

根施脯氨酸对铬胁迫下小麦幼苗生长的生理影响*

巴青松¹, 张兰兰¹, 李桂萍¹, 刘红占², 杨凤梅¹,
许孜书¹, 陈 楚¹, 傅兆麟¹

(1. 淮北师范大学 生命科学学院, 资源植物生物学安徽省重点实验室, 安徽 淮北 235000;

2. 周口师范学院 生命科学与农学院, 河南 周口, 466001)

摘要:【目的】探究根施脯氨酸对铬胁迫下小麦幼苗生长的影响。【方法】以小麦品种轮选 988 为材料, 采用溶液培养法, 研究 30 mg/L 脯氨酸对 160 mg/L Cr³⁺胁迫下的小麦根系的生理影响。【结果】Cr³⁺胁迫严重抑制小麦生长。与单独 Cr³⁺胁迫相比, 根施脯氨酸后, 小麦幼苗根长、株高、茎叶鲜重、茎叶干重、根鲜重和根干重分别上升了 49.4%、17.9%、21.7%、35.4%、52.0% 和 38.7%; 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 分别升高了 8.51%、4.50%、8.19% 和 9.74%; 引起超氧阴离子 (O₂⁻) 自由基含量、过氧化氢 (H₂O₂) 和丙二醛 (MDA) 含量分别下降了 60.32%、24.56% 和 34.20%; 根系活力上升了 1.67 倍。【结论】根施脯氨酸可以显著提高小麦根的抗氧化能力, 进而增强小麦的抗逆性, 缓解 Cr³⁺对小麦根系的毒害作用。

关键词: 脯氨酸; 铬胁迫; 活性氧代谢; 小麦幼苗

中图分类号: S 512.106.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 04-0576-07

Effect of Root Applying Proline on the Growth of Wheat Seedling under Chrome Stress

BA Qingsong¹, ZHANG Lanlan¹, LI Guiping¹, LIU Hongzhan², YANG Fengmei¹,
XU Zishu¹, CHEN Chu¹, FU Zhaolin¹

(1. College of Life Science, Huaibei Normal University, Anhui Key Laboratory of Plant Resources and

Biology, Huaibei 235000, China; 2. College of Life Sciences and Agriculture,

Zhoukou Normal University, Zhoukou 466001, China)

Abstract: [Purpose] The effect of proline on chrome (Cr³⁺) toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) was studied. [Method] Wheat seedlings exposed to 160 mg/L Cr³⁺ were treated with 30 mg/L proline. [Results] Cr³⁺ exposure depressed wheat growth. Compared with the single Cr³⁺ stress, after proline application, the root length, plant height, fresh weight of stem leaf, dry weight of stem leaf, root fresh weight and root dry weight of the seedlings increased significantly by 49.4%, 17.9%, 21.7%, 52.0% and 38.7%, respectively. And the activity of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX), increased by 8.51%, 4.50%, 8.19% and 9.74%, respectively; the contents of superoxide anion (O₂⁻), hydrogen peroxide (H₂O₂), and malondi-

收稿日期: 2018-01-23

修回日期: 2019-04-21

网络首发时间: 2019-07-22 10:56:52

*基金项目: 安徽省自然科学基金 (1708085QC62); 安徽省大学生创新创业训练计划项目 (201810373105); 淮北师范大学博士科研启动基金项目 (15601047); 资源植物生物学安徽省重点实验室开放基金项目 (ZYZWSW2014012); 河南省科技厅科技攻关项目 (172102110165)。

作者简介: 巴青松 (1984—), 男, 安徽太和人, 博士, 讲师, 主要从事植物雄性不育机理和逆境生物学研究。E-mail: baqs1234@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.s.20190719.1556.001.html>



aldehyde (MDA), rise significantly by 60.32%, 24.56% and 34.20%, respectively. Ultimately, the root activity increased by 1.67 times. [Conclusion] Therefore, exogenous proline could significantly improve the antioxidant capacity of wheat roots, and then it could enhance the resistance ability of wheat and alleviate the toxic effect of chrome on wheat seedlings.

