

不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响

梁 程, 林匡飞, 张 雯, 周 健, 韩晓琳

(上海市功能性材料化学重点实验室 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237)

摘 要:以淮稻 6 号为试验材料,采用水培的方法,研究了不同硫(S)浓度下(9、720 mg·L⁻¹)硒(Se)(5 mg·L⁻¹)和镉(Cd)(1、10 mg·L⁻¹)交互胁迫对水稻幼苗一些生理特性的影响,主要研究指标包括生物量、巯基物质含量和硒、镉含量。结果表明:(1)Cd 对水稻幼苗各部分生长状况抑制能力大小不同,其对根长的抑制作用明显大于对茎长的抑制;(2)在无 Se 条件下,随着 Cd 浓度的增加,Cd 对水稻幼苗生长的毒性不断增大,在加入一定浓度的 Se 后,Cd 的毒性作用得到缓解;(3)在不同浓度 S 处理和 Se、Cd 交互胁迫下,随着 S 浓度增大,Cd 对水稻幼苗毒性作用减轻;但高浓度的 S 处理反而对 Cd 与 Se 交互实验中 Cd 的毒性产生协同作用;(4)高浓度的 S 处理可以抑制水稻幼苗对 Se 的吸收;(5)巯基物质含量随着胁迫时间的增加呈先上升后下降的趋势。在 Se、Cd 交互实验中,低浓度 S 处理可以提高水稻幼苗中 GSH 和 PCs 的含量,从而促进植株体内重金属和 PC 的络合作用,缓减 Cd 对水稻幼苗的毒害。

关键词:水稻;镉;硫;硒;生长量;非蛋白巯基

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)05-0857-10

Effects of Sulfur and Selenium Treatment on Plant Growth and Some Physiological Characteristics of Rice Under Cadmium Stress

LIANG Cheng, LIN Kuang-fei, ZHANG Wen, ZHOU Jian, HAN Xiao-lin

(Shanghai Key Laboratory of Functional Materials Chemistry; State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, Shanghai 200237, China)

Abstract: Sulfur and selenium are important components in the defense system of plants. To better understand the interactions between sulfate and selenium in plant response to cadmium stress, changes in plant growth and the content of non-protein thiols (NPT, GSH, PC) were investigated in No.6 Huai rice seedlings grown hydroponically with Cd, with or without applications of sulfate and selenium. Results indicated that higher concentration of Cd (10 mg·L⁻¹) caused decreases of plant growth, dry mass of rice seedlings and enhancement of Cd content in plant. As compared to the control, the higher concentration of S (720 mg·L⁻¹) supply alone decreased Cd accumulation in rice due to the decrease of Cd availability and the alleviation effects of glutathione in rice as well as the a diminishing of the PC content. In presence of Se (5 mg·L⁻¹), addition of 9 mg·L⁻¹ exogenous sulfates to the medium significantly increased the plant growth, the content of non-protein thiols (NPT, GSH, PC) and clearly decreased the content of Se in rice seedlings as compared to that of Se and Cd treatment alone. A combination of Se (5 mg·L⁻¹)-S (720 mg·L⁻¹) treatment led to a decrease of rice plants size, dry mass and Se content, so did the content of non-protein thiols under cadmium stress.

Keywords: rice; cadmium; sulfur; selenium; plant growth; non-protein thiols

收稿日期:2011-10-24

基金项目:国家自然科学基金(20807028,40871223,40901148,41001316,20677025);环保公益性行业科研专项(200909089);中央高校基本科研业务费专项(WB0911011, WB0914041)

作者简介:梁 程(1987—),女,浙江人,硕士研究生,从事植物毒理学研究。E-mail:chanceliang87@gmail.com

* 通讯作者:林匡飞 E-mail:kflin@ecust.edu.cn

水稻作为亚洲地区主要粮食作物,在农业生产中占有重要地位。但是随着工业的发展,环境污染日益严重,重金属污染中尤其是镉污染不容忽视。镉为非营养元素,对植物具有明显的毒害作用,而且会通过食物链危及人体健康。如何缓解或者抑制植物镉的毒害,已经引起了人们的广泛关注。硒是动物和人体营养的必需微量元素,微量的硒对高等植物的生长有重要作用,是植物生长发育的一种有益元素。

据推测,硒的毒性机制是硒干扰了硫的代谢。在一些植物体内,硒可部分取代巯基(-SH)中的硫以几种硒代含硫氨基酸的形式参与蛋白质的合成,从而对植物的氮代谢、硫代谢和氨基酸代谢产生影响^[1]。Wu 等^[2]研究表明,植物蛋白质中的硒含量与硒抑制植物生长成正比,说明硒对植物的毒性主要是硒同化后进入蛋白水平上起作用。

硫是植物必需的 6 种大量元素之一,在植物体内的含量为 3%~5%,主要以半胱氨酸和甲硫氨酸残基形式存在于蛋白质中^[3],它主要被用在肥料中,也被广泛用在火药、润滑剂、杀虫剂和抗真菌剂中。近年来,国内外对硫的吸收和代谢研究给予很大的关注,部分原因是人们对植物重金属抗性机制研究涉及到与硫同化有关的 PC 合成途径^[4-5]。

硒与硫是同族元素, SO_4^{2-} 与 SeO_4^{2-} 有相似的化学性质,在植物根吸收营养物质的过程中,硫是影响植物吸收 Se 的一个重要因素^[6]。硫成为 Se 与 Cd 交互作用机理研究的关键因素,以往生物体 Se 与 Cd 交互作用机理研究时,没有考虑供试基体或动物活体中硫的浓度,特别是在土壤-植物系统研究中没有考虑土壤中硫的含量(水培液中加入了 SO_4^{2-}),直接影响 Se 与 Cd 交互作用的研究结果。本试验通过设计一套试验方法来研究在硫限制下 Se 与 Cd 交互作用对水稻幼苗的生理特性影响,为解释 Se 对水稻体内 Cd 的解毒机理提供创新的技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以淮稻 6 号(由江苏省淮阴市农科所培育)为供试材料。镉胁迫采用氯化镉(CdCl_2 , 国药集团化学试剂有限公司, AR)配制,硒胁迫采用硒酸钠(NaSeO_4 , 国药集团化学试剂有限公司, AR)配制,外源硫用硫酸镁(MgSO_4 , 上海凌峰化学试剂有限公司, AR)配制。

