

球形红细菌对镉胁迫下小麦幼苗几项生理生化指标的影响

郭 凌, 张肇铭, 芦冬涛

(山西大学生命科学与技术学院, 山西 太原 030006)

摘要:通过水培实验研究了 0、0.5、5、10、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 和 0、15% 光合细菌球形红细菌 (*Rhodobacter sphaeroides*) 菌悬液复合处理对小麦幼苗叶片几项生理生化指标的影响。结果表明,在 Cd^{2+} 胁迫下,小麦叶片丙二醛 (malonyldialdehyde, MDA) 和脯氨酸含量均随培养时间和处理液中 Cd^{2+} 浓度的增加而增加,而小麦叶片中超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性则随之降低。加入球形红细菌菌悬液后 MDA 和脯氨酸含量均有所降低,降幅分别为 2.8%~20.5% 和 0.6%~15.2%;而 SOD 和 CAT 活性均有所升高,增幅分别为 1.6%~59.4% 和 1.8%~12.4%。低浓度镉 ($[\text{Cd}^{2+}]=0.5 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 在幼苗培养第 5 d 对叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和叶绿素总量的合成有一定的促进作用,但到第 11 d 则转变为抑制作用。高浓度镉 ($[\text{Cd}^{2+}]>0.5 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对 4 种光合色素的合成均有抑制作用,且抑制作用随培养时间和 Cd^{2+} 浓度的增加而增加。加入球形红细菌菌悬液后小麦叶片 4 种光合色素含量都有不同程度的增加,增幅分别为 1.4%~24.4%、0.7%~15.4%、2.4%~13.6% 和 1.2%~20.1%。这说明球形红细菌不仅可以增强 Cd^{2+} 胁迫下小麦叶片抗氧化酶的活性,降低 MDA 和脯氨酸的含量,减轻体内膜脂过氧化的程度,而且可以增加光合色素的含量,从而缓解小麦受到的镉胁迫。

关键词:球形红细菌;小麦;镉;丙二醛;脯氨酸;SOD;CAT;叶绿素

中图分类号:X172 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)01-0040-06

Effects of *Rhodobacter sphaeroides* on Some Physiological -Biochemical Indexes of Wheat Seedlings Under Cadmium Stress

GUO Ling, ZHANG Zhao-ming, LU Dong-tao

(School of Life Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The combined effects of *Rhodobacter sphaeroides* solutions (0,15%) and cadmium ion (0,0.5,5,10 and 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on several physiological-biochemical indexes of the wheat seedlings leaves were investigated using water culture experiment. The results showed that under cadmium stress, the contents of malonyldialdehyde (MDA) and proline in leaves of wheat seedlings increased, but the activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) in the wheat seedling leaves decreased with the culture time and the cadmium concentrations increasing. Added *Rhodobacter sphaeroides* in solutions, the contents of MDA and proline in leaves of wheat seedlings decreased by 2.8%~20.5% and 0.6%~15.2%, and the activities of SOD and CAT increased by 1.6%~59.4% and 1.8%~12.4%, respectively. Low concentration of cadmium (0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) promoted the compositions of chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid and total chlorophyll at 5th day, but inhibited them at 11th day. High concentrations of cadmium ($>0.5 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) inhibited the compositions of phytochrome, and this inhibition effect strengthened with the culture time and the cadmium concentrations increasing. The contents of phytochrome in leaves of wheat seedlings with *Rhodobacter sphaeroides* increased by 1.4%~24.4%, 0.7%~15.4%, 2.4%~13.6% and 1.2%~20.1%, respectively. The results suggested that *Rhodobacter sphaeroides* could enhance the activities of antioxidant enzyme, reduce the contents of MDA and proline, relieve the lipid peroxidation and increase the contents of phytochrome in wheat leaves under cadmium stress, thus mitigate the damage of cadmium intimidation to wheat seedlings.