Keywords: proline; chrome stress; reactive oxygen metabolism; wheat seedlings

随着重金属矿藏的开发利用、城市化进程持续推进、固体废弃物垃圾日益增多,致使重金属污染逐渐产生并日益加剧^[1]。在众多的重金属元素中,铬(Cr)是一种重要的环境污染元素,在地壳中含量较高,其相对丰度约为0.001 8,高于Zn、Ni、Cd和Pb等重金属元素。Cr是一种过渡金属元素,在土壤、水体、大气中均有分布,它在土壤中主要是 Cr^{3+} 和 Cr^{6+} 两种价态^[2]。吸收过量的Cr富积于体内,对植物本身造成了伤害,同时还会通过食物链进入人体和动物体内,严重危害其健康^[3]。研究表明: Cr^{3+} 抑制稻谷幼苗生长,降低其叶绿素含量,脂质过氧化作用增强,产生大量的 H_2O_2 ,造成植株不同程度的损伤^[4]。高浓度Cr导致芥菜型油菜出苗率、幼苗生物量和叶绿素含量下降,叶中MDA含量增加^[5];还会抑制植物根部细胞的正常生长发育^[6]。

脯氨酸是细胞内具有渗透调节功能的氨基酸,能够通过与重金属形成络合物的方式降低金属离子的活性^[7]。此外,脯氨酸能降低细胞内活性氧水平,以稳定正常的生物膜结构,降低逆境对植物细胞的不利影响^[8-9]。然而,在 Cr^{3+} 胁迫下,根施脯氨酸对小麦幼苗根系活性氧代谢的影响还鲜有报道。因此,本研究旨在通过分析根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系生长的影响,从活性氧代谢的角度探讨根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系缓解作用的可能机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取均匀饱满的小麦品种轮选988的种子,经0.1% HgCl_2 表面消毒灭菌后进行催芽。种子在25℃、光暗比12:12、光照强度为200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的培养箱中培养,小麦幼苗培养至两叶一心时,供后续试验使用。

1.2 试验方法

1.2.1 Cr^{3+} 对小麦幼苗生长的影响

用相同体积、质量浓度不同的 Cr^{3+} 溶液(0、

10、20、40、80、160、200、300和400 mg/L)处理小麦幼苗。每个处理30株,每种处理3次重复,处理4 d后,测定相关形态指标,并根据测定结果确定可供小麦幼苗正常生长的最大 Cr^{3+} 质量浓度(C_1),选取 C_1 为后续试验的处理浓度。

1.2.2 脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗生长的影响

用相同体积的含有质量浓度为 C_1 的 Cr^{3+} 和不同质量浓度的脯氨酸(0、5、10、15、20、30、50、80、100和150 mg/L)溶液分别处理小麦幼苗,以蒸馏水培养为对照(CK),每天更换1次处理液,每个处理30株幼苗,每种处理3次重复,处理4 d后进行相关生理指标的测定,确定最佳的脯氨酸缓解质量浓度(C_2),选取 C_2 为后续试验的处理浓度。

1.2.3 最适脯氨酸浓度对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗的影响

为了更好地研究最适脯氨酸质量浓度(C_2)对 Cr^{3+} 胁迫下(C_1)小麦幼苗生长发育的影响,设置蒸馏水组(CK)、160 mg/L Cr^{3+} 处理组(Cr)、160 mg/L Cr^{3+} 和30 mg/L脯氨酸处理组(Cr+Pro)共3组试验对小麦幼苗进行培养,处理期间保证各组其他培养条件相同。每个处理重复3次,处理7 d后,每个处理选取长势均匀的30株小麦幼苗测定形态与生理指标。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 小麦生长指标的测定

测定的生长指标为株高、根鲜重、根干重、茎叶鲜重、茎叶干重。测定干重前,于烘箱105℃条件下杀青30 min,再于80℃条件下烘干至恒重,测定其干物质重量。

1.3.2 小麦生理指标的测定

在小麦两叶一心期收取小麦根系,测定其生理指标。氮蓝四唑法测定SOD活性^[10];分光光度法测定CAT活性^[11];愈创木酚法测定POD活性^[12];比色法测定APX活性^[13]。羟胺氧化法测定超氧阴离子自由基含量^[14];氯化钛法测定过氧化氢含量^[15];蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[16];酸性茚三酮法测定游离脯氨酸含量^[17];硫代巴比妥

