

锌对汞胁迫下小麦种子萌发的影响

袁宇飞¹, 李瑞平¹, 李光德^{1*}, 王瑞雪², 张 华¹, 王 涛¹

(1.山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2.济南市天桥区环保局, 济南 250033)

摘 要:通过溶液培养研究了不同浓度锌(Zn)对汞(Hg)胁迫下小麦种子萌发率、芽长、根长以及萌发过程中 α 淀粉酶、蛋白酶、过氧化氢酶活性的影响。结果表明,单独 Hg($15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫下,小麦种子萌发率降低,根长与芽长受到抑制, α 淀粉酶与过氧化氢酶活性降低,蛋白酶活性升高。加入 $10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 后,种子萌发率未表现出明显变化,根长、芽长及 α 淀粉酶受抑制情况缓解,缓解程度随 Zn 浓度升高而下降,表明 Zn 可在一定程度上缓解 Hg 对小麦种子的毒害,但须在一定浓度范围内; $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 减弱了 Hg 单独胁迫对小麦种子蛋白酶活性的促进作用,使其恢复至接近对照水平, $20\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 则表现出对蛋白酶的抑制作用,使其活性低于对照水平,并且随 Zn 浓度升高呈下降趋势。Zn 的加入对 Hg 单独胁迫下活性降低的过氧化氢酶未表现出缓解抑制的作用,反而进一步抑制了酶的活性,并且随着 Zn 浓度升高,抑制作用逐渐加强。因此,Zn 的加入可在总体上缓解 Hg 胁迫对小麦种子萌发的影响,最适 Zn 浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但这种缓解作用只表现在部分方面。

关键词:锌;汞胁迫;小麦;种子萌发

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0259-06

Effects of Zn on Seed Germination of Wheat Under Hg Stress

YUAN Yu-fei¹, LI Rui-ping¹, LI Guang-de^{1*}, WANG Rui-xue², ZHANG Hua¹, WANG Tao¹

(1.College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2.Environmental Protection Agency of Tianqiao District of Jinan City, Jinan 250033, China)

Abstract: The effects of Zn ($10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on the wheat seed germination rate, length of bud and root, activity of α -amylase, protease and catalase in the presence of Hg ($15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) were investigated in this study. The results showed that the single treatment of Hg ($15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) inhibited the wheat seed germination rate, the root and bud length and the activity of α amylase and catalase, while enhanced the protease activity. The addition of Zn ($10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) rarely affected the seed germination rate, while reduced the suppression of root length, bud length and α amylase compared to the single treatment of Hg. This remission decreased with the increase of Zn concentration. Which indicated that a certain range of Zn could mitigate the toxicity produced by Hg on wheat seeds. $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn weakened the promoting function of protease activity by single Hg stress on wheat seeds and almost made it go back to the control level. However, $20\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn showed an inhibitory effect on the protease, which was lower than the control level, and the influence decreased with the increase of Zn concentration. The addition of Zn enhanced the inhibition of catalase activity caused by single Hg stress.

Keywords: Zn; Hg stress; wheat; seed germination

目前,我国受重金属污染的耕地近 2 000 万 hm^2 ^[1], 约占耕地总面积的 1/5, 重金属污染是当今污染面积最广、危害最大的环境问题之一。汞是非营养元素,对植物具有明显的毒害作用,它能抑制植物细胞的分裂和根系伸长,刺激和抑制一些酶的活性,可导致植物

细胞膜脂质过氧化水平上升,引起细胞膜结构的损伤,使细胞膜透性增大,细胞保护系统发生变化,从而抑制植物的生长发育^[2-3]。锌是植物必需的营养元素,锌可以作为六大类功能酶中不同的辅助因子成分,可以调节酶的活性^[4],影响 DNA、RNA 聚合酶进而影响核酸和蛋白质的合成^[5],维持和稳定生物膜功能的完整性^[6];也可以通过诱导合成锌金属硫蛋白清除自由基,抑制细胞过氧化损伤^[7]。汞和锌是同一族元素,化学性质相似,关于锌与汞的相互作用的研究,国内的