Keywords: *Rhodobacter sphaeroides*; wheat; cadmium; malonyldialdehyde (MDA); proline; superoxide dismutase (SOD); catalase (CAT); chlorophyll

收稿日期:2007-03-07

基金项目:国家科技攻关项目(2001BA540C)

作者简介:郭 凌(1982—),女,北京昌平,硕士研究生,主要从事“三废”处理及资源化的研究。E-mail:guoling0831@163.com

联系作者:张肇铭 E-mail:zhangzhm@sxu.edu.cn

光合细菌(Photosynthetic Bacteria, 简称 PSB)是能利用光能进行原始光合作用的一类原核微生物的总称。近年来,光合细菌在水产养殖、饲料添加剂、天然色素应用、有机肥料、处理工业有机废水等方面已有广泛应用^[1]。研究表明,镉对植物的毒害作用与其影响活性氧自由基的代谢平衡有关^[2]。镉胁迫可以使植物体内产生大量的自由基,引发并加剧膜脂质过氧化过程,引起 SOD、CAT 等抗氧化酶活性的变化,最终导致 MDA 大量积累和膜系统的损伤^[3]。利用光合细菌缓解镉对植物胁迫机制的研究尚未见报道。

本文以小麦为材料,用水培方法研究了球形红细菌菌悬液与不同浓度 Cd^{2+} 复合处理对小麦幼苗生长过程中几项生理生化指标的影响,为减轻镉对小麦苗期的危害提供了一种农业防护措施,也为光合细菌进一步开发利用提供了理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验菌种

光合细菌紫色非硫菌群红细菌属的球形红细菌(*Rhodobacter sphaeroides*),由本院光合细菌研究室分离鉴定保藏^[4]。

1.2 材料处理

将小麦(*Triticum aestivum*)“晋麦 170”种子用 3% H_2O_2 消毒 10 min,用去离子水洗净后浸泡 4 h,然后 25 °C 萌发过夜。选取大小一致露白的小麦种子,用去离子水在铺有滤纸的培养皿中培养 3 d 后移入盛有 200 mL 处理液的大培养皿中培养。处理液是用 Hoagland 营养液、 CdSO_4 溶液和球形红细菌菌悬液($\text{OD}_{580}=1.803$)配制而成的,处理液中 Cd^{2+} 浓度分别为 0、0.5、5、10、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,球形红细菌菌悬液的投入百分比为 0、15%。镉处理的最大浓度 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 小于镉胁迫下球形红细菌生长的安全浓度 22.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[5],因此可以保证处理过程中球形红细菌的正常活性。培养在光照培养箱中进行,条件为日温 25 °C,14 h,夜温 20 °C,10 h,培养周期为 13 d。在培养过程中每天补充去离子水,以保证处理液总体积不变^[6]。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 小麦叶片中叶绿素、脯氨酸和 MDA 含量的测定:

参见文献[7]。

1.3.2 小麦叶片中 SOD、CAT 活性的测定

采用南京建成生物工程研究所研制的超氧化物歧化酶活性测定试剂盒(黄嘌呤氧化酶法)和过氧化

氢酶活性测定试剂盒(紫外分光法)测定。酶活性以 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ 蛋白表示。

1.4 仪器与试剂

1.4.1 仪器

PGZ-200 光照培养箱(中科生命科技股份有限公司),烘箱,分析天平,干燥器,UV-2102 PC 型紫外可见分光光度计(美国尤尼柯公司),TGL-16G-A 型低温高速离心机(上海安亭科学仪器厂)。

1.4.2 试剂

100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉标准溶液(国家环境保护总局标准样品研究所),硫酸镉,95%乙醇,三氯乙酸,硫代巴比妥酸,以上试剂均为分析纯。