酸反应法测定 MDA 含量^[18]；氯化三苯基四氮唑法测定根系活力^[19]。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理，用 SPSS 22.0 软件的最小显著差数法 (LSD 法) 进行单因素方差分析和显著性检验，用 SigmaPlot 13.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同质量浓度 Cr³⁺对小麦幼苗生长的影响

由表 1 可知：随着 Cr³⁺质量浓度的升高，小麦幼苗的株高、根长、根鲜重、茎叶干重和根干重均表现为下降的趋势。在 160 mg/L Cr³⁺处理下，小麦幼苗生长虽然受到显著抑制，但此质量浓度下也能够正常生长，即：可供小麦幼苗

正常生长的最大 Cr³⁺质量浓度为 160 mg/L，故选取该质量浓度作为后续试验的 Cr³⁺处理质量浓度。

2.2 不同质量浓度的脯氨酸对 Cr³⁺胁迫下小麦幼苗生长的影响

由表 2 可知：根施 30 mg/L 脯氨酸对 Cr³⁺胁迫下小麦幼苗生长有明显的影响，随着脯氨酸质量浓度的升高，小麦幼苗形态指标的变化呈先升高后降低的趋势。根施 30 mg/L 脯氨酸后，Cr³⁺胁迫下小麦幼苗根长、株高、根鲜重、茎叶鲜重和根干重的表现最好，故选择 30 mg/L 作为后续试验的处理质量浓度。

2.3 最适脯氨酸质量浓度对 Cr³⁺胁迫下小麦幼苗的影响

2.3.1 对小麦幼苗生长的影响

由表 3 可知：与对照组相比，Cr³⁺胁迫对小

表 1 不同质量浓度 Cr³⁺对小麦幼苗的影响

Tab. 1 Effects of different mass concentrations of Cr³⁺ on the wheat seedlings

$\rho(\text{Cr}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	株高/cm plant height	根长/cm root length	根鲜重/g root fresh weight	茎叶干重/g stem dry weight	根干重/g root dry weight
0	8.43±0.15 a	7.10±0.30 a	0.077 3±0.004 0 a	0.040 2±0.002 0 a	0.016 5±0.000 2 a
10	7.24±0.17 ab	6.16±0.18 b	0.063 0±0.003 2 b	0.036 4±0.001 4 a	0.013 5±0.000 2 b
20	7.72±0.22 bc	7.06±0.34 a	0.067 1±0.002 9 b	0.038 8±0.001 7 a	0.014 0±0.000 2 c
40	7.82±0.14 ac	6.71±0.28 ab	0.065 3±0.002 2 b	0.039 9±0.001 4 a	0.014 5±0.000 2 bc
80	6.83±0.29 d	5.27±0.25 c	0.049 4±0.001 8 c	0.037 5±0.001 6 ab	0.013 4±0.000 2 d
160	6.30±0.19 de	4.39±0.25 d	0.040 6±0.003 2 d	0.036 1±0.001 1 ab	0.012 4±0.000 1 e
200	6.00±0.29 ef	4.12±0.22 de	0.038 9±0.002 7 d	0.035 3±0.002 3 ab	0.011 7±0.000 3 f
300	5.54±0.26 f	3.98±0.16 df	0.039 0±0.002 0 d	0.033 2±0.002 6 bc	0.008 8±0.000 2 g
400	4.45±0.32 g	3.45±0.40 ef	0.033 1±0.004 5 d	0.028 1±0.003 9 c	0.006 6±0.000 1 h

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)；下同。

Note: Different lowercase letters following data mean significant difference among different treatments at 0.05 level; the same as below.

表 2 根施不同质量浓度脯氨酸对 Cr³⁺胁迫下小麦生长的影响

Tab. 2 Effect of different mass concentrations of root applying proline on the growth of wheat under Cr³⁺ stress

