cd 胁迫所造成的伤害具有不同程度的缓解作用。其中,10 mmol/L 的外源 Ca 对毛葱生长的缓解作用最为显著。

(2)外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱叶片光合色素含量的影响。Cd 胁迫毛葱 12 d 后能导致其叶绿素 a 含量的显著增加,处理组与对照组之间差异显著($P < 0.05$)。不同浓度外源 Ca 对叶绿素 a 的增加幅度有明显的影响。1 mmol/L Ca 有效的缓解了 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理组毛葱叶片叶绿素 a 含量的骤升;10 mmol/L Ca 使 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理毛葱叶片叶绿素 a

含量恢复到正常水平。

(3)外源 Ca 对 Cd 胁迫下毛葱叶片光合特性的影响。Cd 胁迫毛葱 12 d 后,10、100 $\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理毛葱其叶片净光和速率比对照组分别下降了 24.2%、75.8% 和 85.4%。外源 Ca 对其下降幅度有明显的影响。具体表现为,Ca 浓度为 0.1 mmol/L 时对 Cd 的毒害无明显缓解作用;当 Ca 浓度达 1 mmol/L 时可显著缓解 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 的毒害($P < 0.05$);当外源 Ca 浓度高达 10 mmol/L 时,比 1 mmol/L 有更好的缓解作用,对 100 $\mu\text{mol/L}$ 和 300 $\mu\text{mol/L}$ Cd 毒害均有明显缓解作用。

(4)Cd 处理后毛葱体内 Cd 含量显著增加且与 Cd 浓度呈正相关性,但 Cd 在毛葱根系中的积累量远远高于叶片中的含量。施加外源 Ca 显著降低了 Cd 处理组中毛葱根系和叶片中 Cd 的积累量($P < 0.05$)。与外源 Ca 对毛葱根系中 Cd 的积累的影响一致,毛葱叶片中 Cd 的积累量随着施加外源 Ca 而明显降低。

(5)Cd 胁迫造成毛葱体内明显的矿质营养失衡,显著降低毛葱根中 Mg、Mn,叶中 Ca、Mg、Mn、Zn 等元素的含量;却显著增加了毛葱根中 Ca、Fe、Zn,叶中 Fe 元素的含量,扰乱毛葱体内矿质营养的内稳态;外源 Ca 削弱了 Cd 胁迫所造成的矿质元素失衡,稳定了毛葱体内矿质营养的内稳态。

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] 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 Biologica Experimentalis Sinica*, 2004, 37(6): 461-468.
- [3] 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.
- [4] Li S, Yu J L, Zhu M J, Zhao F G, Luan S. Cadmium impairs ion homeostasis by altering K^+ and Ca^{2+} channel activities in rice root hair cells. *Plant, Cell & Environment*, 2012, 35(11): 1998-2013.
- [5] 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.
- [6] Cheval C, Aldon D, Galaud J P, Ranty B. Calcium/calmodulin-

