

# 谷胱甘肽对铅胁迫下辣椒幼苗生理特性的影响

雷 阳<sup>1</sup>, 乔 宁<sup>1</sup>, 苗如意<sup>1</sup>, 杨玉花<sup>2</sup>, 吴越莉<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学园艺学院 太原 030031; 2. 农业农村部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室·山西农业大学农业基因与资源研究中心 太原 030031)

**摘要:** 为了探究谷胱甘肽(GSH)对辣椒铅抗性的作用机制,以晋椒 503 为试验材料研究铅(Pb)胁迫下不同浓度的 GSH 和丁硫堇(BSO)对辣椒幼苗各项生理生化参数的影响。结果表明,与 CK 相比,铅胁迫造成了辣椒幼苗的生物量、光合色素含量、抗氧化酶活性、AsA-GSH 循环(抗坏血酸-谷胱甘肽循环)效率均显著下降;在 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Pb 胁迫下,喷施 1.5、10、15 mmol·L<sup>-1</sup> GSH 均可显著增加辣椒幼苗的生物量,显著增加叶片中光合色素含量;喷施 5~10 mmol·L<sup>-1</sup> GSH 效果最好,相比于不喷施 GSH 可以显著提高抗氧化酶活性、AsA-GSH 循环关键酶活性,其中 CAT 活性分别增加了 60.19%和 50.26%, APX 活性增加了 65.29%和 66.53%, POD 活性增加了 92.71%和 78.01%, SOD 活性增加了 41.66%和 45.29%, MDHAR 活性增加了 41.92%和 44.27%, DHAR 活性增加了 53.14%和 61.00%, GR 活性增加了 50.52%和 65.63%,而添加 GSH 合成抑制剂丁硫堇则会逆转上述作用。综上所述,GSH 可有效缓解铅胁迫对辣椒造成的生理损害,进而提高辣椒抵抗铅胁迫的能力;15 mmol·L<sup>-1</sup> 的 GSH 会造成抗氧化酶和 AsA-GSH 循环关键酶的活性降低,但其主要原因为 GSH 降低了胁迫下活性氧对辣椒的生理损害,因此辣椒幼苗的生物量和光合色素含量并未减少。

**关键词:** 辣椒;铅胁迫;谷胱甘肽;生理特性

中图分类号: S641.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)05-074-07

## Glutathione affects physiological characteristics of pepper seedlings under severe lead stress

LEI Yang<sup>1</sup>, QIAO Ning<sup>1</sup>, MIAO Ruyi<sup>1</sup>, YANG Yuhua<sup>2</sup>, WU Yueli<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture, Shanxi Agriculture University, Taiyuan 030031, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Center for Agricultural Genetic Resources Research, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

**Abstract:** Pepper variety Jinjiao 503 was used as material to explore the mechanism of glutathione (GSH) on lead tolerance in pepper. Different concentration of GSH and BSO were tested and physiological and biochemical parameters of pepper seedlings were measured under lead stress. Lead stress caused a significant decrease in biomass, photosynthetic pigment content, antioxidant enzyme activity and ascorbic acid (AsA)-GSH cycle efficiency of pepper seedlings. Spraying 5-10 mmol·L<sup>-1</sup> GSH significantly increased the biomass of pepper seedlings, increased the photosynthetic pigment content in leaves, and increased the enzyme activities of POD, SOD, CAT, APX, GR, DHAR and MDHAR, while adding GSH synthesis inhibitor butinoline can reverse the above effects. The results showed that GSH can effectively alleviate the physiological damage caused by lead stress, and then improve the ability of pepper to tolerate lead stress; Although 15 mmol·L<sup>-1</sup> GSH can reduce the activities of antioxidant enzymes and key enzymes of AsA-GSH cycle, it does not harm the biomass and photosynthesis of pepper seedlings, which indicates that the enzyme activity is not completely equivalent to the strength of stress.

**Key words:** Pepper; Lead stress; GSH; Physiological characteristics

重金属铅(Pb)是植物体内的非必需元素,可造成植物细胞内活性氧(ROS)过量积累,进而导致植物生长迟滞、光合作用受阻,甚至细胞死亡等严重的生理胁迫<sup>[1]</sup>。随着我国工业化和城市化的持续发

展,工矿企业排放的三废、汽车尾气中的铅离子大量进入土壤和地下水中<sup>[2]</sup>。据统计,我国土壤中的铅等重金属污染情况极其严重,污染超标率高达 7.0%,而其中工业园区和矿区的土壤污染最为严重,

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2022-03-21

基金项目: 山西省青年基金(20210302124152); 中央引导地方科技发展专项资金(YDZJSX2021D003)

作者简介: 雷 阳,男,助理研究员,主要从事蔬菜栽培研究。E-mail: leiyanghd@163.com

超标率分别高达 29.4%和 33.4%<sup>[3]</sup>。山西省经济发展长期依赖重工业和矿产资源,土壤中的铅污染严重,已经成为经济转型、农业绿色发展的限制性因素。

