植物学通报 2004, **21** (5): 531~538
Chinese Bulletin of Botany

研 究 论 文

Hg^{2+} 与 POD 复合处理对小麦萌发及幼苗生长的影响

[1,2]马剑敏 [2]李 今 [1]张改娜 [1]杨柯金 [1]王 琳 [2]吴振斌①

[1](中国科学院水生生物研究所 武汉 430072) [2](河南师范大学生命科学学院 新乡 453002)

摘要 通过水培实验研究了0、10、20、50、70和100 mg·L^{-1} Hg^{2+}和65 U·mL^{-1}的过氧化物酶(POD)混合浸种对小麦(*Triticum aestivum* L.)萌发及幼苗生长过程中的10个形态和生理生化指标的影响。结果表明：施加外源POD可明显提高种子发芽率、植株日均增重和幼苗叶片的可溶性蛋白含量，增加幼苗叶片内源超氧物歧化酶(SOD)和POD的活性，拮抗Hg^{2+}胁迫对种子发芽率、苗高、日均增重及叶片可溶性蛋白含量的不利影响，Hg^{2+}浓度较高时(≥50 mg·L^{-1})，对种子发芽率和日均增重的拮抗作用更明显，并对较低浓度Hg^{2+}(≤20 mg·L^{-1})胁迫引起的叶片SOD活性的上升和低于100 mg·L^{-1}的 Hg^{2+}胁迫引起的叶片POD活性的上升有进一步的促进作用；然而对幼苗平均最长根长度、侧根数和幼苗叶片叶绿素含量则无明显影响。

关键词 Hg^{2+}+ POD，小麦萌发，SOD，POD

Effects of POD and Hg^{2+} on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat

[1,2]MA Jian-Min [1]LI Jin [2]ZHANG Gai-Na [2]YANG Ke-Jin [2]WANG Lin [1]WU Zhen-Bin①

[1](*Hydrobiology Institute, the Chinese Academy of Sciences*, Wuhan 430072)
[2](*College of Life Science, Henan Normal University*, Xinxiang 453002)

Abstract Experiments were carried out to study the effects of soaking wheat seeds with POD (peroxidase) and Hg^{2+} together on 10 morphological and physiological indexes during the seed germination and seedling growth. The results showed that exogenous POD could raise the seed germination rate, wake the increased average weight per day and the soluble protein centent of the leaves, and enhance the activities of SOD (superoxide dismutase) and POD of the leaves. The exogenous POD also resist and weaken the effects of the Hg^{2+} stress on the seeds germination rate, height of wheat, increased average weight per day and the soluble protein. Moreover, when Hg^{2+}≥50 mg·L^{-1}, the resisting and weakening effects on the germination rate and the increased average fresh weight per day were more obvious. Besides, exogenous POD could further heighten the activities of SOD under the stress of Hg^{2+}≤20 mg·L^{-1}, and POD under the stress Hg^{2+}≤100 mg·L^{-1} in the leaves. But exogenous POD should not obviously affect on the average length of the longest wheat roots,

①**通讯作者**。Author for correspondence. E-mail: wuzb@ihb.ac.cn
收稿日期：2003-06-06 **接受日期**：2003-09-04 **责任编辑**：崔郁英

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112

the number of lateral roots and the chlorophyll content of the leaves.

Key words Hg^{2+}+POD, Wheat germination, SOD, POD

Hg 是污染环境的重要因素之一，它对小麦(*Triticum aestivum* L.)胁迫的研究，国内外已有许多报道。过氧化物酶(POD)是细胞内抗脂质过氧化作用的酶活性保护系统的主要成分之一，是一种对逆境胁迫十分敏感的酶，Hg^{2+} 胁迫不仅可引起小麦形态指标的变化，而且也可引起小麦内源 POD、超氧化物歧化酶(SOD)等的变化 (陈鑫阳等, 1985; 张志杰等，1989；Titov，1995；庞欣等，2001)。但外源 POD 对抗重金属胁迫的研究尚未见报道。本文利用水培法，研究了外源POD与不同浓度Hg^{2+}复合浸种对小麦种子萌发及幼苗生长过程中的形态和生理生化指标的影响，旨在探讨外源 POD 在小麦对抗重金属毒害方面所具有的作用，以拓展 POD 的应用范围。同时，进一步了解 Hg^{2+} 污染对植物影响的规律和机制。