$\rho(\text{脯氨酸})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ concentration of proline	根长/cm root length	株高/cm plant height	根鲜重/g root fresh weight	茎叶鲜重/g fresh weight of stem leaf	根干重/g root dry weight
CK	5.67±0.10 a	10.14±0.12 a	0.056 7±0.002 6 a	0.080 0±0.002 5 a	0.007 6±0.000 3 a
0	4.43±0.14 b	7.17±0.31 bd	0.019 7±0.003 2 hi	0.045 7±0.002 7 ef	0.004 6±0.000 3 g
5	4.61±0.25 b	7.59±0.25 bd	0.025 3±0.002 8 bh	0.048 4±0.003 6 bef	0.005 1±0.000 2 fg
10	4.69±0.26 b	7.93±0.30 bd	0.023 7±0.002 1 ch	0.050 9±0.003 9 bef	0.005 6±0.000 2 bf
15	4.67±0.27 b	7.99±0.27 bd	0.026 9±0.003 6 dh	0.052 7±0.002 9 bef	0.005 7±0.000 2 df
20	4.86±0.28 ab	7.99±0.35 bd	0.028 6±0.001 1 bcde	0.055 0±0.001 5 bd	0.006 0±0.000 2 bde
30	5.14±0.21 ab	8.41±0.19 bc	0.030 9±0.004 2 bcd	0.055 6±0.005 0 bc	0.006 4±0.000 2 bc
50	4.66±0.22 b	8.00±0.47 bd	0.027 7±0.002 5 bcdg	0.052 6±0.004 6 cdef	0.006 0±0.000 2 cde
80	4.70±0.36 b	7.71±0.30 bd	0.026 4±0.001 8 efgh	0.051 0±0.003 2 cdef	0.005 9±0.000 2 cde
100	4.64±0.32 b	7.59±0.41 bd	0.025 0±0.002 7 efghi	0.049 3±0.001 8 cde	0.005 7±0.000 3 df
150	4.04±0.41 bc	7.51±0.16 de	0.017 7±0.000 8 icj	0.045 4±0.001 9 f	0.004 1±0.000 2 g

麦幼苗的茎叶干重和鲜重、根长、根鲜重、根干重都有显著的抑制作用 ($P<0.05$); 与 Cr^{3+} 处理组相比, 根施脯氨酸处理 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗的根长、茎叶鲜重、根鲜重、茎叶干重和根干重均显著增加 ($P<0.05$)。可见, 30 mg/L 脯氨酸处理可有效缓解 160 mg/L Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗的生长, 但并没有将 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗恢复到正常水平。

表 3 根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗形态的影响
Tab. 3 Effect of root applying proline on the morphological indexes of wheat seedlings under Cr^{3+} stress

处理 treatment	株高/cm plant height	根长/cm root length	茎叶鲜重/g fresh weight of stem leaf	根鲜重/g root fresh weight	茎叶干重/g dry weight of stem leaf	根干重/g root dry weight
CK	10.82±0.66 a	13.02±0.86 a	0.105 4±0.010 4 a	0.116 8±0.014 2 a	0.009 6±0.000 2 a	0.007 8±0.000 3 a
Cr	6.94±0.43 b	4.38±0.69 c	0.050 2±0.010 4 b	0.029 4±0.005 1 c	0.006 2±0.000 2 c	0.003 8±0.000 2 c
Cr+Pro	8.40±0.28 b	8.72±0.25 b	0.085 6±0.004 5 a	0.061 2±0.004 9 b	0.008 4±0.000 2 b	0.006 2±0.000 2 b

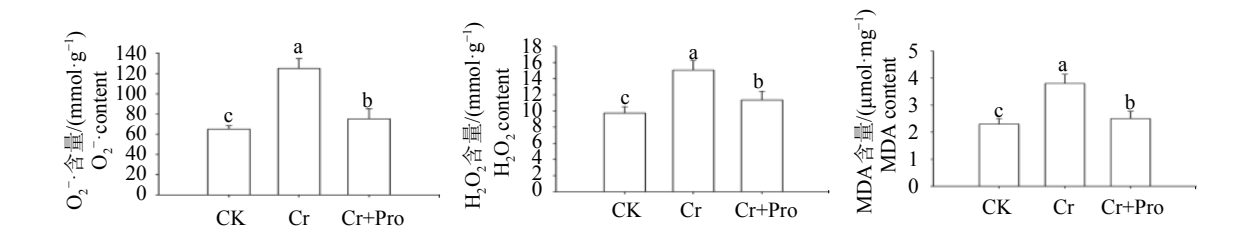
2.3.2 对小麦幼苗根系抗氧化酶活性的影响
由表 4 可知: 相对于对照组, Cr^{3+} 胁迫下的小麦幼苗根系 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均有显著降低 ($P<0.05$); 而与 Cr^{3+} 胁迫相比, 在根施脯氨酸后, 小麦幼苗根系抗氧化酶活性皆有不同程度的上升 ($P<0.05$)。由此说明, 根施脯氨酸能够提高 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系的抗氧化酶活性。