收稿日期:2011-06-08

作者简介:袁宇飞(1985—),山东滨州人,硕士,研究方向为污染修复工程。E-mail:yyf_afei@163.com

* 通讯作者:李光德 E-mail:lguangde@sda.u.edu.cn

报道主要集中在动物及微生物方面^[8-9],对植物的研究较少。本文以小麦种子为试验材料,探讨了汞胁迫下,外加锌对小麦种子萌发情况及 α 淀粉酶、蛋白酶、过氧化氢酶活性的影响,以期对汞胁迫伤害植物的生态防护技术研究提供参考,同时为研究重金属在植物体内的作用机理提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试小麦为“农大 D440”,购自山东农业大学大种业公司。

选取饱满、均匀一致的小麦种子,用 5%次氯酸钠溶液消毒灭菌 20 min,再用去离子水冲洗 7 次。将消毒后的种子分别以含有重金属 Zn、Hg 的溶液浸种,Zn、Hg 以 ZnSO_4 、 HgCl_2 的形式加入,浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)分别为: T_0 :0 Zn 和 15 Hg, T_1 :10 Zn 和 15 Hg, T_2 :20 Zn 和 15 Hg, T_3 :50 Zn 和 15 Hg, T_4 :100 Zn 和 15 Hg。浸种 18 h 后,弃去多余溶液,置培养皿中(铺一层滤纸)于暗处培养,温度(25 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$,每皿 200 粒。每日添加少量相应溶液,保持滤纸湿润。另外设置以去离子水处理的对照组(CK),每个浓度处理重复 3 次,共 18 个处理。培养 4 d 之后取样,测定各项指标。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 萌发率与芽长、根长

对萌发 4 d 的种子的萌发率与芽长、根长进行测定,测定方法为直尺直接测量,并通过相关软件对测定结果进行统计分析。

1.2.2 α 淀粉酶活性测定

采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[10]。以 40 $^{\circ}\text{C}$ 、pH5.6 的条件下,每分钟催化底物释放 1 mg 麦芽糖的量为 1 个酶活力单位($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)。

1.2.3 蛋白酶活性测定

采用甲醛滴定法^[11]。以每小时每 1 mg 蛋白质酶解产生 1 mg 氨基酸为 1 个酶活力单位($\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。

1.2.4 过氧化氢酶活性测定

采用高锰酸钾滴定法^[12]。以每 1 g 鲜重样品在 1 min 内分解 H_2O_2 的量为 1 个酶活力单位($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子萌发率及芽长、根长的影响

由表 1 的结果可以看出,与以去离子水处理的对照组(CK)相比,单独添加 Hg 的处理组(T_0)种子萌发率降低了 11.1%,达到显著差异水平($P<0.05$),说明 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 的加入在一定程度上抑制了小麦的萌发。不同浓度的 Zn 加入后,小麦萌发率的变化未表现出明显的变化规律,相关系数为-0.234,且各处理组间未达到显著差异水平($P>0.05$),说明 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 胁迫下,0~100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 的添加量对小麦种子的萌发无明显影响。

表 1 的结果显示,与 CK 组相比, $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 的加入(T_0)显著抑制了小麦芽与根的生长($P<0.05$),说明该浓度下 Hg 对小麦种子表现出毒害作用,10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 加入后(T_1),芽长与根长比单独添加 Hg 的处理组(T_0)分别升高了 10.4%与 17.9%,差异显著($P<0.05$),说明该浓度 Zn 的加入在一定程度上缓解了 Hg 对小麦芽与根生长的抑制作用,两者的联合作用表现为拮抗作用。随着外加 Zn 浓度的升高(T_2 至 T_4),小麦芽长与根长则表现出逐渐下降的变化趋势,相关系数分别为-0.978 与-0.964,说明随着 Zn 浓度的升高,Zn 对 Hg 毒性的缓解作用逐渐减弱,甚至在 Zn 浓度较高的处理组中(T_3 、 T_4),Zn 与 Hg 的联合作

