

光合细菌对 Cd²⁺胁迫下黑小麦幼苗生长及抗氧化酶的影响

马文丽¹, 张荷玲², 杨素萍¹

(1.山西大学生命科学与技术学院, 山西 太原 030006; 2.山西大学体育学院, 山西 太原 030006)

摘要:采用水培试验方法系统研究了不同浓度 Cd²⁺、不同形式光合细菌及光合细菌与 Cd²⁺协同处理对黑小麦种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶的影响,以探讨光合细菌对植物幼苗生长及应激能力的影响。结果表明:低浓度 Cd²⁺对幼苗生长具有轻微刺激作用,高浓度 Cd²⁺对幼苗生长具有抑制作用;光合细菌菌体及 30 倍稀释上清液对种子萌发及幼苗生长具有刺激作用,而培养液原液及上清液具有显著抑制作用;不同处理均可引起黑小麦 POD 及 CAT 酶活性及同工酶表达的改变;外部形态及内源抗氧化酶改变均表明光合细菌对 Cd²⁺胁迫伤害黑小麦幼苗具有一定缓解效应。

关键词:光合细菌; 镉胁迫; 种子萌发; 幼苗生长; 过氧化物酶(POD); 过氧化氢酶(CAT)

中图分类号:X172 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)06-1059-06

Effects of Photosynthetic Bacteria on Seedling Growth and Antioxidant Enzymes in Black Wheat Under Cadmium Stress

MA Wen-li¹, ZHANG He-ling², YANG Su-ping¹

(1.School of Life Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Physical Education College, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The seeds of black wheat were cultured in liquid media containing heavy metal Cd²⁺, photosynthetic bacteria (*Rhodospseudomonas palustris*) or the combination of both. The seed germination, seedling growth and antioxidant enzyme activities were examined for each media, in order to explore the possible facilitative effects of photosynthetic bacteria on early-stage growth and development of black wheat. The data showed that low amount of Cd²⁺ could slightly stimulate the seedling growth, but high concentration of Cd²⁺ had inhibition effects. The photosynthetic bacteria colonies and the culture supernatant diluted by 30 times significantly improved the seed germination rate and seedling growth, but the undiluted culture solution or its supernatants showed deterring effects. The POD and CAT activities of seedlings changed when exposed to Cd²⁺ and/or bacterial culture solutions. The morphological improvement and the enhancement of the antioxidant enzyme activity in black wheat seedlings suggested that the photosynthetic bacteria could alleviate the damage caused by Cd²⁺ stress.

Keywords: photosynthetic bacteria; cadmium stress; seed germination; seedling growth; POD; CAT

光合细菌(PSB, *Photosynthetic Bacteria*)是一类在厌氧光照下进行不产氧光合作用的原核生物的总称,它在厌氧光照及好氧黑暗条件下都能以有机物为基质进行代谢和生长,因此对有机物有很强的降解转化能力,同时对硫、氮素的转化也起了很大的作用。在分

类地位上,光合细菌属于原核生物界细菌门真细菌纲红螺菌目(*Rhodospirillales*),可分为紫色细菌和绿色细菌。光合细菌在光照下能利用硫化氢、硫代硫酸盐、分子氢或其他还原剂,把二氧化碳还原成有机物,经细菌型光合作用,将二氧化碳还原成有机营养物质,并能固定大气中的氮。目前已知,所有的厌氧性光合细菌都能以二氧化碳为碳源,以无机物为供氢体,在光照下进行自养生长。同时,这些细菌也能利用有机物进行异养生长^[1]。近年来,光合细菌在水产养殖、饲料添加、能源开发、保健产品、净化城市生活污水、处理高

收稿日期:2005-02-25

基金项目: 山西省自然科学基金 (20041077); 国家自然科学基金 (30470044)