表 4 根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系抗氧化酶活性的影响 (鲜重, FW)
Tab. 4 Effect of root applying proline on the antioxidant enzyme activity of wheat seedling roots under Cr^{3+} stress (fresh weight, FW)

处理 treatment	SOD 活性/(U·g ⁻¹ ·h ⁻¹) SOD activity	POD 活性/(U·g ⁻¹ ·h ⁻¹) POD activity	CAT 活性/(U·g ⁻¹ ·h ⁻¹) CAT activity	APX 活性/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹) APX activity
CK	168.32±0.36 a	433.69±0.37 a	110.69±2.20 a	3.30±0.36 a
Cr	151.03±0.25 b	406.35±2.01 b	94.83±3.68 b	2.67±0.20 c
Cr+Pro	163.89±0.18 a	424.62±1.41 a	102.60±3.34 a	2.93±0.00 b

2.3.3 对小麦幼苗根系 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 H_2O_2 和 MDA 含量的影响
由图 1 可知: 与对照组相比, 单独 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗中 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 H_2O_2 和 MDA 含量均显著升高 ($P<0.05$); 而根施脯氨酸后, 三者的含量又较单独 Cr^{3+} 胁迫显著降低 ($P<0.05$)。由此可见, 根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系中 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 有很强的清除作用, 还能降低 Cr^{3+} 胁迫下小麦根系的 H_2O_2 含量, 并具有降低小麦根系细胞膜脂过氧化的作用。

2.3.4 对小麦幼苗根系游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响
由图 2 可知: 与对照组相比, Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系游离脯氨酸含量显著增加、可溶性糖含量显著下降 ($P<0.05$); 根施脯氨酸后, 较单独 Cr^{3+} 处理游离脯氨酸含量显著降低、可溶性糖含量显著增加 ($P<0.05$)。说明根施脯氨酸能够降低 Cr^{3+} 胁迫下根系脯氨酸含量, 但能在一定程度上提高 Cr^{3+} 胁迫下可溶性糖的含量。



注: 不同小写英文字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$); 下同。
Note: Different letters lowercase mean significant difference among different treatments at 0.05 level; the same as below.

图 1 根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 H_2O_2 和 MDA 含量的影响
Fig. 1 Effects of root applying proline on the content of $\text{O}_2^{\cdot-}$, H_2O_2 and MDA in wheat seedlings under Cr^{3+} stress

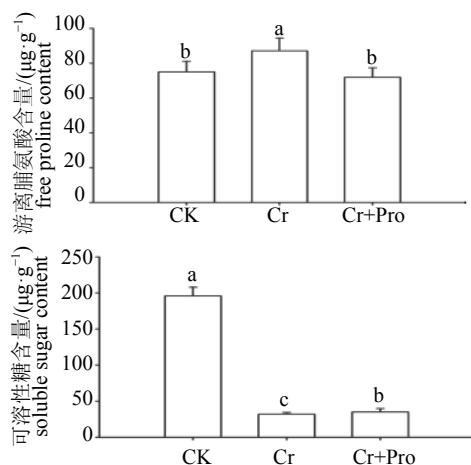


图 2 根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响

Fig. 2 Effects of root applying proline on the free proline and soluble sugar content in wheat seedlings roots under Cr^{3+} stress

2.3.5 对小麦幼苗根系活力的影响

由图 3 可知： Cr^{3+} 处理显著降低了小麦幼苗的根系活力，但在根施脯氨酸以后， Cr^{3+} 胁迫下的小麦幼苗根系活力值上升了 1.67 倍。因此，根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下的小麦幼苗根系具有很强的修复能力。