- mediated regulation of plant immunity. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 2013, 1833 (7): 1766-1771.
- [7] Gong M, Li Y J, Chen S Z. Absciscic acid-induced thermotolerance in *Maize* seedlings is mediated by calcium and associated with antioxidant systems. *Journal of Plant Physiology*, 1998, 153(3/4): 488-496.
- [8] Wang H, Zhou W, Lin B. Effects of Ca on growth and some physiological characteristics of *maize* under Cd stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 78-87.
- [9] Chen X L, Yu T Y, Qin H M, Liang X L, Wu P D, Lun J H, Zhou L Y. The effect of calcium on corn seedling growth and physiological characteristics under chromium stress. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(4): 74-78.
- [10] Fiskesjö G. Nucleolar dissolution induced by aluminium in root cells of *Allium*. *Physiologia Plantarum*, 1983, 59(3): 508-511.
- [11] Qin R, Jiao Y Q, Zhang S S, Jiang W S, Liu D H. Effects of aluminum on nucleoli in root tip cells and selected physiological and biochemical characters in *Allium cepa* var. *agrogarum* L. *BMC Plant Biology*, 2010, 10: 225, doi: 10.1186/1471-2229-10-225.
- [12] Zhang Z L, Zhai W J. Guide of Plant Physiology Experiment. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [13] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 1987, 148: 350-382.
- [14] Zhang F, Luo C D, Zhang J. Alleviation effect of exogenous Ca, P and N on the growth of *Chinese fir* seedlings under Al stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 213-217.
- [15] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed. New York: Academic Press, 1995.
- [16] McNulty I B. Rapid osmotic adjustment by a succulent halophyte to saline shock. *Plant Physiology*, 1985, 78(1): 100-103.
- [17] Guerrier G. Fluxes of Na^+ , K^+ and Cl^- and osmotic adjustment in *Lycopersicon pimpinellifolium* and *L. esculentum* during short- and long-term exposures to NaCl. *Physiologia Plantarum*, 1996, 97(3): 583-591.
- [18] Zhong H, Lauchli A. Spatial distribution of solute, K, Na, Ca and their deposition rates in the growth zone of primary cotton roots: Effects of NaCl and CaCl_2 . *Planta*, 1994, 194(1): 34-41.
- [19] Talukdar D. Exogenous calcium alleviates the impact of cadmium-induced oxidative stress in *Lens culinaris* medic. Seedlings through modulation of antioxidant enzyme activities. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2012, 15(4): 325-334.
- [20] Colmer T D, Fan T W M, Higashi R M, Läuchli A. Interactive effects of Ca^{2+} and NaCl salinity on the ionic relations and proline accumulation in the primary root tip of *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, 1996, 97(3): 421-424.
- [21] McLaughlin M J, Singh B R. Cadmium in Soils and Plants. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [22] Tang L, Chen Y, Wang W. Reversed phase high performance liquid chromatography analysis of chlorophyll derivatives in *Ginkgo* (*Ginkgo biloba* L.) leaves. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(2): 265-267.
- [23] Shen C G, Zhang F S, Mao D R. Advances in degradation metabolism of chlorophyll during plant leaf senescence. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15(S1): 41-46.
- [24] Ghosh A K, Sen S, Palit S, Ghosh A, Sharma A, Talukder G. Comparative efficacy of chlorophyllin in reducing cytotoxicity of some heavy metals. *Biology of Metals*, 1991, 4(3): 158-161.
- [25] Dong C X, Zhou J M, Zhao S J, Wang H Y. Effects of exogenous Ca on some physiological characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum*) seedlings with different Ca sensitivity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 267-272.
- [26] Qiu D L, Liu X H, Guo S Z. Regulation function of calcium on photosynthesis of *Dimocarpus longana* Lour. cv. Wulongling under simulated acid rain stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1072-1076.
- [27] Wang A G. The oxygen metabolism in plant // Yu S W, Tang Z C, eds. *Plant Physiology and Molecular Biology*. Beijing: Science Press, 1998: 366-389.
- [28] Xiao X Y, Liao X Y, Chen T B, Zhang Y Z. Effects of arsenic and calcium on metal accumulation and translocation in *Pteris vittata* L.. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1477-1487.
- [29] Hall D O, Rao K K. Photosynthesis. 5th ed. London: Cambridge University Press, 1994: 76-165.
- [30] Crane F L, Bar R. Function of calcium in chloroplasts // Trewavas A J, ed. *Molecular and Cellular Aspects of Calcium in Plant Development*. New York: Plenum Press, 1986: 269-276.
- [31] Handreck K A. Growth of ferns in soil less media, as affected by pH, iron and calcium/magnesium ratio. *Scientia Horticulturae*, 1992, 50(1/2): 115-126.
- [32] Mengel K, Kirkby E A. Principles of Plant Nutrition. Worblaufen-Bern: International Potash Institute, 1978.
- [33] Skórzyńska-Polit E, Tukendorf A, Selstam E, Baszyński T. Calcium modifies Cd effect on runnerbean plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 40(3): 275-286.
- [34] Sarret G, Harada E, Choi Y E, Isaure M P, Geoffroy N, Fakra S, Marcus M A, Birschwils M, Clemens S, Manceau A. Trichomes of tobacco excrete zinc as zinc-substituted calcium carbonate and other zinc-containing compounds. *Plant Physiology*, 2006, 141(3): 1021-1034.
- [35] Grattan S R, Grieve C M. Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1992, 38(4): 275-300.
- [36] Sagi M, Dovrat A, Kipnis T, Lips H. Ionic balance, biomass production, and organic nitrogen as affected by salinity and nitrogen source in annual ryegrass. *Journal of Plant Nutrition*,