表 1 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子萌发率及芽长、根长的影响

Table 1 Influence of different Zn treatments on germination rate and length of bud and root of wheat under Hg stress

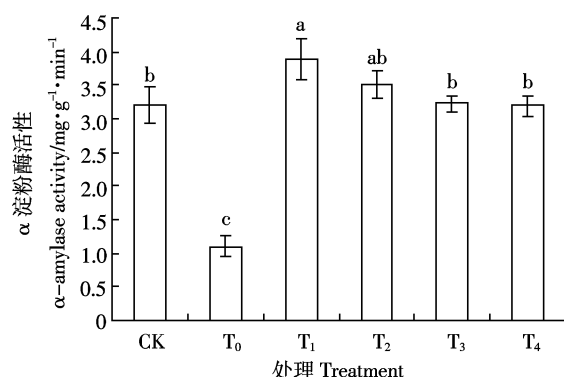
处理组 Treatment group	Zn 添加量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn addition amount	Hg 添加量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg addition amount	项目 Item		
			萌发率 Germination rate/%	芽长 Bud length/cm	根长 Root length/cm
CK	0	0	78.33 $\pm$ 4.23a	4.63 $\pm$ 0.20a	2.71 $\pm$ 0.17a
T_0	0	15	69.67 $\pm$ 3.32b	3.10 $\pm$ 0.14c	1.84 $\pm$ 0.12c
T_1	10	15	75.67 $\pm$ 5.51ab	3.46 $\pm$ 0.06b	2.17 $\pm$ 0.16b
T_2	20	15	66.00 $\pm$ 6.21b	3.17 $\pm$ 0.18c	2.12 $\pm$ 0.09b
T_3	50	15	73.00 $\pm$ 4.35ab	2.90 $\pm$ 0.16c	1.81 $\pm$ 0.11c
T_4	100	15	69.33 $\pm$ 8.08ab	2.46 $\pm$ 0.12d	1.65 $\pm$ 0.20c

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note:Different little letters meant significant difference at 0.05 level. The same below.

用表现为对小麦芽长与根长的抑制作用,说明 Zn 对 Hg 毒性的缓解作用是有一定限度的,并且须在一定的浓度范围内。

2.2 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子 α 淀粉酶活性的影响

由图 1 的结果可以看出,单独 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 处理下(T_0),小麦种子 α 淀粉酶活性比对照(CK)下降了 61.7%,达到显著差异水平($P<0.05$),说明浓度为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Hg 对小麦种子 α 淀粉酶活性表现为抑制作用; $10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Zn 加入后($T_1\sim T_4$), α 淀粉酶活性均比 T_0 显著升高($P<0.05$),峰值出现在 T_1 处理,比 T_0 升高了 252.6%;随着外加 Zn 浓度的升高, α 淀粉酶活性表现出逐渐下降的趋势,相关系数为 -0.829 ,但总是高于或接近对照。说明 $10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Zn 有效缓解了 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 对小麦种子 α 淀粉酶活性的抑制作用,并且这种缓解作用随外加 Zn 浓度的升高呈下降趋势。因此该浓度下,Zn 与 Hg 对小麦种子 α 淀粉酶活性的联合作用表现为拮抗作用。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Different little letters meant significant difference at 0.05 level.

The same below.