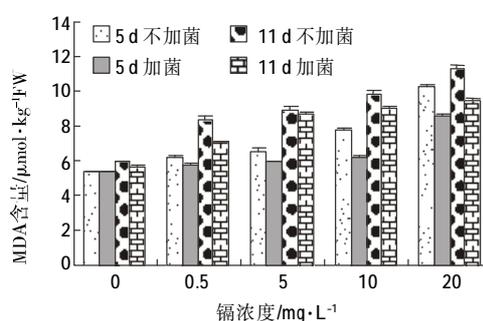
1.5 数据处理与计算方法

将所测得的数据利用 SPSS 软件进行 Cd^{2+} 处理浓度,培养时间和球形红细菌菌悬液浓度 3 个因素的多因素方差分析和 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 球形红细菌菌悬液对不同浓度 Cd^{2+} 胁迫下小麦幼苗叶片 MDA 含量的影响

植物体内 MDA 的积累量反映植物体内膜脂过氧化程度。如图 1 所示,在 Cd^{2+} 胁迫下小麦幼苗叶片中 MDA 含量随培养时间和处理液中 Cd^{2+} 浓度的增加而增加。当 Cd^{2+} 浓度为 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,第 5 d 和 11 d 小麦叶片 MDA 含量分别为对照的 187.3% 和 190.0%,几乎为对照的 2 倍。在同一浓度 Cd^{2+} 处理下,球形红细菌组的 MDA 含量与对照组相比有明显降低,降低幅度为 2.8%~20.5%。通过多因素方差分析可知,在实验范围内, Cd^{2+} 处理浓度,培养时间和菌悬液浓度对



注:图中数据均为 3 次测定平均值计算得到,误差线表示标准偏差,下同。

图 1 球形红细菌菌悬液和不同浓度 Cd^{2+} 复合处理后小麦幼苗叶片中 MDA 含量

Figure 1 Contents of MDA in leaves of wheat seedlings treated with *Rhodobacter sphaeroides* solutions and different concentrations of cadmium

小麦幼苗叶片 MDA 含量的影响均为极显著 ($P < 0.01$)。3 个因素间的交互作用对小麦幼苗叶片 MDA 含量的影响也为极显著 ($P < 0.01$)。经 Duncan 多重比较可知,当 Cd^{2+} 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,在小麦幼苗培养第 5 d,球形红细菌组的 MDA 含量降幅最大为 20.5%。

2.2 球形红细菌菌悬液对不同浓度 Cd^{2+} 胁迫下小麦幼苗叶片脯氨酸含量的影响

在逆境条件下,植物体内脯氨酸含量显著增加,植物体内脯氨酸含量在一定程度上反映了植物的抗逆性。如图 2 所示,在 Cd^{2+} 胁迫下小麦幼苗叶片中脯氨酸含量变化趋势与 MDA 含量的变化趋势基本相同。但在同一浓度 Cd^{2+} 处理下,小麦幼苗叶片中脯氨酸含量没有 MDA 含量的增加幅度大。在同一浓度 Cd^{2+} 处理下,球形红细菌组的脯氨酸含量与对照组相比有明显降低,降低幅度为 0.6%~15.2%。其中,低浓度 Cd^{2+} 与球形红细菌复合处理后脯氨酸含量的降幅较小,高浓度 Cd^{2+} 与球形红细菌复合处理后脯氨酸含量的降幅较大。通过多因素方差分析可知,在实验范围内, Cd^{2+} 处理浓度,培养时间和菌悬液浓度对小麦幼苗叶片脯氨酸含量的影响均为极显著 ($P < 0.01$)。3 个因素间的交互作用对小麦幼苗叶片脯氨酸含量的影响也为极显著 ($P < 0.01$)。经 Duncan 多重比较可知,当 Cd^{2+} 浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,在小麦幼苗培养第 11 d,球形红细菌组的脯氨酸含量降幅最大为 15.2%。

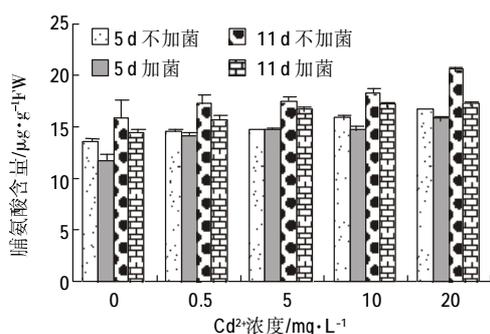


图 2 球形红细菌菌悬液和不同浓度 Cd^{2+} 复合处理后小麦幼苗叶片中脯氨酸含量

Figure 2 Contents of proline in leaves of wheat seedlings treated with *Rhodobacter sphaeroides* solutions and different concentrations of Cd^{2+}