作者简介: 马文丽(1969—),女,河北省南宫人,在职博士研究生,从事生物化学教学及科研工作。E-mail:mawli@sxu.edu.cn

联系人:杨素萍

浓度工业有机废水等方面已有广泛应用^[2,3]。在农业生产上,光合细菌作为优质有机肥料也开始得到广泛应用。当前环境重金属污染日趋严重,而镉(Cd²⁺)是首要元素之一。不当的工业排污使得大量 Cd²⁺进入土壤-植物生态系统,并通过食物链危及人类健康^[4,5]。

本文以黑小麦为材料,在实验室系统研究 Cd²⁺胁迫对黑小麦种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶影响的基础上^[6],研究了光合细菌对 Cd²⁺胁迫下黑小麦种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶的影响,为光合细菌的进一步开发应用提供一定理论基础,该内容目前还未见有文献报道。

1 材料与方法

1.1 试验材料

黑小麦 76 号由山西省农科院孙善澄研究员提供。光合细菌为沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palustris*),30℃±2℃,5 000 lx 光照厌氧条件下培养至对数期,菌体浓度为 1.95×10⁹·mL⁻¹,留取部分原液处理样品,其他菌液于 5 000 r·min⁻¹ 下离心 20 min,分取上清液及菌体处理样品。

1.2 材料处理

选取均匀饱满的种子,将其整齐地排列在铺有数层纱布的培养皿(10 cm×2.0 cm)中,每皿 50 粒。分别用去离子水、光合细菌的原液、上清液、30 倍稀释上清液、不同浓度的 Cd²⁺(10、20、50 mg·L⁻¹,用 CdCl₂·2.5 H₂O 配制,以 Cd²⁺浓度计)、原液与不同浓度的 Cd²⁺的 1:1 混合液、菌体与不同浓度的 Cd²⁺的混合液(菌体浓度为 1.0×10⁹·mL⁻¹)、纯菌体(菌体浓度为 1.0×10⁹·mL⁻¹)浸泡处理种子 24 h,弃去多余处理液,置室温下自然光照发芽(20℃~22℃)。每 1 处理做 3 个重复培养。

1.3 种子萌发指标测定

浸种后 7 d 测定萌发率。萌发 4 d,开始测定苗长,每 2 d 量取 1 次,每次每皿随机抽取 20 棵进行测量,试验数据用统计学方法进行处理,结果用平均值±标准偏差表示,各处理组与对照用双尾 *t*-检验法进行比较。

1.4 粗酶液的制备

分别取已生长 4、10 d 的黑小麦幼苗,称重,每克鲜重加 2 mL 研磨介质,冰浴研磨。研磨介质为 50 mmol·L⁻¹ pH7.8 的磷酸缓冲液,内含 2 mmol·L⁻¹ Na₂-EDTA,1%聚乙烯吡咯烷酮(PVP)。匀浆浸提过夜,在 5 000 r·min⁻¹ 下冷冻离心 20 min,上清液即为粗酶提

取液,可用于测定酶活性及进行同工酶电泳分析。

1.5 酶活性测定

POD 参照 Kochba 等(1977)的方法。用愈创木酚-过氧化氢试剂(含有 0.2 mol·L⁻¹ pH6.0 磷酸缓冲液 50 mL,30%过氧化氢 0.028 mL;愈创木酚 0.019 mL)在 756 分光光度计上测定 470 nm 处光密度值,酶活性以 $\Delta OD_{470} \cdot \min^{-1} \cdot g^{-1}FW$ 表示^[7]。CAT 活性测定采用南京建成生物工程研究所的过氧化氢酶活性测定试剂盒(紫外分光法)。酶活性以 U·g⁻¹FW 表示。