1 材料与方法

1.1 实验材料及方法

以‘豫麦 49 号’为材料。用蒸馏水、$HgCl_2$ 和 POD 溶液(3 250 U·mL^{-1})配制总体积为 50 mL 含 1 mL POD 和不同浓度 Hg^{2+} 的溶液于 13 个干净的小烧杯中(详见表 1 注解)。其中 POD 为萝卜(*Raphanus sativus* L.)提取品(马剑敏等，1998)，冻干品为淡棕褐色。之后每烧杯中放置 80 粒饱满无损伤小麦种子，浸泡 24 h 后，将其摆放于相应编号的直径为 15 cm 并垫有 4 层滤纸的培养皿中，把原浸种液倒入其中，以后每天喷洒蒸馏水保持湿润至第 10 d。培养条件为室温(25~28℃)、自然光照。实验重复 3 次。

1.2 测试指标与方法

(1)发芽率(第 7 d): 胚芽长至种子大小一半时为发芽。每天观察，至对照 1 的发芽率不再变化为止。

(2)日均增重(第 1~7 d): 取 20 粒(棵)，称鲜重取平均值。

(3)平均最长根长度和根长的抑制率: 测量20棵第7 d的麦苗的最长根长,求其平均值，其值分别除以对照 1 的相应值后与 100% 的差即为抑制率。

(4)侧根数(第 7 d): 量取 20 棵取平均值。

(5)苗高(第 7 d): 量取 20 棵取平均值。

(6)叶绿素含量(第 7~10 d): 采用浸提法(龚富生和张嘉宝，1995)。

(7)可溶性蛋白含量(第7~10 d): 定量称取叶片(取自多棵苗)入研钵，加入定量的PBS (pH 7.0)和少量石英砂，在冰上研磨，10 000 r·min^{-1} 离心后留上清，之后用 Bradford 法(张龙翔，1997)测定。

(8)SOD酶活(第7~10 d): 采用改良联苯三酚自氧化法(邓碧玉等，1991)，样液的制备同(7)。

(9)POD酶活(第7~10 d): 采用愈创木酚法(张龙翔, 1997)，样液的制备同(7)。

2 结果与分析

2.1 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦萌发的影响

Hg^{2+}+ POD复合处理(以下简称复合处理)可显著影响小麦种子发芽率(p<0.01)，但结果(表1)

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112

表明，在 $Hg^{2+} \leq 10\ mg \cdot L^{-1}$ 时对发芽率影响不大，之后随着 Hg^{2+} 浓度升高，发芽率明显下降，Hg^{2+} 浓度与发芽率呈负相关($r=-0.9235$)。

单一 Hg^{2+} 处理(以下简称单一处理)也可显著影响发芽率($p<0.01$)，在 Hg^{2+} 浓度较低($\leq 20\ mg \cdot L^{-1}$)时，发芽率明显高于对照 1，表现为一定的促进效应，$50\ mg \cdot L^{-1}$ Hg^{2+} 处理，发芽率猛然降至50%，即高浓度 Hg^{2+} 处理时表现为强烈的抑制作用。李丽君等(2001)也发现低浓度的镉(Cd)可以提高玉米的发芽率，而高浓度的 Cd 则不利于玉米的萌发和生长。复合处理与之相比，两者间差异显著($p<0.05$)，表现为低浓度不再促进发芽，而高浓度的抑制效应也明显减缓 。

另外，灭活 POD 处理(以下简称灭活处理)的小麦发芽率低于对照 1 和单一活性 POD 处理(以下简称活性处理)的种子发芽率。说明施加外源 POD 可明显提高种子发芽率，明显减缓高浓度 Hg^{2+}($\geq 50\ mg \cdot L^{-1}$)对发芽率的抑制作用。

2.2 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦苗高的影响(表 1)