2.3 球形红细菌菌悬液对不同浓度 Cd^{2+} 胁迫下小麦幼苗叶片 SOD、CAT 活性的影响

SOD 广泛分布于细胞各组成部分,是重要的活性氧防御酶,可以催化 $O_2^{\cdot-}$ 形成 H_2O_2 和 O_2 。正常情况

下,SOD 活性稳定,植物产生和清除 $O_2^{\cdot-}$ 的能力处于动态平衡。如图 3 所示,在 Cd^{2+} 胁迫下小麦幼苗叶片中 SOD 活性随处理液中 Cd^{2+} 浓度和培养时间的增加而降低。当 Cd^{2+} 浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,第 5 d 和 11 d 小麦叶片 SOD 活性仅为对照的 42.0%和 41.1%。在同一浓度 Cd^{2+} 处理下,球形红细菌组的 SOD 活性与对照组相比有明显升高,增幅为 1.6%~59.4%。通过多因素方差分析可知,在实验范围内, Cd^{2+} 处理浓度,培养时间和菌悬液浓度以及各因素间的交互作用对小麦幼苗叶片 SOD 活性的影响均为极显著 ($P < 0.01$)。经 Duncan 多重比较可知,当 Cd^{2+} 浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,在小麦幼苗培养第 5 d,球形红细菌组的 SOD 活性增幅最大为 59.4%。

CAT 定位于线粒体、过氧化物体和乙醛酸循环体中,可以专一清除在光呼吸和脂肪酸 β 氧化过程中生成的 H_2O_2 。如图 4 所示,在 Cd^{2+} 胁迫下小麦幼苗叶

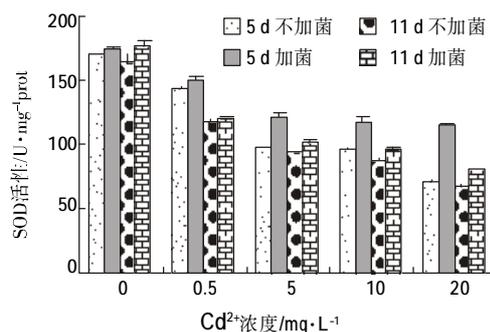


图 3 球形红细菌菌悬液和不同浓度 Cd^{2+} 复合处理后小麦幼苗叶片中 SOD 活性

Figure 3 The activities of SOD in leaves of wheat seedlings treated with *Rhodobacter sphaeroides* solutions and different concentrations of Cd^{2+}

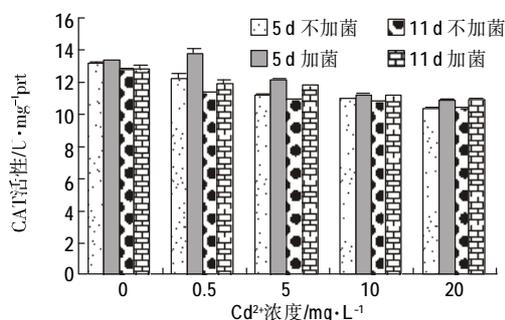


图 4 球形红细菌菌悬液和不同浓度 Cd^{2+} 复合处理后小麦幼苗叶片中 CAT 活性

Figure 4 The activities of CAT in leaves of wheat seedlings treated with *Rhodobacter sphaeroides* solutions and different concentrations of Cd^{2+}