1.6 同工酶电泳

采用 PAGE 方法^[8]。分离胶浓度为 7%,浓缩胶浓度为 3%,点样量 10~20 μ L,在 80~100 V 稳压条件下电泳约 3~4 h。

POD 同工酶采用联苯胺染色法:将联苯胺溶液(取联苯胺 0.8 g,加 6 mL 冰醋酸,加热至 80℃溶解,待溶后加入 34 mL 蒸馏水)、4%氯化铵溶液、5%ED-TA-Na 溶液、0.3% H₂O₂ 溶液按 1:1:1:2 的比例混合,倒入白瓷盘内凝胶板上,来回振荡 5~10 min,待酶带清晰显出,立即放入自来水冲洗,酶带全变成棕色,在 GDS-8000 凝胶成像系统上拍照。

CAT 同工酶染色法:将 1%可溶性淀粉溶液于沸水浴中充分煮沸至无色透明。胶片脱下后放入上述溶液中,4℃下浸泡 100 min,倾出淀粉液加入 0.5%过氧化氢溶液,室温下静置 1 min,然后用双蒸水漂洗几次,加入 0.5% KI 溶液(取 1 g,用双蒸水定容至 200 mL,加 1 mL 冰醋酸使之酸化),将漂洗好的胶片放入。室温下,背景逐渐变蓝色,酶活处无色透明,清晰后立即以蒸馏水漂洗,并迅速照相,以防谱带消失。

2 结果和讨论

2.1 不同处理对种子萌发的影响

从表 1 可以看出,不同形式的光合细菌处理对种子的萌发率具有不同的影响。*t*-检验显示,30 倍稀释上清液处理对黑小麦种子萌发率具有显著激活效应,纯菌体处理对黑小麦种子萌发率影响不大,原液处理导致黑小麦种子萌发率明显降低。从表 2 可以看出,Cd²⁺加光合细菌原液处理对黑小麦种子萌发率具有极显著抑制效应,Cd²⁺加光合细菌菌体处理对黑小麦种子萌发率具有激活效应,见表 3。

2.2 不同处理对幼苗苗长的影响

从图 1 可以看出,10 mg·L⁻¹ Cd²⁺对苗长影响不明显,20 mg·L⁻¹ Cd²⁺对苗长有抑制作用,而 50 mg·L⁻¹ Cd²⁺对苗长有明显抑制作用。从图 2 可以看出,30 倍稀释

表 1 不同形式光合细菌处理对黑小麦种子萌发率的影响

Table 1 Effects of various forms of photosynthetic bacteria on seed germination of black wheat

	CK	原液	上清液	30 倍稀释上清液	纯菌体
萌发率/%	92.7±3.1	54.0±4.0**	26.0±3.5**	97.3±1.2*	94.7±1.2

注:* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

表 2 光合细菌原液与 Cd^{2+} 溶液协同处理对黑小麦种子萌发率的影响

Table 2 Effects of photosynthetic bacteria cooperated with Cd^{2+} on seed germination of black wheat

	CK	$10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ +原液	$20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ +原液	$50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ +原液
萌发率/%	92.7±3.1	47.3±4.2**	30.7±2.3**	32. 7±1.2**

注:* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

表 3 光合细菌菌体与 Cd^{2+} 溶液协同处理对黑小麦种子萌发率的影响

Table 3 Effects of photosynthetic Bacteria cooperate with Cd^{2+} treatment on seed germination of black wheat

	CK	$10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ +菌体	$20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ +菌体	$50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ +菌体
萌发率/%	92.7±3.1	95.3±1.2	90.7±2.3	93.3±1.2

注:* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

上清液在萌发初期对苗长影响不明显,7d 以后表现出刺激作用且随时间延长逐渐加剧。纯菌体萌发初期即表现刺激作用,且刺激作用较 30 倍稀释上清液明显。从图 3 可以看出, $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ 加菌体对苗长有抑制作用; $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ 加菌体在初期对苗长有抑制作用,但从 9 d 以后抑制作用逐渐减弱,转为刺激作用; $50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ 加菌体初期对苗长有很强烈的抑制作用,从 12 d 开始,抑制作用减弱,转为刺激作用。