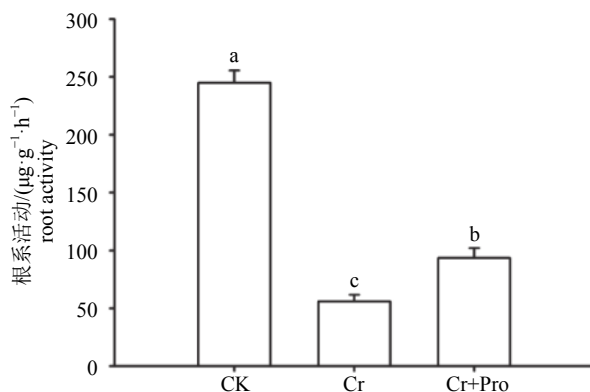


图 3 根施脯氨酸对 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系活力的影响

Fig. 3 Effects of root applying proline on the root activity in wheat seedlings under Cr^{3+} stress

3 讨论

随着印染、制革、电镀和冶金等工业的快速发展，产生了大量的含铬废水，这些废水进入地表，极易造成严重的土壤铬污染。过量的铬会抑制植物根系细胞的分裂，减少根尖细胞的存活率，抑制根系对氮、磷、钾等矿质元素的吸收，进而导致植株叶片泛黄，降低植物的光合作用效

率，最终降低植物生物量^[20-21]。有研究表明： Cr^{6+} 处理可抑制高丹草幼苗根尖分生区细胞有丝分裂，引起染色体畸变^[22]；在受到 Cr^{3+} 污染的土壤中，植物吸收的铬大部分累积在根部^[23-24]，但能够在水稻籽粒中累积^[25]。本研究也表明：与对照相比， Cr^{3+} 处理显著降低了小麦幼苗的根系活力，导致其上部 and 根系的生物量降低。

丙二醛 (MDA) 含量是生物膜过氧化程度的主要指标，能够间接地反映植物在逆境环境的抗逆能力。SOD、CAT、POD 和 APX 等抗氧化酶是植物体内重要的保护酶类，其活性高低能够反映植物对逆境胁迫的适应能力。SOD 是植物细胞抵御活性氧伤害的抗氧系统第一道防线，具有清除细胞内的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的作用^[26]。SOD 能够催化分解 $\text{O}_2^{\cdot-}$ ，但是会生成 H_2O_2 ，而其他抗氧化酶 (POD、APX、CAT 等) 能够分解 SOD 催化产生的 H_2O_2 ，从而形成了完整消除活性氧的酶系抗氧化系统^[27]。本研究表明： Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均显著降低，加剧了小麦根系中活性氧的过量产生，引起活性氧代谢平衡失调，加剧了膜脂过氧化作用；而在加入根施脯氨酸后，抗氧化酶活性皆有不同程度的上升，降低了活性氧对生物膜的损伤。由此可见，根施脯氨酸能够提高 Cr^{3+} 胁迫下小麦幼苗根系的抗氧化酶活性。

为了应对重金属胁迫压力，植物细胞内会合成大量诸如可溶性糖、游离脯氨酸等渗透调节物质，以维持细胞渗透平衡。可溶性糖也是植物体内重要的渗透调节物质之一，可以调节细胞渗透压，以增强适应环境的能力。研究表明：铬对植物体内糖代谢有显著的影响，但结论并不一致，如：随着 Cr^{6+} 处理浓度增加，芹菜叶片中可溶性糖含量呈增加趋势^[28]；高浓度 Cr^{3+} 能降低普通小球藻细胞的可溶性糖含量^[29]。本研究表明：160 mg/L Cr^{3+} 胁迫降低了小麦根系的可溶性糖含量，根施脯氨酸能够提高 Cr^{3+} 胁迫下小麦根系可溶性糖含量，增强小麦幼苗适应逆境的能力。

脯氨酸能够以游离状态分布于植物的组织器官中，当植物受到逆境胁迫时，体内的脯氨酸便急剧增加^[30]，积累的脯氨酸可以调节植物细胞的渗透和稳定生物大分子结构^[31]。本研究表明：小麦幼苗在 Cr^{3+} 胁迫下，根系中的脯氨酸大幅上升。脯氨酸的积累是胁迫下信号传导途径的适应

性反应,可能是由于逆境胁迫减弱了脯氨酸的降解或者促进了脯氨酸的生物合成所致^[32]。外施脯氨酸可以有效地缓解盐胁迫^[7]、镉胁迫^[33]、干旱胁迫^[34]和冻害^[35]等非生物胁迫对植物的不利影响。本研究表明:根施脯氨酸降低了在 Cr^{3+} 胁迫状态下游离脯氨酸的含量,进而维持小麦根系正常的渗透调节能力,降低了 Cr^{3+} 对小麦幼苗根系损伤,缓解了 Cr^{3+} 胁迫对小麦幼苗根系的影响。而且,小麦幼苗在 Cr^{3+} 胁迫下,根施脯氨酸能够增强根系活力,促进小麦幼苗的生长。