复合与单一两种处理的苗高均显著低于对照 1($p<0.01$)，且随 Hg^{2+} 浓度的升高，苗高渐次降低，但复合处理的又明显高于相应单一处理的苗高($p<0.05$)，而且在高 Hg^{2+} 浓度($\geq 50\ mg \cdot L^{-1}$)时差别更明显。灭活处理的小麦苗高度低于对照 1 和活性处理的苗高度。说明施加外源 POD 可减轻 Hg^{2+} 尤其是高浓度 Hg^{2+} 对小麦苗高度的抑制作用。

2.3 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦根生长的影响(表 1)

复合和单一处理均导致小麦的平均最长根长度显著改变($p<0.01$)，而且，平均最长根长度与 Hg^{2+} 浓度均显著负相关($r_1=-0.957$, $r_2=-0.966$, $\alpha>0.01$)。但复合处理的平均最长根长度又明

表 1 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小表发芽和生长的影响

Table 1 The effects of Hg^{2+} and POD combination treatment on wheat germination and growth

指标 Index	对照 1 Control 1	对照 2 Control 2	处理 Treatment 1	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'	6/6'
GR(%)	85	80	86	86/91	79/90	74/50	73/39	43/31
H(cm)	11.32	8.64	9.13	9.26/8.04	8.45/8.15	8.36/5.65	7.20/4.19	3.97/1.95
ALR(cm)	6.31	9.05	8.75	7.01/6.02	6.21/5.74	5.51/5.15	4.98/3.02	2.58/1.15
IR(%)	0	-43.4	-38.7	-11.1/4.6	1.6/9.0	12.7/19.4	21.1/52.1	59.1/81.8
NFR	5.2	5.3	4.9	5.3/5.2	5.4/5.2	5.4/5.1	5.2/5.0	4.2/4.0
IAFW($mg \cdot d^{-1}$)	7.50	4.96	10.07	8.67/5.48	8.01/5.43	6.16/2.48	3.95/1.71	1.30/1.08

对照 1. 用蒸馏水(DW)培养；对照 2. 含 1 mL 加热灭活的 POD 溶液；1. 含 1 mL POD；2. 含 Hg^{2+} 10 $mg \cdot d^{-1}$ 和 1 mL POD；2'. 含 10 $mg \cdot d^{-1}$ Hg^{2+}；3. 含 Hg^{2+} 20 $mg \cdot d^{-1}$ 和 1 mL POD；3'. 含 Hg^{2+} 20 $mg \cdot d^{-1}$；4. 含 Hg^{2+} 50 $mg \cdot d^{-1}$ 和 1 mL POD；4'. 含 Hg^{2+} 50 $mg \cdot d^{-1}$；5. 含 Hg^{2+} 70 $mg \cdot d^{-1}$ 和 1 mL POD；5'. 含 Hg^{2+} 70 $mg \cdot d^{-1}$；6. 含 Hg^{2+} 100 $mg \cdot d^{-1}$ 和 1 mL POD；6'. 含 Hg^{2+} 100 $mg \cdot d^{-1}$; GR. 发芽率; H. 苗高; ALR. 平均最长根长度; IR. 根长抑制率; NFR. 侧根数; IAFW. 日均增重

Control 1. Cultivated with distilled water; Control 2. With distilled water and 1 mL boiled POD; 1. With distilled water and 1 mL POD (3250 U); 2. With Hg^{2+} 10 $mg \cdot d^{-1}$ and 1 mL POD; 2'. With Hg^{2+} 10 $mg \cdot d^{-1}$; 3. With Hg^{2+} 20 $mg \cdot d^{-1}$ and 1 mL POD; 3'. With Hg^{2+} 20 $mg \cdot L^{-1}$; 4. With Hg^{2+} 50 $mg \cdot L^{-1}$ and 1 mL POD; 4'. With Hg^{2+} 50 $mg \cdot d^{-1}$; 5. With Hg^{2+} 70 $mg \cdot d^{-1}$ and 1 mL POD; 5'. With Hg^{2+} 70 $mg \cdot d^{-1}$; 6. With Hg^{2+} 100 $mg \cdot d^{-1}$ and 1 mL POD; 6'. With Hg^{2+} 100 $mg \cdot d^{-1}$. The total volume of culture solution is 50 mL in every one. GR. The germination rate; H. The height of wheat; ALR. The average length of the longest wheat root; IR. The inhibitory rate for root; NFR. The number of lateral root; IAFW. Increased average fresh weight per day