图 1 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子 α 淀粉酶活性的影响

Figure 1 Influence of different Zn treatments on α -amylase activity of wheat seeds under Hg stress

2.3 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子蛋白酶活性的影响

图 2 的结果表明,单独 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 处理下(T_0),小麦种子蛋白酶活性比对照(CK)升高了 29.6%,差异显著($P<0.05$),说明浓度为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Hg 对小麦种子蛋白酶活性表现为促进作用; $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Zn 加入后(T_1),蛋白酶活性比 T_0 显著降低($P<0.05$),略高于对照(CK),说明该浓度 Zn 减弱了 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 对小麦种子蛋白酶活性的促进作用,使蛋

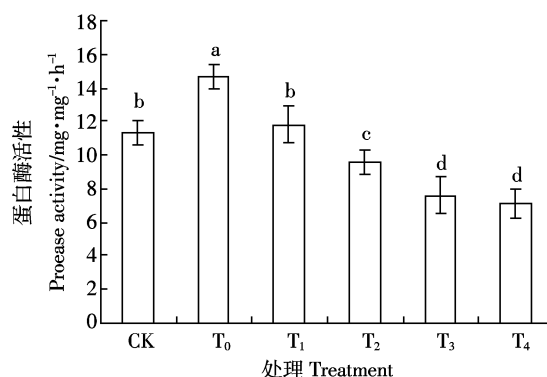


图 2 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子蛋白酶活性的影响

Figure 2 Influence of different Zn treatments on proenzyme activity of wheat seeds under Hg stress

白酶活性恢复至接近对照(CK)水平,与 Hg 的联合作用表现为拮抗作用;随着外加 Zn 浓度的升高,蛋白酶活性呈逐渐下降的趋势,相关系数为 -0.855 ,说明较高浓度的 Zn 与 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 联合作用抑制了小麦种子蛋白酶的活性,并且这种抑制作用随 Zn 浓度的升高逐渐加强。

2.4 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子过氧化氢酶活性的影响

图 3 的结果表明,单独 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg 处理下(T_0),小麦种子过氧化氢酶活性比对照(CK)降低了 32.9%,差异显著($P<0.05$),说明浓度为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Hg 抑制了小麦种子过氧化氢酶的活性; $10\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Zn 加入后($T_1\sim T_4$),过氧化氢酶活性比 T_0 进一步降低,并且随着外加 Zn 浓度升高呈逐渐下降的趋势,相关系数为 -0.853 ,说明该浓度范围内 Zn 的加入,不仅没有缓解 Hg 对小麦种子过氧化氢酶活性的抑制作用,反而进一步抑制了酶的活性,并且随着 Zn 浓度升高,抑制作用逐渐加强。

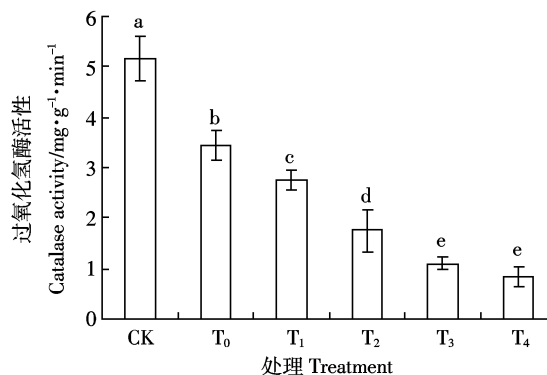


图 3 不同浓度 Zn 对 Hg 胁迫下小麦种子过氧化氢酶活性的影响

Figure 3 Influence of different Zn treatments on catalase activity of wheat seeds under Hg stress

3 讨论

Hg 是植物非必需元素, 在植物体内积累到一定程度, 就可能对植物造成毒害作用^[13-14]。马成仓等^[15]的研究证明, HgCl_2 对小麦种子萌发产生毒害的临界浓度是 $5 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 约为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Hg。本研究中, Hg 单独胁迫下, 与对照相比, 小麦种子萌发率下降, 芽长与根长受到抑制, 说明 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Hg 对小麦种子产生了毒害作用。

Hg 对 SH 自由基有很强的亲和力, 会扰乱任何未受保护的蛋白质的正常功能。Hg 会结合到蛋白质分子的同一条链或两条相邻的链上^[16], Hg 和蛋白质的结合会增加某些 DNA 片段的密度, 从而改变它们在 DNA 链上的位置, 改变 DNA 的正常结构, 当蛋白质中 Hg 的含量达到一定程度时就导致蛋白质沉淀^[17], 因此 Hg 可以破坏细胞的酶系统, 从而抑制酶的活性。也有研究证明^[18], 低浓度 Hg 胁迫会刺激植物的生长, 促进某些酶的活性。