谷胱甘肽(GSH)是谷氨酸、半胱氨酸和甘氨酸缩合而成的多肽类活性小分子<sup>[4]</sup>,一方面可直接或间接清除 ROS<sup>[5]</sup>,同时也能够通过形成多聚物进而螯合铅等重金属离子,降低重金属的胁迫危害<sup>[6]</sup>。 $\gamma$ -谷氨酰半胱氨酸合成酶( $\gamma$ -GCS)是合成 GSH 前体的关键酶,其活力直接决定了 GSH 合成速率,丁硫堇(BSO)是  $\gamma$ -GCS 的抑制剂,能够有效减少植物内源 GSH 含量<sup>[7]</sup>。Estrella-gómez 等<sup>[8]</sup>研究表明,小槐叶可通过激活 *SmGS* 基因的表达来增加谷氨酰胺合成酶(GS)合成量,进而提高 GSH 含量来应对铅胁迫对细胞的损害。Nahar 等<sup>[9]</sup>研究表明,GSH 可有效提高干旱胁迫下绿豆的生物量、光合色素含量、抗氧化酶活性,有效缓解干旱胁迫对绿豆幼苗生长的抑制作用。Zhou 等<sup>[10]</sup>的研究表明,GSH 可有效缓解盐胁迫对番茄光合作用的抑制,并提高抗氧化酶活性,而添加 BSO 则会起到与 GSH 相反的作用。

近年来,随着我国铅污染的情况不断恶化,科研工作者做了大量关于缓解植物铅胁迫的研究<sup>[11-12]</sup>。然而,关于 GSH 对铅胁迫下辣椒生理影响的研究尚未见报道。笔者针对山西省土壤的铅污染问题,探究了铅胁迫下不同浓度 GSH 和  $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  BSO<sup>[11]</sup>对辣椒幼苗各项生理指标的影响,旨在探讨 GSH 对辣椒逆境响应的调节机制,以期为辣椒耐重金属栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试辣椒品种为晋椒 503,由山西农业大学园艺学院辣椒育种团队提供。铅离子供体  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  和谷胱甘肽 GSH 均购自 Sigma 公司,BSO 购自北京百灵威科技有限公司。

### 1.2 方法

试验于 2020 年 3 月在山西农业大学(龙城校区)进行。选取均匀无病害的晋椒 503 辣椒种子,用灭菌水在室温下浸泡 4~5 h。然后用 75%乙醇冲洗 20 s,15% NaClO 冲洗 15 min,灭菌水洗涤 3 次,放入真空干燥箱  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干 30 min,播种于 72 孔的穴盘中, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (光/暗 12 h/12 h)光照培养箱中培养。培养 15 d 后,取长势一致的幼苗,分成 CK 对照组和 5 个处理组移栽至营养箱中,土壤营养液于处理

时直接加入,GSH 和 BSO 以叶片喷施的方式于每日 08:00 进行喷施,详见表 1。在处理 12 d 后测定根长、株高、地上/地下部干质量、根冠比等指标,每处理测定 3 株,3 次重复。将收集的辣椒幼苗从根部和茎部切开,分别于  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  杀青 15 min, $80 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干至质量恒定,分别称量地上部和地下部干质量,地下部干质量与地上部干质量之比即为根冠比。

表 1 试验处理

处理	土壤营养液	叶面营养液
CK	1/2Hoglang 营养液	蒸馏水
Pb	1/2Hoglang 营养液+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	蒸馏水
PbGSH1	1/2Hoglang 营养液+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	$1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ GSH
PbGSH5	1/2Hoglang 营养液+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	$5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ GSH
PbGSH10	1/2Hoglang 营养液+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	$10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ GSH
PbGSH15	1/2Hoglang 营养液+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	$15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ GSH
PbBSO	1/2Hoglang 营养液+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	$1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ BSO

### 1.3 幼苗生理指标的测定及方法

叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量的测定:避光条件下取晋椒 503 辣椒幼苗叶片 2 g,采用丙酮溶解法提取,然后分别在 470、649 和 665 nm 波长下测定。

采用 Murshed 等<sup>[13]</sup>的方法测定 AsA(抗坏血酸)、脱氢抗坏血酸(DHA)、GSH(谷胱甘肽)、氧化型谷胱甘肽(GSSG)含量以及超氧阴离子( $\text{O}_2^{\cdot-}$ )产生速率和  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量。采用苏州格锐思生物技术有限公司试剂盒测定过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)、谷胱甘肽还原酶(GR)和  $\gamma$ -GCS 酶活性。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2016 整理数据和作图;采用 SAS 1.2 分析数据,用 Duncan 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 谷胱甘肽对铅胁迫下辣椒幼苗生物量的的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,Pb 处理后辣椒幼苗根长、株高、地上部和地下部干质量以及根冠比均显著下降,降幅分别为 30.83%、18.93%、32.99%、59.00%、38.24%。在铅胁迫下,4 个喷施 GSH 处理比 Pb 处理幼苗根长、株高、地上部和地下部干质量