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112

显高于相应浓度单一处理的值(p<0.05)。从对根长的抑制率来看，单一处理时，10 mg·L^{-1} Hg^{2+}时已显轻微抑制，抑制率随 Hg^{2+} 浓度升高呈指数增长，而在复合处理时，虽然抑制率的变化趋势与单一处理的相同，但其值较低，而且在 10 mg·L^{-1} Hg^{2+} 时抑制率为负值，20 mg·L^{-1} Hg^{2+} 时才显轻微抑制。从侧根数目看，两种处理对其均未产生显著影响(p>0.05)。

灭活和活性处理的平均最长根长度均高于对照1的值,而且在此项各数值中以灭活处理的值为最高；灭活处理的小麦侧根数目则无明显变化。说明施加外源 POD 对小麦侧根数无明显影响，虽可减轻 Hg^{2+} 对平均最长根长度的抑制作用，但此效应不是由 POD 酶活引起的。

2.4 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦日均增重的影响(表 1)

复合和单一处理均导致小麦日均增重显著改变(p<0.01)。在复合处理中，Hg^{2+} 浓度较低时(≤ 20 mg·L^{-1})小麦日均增重大于对照 1，之后随 Hg^{2+} 浓度升高而减小，Hg^{2+} ≥ 70 mg·L^{-1} 时大幅度减小；在单一处理中，总趋势与前者相同，但各数值均低于对照 1，而且日均增重大幅度减小的 Hg^{2+} 浓度降至 50 mg·L^{-1}，与复合处理相比，相应的值均有明显降低(p<0.05)。

另外，灭活处理的小麦日均增重亦明显低于对照 1。活性处理的小麦日均增重明显高于对照 1。说明施加外源 POD 可明显增加小麦萌发期的日均增重，拮抗 Hg^{2+} 对日均增重的抑制作用，而且在 Hg^{2+} 浓度较高时，拮抗效果更明显。

2.5 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦幼苗叶片叶绿素含量的影响(表 2)

横向比较，总体上看，在单一处理中，叶绿素 a(Chl a)含量对 Hg^{2+} 浓度变化较为敏感(p<0.05)，低 Hg^{2+} 浓度(≤ 20 mg·L^{-1})时含量高于对照 1，高 Hg^{2+} 浓度(≥ 50 mg·L^{-1})时常低于对照 1，并随 Hg^{2+} 浓度升高而持续下降；Shimazaki 等(1980)曾发现，经 SO_2 处理的植物叶片中，Chl a 更易遭到破坏，任安芝等(2000)的研究也证实，Chl a 对重金属胁迫的变化更为敏感。叶绿素 b (Chl b)含量变化不大(p>0.05)，总体上看，在高 Hg^{2+} 浓度(≥ 50 mg·L^{-1})时，含量有所下降； chl a 和 chl b 的变化情况与张志杰等(1989)的研究一致；Chl a+Chl b 含量第 7 d 在各组间变化不大(p>0.05)，在此后的3 d中，其含量在低Hg^{2+}浓度(≤20 mg·L^{-1})时有所增加，

表2 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦叶片叶绿素含量(mg·g^{-1} FW)的影响

Table 2 The effect of Hg^{2+} and POD combination treatment on chlorophyll content (mg·g^{-1} FW) of wheat leaves