片中CAT活性与SOD活性的变化趋势基本相同。但在同一浓度Cd²⁺处理下,CAT活性没有SOD活性的下降幅度大,这说明在Cd²⁺处理下SOD比CAT更为敏感。在同一浓度Cd²⁺处理下,球形红细菌组的CAT活性与对照组相比也有明显升高,增幅为1.8%~12.4%。其中,低浓度Cd²⁺与球形红细菌复合处理后CAT活性的增幅较大,高浓度Cd²⁺与球形红细菌复合处理后CAT活性的增幅较小。通过多因素方差分析可知,在实验范围内,Cd²⁺处理浓度,培养时间和菌悬液浓度以及各因素间的交互作用对小麦幼苗叶片CAT活性的影响均为极显著(P<0.01)。经Duncan多重比较可知,当Cd²⁺浓度为0.5 mg·L⁻¹时,在小麦幼苗培养第5 d,球形红细菌组的CAT活性增幅最大为12.4%。

2.4 球形红细菌菌悬液对不同浓度Cd²⁺胁迫下小麦幼苗叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是光合作用的主要色素,叶绿素的破坏直接导致光合作用效率的降低,其含量的减少是衡量叶片衰老的重要标志。由表1可知,当Cd²⁺浓度为0.5 mg·L⁻¹时,第5 d小麦幼苗叶片中叶绿素a、类胡萝卜素含量和叶绿素总量与对照组相比都有明显提高,但到第11 d,叶绿素a、类胡萝卜素含量和叶绿素总量与对照组相比均表现出抑制作用;当Cd²⁺浓度≥5 mg·L⁻¹时,小麦叶片中叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量以及叶绿素总量在培养过程中均表现

出明显的抑制作用。Cd²⁺胁迫下,小麦叶片的叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量和叶绿素总量均随培养时间的增加而降低。

在同一浓度Cd²⁺处理下,用球形红细菌菌悬液处理的小麦幼苗叶片4种光合色素含量与对照组相比均有一定程度的增加。加入球形红细菌菌悬液后,第11 d小麦幼苗叶片4种光合色素含量的增长率基本高于其第5 d的增长率。空白组加入球形红细菌菌悬液后小麦幼苗叶片4种光合色素含量也有一定程度的增加。低浓度Cd²⁺与球形红细菌复合处理后光合色素含量增幅较小,高浓度Cd²⁺与球形红细菌复合处理后光合色素含量增幅较大。这说明球形红细菌在一定程度上可以缓解镉对小麦幼苗叶片光合色素的损伤。

通过多因素方差分析可知,在实验范围内,Cd²⁺处理浓度,培养时间和菌悬液浓度以及各因素间的交互作用对小麦幼苗叶片叶绿素a含量和叶绿素总量的影响均为极显著(P<0.01)。经Duncan多重比较可知,当Cd²⁺浓度为20 mg·L⁻¹时,在小麦幼苗培养第11 d,球形红细菌组叶绿素a含量和叶绿素总量的增幅最大分别为24.4%和20.1%。

Cd²⁺处理浓度,培养时间和菌悬液浓度对小麦幼苗叶片叶绿素b和类胡萝卜素含量的影响也为极显著(P<0.01)。3个因素间的交互作用对叶绿素b和类胡萝卜素含量的影响无显著差异(P>0.05)。但是培养时间与菌悬液浓度的交互作用对叶绿素b含量的影

表1 球形红细菌菌悬液和不同浓度Cd²⁺复合处理后小麦幼苗叶片中叶绿素含量

Table 1 The contents of chlorophyll in leaves of wheat seedlings by treated with *Rhodobacter sphaeroides* solutions and different concentrations of Cd²⁺