表2 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗生物量的影响

处理	根长/cm	株高/cm	地上部干质量/g	地下部干质量/g	根冠比
CK	6.52±0.18 a	17.54±0.09 a	2.94±0.12 a	1.00±0.03 a	0.34±0.02 a
Pb	4.51±0.11 d	14.22±0.15 d	1.97±0.10 d	0.41±0.02 d	0.21±0.01 c
PbGSH1	5.68±0.08 c	15.48±0.23 c	2.18±0.09 c	0.62±0.04 c	0.29±0.02 b
PbGSH5	6.16±0.09 b	16.35±0.45 b	2.67±0.10 b	0.73±0.01 b	0.27±0.01 b
PbGSH10	6.18±0.24 b	16.42±0.38 b	2.73±0.07 b	0.72±0.04 b	0.26±0.01 b
PbGSH15	6.10±0.14 b	16.37±0.22 b	2.77±0.12 b	0.71±0.02 b	0.26±0.01 b
PbBSO	4.05±0.24 e	13.22±0.47 e	1.82±0.09 d	0.33±0.03 e	0.18±0.02 c

注:表中同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

以及根冠比均显著提高;除根冠比外,喷施5、10、15 mmol·L<sup>-1</sup> GSH对辣椒幼苗生物量均显著高于1 mmol·L<sup>-1</sup>的GSH处理,而3个高浓度GSH处理之间幼苗生物量差异均不显著。与Pb处理相比,PbBSO则会显著降低辣椒幼苗根长、株高、地下部干质量,降低地上部干质量、根冠比。结果表明,GSH可有效缓解铅胁迫对辣椒幼苗的毒害,促进辣椒幼苗生物量的增加,但仍比CK有显著降低,未能恢复至CK的水平。

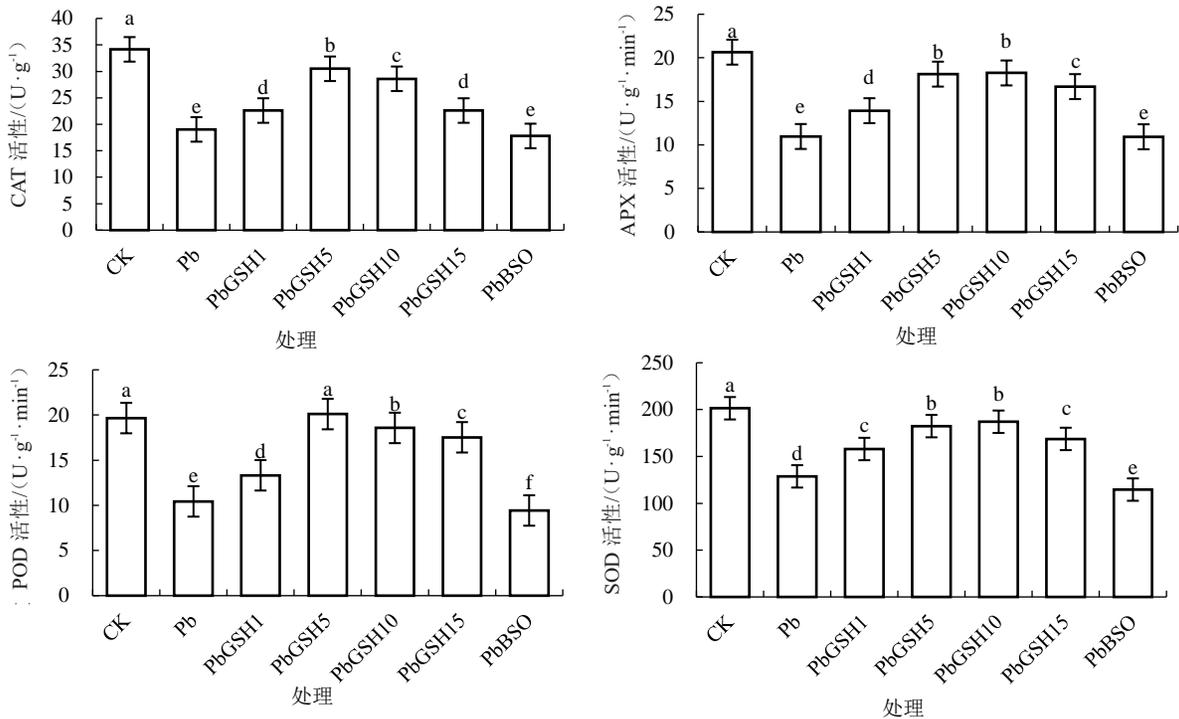
### 2.2 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗叶片光合色素含量的影响

由表3可知,与CK相比,Pb处理的叶片叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量均显著降低,降幅分别为46.83%、40.71%和49.17%。在铅离子胁迫下,4个喷施GSH处理与Pb处理相比,辣椒幼苗叶片的叶绿素a含量分别显著提高12.65%、49.38%、47.18%和49.90%,叶绿素b含量分别显著提高