1.2 培养与胁迫

选用饱满的种子,经 12%次氯酸钠溶液浸泡、消

毒 30 min 后,用去离子水漂洗,移至培养皿中,置于 30 ℃培养箱中催芽,每日光照时间为 16 h,相对湿度 70%,以 Hoagland 营养液培养。由于硫元素是本实验的一个研究对象,所以营养液中以氯元素和氮元素代替硫元素。一周后对水稻幼苗进行暴毒,其中 Cd 胁迫浓度分别为 1、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,Se 胁迫浓度为 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (硒与镉浓度设置是根据部分文献报道,在不同浓度下硒与镉对植物体的危害临界值所选择)。S 的处理浓度分别为低硫(9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和高硫(720 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)(硫的浓度设置是根据植物正常生长所需要的硫的浓度而选择,且根据预实验所得结果,确定差异较为显著的两组——低浓度、高浓度)。水稻幼苗暴毒时间为 20 d,在处理第 5、10、15、20 d 收获水稻样品,每个处理设 3 个重复。每 2 d 用稀 HCl 和稀 NaOH 调 pH5.1~5.5,每日用去离子水补充水分蒸发部分,每周更换营养液 1 次。

1.3 测定方法

1.3.1 生长指标测定

样品采集后,用去离子水清洗,然后将水稻幼苗从基部剪开,测量地上部和根部的生长量,然后将水稻鲜样置于 90 ℃杀青 15 min,100 ℃烘至干样品恒重后分别称得地上部分和地下部分的干重。

1.3.2 Se、Cd 含量的测定

将水稻幼苗的干样粉碎后微波消解,分别用原子荧光法测定样品中的硒含量,用原子吸收法测定样品中的镉含量。

1.3.3 GSH 和 NPT 含量的测定

非蛋白质态巯基总量(TNP-SH)的测定采用比色法^[7]。称 0.3 g 水稻幼苗鲜样放于研钵中,加入预冷的 5%(V/V)磺基水杨酸(SSA,含 6.3 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ DTPA, pH<1)3 mL 和少量石英砂,冰浴上充分研磨,4 ℃低温离心(10 000 g)15 min,上清液冷藏用于 TNP-SH 的测定。取上清液 0.25 mL,加 0.5 mL 磷酸缓冲液(0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH7.5)和 3 mL 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DTNB,室温下放置 20 min,然后在 412 nm 波长下用分光光度计比色测定。以等量的未加 DTNB 的溶液作为对照。以 GSH 为 2-SH 标样,制作标准曲线。

谷胱甘肽(GSH)的测定采用比色法^[8]。称 0.3 g 水稻幼苗的鲜样放于研钵中,加入预冷的 5% TCA 溶液 3 mL 和少量石英砂,冰浴上充分研磨,4 ℃低温离心(18 000 g)15 min,上清液冷藏用于 GSH 的测定。取上清液 0.25 mL,加入 0.25 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ pH8.0 的 Tris-HCl 缓冲液 0.5 mL,摇匀,再加入 3%甲醛 0.25 mL,摇匀,室

温下分别准确静置 20 min 后,立刻加入预先恒温于 25 ℃水浴中的 DTNB 分析溶液 3 mL,摇匀,准确静置 5 min 后,立刻在波长为 412 nm 处测定吸光度 A。

植物螯合肽(PC)的测定采用差减法^[9]。测定植物组织内 PC 的诱导合成量,即:植物螯合肽(PC)=非蛋白质态巯基总量(TNP-SH)-谷胱甘肽含量(GSH)。

1.4 数据分析方法

采用 Excel 2003、Origin Pro 8.0 和 SPSS 16.0 软件对相关数据进行处理和统计分析。组内差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA, LSD)方法在 $\alpha=0.05$ 水平下测定。

2 结果与分析

2.1 不同处理下水稻生长指标的变化

无论在低 Cd 还是高 Cd 胁迫下,水稻幼苗的生长均受到明显的抑制,随着 Cd 浓度的上升,其抑制程度也增加(图 1)。对照空白, Cd=1 mg·L⁻¹ 时,在低浓度 S 和 Se 胁迫时,水稻幼苗地上部和根部的生长量随着胁迫时间的延长均受到抑制,生长缓慢,但是总体呈增长趋势($P<0.05$),在第 15 d 时,对照空白地上部分和根的生长抑制率分别为 6.2%和 7.9%,地上部分和根的干重抑制率分别为 11.7%和 12.5%;高浓度 S 处理下,水稻的地上部和根部生长量和干重增长趋势最好,在第 20 d 时,相对空白的生长和干重增长率分别为 18.1%、2.4%和 27.3%、6.8%。Cd=10 mg·L⁻¹ 时,与空白相比,高浓度 Cd(10 mg·L⁻¹)胁迫下对水稻幼苗生长的抑制作用更加明显, S 处理可促进植株的生长,其中高浓度 S 处理下水稻的生长趋势明显,在第 20 d 时,其地上部和根部的生长量和干重较空白分别为 29.8%、4.7%和 5.6%、4.4%;高浓度 S 和 Se 胁迫下,在第 20 d 时,水稻幼苗地上部分和根部生长量和干重的抑制率分别为 6.3%、9.8%和 16.3%、9.9%。在高 Cd(10 mg·L⁻¹)胁迫的条件下,低浓度 S 处理对 Cd 胁迫的缓解效应不明显。

2.2 不同处理下 Cd 的含量变化

水稻幼苗地上部和根部 Cd 含量均表现为随胁迫时间的增加而增加,且根部大于地上部($P<0.05$), S 处理有助于一定程度上缓解水稻幼苗的重金属毒害(图 2)。Cd=1 mg·L⁻¹ 时,在第 20 d 高浓度 S 处理与低浓度 S 处理相比,水稻幼苗的地上部和根部的 Cd 含量分别减少 3.9%和 18.3%。Cd=10 mg·L⁻¹ 时,在第 20 d 高浓度 S 处理与低浓度 S 处理相比,水稻幼苗地上部和根部的 Cd 含量分别减少 20.4%和 13%。

Se 的胁迫抑制了水稻幼苗地上部和根部对 Cd 的吸收,而减缓 Cd 在水稻幼苗中的累积。由图 3 可知, Cd=1 mg·L⁻¹ 时,在第 20 d 有 Se 胁迫的水稻幼苗较无 Se 胁迫的水稻幼苗的地上部和根部的 Cd 含量减少了 15.6%和 24.5%; Cd=10 mg·L⁻¹ 时,在第 20 d 有 Se 胁迫的水稻幼苗较无 Se 胁迫的水稻幼苗的地上部和根部的 Cd 含量减少了 13.4%和 5.5%。