日期(d) Date	指标 Index	对照 1 Control 1	对照 2 Control 2	处理 Treatment 1	2/2′	3/3′	4/4′	5/5′	6/6′
7	Chl a	8.64	8.71	8.32	8.34/8.77	8.56/9.08	7.78/8.70	9.02/9.12	8.22/8.38
	Chl b	2.14	2.05	2.11	2.00/2.59	2.04/2.45	2.02/2.46	2.51/2.31	2.14/2.36
	Chl a+Chl b	10.78	10.76	10.43	10.34/11.36	10.60/11.53	9.80/11.15	11.53/11.43	10.36/10.64
8	Chl a	8.93	9.96	10.01	9.60/10.64	9.54/10.03	8.77/9.12	10.13/8.35	7.28/7.26
	Chl b	2.23	2.58	2.48	2.42/2.80	2.40/2.60	2.22/2.33	2.53/2.15	2.06/1.95
	Chl a+Chl b	11.16	12.54	12.49	12.02/13.44	11.94/12.63	10.99/11.45	12.66/10.50	9.34/9.21
9	Chl a	9.07	10.11	10.06	9.25/10.42	10.09/9.02	9.77/7.26	10.11/7.16	9.06/7.02
	Chl b	2.55	2.16	2.37	2.38/2.01	2.63/2.08	3.02/1.69	3.01/1.65	2.54/1.83
	Chl a+Chl b	11.62	12.27	12.43	11.63/12.43	12.72/11.10	12.79/8.95	13.12/8.81	11.60/8.85
10	Chl a	9.38	10.08	10.28	10.23/9.88	11.54/11.01	10.45/7.69	10.10/7.28	8.88/7.18
	Chl b	2.84	2.97	2.80	3.00/2.72	3.10/2.96	2.73/2.05	2.73/1.82	2.32/1.91
	Chl a+Chl b	12.22	13.05	13.08	13.23/12.60	14.64/13.91	13.18/9.74	12.83/9.10	11.20/9.09

对照 1 和对照 2 以及各处理组的说明同表 1

The notes on control 1, control 2 and the treatment are same as table 1

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112

之后随 Hg^{2+} 浓度升高而逐渐下降。在复合处理中，Chl a 的值与对照 1 差异不明显($p>0.05$)，在低 Hg^{2+} 浓度(≤ 20 mg·L^{-1})时，其含量与对照 1 相比并未增加，而在高 Hg^{2+} 浓度(≥ 50 mg·L^{-1})时，其含量与对照 1 相比并未降低，直到 Hg^{2+} 为 100 mg·L^{-1} 时，其含量才有所减小，即施加外源 POD 既减缓了低浓度 Hg^{2+} 对叶绿素含量的促升作用，也减缓了高浓度 Hg^{2+} 对叶绿素含量的抑制作用；Chl b 和 Chl a+Chl b 含量的变化趋势与单一处理组近似，但其含量在高 Hg^{2+} 浓度时无下降(有些值在 Hg^{2+} 为 100 mg·L^{-1} 时才稍有下降)($p>0.05$)。纵向比较，总体上看，Chl a、Chl b 和 Chl a+Chl b 含量在 Hg^{2+} 浓度较低(≤ 20 mg·L^{-1})时随时间后延而有所上升，但幅度不大，而在高浓度(≥ 50 mg·L^{-1})时，有所下降或先升后降。

灭活和活性处理的各指标变化趋势同对照 1，但在数值上三者间差异不显著。总之，在低浓度 Hg^{2+}(≤ 20 mg·L^{-1})的胁迫下，叶片叶绿素含量有所上升，而在高浓度 Hg^{2+}(≥ 50 mg·L^{-1})的胁迫下，叶片叶绿素含量下降，施加外源 POD 虽可减缓高浓度 Hg^{2+} 对叶片叶绿素含量的促降作用，也可削减低浓度 Hg^{2+} 对叶绿素含量的促升作用，但此效应不是由 POD 酶活性引起的。

2.6 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦幼苗叶片可溶性蛋白含量的影响(表 3)

横向比较，复合与单一处理均导致叶片可溶性蛋白(SP)含量显著改变($p<0.05$)。在单一处理中，叶片 SP 含量在低 Hg^{2+} 浓度(≤ 20 mg·L^{-1})时最高，之后随 Hg^{2+} 浓度的升高而逐渐降低；复合处理时的变化趋势同前，但相应的 SP 含量较高($p<0.05$)，与对照 1 相比，在 Hg^{2+} 为 70 mg·L^{-1} 时，SP 含量仍未明显下降。纵向比较，SP 含量在 7～8 d(对照 1 和加 10 mg·L^{-1} Hg^{2+} 的组为 7～9 d)上升，9～10 d 下降。

另外，灭活处理组的 SP 含量在 7～8 d 与对照 1 和活性处理组没有明显差别，在 9～10 d 则低于对照 1 和单一活性 POD 处理组。说明施加外源 POD 可提高小麦幼苗叶片可溶性蛋白含量，拮抗 Hg^{2+}，尤其是高浓度 Hg^{2+} 对 SP 含量的促降作用。植物在一定程度的胁迫条件下体