33.20%、51.45%、54.15%和49.38%,类胡萝卜素分别显著提高18.75%、54.32%、62.20%和51.04%;其中PbGSH5、PbGSH10和PbGSH15光合色素含量均显著高于PbGSH1,而前三者之间差异均不显著。与其他处理相比,喷施BSO则会显著降低辣椒幼苗叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量和叶绿素a+叶绿素b的含量。表明GSH可有效缓解铅离子对辣椒光合色素的破坏,从而提升幼苗对铅胁迫的耐受性。

表3 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗光合色素的影响

处理	$\rho$ (叶绿素a)/(mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (叶绿素b)/(mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (类胡萝卜素)/(mg·L <sup>-1</sup> )
CK	28.98±0.33 a	8.13±0.26 a	13.22±0.46 a
Pb	15.41±0.44 d	4.82±0.05 d	6.72±0.34 d
PbGSH1	17.36±0.77 c	6.42±0.15 c	7.98±0.17 c
PbGSH5	23.02±0.37 b	7.30±0.32 b	10.37±0.23 b
PbGSH10	22.68±0.45 b	7.43±0.29 b	10.90±0.99 b
PbGSH15	23.10±0.32 b	7.20±0.36 b	10.15±0.11 b
PbBSO	10.90±0.39 e	4.31±0.12 e	5.35±0.51 e



注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

图1 GSH对铅胁迫下辣椒叶片抗氧化酶活性的影响

### 2.3 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由图1可知,与CK相比,Pb处理的叶片CAT、APX、POD和SOD活性均显著降低,降幅分别为44.28%、46.89%、46.94%和36.09%。在铅胁迫下,与Pb处理相比,外源GSH对辣椒叶片中的抗氧化酶活性均有显著提高。其中,PbGSH5处理的效果最为突出,其CAT和POD活性均显著高于其他GSH处理,APX和SOD活性均显著高于PbGSH1和PbGSH15,但与PbGSH10差异不显著。当GSH浓度达到 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,4种抗氧化酶活性均出现下降。与Pb处理相比,铅胁迫下喷施BSO,则会显著降低POD和SOD活性,而CAT、APX活性均

与Pb处理差异不显著。表明GSH对抗氧化物酶活性的影响具有两面性,低浓度的GSH可有效提升抗氧化酶活性,而过高的浓度则会降低其活性。

### 2.4 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗叶片AsA-GSH循环关键酶活性的影响

由图2可知,与CK相比,Pb处理辣椒幼苗叶片MDHAR、DHAR、GR和 $\gamma$ -GCS活性均显著降低,降幅分别为29.43%、34.47%、46.40%和38.60%。与Pb处理相比,在铅胁迫下喷施GSH可显著提高辣椒叶片MDHAR、DHAR、GR活性,其中,PbGSH5和PbGSH10处理的效果较好,当GSH浓度达到 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,3种酶的活性均比Pb-