- 1997, 20(10): 1291-1316.
- [37] Ruiz D, Martinez V, Cerda A. Citrus response to salinity: Growth and nutrient uptake. *Tree Physiology*, 1997, 17(3): 141-150.
- [38] Cohen C K, Fox T C, Garvin D F, Kochian L V. The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants. *Plant Physiology*, 1998, 116(3): 1063-1072.
- [39] Gong M, Chen S N, Song Y Q, Li Z G. Effect of calcium and calmodulin on intrinsic heat tolerance in relation to antioxidant systems in maize seedlings. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1997, 24(3): 371-379.
- [40] Gong M, van der Luit A H, Kinght M R, Trewavas A J. Heat shock induced changes in intracellular Ca^{2+} level in tobacco seedlings in relation to thermo tolerance. *Plant Physiology*, 1998, 116(1): 429-437.
- [41] Hanson J B. The functions of calcium in plant nutrition. *Advanced Plant Nutrition*, 1984, 1: 149-208.
- [42] McLaughlin M J, Singh B R. Cadmium in Soils and Plants. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [43] Cheng S H, Willmann M R, Chen H C, Sheen J. Calcium signaling through protein Kinases. The Arabidopsis calcium-dependent protein kinase gene family. *Plant Physiology*, 2002, 129(2): 469-485.
- [44] McLaughlin S B, Wimmer R. Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytology*, 1999, 142(3): 373-417.
- [45] Sander D, Pelloux J, Brownlee C, Harper J F. Calcium at the crossroads of signaling. *Plant Cell*, 2002, 14(S1): S401-S417.
- [46] Trewavas A. Le calcium, C'est la vie: Calcium makes waves. *Plant Physiology*, 1999, 120(1): 1-6.
- [47] Kinoshita T, Nishimura M, Shimazaki K. Cytosolic concentration of Ca^{2+} regulates the plasma membrane H^{+} -ATPase in guard cells of fava bean. *Plant Cell*, 1995, 7(8): 1333-1342.
- [48] 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): 256-264.
- 参考文献:**
- [2] 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.
- [3] 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] 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.
- [8] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响. *植物营养与肥料学报* 2001, 7(1): 78-87.
- [9] 陈晓玲, 余土元, 秦华明, 梁雪莲, 吴培钿, 伦锦华, 周玲艳. 钙对铬胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响. *玉米科学* 2009, 17(4): 74-78.
- [12] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [14] 张帆, 罗承德, 张健. 外源钙、磷、氮对铝胁迫下杉木幼苗生长影响的调控研究. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 213-217.
- [22] 唐蕾, 陈蕴, 王武. 银杏叶中叶绿素衍生物的反相高效液相色谱分析. *植物生理学通讯*, 2006, 42(2): 265-267.
- [23] 沈成国, 张福锁, 毛达如. 植物叶片衰老过程中叶绿素降解代谢研究进展. *植物学通报*, 1998, 15(增刊): 41-46.
- [25] 董彩霞, 周健民, 赵世杰, 王火焰. 外源钙对不同钙敏感型番茄幼苗生理特性的影响. *应用生态学报* 2005, 16(2): 267-272.
- [26] 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 模拟酸雨胁迫下钙对龙眼光合功能的调节作用. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1072-1076.
- [27] 王爱国. 植物的氧化代谢 // 于叔文, 汤章成主编. 植物生理与分子生物学. 北京: 科学出版社, 1988: 366-389.
- [28] 肖细元, 廖晓勇, 陈同斌, 张杨珠. 砷、钙对蜈蚣草中金属元素吸收和转运的影响. *生态学报*, 2003, 23(8): 1477-1487.
- [48] 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): 256-264.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advance in the study on drought index LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill
sludge CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

Autecology & Fundamentals

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant
plants and soil in alpine meadow LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)

- Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

Population, Community and Ecosystem

- The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)
- Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)
- The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)
- Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)
- Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)
- Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)
- Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)
- Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

Resource and Industrial Ecology

- The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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 90 元/册,全年定价 2160 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

本期责任副主编 象伟宁

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 34 卷 第 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 5 (March, 2014)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元