Cd ²⁺ 浓度/mg·L ⁻¹ +菌液/%	叶绿素a/mg·g ⁻¹		叶绿素b/mg·g ⁻¹		类胡萝卜素/mg·g ⁻¹		叶绿素总量/mg·g ⁻¹	
	5 d	11 d	5 d	11 d	5 d	11 d	5 d	11 d
0+0	1.413 6	1.448 4	0.494 0	0.493 4	0.273 5	0.274 6	1.907 5	1.941 8
0+15	1.553 7 (9.9%)	1.556 4 (7.4%)	0.536 2 (8.5%)	0.547 9* (11.0%)	0.304 0 (11.2%)	0.315 5 (14.9%)	2.089 6 (9.5%)	2.104 3 (8.4%)
0.5+0	1.573 2	1.172 2	0.543 7	0.403 7	0.287 9	0.232 6	2.116 9	1.575 9
0.5+15	1.595 4 (1.4%)	1.223 4 (4.4%)	0.547 3 (0.7%)	0.416 4 (3.1%)	0.306 0 (6.3%)	0.243 4 (4.6%)	2.142 7 (1.2%)	1.639 8 (4.1%)
5+0	1.365 1	0.971 4	0.476 1	0.334 9	0.268 4	0.206 0	1.841 2	1.306 4
5+15	1.439 7 (5.5%)	1.162 6 (19.7%)	0.485 1 (1.9%)	0.386 6* (15.4%)	0.275 0 (2.4%)	0.226 0 (9.7%)	1.924 7 (4.5%)	1.549 2 (18.6%)
10+0	1.304 7	0.945 8	0.451 5	0.323 0	0.231 7	0.197 9	1.756 2	1.268 8
10+15	1.322 5 (1.4%)	1.128 1 (19.3%)	0.463 8 (2.7%)	0.361 2* (11.8%)	0.263 2 (13.6%)	0.218 9 (10.6%)	1.786 2 (1.7%)	1.489 4 (17.4%)
20+0	1.064 3	0.895 9	0.372 5	0.311 9	0.214 1	0.174 7	1.436 8	1.207 7
20+15	1.183 0 (11.2%)	1.114 5 (24.4%)	0.396 3 (6.4%)	0.335 4* (7.5%)	0.224 6 (4.9%)	0.186 4 (6.7%)	1.579 3 (9.9%)	1.449 9 (20.1%)

注:表中数据均为3次测定的平均值,括号中为球形红细菌菌悬液处理后小麦幼苗叶片中4种光合色素的增长率。

响为显著 ($P < 0.05$); Cd^{2+} 处理浓度与菌悬液浓度的交互作用对类胡萝卜素含量的影响为显著 ($P < 0.05$), 经 Duncan 多重比较可知, 当 Cd^{2+} 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 在小麦幼苗培养第 11 d, 球形红细菌组叶绿素 b 含量的增幅最大为 15.4%; 当 Cd^{2+} 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 在小麦幼苗培养第 5 d, 球形红细菌组类胡萝卜素含量的增幅最大为 13.6%。

3 讨论

根据 Fridovich 自由基伤害理论, 在重金属、干旱、高盐等逆境条件下, 植物细胞内会积累大量活性氧, 破坏活性氧的代谢平衡, 从而引发膜脂质过氧化作用, 破坏膜结构, 影响膜功能^[8,9]。实验结果表明, Cd^{2+} 胁迫可以使小麦幼苗叶片中 MDA 和脯氨酸的含量增加, 而且随着胁迫时间的增加会加速它们在小麦体内的积累。大量研究表明, 重金属是膜脂质过氧化的诱变剂, 浓度越高膜脂质过氧化的产物 MDA 积累越多, 二者呈密切相关^[10]。近年来许多研究表明脯氨酸具有清除活性氧的功能^[11]。根据 Pang 等的报道, 脯氨酸的积累是细胞进行渗透调节, 稳定细胞结构, 降低氧化的作用^[12]。

正常情况下, 植物自身存在抗氧化酶系统, 能够清除体内多余的自由基, 使自由基的变化保持动态平衡。SOD 和 CAT 就是抗氧化酶系统中主要的酶, 它们共同作用可以清除过氧化物。活性氧可以作为第二信使, 启动细胞的防御反应, SOD 是保卫植物细胞免受自由基伤害的第一道防线^[13]。CAT 是 C_3 植物中 H_2O_2 清除的关键酶, 而且是 C_3 植物耐受胁迫所必需的保护酶^[14]。但当环境中污染物超过植物所能承受的阈值时, 抗氧化酶系统就会发生紊乱, 使自由基大量积累从而损伤植物细胞。实验结果表明, SOD 和 CAT 的活性随 Cd^{2+} 浓度和培养时间的增加而降低。但是 CAT 活性的降低幅度较小, 这说明在 Cd^{2+} 胁迫下 SOD 比 CAT 更为敏感。