由图 4 可知,高浓度 S 处理下 Se、Cd 胁迫抑制了水稻幼苗的生长,使水稻幼苗中的 Cd 含量较无 S 处理下的 Cd 含量大。其中 Cd=1 mg·L⁻¹ 在第 20 d 时,高浓度 S 处理 Se、Cd 胁迫比无 S 处理的地上部和根部的 Cd 含量高 14.7%和 11.8%。Cd=10 mg·L⁻¹ 时,高浓度 S 处理下 Se、Cd 胁迫的水稻幼苗的 Cd 含量增长趋势明显($P<0.05$),在第 20 d 时较无 S 处理的 Se、Cd 胁迫地上部和根部分别增加 13.2%和 8.2%。

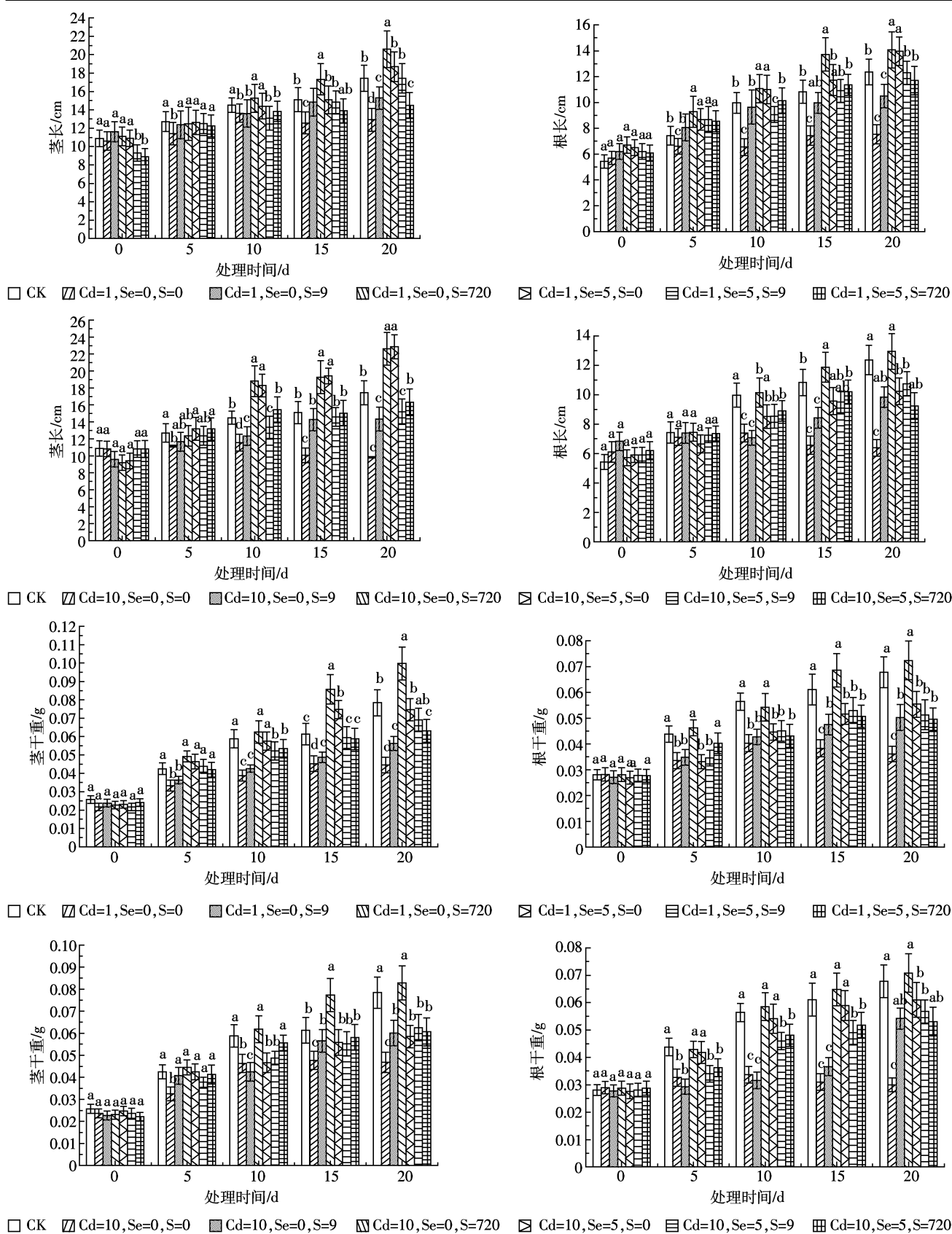
2.3 Cd 胁迫下 S 浓度对水稻 Se 累积的影响

在相同浓度的 Se 胁迫下,无论高浓度的 Cd 还是低浓度的 Cd,水稻幼苗中 Se 含量均随着 S 浓度的增加而减少(图 5),随着胁迫时间的增加水稻幼苗中 Se 含量总体呈增长趋势($P<0.05$)。Se、Cd 胁迫时,水稻幼苗茎部的 Se 含量增长较地上部缓慢。当 Cd=1 mg·L⁻¹ 时,低浓度 S 处理对水稻幼苗的 Se 吸收影响较小;高浓度 S 处理使水稻幼苗中 Se 的累积趋势减缓。低浓度 S 处理时,水稻幼苗地上部和根部的 Se 含量较无 S 处理分别降低了 18.3%和 9.7%;高浓度 S 处理时,水稻幼苗地上部和根部的 Se 含量较无 S 处理分别降低了 31.8%和 12.8%。当 Cd=10 mg·L⁻¹ 时,低浓度 S 处理水稻幼苗地上部和根部的 Se 含量较无 S 处理分别降低了 37.2%和 6.7%;高浓度 S 处理时,水稻幼苗地上部和根部的 Se 累积量较无 S 处理分别降低了 46.2%和 20.4%。

2.4 不同处理下水稻 GSH、NPT 和 PC 含量变化

2.4.1 NPT 含量变化

图 6 显示,不同硫浓度处理时,硒镉胁迫下水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量均显著高于对照($P<0.05$)。Cd=1 mg·L⁻¹ 时,不同浓度 Cd、S 处理的水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量均比空白大,但增量不明显;对比无 S 处理的 Se、Cd 共同胁迫和有 S 处理的 Se、Cd 共同胁迫时,水稻幼苗的地上部和根部中 NPT 含量均有明显的先增后降趋势($P<0.05$),且均在第 15 d 时 NPT 含量最大,其中 Se、Cd 胁迫时,水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量较空白分别增加了 165.5%和 135%;低浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下水稻幼苗地上