种子萌发是一个需要大量能量和物质的过程, 发芽所需的能量和物质完全来源于贮存物质氧化分解所释放的能量。贮存物质的分解需要大量的酶参与, 因此种子发芽时酶的变化是最为明显的现象。小麦是淀粉型种子, 种子中贮存物质主要为淀粉, 其次为蛋白质, 因此淀粉酶、蛋白酶是种子萌发过程中的重要酶类。淀粉分解为小麦幼胚的发育提供能量和碳源, 而蛋白质分解产物氨基酸则是制造新组织的主要原料。过氧化氢酶是一种保护性酶, 可以清除过氧化氢, 限制潜在的活性氧伤害, 植物组织中过氧化氢酶活性与植物的抗逆性密切相关^[19-20]。本研究中, Hg 单独胁迫下, 小麦种子 α 淀粉酶与过氧化氢酶活性受到抑制, 蛋白酶活性提高, 说明 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Hg 能促进小麦萌发过程中对蛋白质的分解利用, 同时抑制对淀粉的分解利用, 降低组织的抗氧化能力。蛋白酶活性的升高可用植物的应激反应来解释, 段昌群等^[21]认为小剂量、短时间内的重金属处理, 可以提高或加速植物的某些生理生化反应, 即所谓的应激反应。这是由于植物在逆境的诱导下, 植物机体本身的防御机能应激加强, 防御体系中的物质活性迅速升高, 促进了部分酶的活性^[22]。另有研究表明^[23], 植物对重金属的应激反应存在一个耐性临界值, 重金属含量超过这一临界值, 即表现出毒害作用。植物中不同的酶类存在不同的临界值, 因此在 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Hg 胁迫下表现出不同的变化趋势。

Zn 是植物必需的营养元素, 适量的 Zn 对许多关键酶的合成、蛋白结构的稳定起着非常重要的作用, Zn 还对氧化胁迫造成的膜脂过氧化、质膜损害、膜渗透性的改变具有稳定和保护效应^[24-26]。有文献报道^[27], Zn 对细胞保护作用的途径之一是基于控制过氧化作用, 作用机理可能是由于 Zn 离子和 S 的配体有高度亲和力, 与膜蛋白的 SH 基形成稳定的硫醇盐。Zn 与 Hg 为同族元素, 具有相同的外层电子结构, 在植物体内可能与 Hg 竞争结合 SH 基, 从而减少 Hg 与蛋白质的结合, 缓解 Hg 对酶系统的破坏。

本研究中, 低浓度 Zn ($10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 加入后, Hg 胁迫下受到抑制的小麦种子根长与芽长得到一定程度恢复, 可能的原因是 Zn 的加入促进部分酶的合成, 抑制了过氧化作用, 改善了植物细胞内环境, 促进了植物生长。说明该浓度下, Zn 对 Hg 的毒害起到了一定的缓解作用, 该结果与王立新等^[28]对豌豆的研究结果一致。冯淑利等^[29]的研究表明, 较高浓度的 Zn 可使植物体内活性氧自由基含量升高, 诱发膜脂过氧化作用, 同时活性氧自由基会攻击蛋白质上的氨基酸残基, 使其金属结合位点被优先氧化, 导致蛋白质和叶绿体发生降解, 对植物体造成伤害。本研究中, Zn 对 Hg 毒性的缓解作用随着外加 Zn 浓度的升高而呈逐渐减弱的趋势, 高浓度 Zn ($50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 反而进一步抑制了种子芽长与根长, 与 Hg 共同表现出毒害作用, 与上述研究成果相一致。Zn 的加入对 Hg 胁迫下小麦种子的萌发率未表现出显著影响。