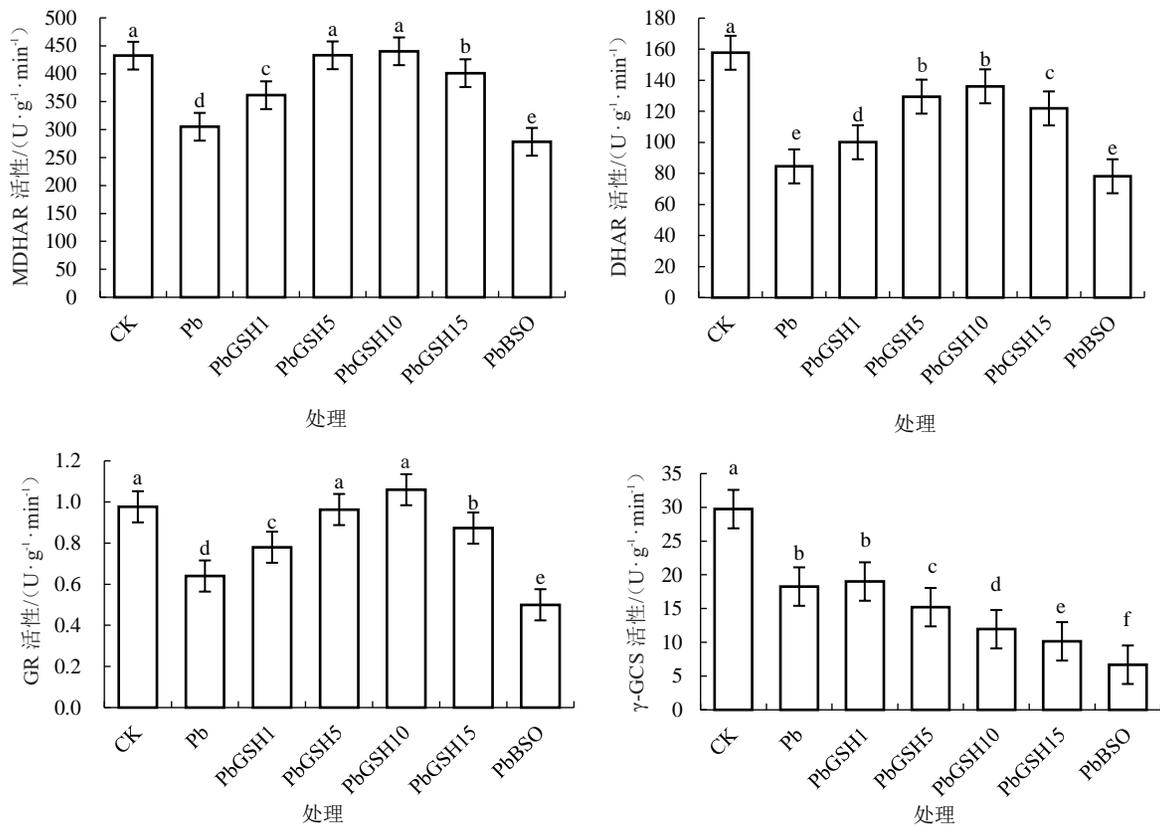


图2 GSH对铅胁迫下辣椒叶片AsA-GSH循环关键酶活性的影响

GSH10处理显著降低; $\gamma$ -GCS活性则与其他3种酶活性相反,与Pb处理相比,在铅胁迫下喷施 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  GSH时,辣椒幼苗叶片 $\gamma$ -GCS活性略有提高,但与Pb处理差异不显著;而当喷施其他浓度GSH后反而会显著降低其活性,且喷施浓度越大, $\gamma$ -GCS活性越低。在铅胁迫下喷施BSO后,MDHAR、GR和 $\gamma$ -GCS活性均比Pb处理显著降低,降幅分别为8.81%、21.88%和63.42%。

### 2.5 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗叶片AsA循环的影响

由图3可知,Pb处理比CK处理的AsA含量显著减低22.17%,DHA含量显著升高53.21%,AsA/DHA显著降低49.19%。与Pb处理相比,在铅胁迫下4种浓度GSH处理均可显著提升辣椒叶片AsA含量和AsA/DHA,并显著降低DHA含量,且浓度越高效果越明显。其中,PbGSH15处理的AsA含量不仅比Pb处理显著上升33.44%,且比CK显著提高了3.86%。喷施BSO后,与Pb处理相比,辣椒叶片AsA含量和AsA/DHA均显著降