图 4 对 Cd^{2+} 处理与协同处理对苗长的影响进行了比较,可以看出, Cd^{2+} 浓度为 $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,协同处理下苗长均比 Cd^{2+} 胁迫下苗长明显降低; Cd^{2+} 浓度为 $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,胁迫 10 d 内,协同处理苗长比 Cd^{2+} 胁迫下苗长降低,而 10 d 以后,协同处理下苗长均比 Cd^{2+} 胁迫下苗长升高; Cd^{2+} 浓度增加到 $50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,胁迫 6 d 内,协同处理苗长比 Cd^{2+} 胁迫下苗长降低,6 d 后协同处理比 Cd^{2+} 处理苗长增加,且增加幅度随处理时

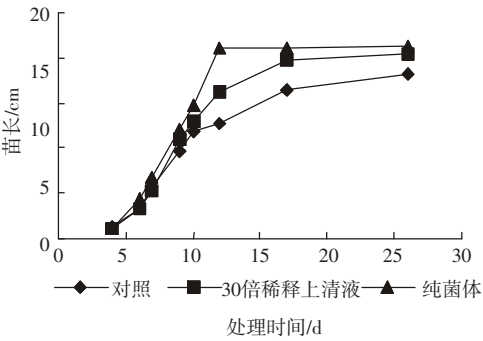


图 2 不同形式光合细菌处理对黑小麦苗长的影响
Figure 2 Effects of various forms of photosynthetic bacteria on seedling length of black wheat

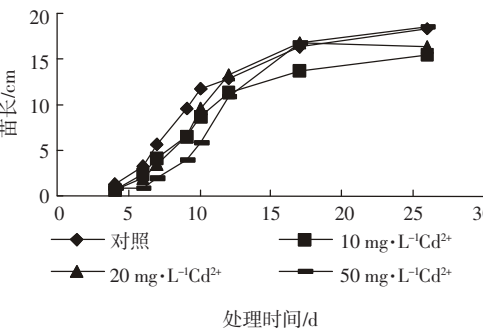


图 3 光合细菌与 Cd^{2+} 溶液协同处理对黑小麦苗长的影响
Figure 3 Effects of photosynthetic bacteria cooperated with Cd^{2+} on seedling length of black wheat

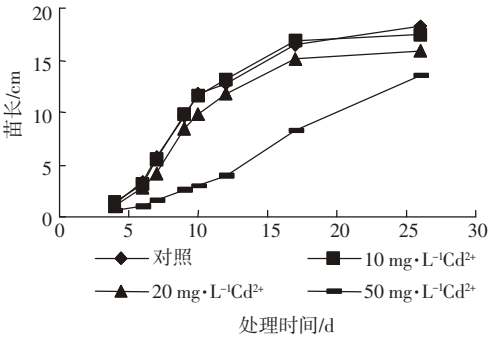


图 1 不同浓度 Cd^{2+} 处理对黑小麦苗长的影响
Figure 1 Effects of various concentrations of Cd^{2+} on seedling length of black wheat