不同浓度 Zn ($10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的加入使 Hg 胁迫下活性受抑制的 α 淀粉酶活性出现不同程度升高, 峰值出现在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 处理中, 说明实验设计浓度下, Zn 抑制了 Hg 对 α 淀粉酶系统的破坏, 促进了酶的活性, 这种促进作用在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 浓度下最为明显。乔琳等^[30]对玉米种子的研究中, Zn 单独作用未能促进 α 淀粉酶活性, 可能的原因是 Zn 对 α 淀粉酶的促进作用主要表现在缓解 Hg 毒性过程中。在蛋白酶活性的试验中, Zn 的加入则抑制了 Hg 对酶活性的促进作用, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 使蛋白酶活性下降至接近对照水平, 说明 Zn 减弱了 Hg 胁迫对蛋白酶的影响, 可能的原因是 Zn 加入后与 Hg 竞争结合 SH 基, 缓解了 Hg 对蛋白酶的刺激作用, 从而减弱了植物的应激反应, 该结果与陈刚才等^[31]对小麦幼苗酶活性的研究结果类似。较高浓度下 ($20 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Zn 使得蛋白酶活性下降至低于对照水平, 并且随着 Zn 浓度升高蛋白酶活性逐渐下降, 表现出毒害作用。

过氧化氢酶的试验结果与上述两种酶不同,Zn的加入未表现出对Hg影响的缓解作用,Hg胁迫下受到抑制的酶活性进一步降低,并随着外加Zn浓度的升高逐渐下降。马成仓等^[2]的研究证明,Hg浓度高于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 可抑制大豆种子过氧化氢酶活性,而乔传英等^[32]的研究证明,Zn浓度高于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 即可对小麦种子过氧化氢酶产生毒害作用。由此可推知,本研究中过氧化氢酶活性下降可能是Hg与Zn联合抑制造成,二者表现出协同作用。因此Zn的加入可加剧Hg对过氧化氢酶的毒害作用。

4 结论

Zn的加入可以在一定程度上缓解 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg对小麦种子萌发造成的影响。对于种子根长、芽长及 α 淀粉酶活性,Zn可缓解Hg对其的抑制作用,对于蛋白酶活性,Zn则减弱了Hg对其的促进作用。以上缓解作用在Zn浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最显著,较高浓度下,缓解作用减弱,甚至表现出毒害作用。因此,对于单一重金属Hg污染,可以通过适当调节Zn的加入水平来缓解Hg对植物造成的危害。

在种子萌发率及过氧化氢酶活性方面,Zn的加入未表现出对Hg影响的缓解作用,并且进一步抑制了过氧化氢酶的活性,因此Zn对Hg毒性的缓解作用只表现在部分方面。

参考文献:

- [1] 罗春玲,沈振国.植物对重金属的吸收和分布[J].植物学通报,2003,20(1):59-66.
LUO Chun-ling, SHEN Zhen-guo. The mechanisms of heavy metal uptake and accumulation in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, 20(1):59-66.
- [2] 马成仓,洪法水,李清芳.汞对大豆种子萌发中膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J].中国油料作物学报,1995,17(3):10-13.
MA Cheng-cang, HONG Fa-shui, LI Qing-fang. The effect of mercury on membrane lipid peroxidation and endogenous protective systems of soybean during germination[J]. *Chinese Journal of Oilcrop Sciences*, 1995, 17(3):10-13.
- [3] 高大翔,刘惠芬,刘卉生,等.汞胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响[J].农业环境科学学报,2005,24(增刊):13-16.
GAO Da-xiang, LIU Hui-fen, LIU Hui-sheng, et al. Effects of Hg on seed germination, seedling development and physiological and biochemical characteristics of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):13-16.
- [4] Vallee B L, Auld D S. Zinc coordination function and structure of zinc enzymes and other protein[J]. *Biochemistry*, 1990, 29:5647-5659.
- [5] 徐晓燕,杨肖娥,杨玉爱.锌在植物中的形态及生理作用机理研究进展[J].广东微量元素科学,1999,6(11):1-6.
XU Xiao-yan, YANG Xiao-e, YANG Yu-ai. Progress in the research on the forms of Zn in plant and mechanisms of physiological role of Zn[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1999, 6(11):1-6.
- [6] 张福锁.锌营养状况对小麦根细胞膜透性的影响[J].植物生理与分子生物学学报,1992,18(1):24-28.
ZHANG Fu-suo. Effect of zinc nutritional status on membrane permeability in wheat roots[J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 1992, 18(1):24-28.
- [7] 周彦峰,吴伟,胡庚东,等.镉锌联合诱导金属硫蛋白在鲫鱼肝脏和肾脏中的表达[J].生态环境学报,2009,18(3):811-816.
ZHOU Yan-feng, WU Wei, HU Geng-dong, et al. Metallothionein in liver and kidney of *Carassius auratus* exposing to cadmium and zinc[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3):811-816.
- [8] 连祥霖,郑颂毅.锌对氯化汞免疫毒性的影响及其机理[J].环境与健康杂志,1999,16(5):266-267.
LIAN Xiang-lin, ZHENG Song-yi. Effects of zinc on immune toxicity of mercuric chloride and its mechanism[J]. *Journal of Environment and Health*, 1999, 16(5):266-267.
- [9] 徐乐焱,王毅,邱炳源,等.锌金属硫蛋白拮抗甲基汞对红细胞膜损伤的作用[J].卫生研究,1999,15(3):182-183.
XU Le-yan, WANG Yi, QIU Bing-yuan, et al. The protective effects of zinc metallothionein against erythrocyte membrane damage induced by methylmercury[J]. *Journal of Hygiene Research*, 1999, 15(3):182-183.
- [10] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:121-123.
ZOU Qi. Guidebook of phyto-physiology experiments[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:121-123.
- [11] 朱广廉.植物生理学实验[M].北京:北京大学出版社,1990:13-16.
ZHU Guang-lian. Plant physiology experimentation[M]. Beijing: Peking University Press, 1990:13-16.
- [12] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2001:165-167.
LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001:165-167.
- [13] Stoeva N, Berova M, Zlatev Z. Physiological response of maize to arsenic contamination[J]. *Biologia Plantarum*, 2004, 47:449-452.
- [14] 刘建新,赵国林,王毅民. Cd、Zn复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(1):54-58.
LIU Jian-xin, ZHAO Guo-lin, WANG Yi-min. Effects of Cd and Zn combined stress on membrane lipid peroxidation and antioxidant enzyme system of maize seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):54-58.
- [15] 马成仓,洪法水,李清芳. Hg浸种对玉米种子萌发过程中几种酶活性的影响[J].应用生态学报,1997,8(1):110-113.
MA Cheng-cang, HONG Fa-shui, LI Qing-fang. Effect of seed soaking with Hg on enzyme activities of maize seed during its germination[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(1):110-113.
- [16] Zago M P, Oteiza P I. The antioxidant properties of zinc interactions