注:CK 为正常硫培养下的水稻幼苗空白

图 1 不同处理下水稻幼苗茎长、根长、地上部和根系干质量的动态变化

Figure 1 Dynamic variations of plant stem length, root length, stem and root dry mass of rice under different treatments

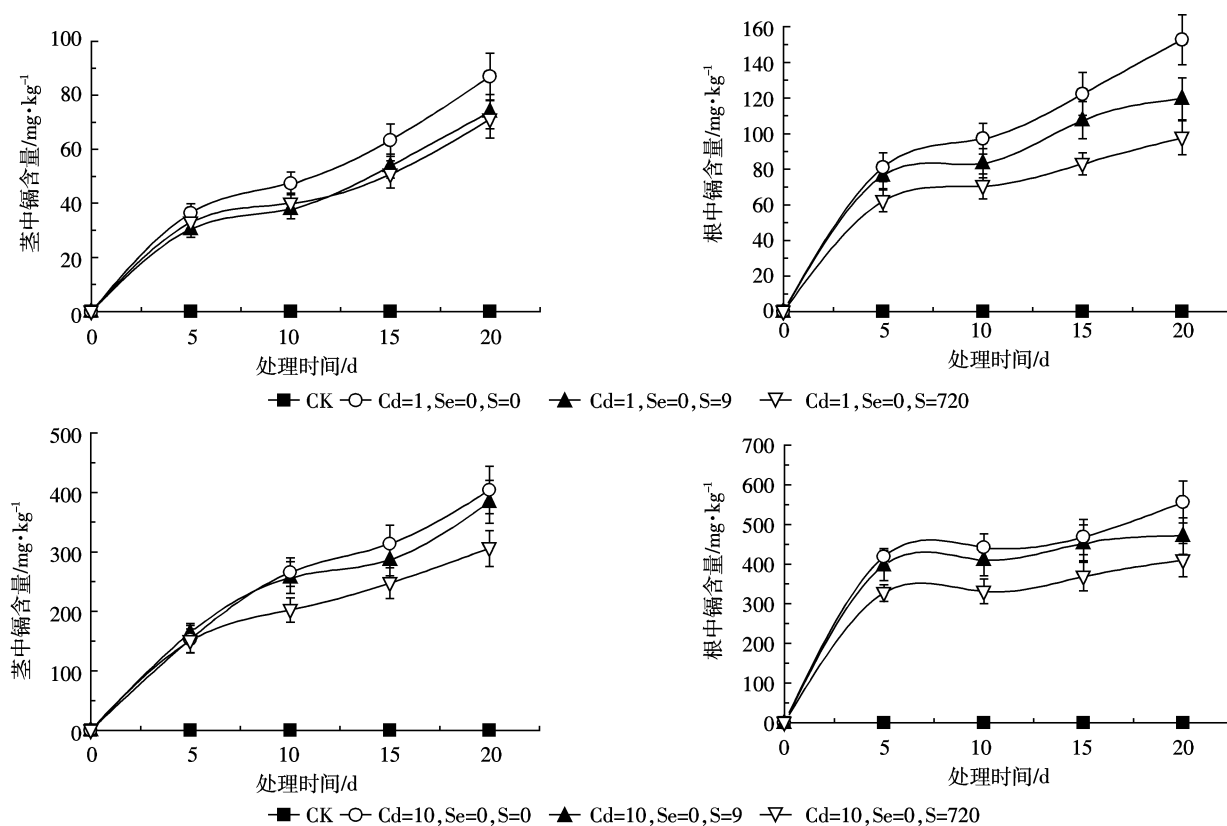


图 2 不同硫浓度处理下水稻植株 Cd 含量的动态变化

Figure 2 Dynamic variation of Cd content in rice under different S treatments

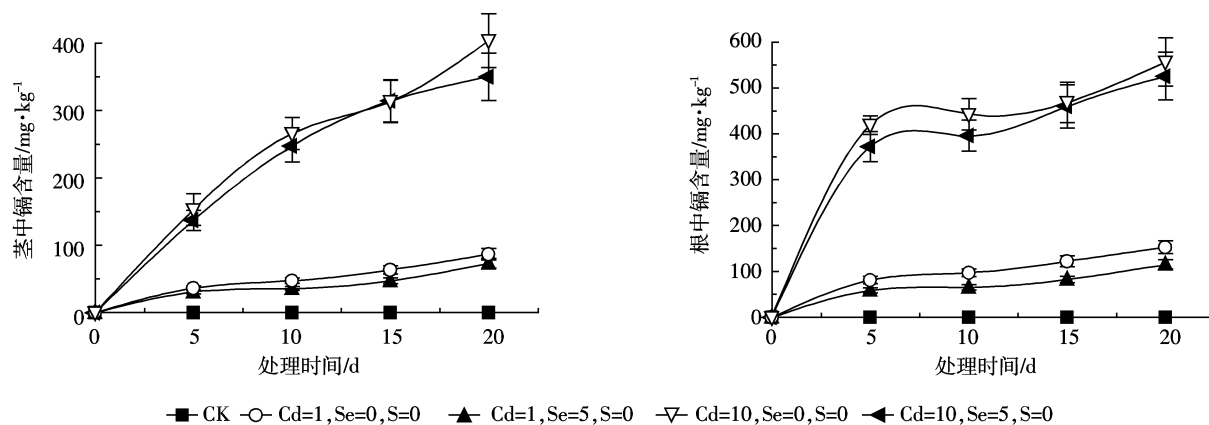


图 3 Se 处理下水稻植株 Cd 含量变化

Figure 3 Cd content in rice under Se treatment

部和根部的 NPT 含量较空白增加了 77.4% 和 144.1%；高浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量较空白增加 159.4% 和 74.9%。Cd=10 mg·L⁻¹ 时,在第 15 d 水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量也达到最大,在 Se、Cd 处理下,对照空白水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量增加 159.4% 和 150.8%；低浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下,对照空白水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量增长

138.1% 和 123%；高浓度 S 处理和 Se、Cd 处理下对照空白水稻幼苗地上部和根部的 NPT 含量增长量则仅为 98.6% 和 83.9%。

2.4.2 GSH 含量变化

由图 6 还可看出,无论低 Cd 胁迫还是高 Cd 胁迫下,水稻地上部分和根部 GSH 含量均受到 Cd 诱导而增加 ($P<0.05$)。Cd=1 mg·L⁻¹ 时,低浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下,在第 15 d 水稻地上部和根部 GSH 含