间延长增大。从外部形态显示光合细菌菌体对 Cd^{2+} 胁迫的缓解作用随 Cd^{2+} 浓度的增加及处理时间的延长而愈加明显。

2.3 不同处理对 POD 及 CAT 酶活性的影响

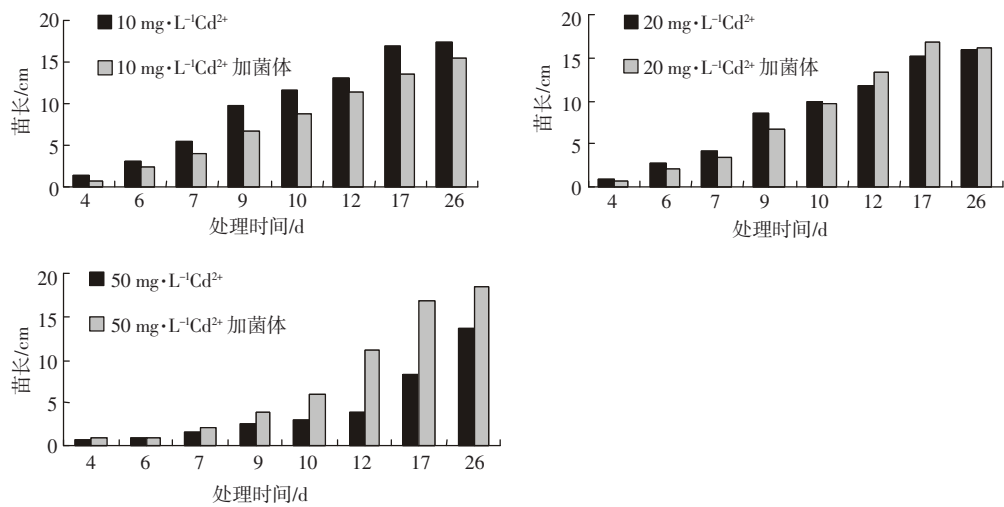


图 4 Cd²⁺处理与协同处理对苗长的影响比较

Figure 4 Effects of Cd²⁺ treatment alone and cooperative treatments on seedling length of black wheat

过氧化物酶和过氧化氢酶具有清除植物体内活性氧自由基,维持细胞膜稳定性的功能。表 4 和表 5 数据表明,Cd²⁺处理 4 d 时,黑小麦幼苗 POD 酶活性被激活,而 CAT 酶活性被抑制。Cd²⁺+菌体处理后,激活效应与抑制效应均被缓解,使酶活性趋于正常水平。Cd²⁺处理 10 d 时,对黑小麦幼苗 POD 酶活性转为抑制效应,CAT 酶活性同样被抑制。Cd²⁺+菌体处理后,POD 及 CAT 酶活性均显著提高,表明光合细菌可提高植物应激能力,缓解 Cd²⁺伤害。

2.4 不同处理下 POD 及 CAT 同工酶电泳分析

利用 PAGE 方法对黑小麦不同处理下幼苗中 POD 同工酶进行了分离分析。结果表明,黑小麦幼苗在处理的不同时期,其 POD 同工酶谱带差异明显,谱带条数及深浅均有变化。总体来看,POD 同工酶谱带可划分为 2 个区,靠近点样端为 I 区,具有 4~5 条带;远离点样端为 II 区,有 3~4 条带,且不同处理条件下

同工酶谱带的变化主要集中在 II 区。

图 5 是黑小麦幼苗在处理 4 d 时 POD 同工酶电泳图。可以看出,POD₆ 这条酶带在不同处理下变化明显。在较低浓度 Cd²⁺处理下,POD₆ 的表达被激活,谱带较宽较深,酶表达量较多;在光合细菌处理下,POD₆ 的表达被关闭。

图 6 是黑小麦幼苗在处理 10 d 时 POD 同工酶电泳图。可以看出,在 10、20、50 mg·L⁻¹Cd²⁺处理下,POD₈ 的谱带颜色逐渐加深,带宽逐渐加大,其表达被激活,且与 Cd²⁺浓度梯度具、有明显的剂量-效应关系。其原因可能是由于 Cd²⁺进入植物组织中,通过一系列生化反应产生了一些对植物体有害的过氧化物。而随着 Cd²⁺浓度的增大及胁迫时间的延长,这种过氧化物在植物体内逐渐增加。由于 POD 具有催化这些对自身有害的过氧化物的氧化分解的功能,因此随着植物体内这些 POD 酶底物浓度的增加,诱使