在 Cd^{2+} 胁迫下, 小麦幼苗生长受到明显的抑制作用, 表现为植株矮小、萎蔫、失绿、易倒伏^[15]。这是因为生长在重金属污染环境中的植物, 体内生理生化过程紊乱, 光合作用降低, 吸收受到抑制, 导致供给植物生长的物质和能量减少, 因而植物生长受到抑制。实验结果表明, 低浓度的 Cd^{2+} 可以在幼苗生长初期刺激叶片叶绿素含量的增加, 而到了中后期则会导致叶绿素含量的降低。高浓度 Cd^{2+} 则在幼苗生长初期就对小麦幼苗叶片叶绿素含量表现出明显的抑制作用。Nag

等^[16]认为 Cd^{2+} 使叶绿素酶活性增加而导致叶绿素分解加快, 使叶绿素含量降低。

球形红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、卟啉类化合物和超氧化物歧化酶等, 可以清除活性氧自由基, 提高植物的抗逆能力^[17,18]。在无胁迫条件下, 施用光合细菌可以增强植物的抗氧化酶活性, 促进光合色素的合成, 提高光合作用的能力, 促进植物生长^[19-21]。实验结果表明, 在 Cd^{2+} 胁迫下, 加入球形红细菌菌悬液后, 小麦叶片 SOD 和 CAT 活性都有明显升高, 增幅分别为 1.6%~59.4% 和 1.8%~12.4%。其中 SOD 活性的增长较为明显, 说明在 Cd^{2+} 胁迫下, 球形红细菌对 SOD 活性增强的作用较大。膜脂过氧化的重要产物 MDA 含量也有 2.8%~20.5% 的降低。这说明球形红细菌不仅可以增强抗氧化酶的活性, 降低体内 H_2O_2 、 O_2^- 、 $\cdot\text{OH}$ 等有害物质的积累, 而且还能减轻膜脂过氧化作用, 从而缓解了 Cd^{2+} 对小麦的胁迫作用。加入球形红细菌菌悬液后, 小麦叶片脯氨酸含量有所降低, 降幅为 0.6%~15.2%。这是由于脯氨酸的积累不仅受合成影响, 还受其降解影响。植物的脯氨酸合成、累积及代谢是一个受非生物胁迫和细胞内脯氨酸浓度高度调控的生理生化过程^[22]。脯氨酸的累积是植物对胁迫的暂时反应, 当胁迫解除后脯氨酸含量立即下降^[23]。在胁迫缓解的过程中脯氨酸的降解过程被激活, 脯氨酸脱氢酶的活性迅速增强, 脯氨酸发生氧化降解, 含量降低。这种生理现象的意义在于胁迫恢复过程中累积的脯氨酸可以作为植物恢复生长所能利用的碳源、氮源和能源来源^[22,24]。球形红细菌对光合色素的合成也有一定的促进作用。在 Cd^{2+} 胁迫下, 球形红细菌可以使叶绿素总量增加 1.2%~20.1%。这也有助于提高光合作用的能力, 增加干物质的积累, 促进植物生长。

此外, 由于光合细菌为 G-原核生物, 细胞壁带有较多的负电荷和氨基、羟基等官能团, Cd^{2+} 与球形红细菌细胞接触时, 二者可以形成稳定的络合物^[25]; 而且球形红细菌可以通过同化型硫酸还原作用及脱硫酶作用生成硫化镉沉淀^[26]。因此, 球形红细菌还可以减少环境中小麦可以直接吸收的 Cd^{2+} , 从而降低了小麦体内各部分镉的积累, 缓解了镉对小麦的胁迫作用。