- with iron and antioxidants[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2001, 31(2):266-274.
- [17] 原海燕, 黄苏珍, 韩玉林. 镉对镉胁迫下马蔺生长、镉积累及生理抗性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(9):2111-2116.
YUAN Hai-yan, HUANG Su-zhen, HAN Yu-lin. Effects of Zn on the growth, Cd accumulation and physiological resistance of *Iris lacteavar. chinensis* under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9):2111-2116.
- [18] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1):8-15.
YANG Xiao-e, LONG Xin-xian, NI Wu-zhong. Physiological and molecular mechanisms of heavy metal uptake by hyperaccumulating plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1):8-15.
- [19] 张治安, 王振民, 徐克章. Cd胁迫对萌发大豆种子中活性氧代谢的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4):670-673.
ZHANG Zhi-an, WANG Zhen-min, XU Ke-zhang. Effect of cadmium stress on active oxygen metabolism in germinated soybean seeds[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(4):670-673.
- [20] 沈益绿, 姚维志, 罗红波. Hg²⁺对细叶蜈蚣草的毒害效应[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 26(2):223-226.
SHEN Ang-lü, YAO Wei-zhi, LUO Hong-bo. Toxological effects of Hg²⁺ pollution on *Egeria najas*[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2004, 26(2):223-226.
- [21] 段昌群, 王焕校. Pb²⁺、Cd²⁺、Hg²⁺对蚕豆(*Vicia faba* L.)乳酸脱氢酶的影响[J]. *生态学报*, 1998, 18(4):413-417.
DUAN Chang-qun, WANG Huan-xiao. The Effects of lead, cadmium and mercury ions on LDH in *Vicia faba*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4):413-417.
- [22] 刘玲, 杨双春, 张洪林. Hg²⁺胁迫下玉米生理生态变化的研究[J]. *生态环境*, 2004, 13(2):161-163.
LIU Ling, YANG Shuang-chun, ZHANG Hong-lin. Physiological and ecological response of maize to mercury stress[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):161-163.
- [23] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6种植物对Pb的吸收与耐性研究[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5):533-537.
LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Research on lead uptake and tolerance in six plants[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5):533-537.
- [24] 刘文霞, 郭华武, 孟祥远, 等. 汞与丁草胺对油麦菜生长和生理特性的影响[J]. *河南农业科学*, 2010, 3(1):51-54.
LIU Wen-xia, GUO Hua-wu, MENG Xiang-yuan, et al. Effects of butachlor and mercury on growth and physiological characteristics of *Lactuca sativa* L[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, 3(1):51-54.
- [25] 马成仓, 洪法水. 汞对小麦种子萌发和幼苗生长作用机制初探[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(4):373-378.
MA Cheng-cang, HONG Fa-shui. Preliminary explanation of the mechanism about effects of mercury on wheat seed germination and seedling growth[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4):373-378.
- [26] Bettger W J, O'Dell B L. Acritical physiological role of zinc in the structure and function of biomembranes[J]. *Life Science*, 1981, 28:1425-1438.
- [27] Clarkson T W. The pharmacology of mercury compounds[J]. *Annu Rev Pharmacol*, 1972, 12:375-406.
- [28] 王立新, 郁建锋, 张泉波, 等. 镉对汞胁迫下豌豆幼苗生长发育效应的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(20):8444-8446.
WANG Li-xin, YU Jian-feng, ZHANG Quan-bo, et al. Influence of Zn on the growth and development of pea seedling under Hg stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(20):8444-8446.
- [29] 冯淑利, 邵云, 刘洋, 等. Zn²⁺胁迫对小麦幼苗生理活性影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1):140-145.
FENG Shu-li, SHAO Yun, LIU Yang, et al. Effects of Zn²⁺ stress on physiological activity of wheat seedlings[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2007, 26(1):140-145.
- [30] 乔琳, 傅兆麟. Cu、Fe、Zn和Pb对玉米种子萌发率及淀粉酶活性的影响[J]. *种子*, 2010, 29(6):36-38.
QIAO Lin, FU Zhao-lin. Effects of Cu, Fe, Zn and Pb on seed germination and α -amylase activity of maize[J]. *Seed*, 2010, 29(6):36-38.
- [31] 陈刚才, 甘露, 万国江. 镉对汞毒害小麦幼苗生长及生理活性的影响[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(5):257-259.
CHEN Gang-cai, GAN Lu, WAN Guo-jiang. Alleviative effect of zinc cation on mercury toxicity of wheat seedlings[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(5):257-259.
- [32] 乔传英, 王红星, 乔琳, 等. 重金属Fe、Zn对小麦种子萌发和生理的影响[J]. *广东农业科学*, 2010(2):7-8.
QIAO Chuan-ying, WANG Hong-xing, QIAO Lin, et al. Effect of Fe and Zn on wheat seed germination and physiology[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010(2):7-8.