表 3 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦叶片中可溶性蛋白含量和 SOD、POD 活性的影响

Table 3 The effects of Hg^{2+} and POD combination treatment on soluble protein content and activity of SOD and POD of wheat leaves

日期 Date (d)	指标 Index	对照 1 Control 1	对照 2 Control 2	处理 Treatment 1	2/2′	3/3′	4/4′	5/5′	6/6′
7	SP(mg·g^{-1} FW)	16.33	17.09	16.21	19.62/17.31	20.06/17.26	17.41/14.86	16.18/14.28	14.23/12.58
	SOD(U·g^{-1} FW)	232	280	344	311/267	306/284	256/281	234/289	252/206
	POD(U·g^{-1} FW)	6434	5800	7134	9486/8356	9300/7980	8344/11036	7912/8618	8674/7964
8	SP(mg·g^{-1} FW)	20.08	20.52	20.02	21.94/20.92	21.46/19.61	20.40/17.24	19.84/16.80	18.81/15.97
	SOD(U·g^{-1} FW)	319	224	400	373/333	312/358	288/387	235/483	278/283
	POD(U·g^{-1} FW)	5812	4536	7200	7552/7719	7364/6438	7040/5946	4960/3034	4488/3080
9	SP(mg·g^{-1} FW)	21.03	17.00	22.07	22.93/21.64	19.18/18.55	18.48/17.0	18.60/16.64	17.28/16.48
	SOD(U·g^{-1} FW)	411	334	545	512/438	482/442	448/556	432/870	467/615
	POD(U·g^{-1} FW)	9139	7920	9710	13720/10875	12540/10010	9288/15375	8305/6788	3888/3290
10	SP(mg·g^{-1} FW)	18.01	15.78	19.39	18.66/18.15	18.22/17.69	18.00/17.61	17.68/16.0	16.08/15.89
	SOD(U·g^{-1} FW)	308	221	470	443/332	371/333	342/367	326/507	428/499
	POD(U·g^{-1} FW)	6777	6812	9384	9725/8838	9460/10063	7920/9800	7750/4060	6496/4130

对照 1 和对照 2 以及各处理组的说明同表 1

The notes on control 1, control 2 and the treatment are same as table 1

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112

内蛋白质含量的增加是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应，其意义有二：一是细胞结构和功能遭受伤害的反应(汤章诚，1984); 二是植物在逆境下的适应表现，系防护反应，可作为鉴定植物相对抗性的指标(任安芝等，2000)。Smirnoff (1993)提出环境胁迫下植物内源蛋白质可能具有清除活性氧的作用，这一生理功能已在强光(AliaArora and Saradhi，1995)、紫外辐射(Saradhi *et al.*，1995)、重金属铜和镉(Wu, 1995)等胁迫下的多种植物中得到间接证实。

2.7 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦幼苗叶片 SOD 活性的影响(表 3)

横向比较，复合与单一处理均导致叶片 SOD 活性显著改变($p<0.05$)。在单一处理中，叶片 SOD 活性随 Hg^{2+} 浓度升高呈先升后降趋势，在 70 mg·L^{-1} 达高峰；在复合处理中，叶片 SOD 活性的高峰值在 Hg^{2+} 为 10 mg·L^{-1} 时，之后随 Hg^{2+} 浓度升高而下降，但在 100 mg·L^{-1} 时有反弹之势；两组处理相比，差异显著($p<0.05$)，在低 Hg^{2+} 浓度(≤ 20 mg·L^{-1})时，前者数据低于后者，而在高浓度 Hg^{2+}(≥ 50 mg·L^{-1})时，前者数据高于后者。纵向比较，在 7～9 d，总体趋势上升，第 10 d 下降。