表 4 不同处理对黑小麦幼苗 POD 酶活性影响

Table 4 Effects of different treatments on POD activity of black wheat seedling

	处理 4 d 时 POD 酶活性 / Δ OD ₄₇₀ ·min ⁻¹ ·g ⁻¹ FW	处理 10 d 时 POD 酶活性 / Δ OD ₄₇₀ ·min ⁻¹ ·g ⁻¹ FW
CK	173.8±6.0	285.9±23.6
原液处理	139.9±11.8*	165.9±10.5**
30 倍稀释上清液处理	257.6±24.3**	294.0±22.9
10 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ 处理	224.4±22.9*	223.8±12.8*
20 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ 处理	230.3±27.3*	234.4±17.7*
50 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ 处理	259.3±23.9**	302.3±19.6
10 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ +菌体处理	141.4±13.6*	274.3±19.0
20 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ +菌体处理	150.1±11.4*	299.5±22.7
50 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ +菌体处理	157.8±14.6	320.7±29.0

注: * P<0.05, ** P<0.01。

表 5 不同处理对黑小麦幼苗 CAT 酶活性影响

Table 5 Effects of different treatments on CAT activity of black wheat seedling

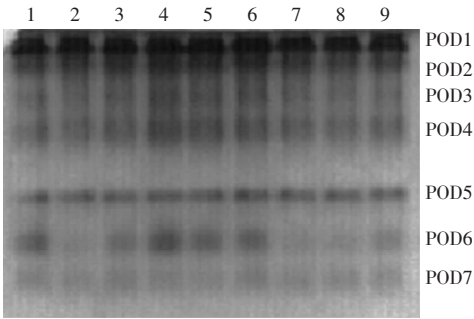
	处理 4 d 时 CAT 酶活性	处理 10 d 时 CAT 酶活性
	/U·g ⁻¹ FW	/U·g ⁻¹ FW
CK	0.73±0.06	1.38±0.19
原液处理	0.23±0.04**	1.50±0.12
30 倍稀释上清液处理	0.78±0.10	1.22±0.06
10 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ 处理	0.72±0.09	1.26±0.06
20 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ 处理	0.48±0.09*	1.23±0.04
50 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ 处理	0.28±0.06**	1.02±0.06
10 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ +菌体处理	0.41±0.06**	1.46±0.13
20 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ +菌体处理	0.36±0.06**	1.49±0.15
50 mg·L ⁻¹ Cd ²⁺ +菌体处理	0.33±0.06**	1.78±0.21*

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

POD活性增加所致。同时,在 Cd²⁺中加入光合细菌处理后,POD₈的表达也开始被激活,其带宽增大,颜色也加深,和单纯 Cd²⁺处理后相比,表现出了明显激活

作用。显示光合细菌可提高植物应激能力。

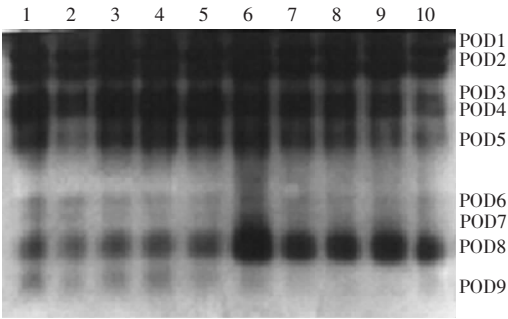
利用 PAGE 方法对不同处理下黑小麦幼苗中 CAT 同工酶进行了分离分析。结果显示,黑小麦 CAT 同工酶谱带数目较少,在不同时期具有 2~3 条,其中第 2 条带为强带,1、3 为弱带。从图 7 可以看出,处理 4 d 时黑小麦幼苗 CAT 酶活性很低,只显示 1 条很窄很浅的 CAT₂ 带,不同处理下差异不明显。随幼苗生长时间的延长,CAT 酶活逐渐增加,谱带加宽加深。图 8 显示,处理 10 d 时不同处理间谱带差异明显,30 倍上清及低浓度 Cd²⁺对 CAT₂ 有激活作用;高浓度 Cd²⁺对 CAT₂ 具抑制作用,50 mg·L⁻¹ Cd²⁺处理下 CAT₁ 表达完全关闭,而菌体加 50 mg·L⁻¹ Cd²⁺处理下 CAT₁ 表达被激活,且 CAT₂ 谱带较单纯 Cd²⁺处理下加宽加深,显示光合细菌可提高植物应激能力。