[参考文献]

- [1] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1214. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2009.0162.
- [2] 张义贤. 三价铬和六价铬对大麦毒害效应的比较[J]. 中国环境科学, 1997(6): 565. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.1997.06.021.
- [3] SALEHIPOUR M, GHORBANI H, KHEIRABADI H, et al. Health risks from heavy metals via consumption of cereals and vegetables in Isfahan Province, Iran[J]. Human & Ecological Risk Assessment, 2015, 21(7): 1920. DOI: 10.1080/10807039.2014.1002292.
- [4] 田保华, 张彦洁, 张丽萍, 等. 镉/铬胁迫对谷子幼苗生长和 NADPH 氧化酶及抗氧化酶体系的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 240.
- [5] 王爱云, 钟国锋, 徐刚标, 等. 铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和铬富集的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1717.
- [6] WANI P A, KHAN M S, ZAIDI A. Chromium reduction, plant growth-promoting potentials, and metal solubilization by *Bacillus* sp. isolated from alluvial soil[J]. Current Microbiology, 2007, 54(3): 237. DOI: 10.1007/s00284-006-0451-5.
- [7] ZOUARI M, BEN A C, ZORRIG W, et al. Exogenous proline mediates alleviation of cadmium stress by promoting photosynthetic activity, water status and antioxidative enzymes activities of young date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2015, 108(6): 1119. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.015.
- [8] WANI A S, AHMAD A, HAYAT S, et al. Is foliar spray of proline sufficient for mitigation of salt stress in *Brassica juncea* cultivars?[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(13): 13413. DOI: 10.1007/s11356-016-6533-4.
- [9] ZOUARI M, AHMED C B, ELLOUMI N, et al. Impact of proline application on cadmium accumulation, mineral nutrition and enzymatic antioxidant defense system of *Olea europaea* L. cv Chemlali exposed to cadmium stress[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2016, 128: 195. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.024.
- [10] SHEN X F, XIAO X M, DONG Z X, et al. Silicon effects on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of peanut under aluminum stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(11): 3063. DOI: 10.1007/s11738-014-1676-8.
- [11] LUNA C M, FOYER C H. Drought controls on H_2O_2 accumulation, catalase (CAT) activity and CAT gene expression in wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(411): 417. DOI: 10.1093/jxb/eri039.
- [12] 方慧, 邹强, 何勇, 等. 基于高光谱的番茄叶片过氧化物酶活力测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2228. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)08-2228-06.
- [13] MIYAKE C, SHINZAKI Y, NISHIOKA M, et al. Photoinactivation of ascorbate peroxidase in isolated tobacco chloroplasts: *Galdieria partita* APX maintains the electron flux through the water-water cycle in transplastomic tobacco plants[J]. Plant and Cell Physiology, 2006, 47(2): 200. DOI: 10.1093/pcp/pci235.
- [14] LUKATKIN A S. Contribution of oxidative stress to the development of cold-induced damage to leaves of chilling-sensitive plants: 1. reactive oxygen species formation during plant chilling[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2002, 49(5): 622. DOI: 10.1023/A:1020232700648.
- [15] LIU X M, WILLIAMS C E, NEMACHECK J A, et al. Reactive oxygen species are involved in plant defense against a gall midge[J]. Plant Physiology, 2010, 152(2): 985. DOI: 10.1104/pp.109.150656.
- [16] 王琼, 苏智先, 张素兰, 等. 慈竹构件和分株水平的可溶性糖含量研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 1994. DOI: 10.3321/j.issn:1001-9332.2004.11.002.
- [17] KHAN M I R, NAZIR F, ASGHER M, et al. Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate cadmium-induced oxidative stress by improving proline and glutathione production in wheat[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 173(3): 9. DOI: 10.1016/j.jplph.2014.09.011.
- [18] TURÓCZY Z, KIS P, TÖRÖK K, et al. Overproduction of a rice aldo-keto reductase increases oxidative and heat stress tolerance by malondialdehyde and methylglyoxal detoxification[J]. Plant Molecular Biology, 2011, 75(4): 399. DOI: 10.1007/s11103-011-9735-7.
- [19] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 等. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4770. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.23.003.
- [20] SINGH H P, MAHAJAN P, KAUR S, et al. Chromium toxicity and tolerance in plants[J]. Environmental Chemistry Letters, 2013, 11(3): 229. DOI: 10.1007/s10311-013-0407-5.
- [21] ASLAM U, AHMAD I, HUSSAIN M, et al. Effect of heavy metal pollution on mineral absorption in sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(1): 101. DOI: 10.1007/s11738-013-1390-y.
- [22] 赵晖, 吕金印. Cr^{6+} 对高丹草幼苗生理特性与根尖细胞有丝分裂的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 761. DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2009.04.022.