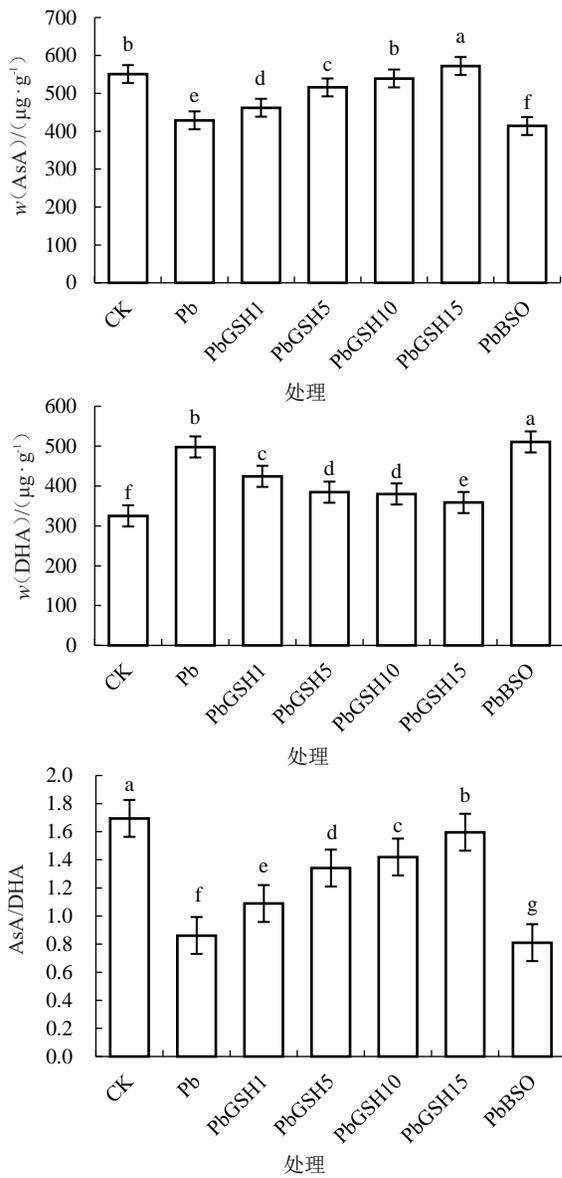


图3 GSH对铅胁迫下辣椒叶片AsA循环的影响

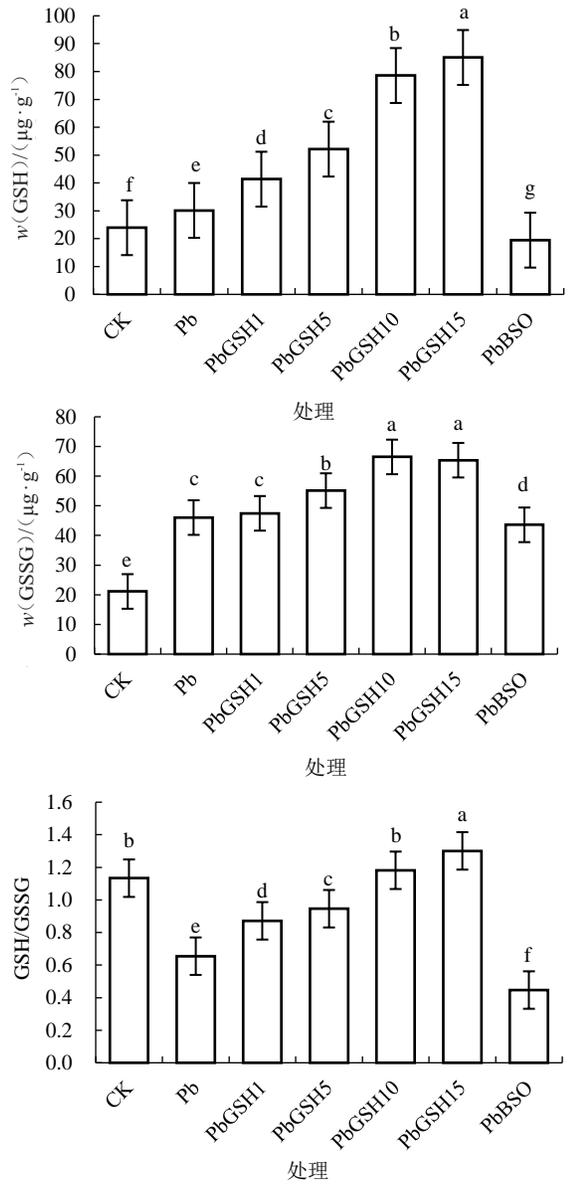


图4 GSH对铅胁迫下辣椒叶片GSH循环的影响

低,DHA含量显著升高。从正反两方面表明,GSH可缓解甚至逆转Pb胁迫对辣椒AsA循环的抑制作用。

### 2.6 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗叶片GSH循环的影响

由图4可知,与CK相比,Pb处理的辣椒叶片中GSH、GSSG含量显著上升,增幅分别为25.85%、117.86%,同时GSH/GSS显著降低了42.23%。与Pb处理相比,在铅胁迫下喷施GSH可不同程度地提高辣椒幼苗叶片中GSH、GSSG含量和GSH/GSSG,其中PbGSH15处理的效果最为突出,与Pb处理相比分别增加了182.21%、42.02%和98.71%。喷施GSH合成抑制剂BSO可显著降低GSH含量和GSH/GSSG,与Pb处理相比降幅分别为35.39%和31.77%,GSSG含量比Pb处理下降,且差异显著。

### 2.7 GSH对铅胁迫下辣椒幼苗叶片ROS的影响

由图5可知,与CK相比,Pb处理辣椒叶片中O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>质量摩尔浓度均显著升高,增幅分别为71.51%、64.22%。表明铅胁迫可显著升高辣椒幼苗叶片中ROS含量。与Pb处理相比,4个喷施外源GSH处理均可显著降低铅胁迫下的辣椒叶片中O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>质量摩尔浓度,其中PbGSH15处理的效果最为明显,与Pb处理相比降幅分别为31.09%、30.30%,差异显著。喷施BSO则会显著提升辣椒叶片O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>质量摩尔浓度,分别比Pb处理提高了37.16%和30.78%。正反两方面表明GSH可有效提升辣椒幼苗清除体内ROS的能力,缓解铅离子对辣椒叶片的氧化胁迫。