综上, 加入球形红细菌菌悬液可以提高小麦叶片抗氧化酶的活性, 降低活性氧自由基对质膜的伤害和膜脂过氧化作用水平, 增加光合色素的合成, 提高小麦的抗逆性, 从而缓解小麦受到的镉胁迫。球形红细

菌与重金属作用的深层机理还有待于进一步研究探讨。

参考文献:

- [1] 朱玉章, 俞吉安, 林志新. 光合细菌的研究及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [2] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应[J]. 中国环境科学, 1996, 16(2): 113-117.
- [3] Sanita di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants [J]. *Environ Exp Bot*, 1999, 41: 105-130.
- [4] 姚竹云, 张肇铭. 几株光合细菌的表型特征及其 DNA-DNA 同源性分析[J]. 应用与环境生物学报, 1996, 2(1): 84-89.
- [5] 白红娟, 张肇铭, 熊琦, 等. Pb^{2+} , Cd^{2+} 和 $Cr(VI)$ 抑制球形红细菌生长的毒性效应[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(1): 88-91.
- [6] 储玲, 刘登义, 王友保, 等. 铜污染对三叶草幼苗生长及活性氧代谢影响的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 119-122.
- [7] 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, 2000.
- [8] Bowler C, Vac Montage M, et al. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1992, 43: 83-116.
- [9] Fridovich I. Free radical in biology[M]. New York: Academic Press, 1976. 239.
- [10] 张玉秀, 柴团耀, Gerard B. 植物耐重金属机理研究进展[J]. 植物学报, 1999, 41(5): 453-457.
- [11] Alia Saradhi P P, Mohanty P. Involvement of proline in protecting thylakoid membranes against free radical induced photodamage[J]. *Photochem Photobiol*, 1997B, 38: 253-257.
- [12] Pang J, Chan G S Y, Zhang J, et al. Physiological aspects of vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes [J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1559-1570.
- [13] Schützendubel A, Polle A. Plant responses to abiotic stress: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization[J]. *J Exp Bot*, 2002, 53: 1351-1365.
- [14] Willekens H, Chamnongpol S, Davey M, et al. Catalase is a sink for H_2O_2 and is indispensable for stress defence in C3 plants [J]. *The EMBOJ*, 1997, 16: 4806-4816.
- [15] Woolhouse H W. Toxicity and tolerance in the responses of plant to metals [A]/Lange O L et al (eds.). *Encyclopaedia of plant physiology*. Vol. 12C. *Physiological plant ecology* [C]. Springer-Verlag, Berlin, 1983, 245-300.
- [16] Nag P. Heavy metal effects in plant tissue involving chlorophyll, chlorophyllase, Hill reaction activity and gelelectrophoretic patterns of soluble proteins [J]. *Indian J Exp Biol*, 1981, 19: 702-706.
- [17] 俞吉安, 叶永钧, 林志新. 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.
- [18] 俞吉安, 张承康, 陈峰, 等. 光合细菌的抗氧化作用机理探讨[J]. 发光学报, 2000, 21(3): 219-222.
- [19] 熊琦, 冯安吉, 刘继彪, 等. 光合细菌促菠菜生长机理初探[J]. 应用与环境生物学报, 1999, 5(增刊): 194-196.
- [20] 夏青, 夏宏, 张晋凤. 光合细菌菌液对甜椒生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 114-115.
- [21] 王秋菊, 崔战利, 张少良, 等. 光合细菌在水稻上的施用方法及作用机理研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 176-178.
- [22] 李玲, 余光辉, 曾富华. 水分胁迫下植物脯氨酸累积的分子机理[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2003, 1: 126-134.
- [23] 王艳青, 陈雪梅, 李悦, 等. 植物抗逆中的渗透调节物质及其转基因工程进展[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(4): 66-70.
- [24] Hare P D, Cress W A. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants[J]. *Plant Growth Regul*, 1997, 21: 79-102.
- [25] 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.
- [26] 白红娟, 张肇铭, 杨官娥, 等. 球形红细菌转化去除重金属镉及其机理研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1809-1814.