灭活处理组的SOD活性明显低于对照1和活性处理组的值，并以活性处理组的值为最高。说明 Hg^{2+} 胁迫可引起内源 SOD 活性的上升，在 70 mg·L^{-1} Hg^{2+} 时达高峰；施加外源 POD 可明显提高内源 SOD 的活性，并且在低 Hg^{2+} 浓度(≤ 20 mg·L^{-1})时，可进一步提高内源 SOD 的活性，而在高浓度 Hg^{2+}(≥ 50 mg·L^{-1})时，对内源 SOD 活性的促升作用不如相应浓度的单一 Hg^{2+} 作用。

2.8 Hg^{2+}+ POD 复合处理对小麦幼苗叶片中 POD 活性的影响(表 3)

横向比较，复合与单一处理均导致叶片 POD 活性显著改变($p<0.01$)。在单一处理中，叶片 POD 活性随 Hg^{2+} 浓度升高呈先升后降趋势，在 50 mg·L^{-1} 达高峰；在复合处理中，叶片 POD 活性的变化趋势同前，但相应的数值较高($p<0.05$)，峰值出现在 10 mg·L^{-1} Hg^{2+} 时，而且在 Hg^{2+} 为 20 mg·L^{-1} 时 POD 活性仍较高，与 10 mg·L^{-1} 时的值差别不大。纵向比较，POD 活性有较大波动。

灭活处理组的 POD 活性明显低于活性处理组的值，也低于对照 1 的值。说明 Hg^{2+} 胁迫可引起内源 POD 活性的上升，在 50 mg·L^{-1} Hg^{2+} 时达高峰；施加外源 POD 可提高内源 POD 的活性，而且比单一 Hg^{2+} 胁迫引起的内源 POD 活性增加的更大。

3 讨论

外源POD对小麦种子萌发及幼苗生长过程中的多种形态和生理生化指标有明显影响，这种影响应通过改变植物体内的生理生化过程来实现。但是，POD 为大分子蛋白质，目前所知，除特殊的内吞作用外，大分子物质不能通过细胞膜进入细胞内部。因此，它对细胞内的生理生化过程的影响可能是间接的，它可能作为一种刺激物或信号，诱导细胞内发生某些变化，从而改变了原有的生理生化过程，进而影响到植物体的生长发育过程。对于 POD 拮抗 Hg^{2+} 胁迫的作用，还有一个原因，即 POD 作为蛋白质它可以和 Hg^{2+} 结合，从而在客观上起到了降低 Hg^{2+} 浓度的作用。这两种作用孰重孰轻，还有待于进一步研究。

叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素，含量的高低能够反应光合作用水平的强弱，严重玲等(1995)认为叶绿素含量的多少是衡量叶片衰老的重要指标，关于重金属导致叶绿素含量

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112

降低的原因，Stobart 等(1985)认为是由于重金属抑制原叶绿素酸酯还原酶(protochlophyllide reductase)和影响氨基 -γ- 酮戊酸(aminolaevulini acid)的合成。而这两个酶对叶绿素的合成是必需 的 。

根据自由基伤害理论(Fridovich，1978)，植物细胞内自由基的积累会引起膜脂过氧化，从而伤害细胞。干旱、高盐、重金属、SO_2 和 NO 等都能引起植物细胞内自由基的增多而伤害植物(罗立新等，1998；卢青，2000)。正常情况下，植物自身有自由基清除系统，可及时清除代谢产生的自由基而免受伤害。但在逆境下，一方面其自由基产生过多，另一方面其自由基清除系统会发生紊乱，从而使细胞受到伤害。在自由基清除系统中，SOD、POD 和过氧化氢酶(CAT)是植物抗氧化酶活性保护系统中的主要酶，它们共同作用可清除过氧化物。因此，当细胞中 POD 和 SOD 活性增强时，正是生物体抵抗逆境胁迫的表现，其活性的维持和提高是植物耐受重金属胁迫的物质基础之一(杨居荣等，1996)，它们的水平可作为植物逆境生理和衰老的生理指标，故随着 Hg^{2+} 胁迫的增强，细胞中 POD 和 SOD 活性也增强。但生物体的抗性是有限度的，如果胁迫超过了阈值，细胞将受到严重伤害，导致其生理活动能力下降，POD 和 SOD 的活性下降也就不可避免。因此，本实验显示的 POD 和 SOD 活性分别在 $Hg^{2+} \geq 50\ mg \cdot L^{-1}$ 和 $70\ mg \cdot L^{-1}$ 时开始下降，可能意味着它们对 Hg^{2+} 胁迫的浓度阈限。施加外源 POD 后，使内源 POD 活性的进一步上升，可能是由于外源 POD 作为一种刺激物或信号，诱导细胞内的某些生理生化过程发生变化，从而造成 POD 对 Hg^{2+} 胁迫的浓度阈限提高所致。内源 SOD 的活性仅在 $Hg^{2+} \leq 20\ mg \cdot L^{-1}$ 时引起叶片 SOD 活性的进一步上升，之后发生波动，说明 SOD 对环境变化更敏感，庞欣等(2001)的研究有同样的结论。其机理涉及到外源 POD 与内源 POD 和 SOD 之间，以及内源 POD 与 SOD 之间的互动关系，这些关系目前尚不明晰。