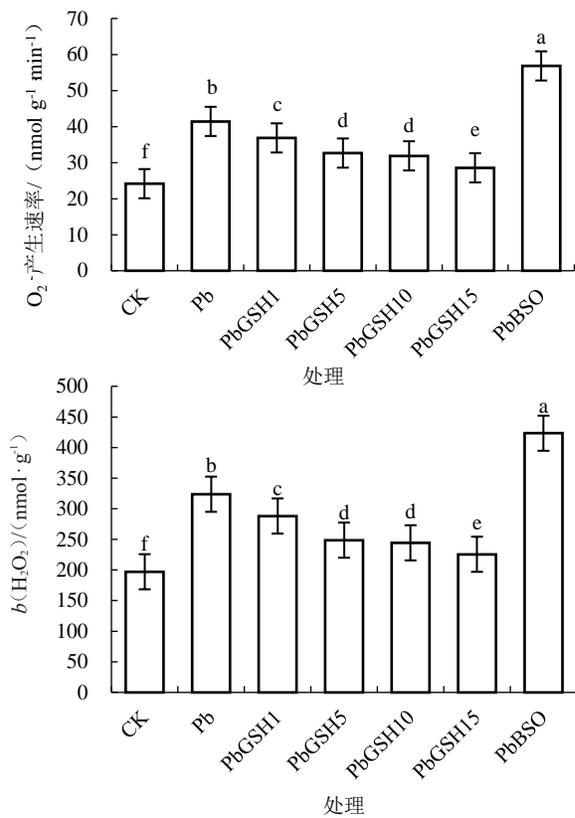


图5 GSH对铅胁迫下辣椒叶片O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响

### 3 讨论与结论

植物体内过量铅会造成细胞内的ROS迅速积累,引起细胞膜过氧化,产生氧化胁迫,破坏光合色素稳定性,阻碍能量的正常转化,严重影响植物生物量的增长<sup>[11,14]</sup>。本研究在铅胁迫下,辣椒幼苗的根长、株高、地上部和地下部干质量、叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量以及总叶绿素含量均显著下降,这与Zhou等<sup>[11]</sup>在番茄上的研究结果相一致。抗氧化酶系统的关键酶有POD、CAT、SOD和APX<sup>[15-16]</sup>,O<sub>2</sub><sup>-</sup>经由SOD催化为H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,而H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>可分别由POD催化还原型辅酶代谢、APX催化AsA代谢,或者是CAT直接清除<sup>[17-18]</sup>。本研究在铅胁迫下,辣椒POD、CAT、SOD和APX活性均显著降低,在对铅胁迫下的辣椒幼苗喷施GSH后,4种抗氧化酶活性均显著提高,但过高的GSH浓度反而会一定程度降低它们的活性,这与邢春艳等<sup>[19]</sup>的研究结果相一致。

GSH在抗氧化剂系统中起到核心作用,GSH和AsA可直接还原ROS,GSH的氧化产物为GSSG,AsA的氧化分为两步,分别生成单脱氢抗坏血酸(MDHA)和DHA<sup>[20]</sup>;GR可将GSSG还原为GSH,实现GSH的循环再生<sup>[21]</sup>;以GSH为电子供

体,MDHAR和DHAR酶可分别将MDHA和DHA还原为AsA,实现AsA的循环再生<sup>[22-23]</sup>。本研究表明,在铅胁迫下,辣椒叶片中关键酶的活性、AsA含量、AsA/DHA和GSH/GSSG均显著降低;GSH、GSSG和DHA含量显著升高。与Pb处理相比,在铅胁迫下补充外源GSH可显著提高GR、DHAR和MDHAR活性,从而提升AsA-GSH循环的还原态比例;而γ-GCS活性则在喷施1mmol·L<sup>-1</sup>GSH时略有提高,但与Pb处理差异不显著,之后随着GSH浓度的增加而逐渐降低;添加BSO可降低AsA-GSH循环的关键酶活性以及还原态/氧化态比例。从正反两方面表明外源GSH一方面可直接补充内源GSH,另一方面可通过激活AsA-GSH循环系统关键酶活性来提升AsA-GSH的循环速率,加快清除铅离子引起的ROS胁迫。同时本研究也表明在辣椒体内GSH对γ-GCS酶具有反馈抑制作用,这与前人的研究结果相一致<sup>[24-25]</sup>。在正常状态下,O<sub>2</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等ROS的生成和清除处于稳定的动态平衡<sup>[26]</sup>。过量的铅离子会使平衡发生移动,在细胞内大量积累ROS,造成细胞氧化胁迫,影响植物的生长、发育、光合作用、逆境响应<sup>[27]</sup>。本研究表明辣椒幼苗受到铅胁迫后O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量上有显著升高,外源GSH可有效降低ROS含量,而BSO则会加剧铅胁迫下ROS的积累,这与蔡仕珍等<sup>[23]</sup>的研究结果相一致。

本研究以铅胁迫下的晋椒503幼苗为材料,探究了不同浓度GSH和BSO对辣椒幼苗各项生理生化参数的影响。结果表明,在铅胁迫下,外源喷施GSH可以增加辣椒幼苗的生物量,增加叶片中光合色素含量,提高抗氧化酶等的活性和AsA-GSH循环系统还原态/氧化态比例,进而清除O<sub>2</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等ROS;添加GSH合成抑制剂BSO则会逆转上述作用。综上所述,15mmol·L<sup>-1</sup>GSH可有效缓解铅胁迫对辣椒造成的生理损害,进而提高辣椒抵抗铅胁迫的能力。

### 参考文献

- [1] 孙天国,孙玉斌.外源亚精胺对铅胁迫下甜瓜幼苗抗氧化代谢的调控效应[J].北方园艺,2020,44(4):42-46.
- [2] 张金青,陈金龙,李凡,等.草地早熟禾种子萌发和幼苗生长对铅胁迫的适应性[J].草地学报,2020,28(1):130-140.
- [3] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》解析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.
- [4] XIA Z L, XU Z W, WANG Y Y, et al. Overexpression of the maize sulfite oxidase increases sulfate and GSH levels and enhances drought tolerance in transgenic tobacco[J]. Frontiers in