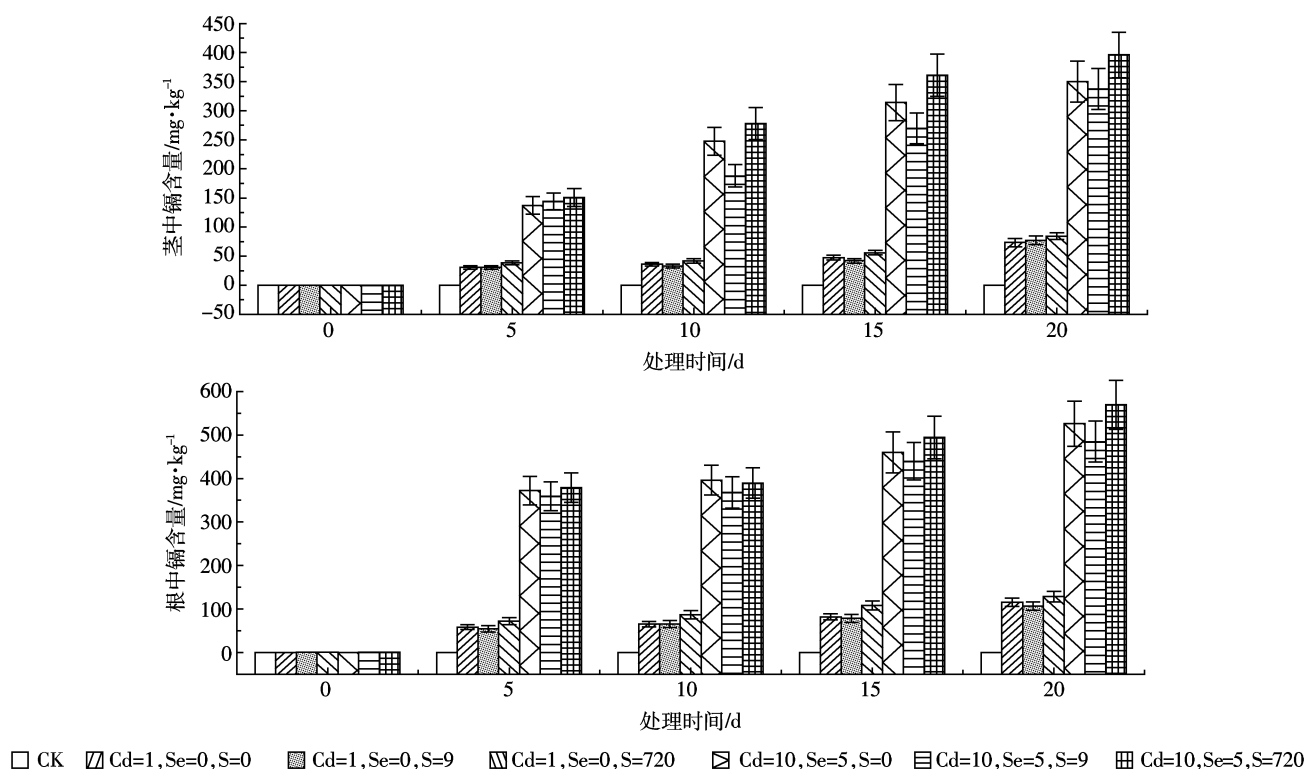


图 4 硒硫处理下水稻植株镉含量变化

Figure 4 The content of Cd in rice under a combination of S-Se treatment

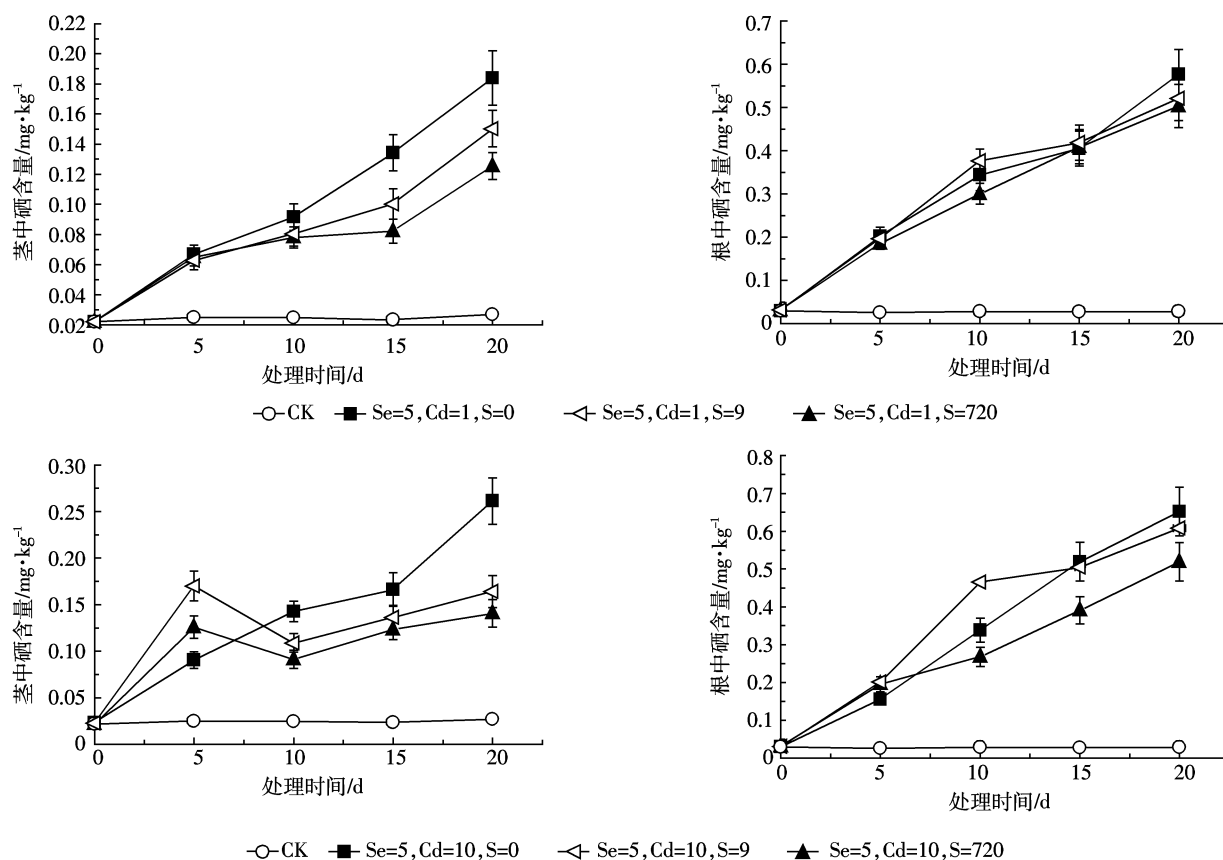