- [23] SOUZA M D, CHU D, ZHAO M, et al. Rhizosphere bacteria enhance selenium accumulation and volatilization by indian mustard[J]. Plant Physiology, 1999, 119(2): 565. DOI: [10.1104/pp.119.2.565](https://doi.org/10.1104/pp.119.2.565).
- [24] 张黛静, 邵云, 柴宝玲, 等. 小麦植株对重金属铬吸收累积的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 311. DOI: [10.3321/j.issn:1672-2043.2009.02.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:1672-2043.2009.02.016).
- [25] GUAN Y D, LA G X, CAO J, et al. Heavy metal contamination in a soil-rice ecosystem in the vicinity of abandoned rural unsanitary landfill[J]. Asian Journal of Chemistry, 2013, 25(8): 4199. DOI: [10.14233/ajchem](https://doi.org/10.14233/ajchem).
- [26] ZHANG H, WANG M J, HU L Y, et al. Hydrogen sulfide promotes wheat seed germination under osmotic stress[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2010, 57(4): 532. DOI: [10.1134/S1021443710040114](https://doi.org/10.1134/S1021443710040114).
- [27] KALAI T, KHAMASSI K, da SILVA J A T, et al. Cadmium and copper stress affect seedling growth and enzymatic activities in germinating barley seeds[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2014, 60(6): 765. DOI: [10.1080/03650340.2013.838001](https://doi.org/10.1080/03650340.2013.838001).
- [28] 柳玲, 吕金印, 张微. 不同浓度 Cr^{6+} 处理下芹菜的铬累积量及生理特性[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 639.
- [29] 蒧玉琴, 任春燕, 朱巧巧, 等. Cr^{3+} 胁迫对小球藻生理生化特性的影响[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 228.
- [30] ASHRAF M, FOOLAD M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance[J]. Environmental & Experimental Botany, 2007, 59(2): 206. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2005.12.006](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006).
- [31] TEH C Y, SHAHARUDDIN N A, HO C L, et al. Exogenous proline significantly affects the plant growth and nitrogen assimilation enzymes activities in rice (*Oryza sativa*) under salt stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(6): 2. DOI: [10.1007/s11738-016-2163-1](https://doi.org/10.1007/s11738-016-2163-1).
- [32] MAGGIO A, MIYAZAKI S, VERONESE P, et al. Does proline accumulation play an active role in stress-induced growth reduction?[J]. Plant Journal, 2002, 31(6): 699. DOI: [10.1046/j.1365-313X.2002.01389.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01389.x).
- [33] SUN C H, LI X H, HU Y L, et al. Proline, sugars, and antioxidant enzymes respond to drought stress in the leaves of strawberry plants[J]. Korean Journal of Horticultural Science and Technology, 2015, 33(5): 625. DOI: [10.7235/hort.2015.15054](https://doi.org/10.7235/hort.2015.15054).
- [34] KAUR G, KUMAR S, THAKUR P, et al. Involvement of proline in response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to chilling stress at reproductive stage[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 128(3): 174. DOI: [10.1016/j.scienta.2011.01.037](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.01.037).
- [35] COUÉE I, SULMON C, GOUESBET G, et al. Involvement of soluble sugars in reactive oxygen species balance and responses to oxidative stress in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(3): 449. DOI: [10.1093/jxb/erj027](https://doi.org/10.1093/jxb/erj027).

责任编辑: 何馨成