- Plant Science, 2018, 9:298-308.
- [5] ANDRÁS K, LÓRÁNT K, GYRGY K, et al. Glutathione can compensate for salicylic acid deficiency in tobacco to maintain resistance to *Tobacco mosaic virus*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10(9):1115-1133.
- [6] YANG X, WU Z, GAO J, et al. Effects of conserved Arg20, Glu74 and Asp77 on the structure and function of a tau class glutathione S-transferase in rice[J]. *Plant Molecular Biology*, 2021, 32(1):1-12.
- [7] SHIKHA K, KHULLAR M. Cadmium induced glutathione bioaccumulation mediated by  $\gamma$ -glutamylcysteine synthetase in ectomycorrhizal fungus *Hebeloma cylindrosporium*[J]. *BioMetals*, 2018, 32(1):101-110.
- [8] ESTRELLA N E, SAURI N E, ZAPATA P O, et al. Glutathione plays a role in protecting leaves of *Salvinia minima* from  $Pb^{2+}$  damage associated with changes in the expression of *SMGS* genes and increased activity of GS[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 75:188-194.
- [9] NAHAR K, HASANUZZAMA N M, ALAM M M, et al. Glutathione-induced drought stress tolerance in mung bean: coordinated roles of the antioxidant defence and methylglyoxal detoxification systems[J]. *Aob Plants*, 2015(7):69-79.
- [10] ZHOU Y, YAN D, DIAO Z, et al. Exogenous gsh protects tomatoes against salt stress by modulating photosystem II efficiency, absorbed light allocation and  $H_2O_2$ -scavenging system in chloroplasts[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(10):2257-2272.
- [11] 王怡仁, 聂梦杰, 王玉泉, 等. 小麦幼苗根系应答重金属 Pb 胁迫的转录组分析[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(6):8-15.
- [12] 刘利乐, 张静, 吴敏, 等. 外源一氧化氮对铅胁迫下高羊茅生理特性的影响[J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(5):458-464.
- [13] MURSHED R, LOPEZ F, SALLANON H. Effect of water stress on antioxidant systems and oxidative parameters in fruits of tomato (*Solanum lycopersicon* L. cv. Micro-tom)[J]. *Physiology & Molecular Biology of Plants*, 2013, 19(3):363-378.
- [14] 张博宇, 滕维超. 铅胁迫对黄花风铃木幼苗生长和生理指标的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(7):7-10.
- [15] 袁满, 徐迎春, 牛叶青, 等. 乙烯与 NO 互作对镉胁迫下荷花的抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10):3433-3440.
- [16] CENGIZ K. Nitrate reductase is required for salicylic acid-induced water stress tolerance of pepper by upraising the ascorbate-glutathione pathway and glyoxalase system[J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, 15(6):13153-13160.
- [17] YUE W, XIN Y, XUE M Q, et al. Methylglyoxal triggers the heat tolerance in maize seedlings by driving ASA-GSH cycle and reactive oxygen species-/methylglyoxal-scavenging system[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 138:91-99.
- [18] SOUMYA M. Recent advancements in the mechanism of nitric oxide signaling associated with hydrogen sulfide and melatonin crosstalk during ethylene-induced fruit ripening in plants[J]. *Nitric Oxide Biology & Chemistry*, 2018, 82:25-34.
- [19] 邢春艳, 周玉卿, 赵九洲, 等. 野生圆锥八仙花对  $Pb(NO_3)_2$  重金属胁迫的生长及生理响应[J]. *北方园艺*, 2020, 44(18):71-77.
- [20] ARAVIND P, PRASAD M N. Modulation of cadmium-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* by zinc involves ascorbate-glutathione cycle and glutathione metabolism[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2005, 43(2):107-116.
- [21] SHAN C, WANG B, SUN H, et al.  $H_2S$  induces NO in the regulation of ASA-GSH cycle in wheat seedlings by water stress[J]. *Protoplasma*, 2020, 257(5):1487-1493.
- [22] FENG J, CHEN L, ZUO J. Protein s-Nitrosylation in plants: current progresses and challenges[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2019, 61(12):1206-1223.
- [23] 蔡仕珍, 龙聪颖, 邓辉茗, 等. 外源 SA、GSH 对 Cd 胁迫下绵毛水苏生理和生长的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(1):211-220.
- [24] 王丹. 外源谷胱甘肽对缺硫胁迫下小白菜硫代葡萄糖苷生物合成的影响[D]. 杭州:浙江农林大学, 2019.
- [25] 段喜华, 唐中华, 郭晓瑞. 植物谷胱甘肽的生物合成及其生物学功能[J]. *植物研究*, 2010, 30(1):98-105.
- [26] LI J, YANG P, GAN Y, et al. Brassinosteroid alleviates chilling-induced oxidative stress in pepper by enhancing antioxidant systems and maintenance of photosystem II[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(11):222-232.
- [27] 黄轩, 李琬婷, 黄晓霞, 等. 铅胁迫对中华常春藤叶绿素含量及荧光特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(16):5469-5475.