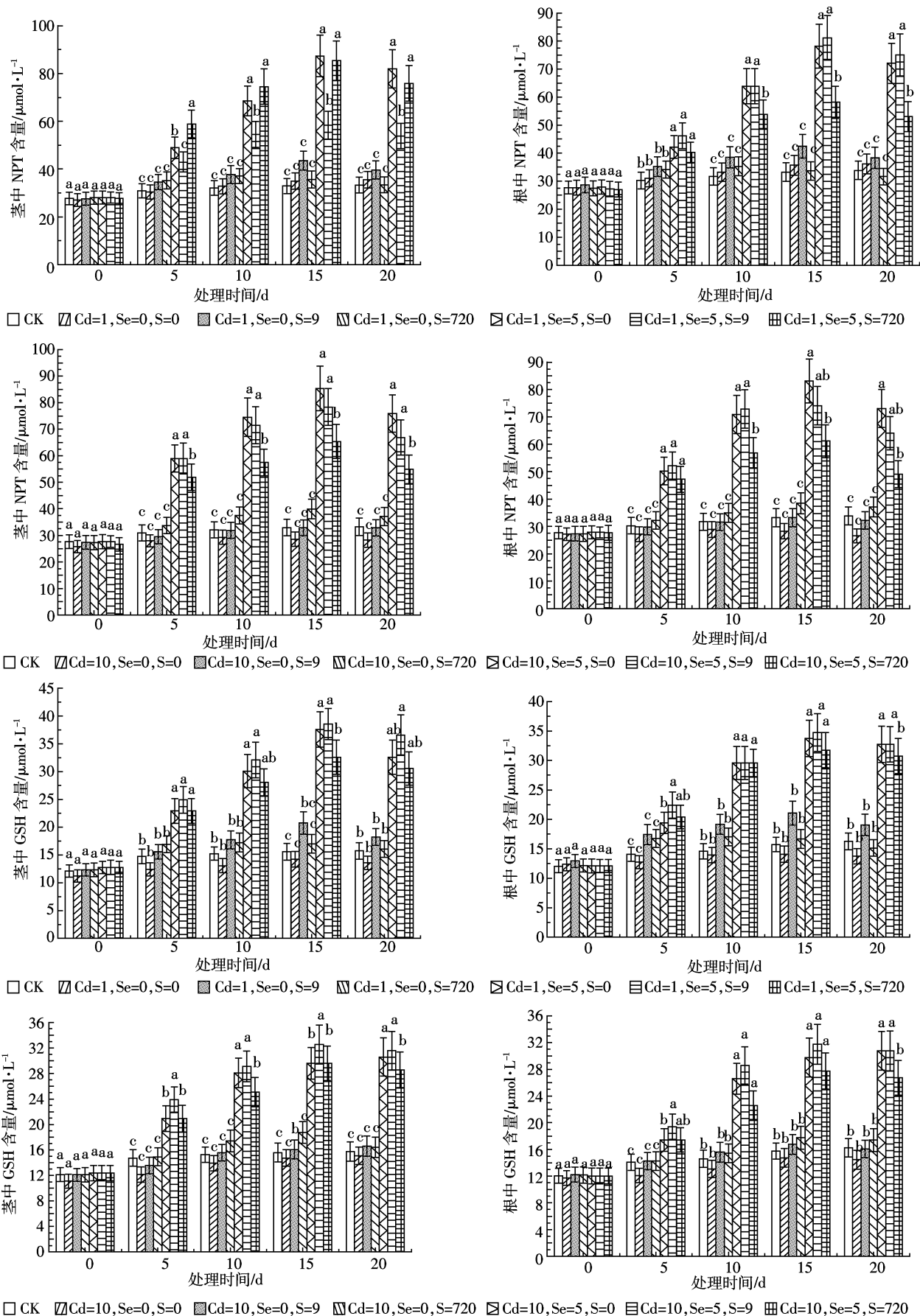


图 5 镉胁迫下水稻植株 Se 含量随硫处理浓度的变化

Figure 5 The content changes of Se in rice under Cd stress and different S treatments