参 考 文 献

马剑敏，王林，张晋豫，王林嵩，马晴雯，靳萍，徐存拴，1998. 超滤法浓缩提取萝卜 POD 过程中的数量关系探讨. 河南师范大学学报，**26**(2)：64~67

邓碧玉，袁勤生，李文杰，1991. 改良的连苯三酚自氧化测定超氧化物歧化酶活性的方法. 生物化学与生物物理进展，**18**：163

卢青，2000. 植物耐盐性的分子生物学研究进展. 生物学杂志，**17**(4)：9~11

任安芝，高玉葆，刘爽，2000. 铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响. 应用与环境生物学报，**6**：112~116

李丽君，郑普山，谢苏妨，2001. 镉对玉米种子萌发和生长的影响。山西大学学报(自然科学版)，**24**：93~94

陈鑫阳，梁厚果，王丽萍，种康，1985. Hg^{2+} 对小麦萌发、生长和某些生理过程的影响.兰州大学学报(自然科学版), **21**: 22~29

汤章诚，1984. 逆境条件下植物蛋白质累积及其可能的意义. 植物生理学通讯，**10**：15~21

张龙翔，1997. 生化实验方法和技术(第二版).北京：高等教育出版社，145~155

张志杰，吕秋芳，方芳，1989. 汞对小麦幼苗生长发育和生理功能的影响. 环境科学，**10**(4)：10~14

杨居荣，贺建群，张国祥，毛显强，1996. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应. 中国环境科学，**16**：113~117

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112

严重铃，李瑞智，钟章成，1995. **模拟酸雨对绿豆、玉米生理生态特征的影响. 应用生态学报，6(增刊)：**124~131

罗立新，孙铁珩，靳月华，1998. **镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累. 环境科学学报，18：**595~599

庞欣，王东红，彭安，2001. **汞胁迫对小麦抗氧化酶活性的影响. 环境化学，20：**351~355

龚富生，张嘉宝，1995. **植物生理学实验. 北京：气象出版社，**74~76

AliaArora S, Saradhi P P, 1995. Light-induced enhancement in proline levels in *Vigna radiata* exposed to environmental stress. *Aust J Plant Physiol*, **22**: 383~389

Fridovich I,1978. The biology of oxygen radicals. *Science*, **201**: 875~880

Saradhi P P, AliaArora S, Prasad K V S K, 1995. Proline accumulates in plants esposed to UV radiation and protects them against UV-induced peroxidation. *Biochem Biophys Res Commun*, **209**: 1~5

Shimazaki K, Sakaki T, Kondo N, Sugahara K, 1980. Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO_2 fumigated leaves of spinach. *Plant Cell Physiol*, **21**: 1193~1204

Smirnoff N,1993. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytol*, **125**: 27~58

Stobart A K, Grifiths W T, Ameen-Bukhari I, Sherwood P R, 1985. The effect of Cd^{2+} on the biosynthesis of chlorophyll, in leaves of barley. *Plant Physiol*, **63**: 293~298

Titov A F,1995. The effect of wheat mercury ions on the growth of wheat, barley and cucumber seedlings. *Russ J Plant Physiol*, **4**: 403~407

Wu J T, Chang S C, Chou T L, 1995. Intracellular proline accumulation in some algae exposed to copper and cadmium. *Bot Bull Acad Sinica*,**36**: 89~93

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t23-112