1~3 依次为纯水、原液、30 倍稀释上清液处理
4~6 为 10、20、50 mg·L⁻¹ Cd²⁺处理
7~9 为 10、20、50 mg·L⁻¹ Cd²⁺ + 菌体处理

图 5 处理 4d 时黑小麦芽 POD 同工酶电泳图

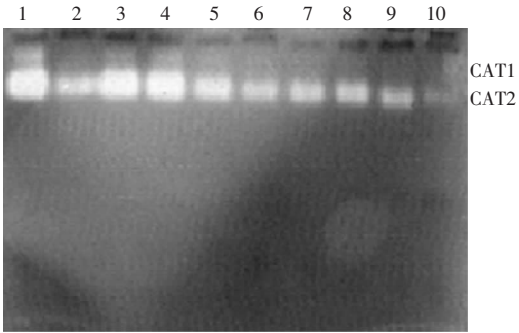
Figure 5 Electrophoretogram of POD isozyme after 4 days treatment



1~3 依次为纯水、原液、30 倍稀释上清液处理
4~6 为 10、20、50 mg·L⁻¹ Cd²⁺处理
7~9 为 10、20、50 mg·L⁻¹ Cd²⁺ + 菌体处理
10 为纯菌体处理

图 6 处理 10d 时黑小麦芽 POD 同工酶电泳图

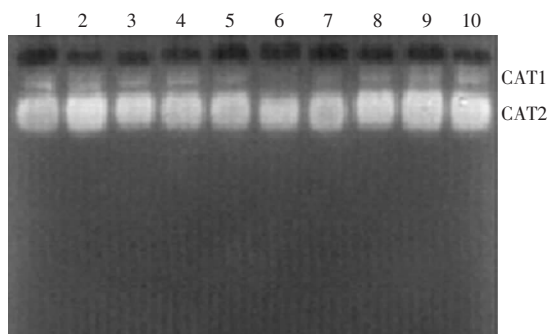
Figure 6 Electrophoretogram of POD isozyme after 10days treatment



1~3 依次为纯水、原液、30 倍稀释上清液处理
4~6 为 10、20、50 mg·L⁻¹ Cd²⁺处理
7~9 为 10、20、50 mg·L⁻¹ Cd²⁺ + 菌体处理
10 为纯菌体处理

图 7 处理 4d 时黑小麦芽 CAT 同工酶电泳图

Figure 7 Electrophoretogram of CAT isozyme after 4 days treatment



1~3 依次为纯水、原液、30 倍稀释上清液处理;
4~6 为 10、20、50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 处理;
7~9 为 10、20、50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ + 菌体处理;
10 为纯菌体处理。

图 8 处理 10 d 时黑小麦芽 CAT 同工酶电泳图

Figure 8 Electrophoretogram of CAT isozyme after 10 days' treatment

关于重金属对植物的伤害机理,根据自由基伤害理论,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。逆境如干旱、高盐、重金属、 SO_2 、 NO_x 等都能引起植物细胞内自由基的增多而伤害植物^[9]。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,POD 和 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^[4,5]。因此,当细胞中 POD、CAT 活性增强时,正是生物体抵抗逆境胁迫的表现,故随着 Cd^{2+} 胁迫的增强,细胞中 POD、CAT 活性也增强。但生物体的抗性是有限的,如果胁迫超过了阈限,细胞将受到严重伤害,导致其生理活动能力下降,POD、CAT 的活性下降也就不可避免。

同工酶分析是认识基因存在和表达的工具^[10]。同工酶几乎存在于所有生物中。在遗传上,当一种酶同时受几个基因控制时,更容易适应环境的变化。一个基因由于突变而无用时,其他基因的存在仍然可以产生类似作用的内同工酶,这有助于机体适应突变的不利后果。本试验通过研究 Cd^{2+} 胁迫及光合细菌处理下黑小麦幼苗中 POD 和 CAT 同工酶谱带的变化,证实了 Cd^{2+} 胁迫及光合细菌等不同处理对黑小麦内源抗氧化酶基因表达产生了一定的影响,某些处理下,基因表达被加强,某些处理下,基因表达被抑制,甚至完全关闭。