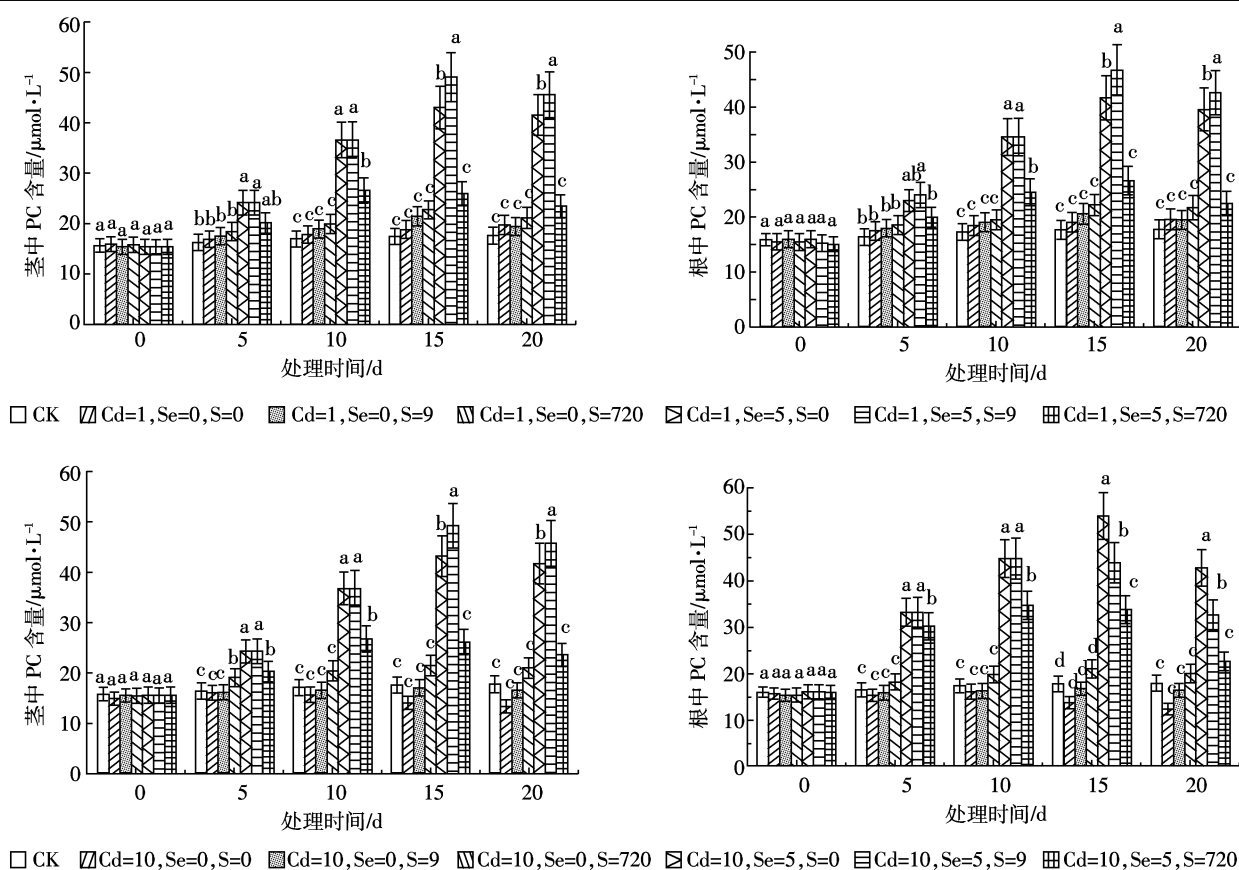


图6 不同处理下水稻 NPT、GSH 和 PC 含量的动态变化

Figure 6 Dynamic variation of NPT, GSH and PC contents of rice under different treatments

量达到最高,对照空白 GSH 增幅分别为 141.3%和 114.3%;低浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下对照空白水稻幼苗的地上部和根部的 GSH 增幅分别为 147.6%和 120.6%;高浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下对照空白水稻幼苗的地上部和根部的 GSH 增幅分别为 109.1%和 101.6%。Cd=10 mg·L⁻¹ 时,在第 15 d 比较空白,Se、Cd 处理地上部和根部分别增加 89.8%和 88.9%;低浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下为 109.1%和 101.6%;高浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下则为 89.8%和 76.2%。此外,S、Cd 胁迫下的 GSH 合成量随胁迫时间的延长含量差异并不明显;在 Se、Cd 交互胁迫、不同 S 浓度的处理下,尽管较空白水稻幼苗的 GSH 的合成量大大增加,但 GSH 的合成量随胁迫时间的变化也并不明显。

2.4.3 PC 含量变化

水稻幼苗中 PC 的含量变化与 NPT 含量的变化相似(图 6)。Cd 处理明显诱导了 PC 的合成。Cd=1 mg·L⁻¹ 时,高浓度 S 处理和 Cd 胁迫下的 PC 含量高于低浓度 S 处理和 Cd 胁迫下的 PC 含量,在第 15 d

时,高浓度 S 处理水稻幼苗地上部和根部的 PC 增加量分别为空白的 30%和 25.7%,低浓度 S 处理水稻幼苗地上部和根部的 PC 增加量分别为空白的 22.9%和 16.5%。Se、Cd 交互胁迫时,水稻幼苗地上部和根部的 PC 增加量分别为空白的 146.9%和 136.6%;低浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下,随着胁迫时间的延长,PC 在幼苗体内的累积量显著增加,在第 15 d 时达到最大,其地上部和根部的 PC 合成增加量分别为空白的 181.5%和 165.1%。而高浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下 PC 含量随时间的变化则不显著,仅为 48.8%和 50.9%。Cd=10 mg·L⁻¹ 时,高浓度 S 处理和 Cd 胁迫下 PC 合成量随时间的变化趋势与低浓度 S 处理和 Cd 胁迫下相似,PC 的含量随 S 浓度和胁迫时间的增加而增加。Se、Cd 交互胁迫时,水稻幼苗地上部和根部较空白的增幅分别为 146.9%和 205.1%;低浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下为 181.5%和 148%;而高浓度 S 处理和 Se、Cd 胁迫下仅为 48.8%和 90.9%。

综上所述,Se、Cd 胁迫下水稻幼苗中的 PC 含量较加 S 处理、Se、Cd 胁迫下水稻幼苗中 PC 含量高,且随

着 S 浓度的加大,PC 含量随胁迫时间的增加而减少。

3 讨论

S 是植物必需的一种营养元素,其吸收和同化对于植物合成巯基物质和减少重金属胁迫十分重要^[10-11]。而硒不仅是人体和动物生理活动必需的重要微量元素,也是植物生长发育的有益元素。硒与重金属元素的相互作用主要表现为对重金属的拮抗作用,主要是通过和重金属结合成难溶性复合物,抑制水稻对重金属的吸收而减缓重金属在植株体内的累积。本试验探讨了不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响,结果表明,增 S 处理缓解了缺 S 水稻幼苗地上部和根部的 Cd 胁迫,且高浓度 S 对水稻幼苗 Cd 胁迫的缓解程度高于低 S 水平,受此影响,水稻幼苗的株高、根长、生物量等指标较缺 S 单 Cd 胁迫下的水稻幼苗均有所上升,但低于空白。Maria 等^[12]研究结果表明,小麦地上部对 Cd 毒害效应更明显,增加趋势较根部高,本研究结果与其一致。

李登超等^[13]研究结果表明,低硫水平时加低浓度硒能促进小白菜的生长,加高浓度的硒则抑制植株生长;高硫水平时加硒均抑制植株生长。一定的 Cd 胁迫下,低 S 和 Se 的添加使水稻幼苗的生物量指标上升,水稻幼苗体内的 Cd 含量下降;但高 S 加 Se 处理下,水稻幼苗的生物指标下降,幼苗体内的镉含量增加,这可能与高硒抑制其内源保护酶系统有关。由图 5 可见,Se、Cd 交互胁迫时,水稻幼苗的 Se 含量随着 S 浓度的增大而减少。说明在 Se 胁迫下,S 在一定程度上抑制了水稻幼苗对 Se 的吸收。

植物耐 Cd 胁迫机制的一个重要方面是巯基物质(GSH、PC)与进入细胞的 Cd 络合^[14-15],然后将其转移至液泡中储存^[16]。细胞内巯基物质的含量与供 S 水平和 Cd 胁迫程度等因素密切相关^[17]。廖宝凉等^[18]研究表明,低浓度的硒对砷的毒性具有拮抗作用,而较高浓度的硒对砷的毒性具有协同作用;并认为硒对砷的拮抗作用是因在植物体内可能形成一种较为稳定而毒性低的硒-砷复合物,以此减轻砷对抗氧化酶活性的抑制作用而减轻活性氧自由基对植物的损伤。谭周磁等^[19]通过外施硒研究硒与重金属的相互作用时,也发现低浓度的硒能降低稻米中重金属镉的含量。本研究结果显示,Se、Cd 交互胁迫下水稻幼苗体内的 NPT、GSH 和 PC 含量显著增加,但低浓度 S 处理下的 NPT、GSH 和 PC 含量较高浓度 S 处理下的大,说明高浓度 S 抑制了巯基物质的合成。这也解释了 Se、Cd 交