大量无机肥料与化学农药的使用,造成土壤残留农药的毒害、土壤盐化、板结严重,土壤肥力趋于衰

竭。因此,应大力提倡使用有机肥料和生物农药,而光合细菌已被证明为一种优质的有机肥料,逐步开始应用在农业生产上。光合细菌可作为底肥,或以拌种和叶面喷施等方式应用^[11]。光合细菌拌种对植物种子萌发及幼苗生长具有促进作用,已得到确认,但光合细菌的使用效果与菌液投放量、投放形式等多种因素密切相关,使用不当就难以取得好的效果。从试验结果来看,光合细菌培养液浓度过大,可对植物生长产生抑制作用。其原因可能为其某些代谢产物抑制了与植物种子萌发及幼苗生长相关的一些酶活性。对于光合细菌可缓解植物重金属伤害、增加植物应激作用,初步分析由于光合细菌为 G⁺ 原核生物,其细胞壁成分主要为肽聚糖,带负电荷和氨基、羟基等官能团,重金属与光合细菌接触时,可与其生成稳定的络合物^[12,13],从而降低环境中重金属含量,减轻逆境对植物的伤害。另外,光合细菌细胞内存在多种有效的自由基清除系统,如大量类胡萝卜素、卟啉类化合物、超氧化物歧化酶等^[14,15],可以清除活性氧自由基,提高植物应激能力。光合细菌作为有机肥料的施用方式方法及其作用的深层机制,有待于进一步探讨。

参考文献:

- [1] 朱玉章,俞吉安,林志新,等.光合细菌的研究及其应用[M].上海:上海交通大学出版社,1991.141-162.
- [2] 杨素萍,赵春贵,曲音波,等.铁和镍对光和细菌生长和产氢的影响[J].微生物学报,2002,43(2):257-263.
- [3] Sawada H. Photosynthetic bacteria in water treatment[J]. *J Ferment Technol*, 1997,55(2):311-316.
- [4] 仲维科,樊耀波,王敏健.我国农作物的重金属污染及其防止对策[J].农业环境保护,2001,20(4):270-272.
- [5] 王红镔,王焕校,文传浩.镉处理下不同小麦品种几种解毒机制探讨[J].环境科学学报,2002,22(4):524-528.
- [6] 马文丽,金小弟,王转花.镉处理对乌麦种子萌发幼苗生长及抗氧化酶的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(1):55-59.
- [7] 华东师范大学生物系植物生理教研组.植物生理实验指导[M].北京:人民教育出版社,1981.143-144.
- [8] 张龙翔,张庭芳,李令媛.生化实验方法与技术[M].北京:高等教育出版社,1997.
- [9] 罗立新,孙铁珩,靳月华,等.镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累[J].环境科学学报,1998,18(5):495-498.
- [10] 胡能书,万贤国.同工酶技术及其应用[M].长沙:湖南科学技术出版社,1985.3-105.
- [11] 杜近义,秦际威.光合细菌的开发应用进展[J].生物学通报,1998,33(11):15-18.
- [12] 周茂洪,张学俊,赵肖为.几种重金属离子对沼泽红假单胞菌的生物效应[J].微生物学通报,2003,30(3):64-68.
- [13] 周茂洪,赵肖为,周峙苗.几种重金属离子对光合细菌生长的抑制效应[J].生态学杂志,2002,21(4):6-11.
- [14] Oscar H, Clark A. Photoprotective function of carotenoid. *Chemistry and Biology*. New York: Plenum Press,1990.
- [15] 俞吉安,叶永钧,林志新,等.光合细菌中类胡萝卜素对脂质过氧化抑制作用研究[J].上海交通大学学报,1998,32(3):107-110.