互胁迫下 S 的处理并未能显著缓解 Cd 对水稻幼苗的毒害。

4 结论

本试验通过不同 S 浓度处理下 Se、Cd 交互胁迫对水稻幼苗的生理特性研究,明确了 Se、Cd、S 含量与水稻幼苗的生物量和巯基物质含量密切相关。通过以上研究,得出下述结论。

(1)Cd 对水稻幼苗各部分生长状况抑制能力大小不同,其中 Cd 对根长的抑制作用明显大于对茎长的抑制。

(2)在硒镉实验中,在无 Se 条件下,随着 Cd 浓度的增加,Cd 对水稻幼苗的生长毒性不断增大,在加入一定浓度的 Se 后,Cd 的毒性作用得到缓解。

(3)在不同浓度 S 处理和 Se、Cd 交互实验下,随着 S 浓度增大,Cd 对水稻幼苗毒性作用减轻;但高浓度的 S 处理反而对 Cd 与 Se 交互实验中的 Cd 毒性产生协同作用。

(4)高浓度的 S 处理可以抑制水稻幼苗对 Se 的吸收。

(5)巯基物质含量随着胁迫时间的增加呈先上升后下降的趋势。在 Se、Cd 交互实验中,低浓度 S 处理可以促进水稻幼苗中的 GSH 和 PCs 含量,从而提高植株体内重金属和 PC 的络合作用,缓减 Cd 对水稻幼苗的毒害。

参考文献:

- [1] A Shrift, Jane M Ulrich. Transport of selenate and selenite into *Astragalus* roots[J]. *Plant Physiology*, 1969, 44: 893-896.
- [2] Lin Wu, Zhang-Zhi Huang. Selenium accumulation and selenium tolerance of salt grass from soils with elevated concentration of Se and salinity[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1991, 22(3): 267-282.
- [3] Thomas Leustek, Kazuki Saito. Sulfate transport and assimilation in plants[J]. *Plant Physiology*, 1999, 120: 637-643.
- [4] Sanita di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants [J]. *Environ and Experimental Botany*, 1999, 41(2): 105-130.
- [5] Sangman Lee, Thomas Leustek. The affect of cadmium on sulfate assimilation enzymes in *Brassica juncea*[J]. *Plant Science*, 1999, 141(2): 201-207.
- [6] Bailey F C, Knight A W, Ogle R S, et al. Effect of sulfate level on selenium uptake by *Ruppia maritima* [J]. *Chemosphere*, 1995, 30(3): 579-591.
- [7] Rama Devi S, Prasad M N V. Copper toxicity in *Ceratophyllum demersum* L. (Coontail), a free floating macrophyte: Response of antioxidant enzymes and antioxidants[J]. *Plant Science*, 1998, 138(2): 157-165.
- [8] 赵旭东,魏东芝,万 群,等. 谷胱甘肽的简便测定法[J]. 药物分析杂

- 志, 2000, 20(1):34-37.
- ZHAO Xu-dong, WEI Dong-zhi, WAN Qun, et al. A simple method for rapid determination of reduced glutathione[J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2000, 20(1):34-37.
- [9] Poonam Bhargava, Ashish Kumar Srivastava, Snigdha Uimil, et al. Phytochelatins plays a role in UV-B tolerance in N_2 -fixing cyanobacterium *Anabaena doliolum*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 16(11): 1220-1225.
- [10] 孙雪梅, 杨志敏. 植物的硫同化及其相关酶活性在镉胁迫下的调节[J]. *植物生理与分子生物学报*, 2006, 32(1):9-16.
- SUN Xue-mei, YANG Zhi-min. Plant sulfate assimilation and regulation of the activity of related enzymes under cadmium stress[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(1):9-16.
- [11] 徐正浩, 沈国军, 诸常青, 等. 植物镉忍耐的分子机理[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6):1112-1116.
- XU Zheng-hao, SHEN Guo-jun, ZHU Chang-qing, et al. Molecular mechanisms of plant resistance to cadmium toxicity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6):1112-1116.
- [12] Maria Filek, Rucka Keskinen, Helina Hartikainen, et al. The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165:833-844.
- [13] 李登超, 朱祝军, 徐志豪. 不同硫水平下硒对小白菜生长及养分含量的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 29:402.
- LI Deng-chao, ZHU Zhu-jun, XU Zhi-hao. Effects of selenium on the growth and nutrient content at different sulphur level in pakchoi[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2003, 29:402.
- [14] 邬飞波, 张国平. 植物螯合肽及其在重金属耐性中的作用[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4):632-636.
- WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Phytochelatins and its function in heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4):632-636.
- [15] 孙 琴, 袁信芳, 王晓蓉. 环境因子对小麦体内镉的生物毒性和植物络合素合成的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7):1360-1365.
- SUN Qin, YUAN Xin-fang, WANG Xiao-rong. Effects of environmental factors on Cd biotoxicity and phytochelatin production in *Triticum aestivum*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7):1360-1365.
- [16] Steffens J C. The heavy metal binding peptides of plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1990, 41:552-575.
- [17] Stefania Astolfi, Sabrina Zuchi, Calvino Passera, et al. Role of sulfur availability on cadmium-induced changes of nitrogen and sulfur metabolism in maize(*Zea mays* L.) leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161:795-798.
- [18] 廖宝凉, 徐辉碧, 花 蓓, 等. 硒、砷在水稻体内的相互作用及其自由基机理的研究[J]. *广东微量元素科学*, 1996, 3(4):1-6.
- LIAO Bao-liang, XU Hui-bi, HUA Bei, et al. Study on the interaction between selenium and arsenic in rice[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1996, 3(4):1-6.
- [19] 谭周磁, 陈 平, 陈嘉勤, 等. 硒在水稻上的应用:Ⅲ. 稻田土壤硒含量及施硒对水稻产量与米质的影响[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 1997, 20(3):62-65.
- TAN Zhou-ci, CHEN Ping, CHEN Jia-qin, et al. The application of Se in rice: Ⅲ. The content of Se in paddy soil and the effect of rice yield and rice quality with Se additions[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 1997, 20(3):62-65.