

王 红, 杨 镇, 裴文琪, 等. 功能性微生物制剂对镉胁迫下水稻生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 974-979.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.05.003

功能性微生物制剂对镉胁迫下水稻生长及生理特性的影响

王 红¹, 杨 镇¹, 裴文琪², 李 跃¹, 李学龙¹, 肇 莹¹, 曹 君¹, 肖 军¹

(1. 辽宁省农业科学院微生物工程中心, 辽宁 沈阳 110161; 2. 东北育才学校, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 采用水培法, 研究了功能性微生物制剂(RD、X、J)对镉胁迫下水稻生长及生理特性的影响。结果表明, 微生物制剂RD和X处理对水稻叶片过氧化氢酶(CAT)活性的提升效果最佳, 还可减小叶片谷胱甘肽还原酶(GR)活性下降的幅度。镉胁迫6 d时, RD对降低叶片 $O_2^{\cdot-}$ 浓度的能力强于X和J。RD处理后SOD活性基本稳定, X和J处理后SOD活性先降低后升高, 但J处理后SOD活性升高幅度最大。功能性微生物制剂显著增加镉胁迫下水稻株高和千粒质量(千粒质量增加2.51%~4.45%), 但对分蘖数的影响不显著。可见, 功能性微生物制剂可增强水稻抗氧化酶系的防御能力, 提高水稻对镉胁迫的抗性, 促进生长。

关键词: 功能性微生物制剂; 镉胁迫; 抗氧化系统; 水稻

中图分类号: S511.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)05-0974-06

Growth and physiological characteristics of cadmium-stressed rice influenced by functional microorganism agent

WANG Hong¹, YANG Zhen¹, PEI Wen-qi², LI Yue¹, LI Xue-long¹, ZHAO Ying¹, CAO Jun¹, XIAO Jun¹

(1. Research Center of Microbial Engineering, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 2. Northeast Yucai School, Shenyang 110000, China)

Abstract: The effects of functional microorganism agents (RD, X and J) on the growth and physiological characteristics of rice under cadmium stress were investigated by water culture. The treatments with RD or X increased the activities of catalase (CAT) and delayed the decrease of the activities of glutathione reductase (GR). As cadmium stress lasted, the ability of agent RD to reduce $O_2^{\cdot-}$ concentration in leaves was greater than that of X or J. The activity of SOD, basically stable in RD treatment decreased and bottomed up in treatment X or J. The increased activity of SOD by J was bigger than by X. Functional microorganism agents had a positive effect on plant height and thousand-grain weight of rice under cadmium stress. Tillering was barely influenced. Functional microorganism agents could enhance the defensive enzymes' activities and cadmium-tolerance of rice so as to promote growth under cadmium stress.

Key words: functional microorganism agent; cadmium stress; antioxidant system; rice

收稿日期: 2016-02-23

基金项目: 辽宁省科学事业公益研究基金项目(2014002009)

作者简介: 王 红(1983-), 女, 山东莒县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事功能性微生物次生代谢诱导抗性研究。(E-mail) wang45852676@126.com

通讯作者: 肖 军, (E-mail) xiaojun20002@163.com

镉是一种有毒的重金属, 由于大量工业废水排放、农药过度使用, 而成为对农田污染危害最大的重金属之一^[1-2]。镉是植物生长发育过程中非必需营养元素, 镉污染不仅抑制种子萌发、影响植株发育, 而且还能诱导植株产生活性氧(ROS)^[3-5], 甚至通

过植株根系吸收作用,在作物可食用部分大量累积,最终通过食物链进入人体,威胁人类健康^[6-7]。

功能性微生物是一种新的微生物资源^[8],用其研制的功能性微生物制剂可促进农作物生长、增强抗逆性。有研究结果表明植物内生真菌菌丝提取物可促进水稻生长发育,提高产量^[9]。*S. nematodiphila* 有较强的重金属抗性,并有产吡啶乙酸、铁载体和增溶矿质磷酸盐的能力,进而具有促进植物生长的潜力^[10]。Ramesh 等^[11]分离到 1 株能产赤霉素的内生真菌,在盐胁迫下能够降低植物脱落酸的含量,进而调节气孔关闭,提高农作物的抗逆性。刘森^[12]分离出 1 株抗稻瘟病的海洋枯草芽孢杆菌 DL-006,显微镜观察发现受到抑制的稻瘟病菌菌丝突出膨大,严重畸形。Zhang 等^[13]研究发现一种内生菌 *Neotyphodiurn gansuense* 在镉胁迫下,可提高植株抗氧化酶系的防御能力。尹艺等^[1]发现碱蓬内生真菌 EF11-01 可以提高水稻对镉胁迫的抗性,促进生长,增强抗氧化防御能力。范仲学等^[14]研究发现枯草芽孢杆菌能减少花生对镉的积累并促进花生生长。在高浓度镉胁迫下,植物产生的 ROS,可破坏细胞膜结构,产生大量自由基($O_2^{\cdot-}$),导致抗性酶活性发生变化^[15-17],抑制抗性酶系的表达^[18-19],破坏光合作用^[20]。因此,植物自身无法修复 ROS 引起的损坏,进而影响植株的生长发育。

本研究利用辽宁省农业科学院微生物工程中心自主分离的一种具有促进水稻生长发育、增强抗逆性的 *Alternaria* sp.(链格孢属)和 *Coprinus micaceus* (晶粒鬼伞)的次生代谢产物的混合物,以及两种具有吸附重金属、抑制水稻根系吸收镉的 *Rhizopus oryzae*(米根霉)和 *Bacillus cereus*(蜡质芽孢杆菌)^[21]的发酵产物,研究施用功能性微生物制剂对镉胁迫下水稻生长及生理特性的影响,筛选具有抗重金属镉效应的功能性微生物制剂,以缓解日益严重的重金属污染问题,为开发安全、绿色的微生物制剂提供理论依据及应用基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为辽星 1 号。供试菌株为 *Alternaria* sp.、*Coprinus micaceus*、*Rhizopus oryzae* 和 *Bacillus cereus*,由辽宁省农业科学院微生物工程中心保存。

1.2 试验方法

1.2.1 微生物制剂的制备 微生物制剂 RD 的制备:由 *Alternaria* sp.和 *Coprinus micaceus* 的菌丝醇提取物按照 1:1 的比例混合而成,参照陈珣等^[22]的方法提取,使用浓度为 50 ng/ml。微生物制剂 J 的制备:*Rhizopus oryzae* 在 PDA 液体培养基中 34 ℃ 培养 3 d,将其发酵液配制成干物质含量为 10 μg/ml,4 ℃ 保存,备用。微生物制剂 X 的制备:*Bacillus cereus* 在 PDA 液体培养基中 30 ℃ 培养 18 h,将其发酵液配制成干物质含量为 10 μg/ml,4 ℃ 保存,备用。

1.2.2 水稻幼苗的培养 将水稻种子用 0.1% HgCl 消毒 15 min,28 ℃ 浸种,催芽 4 d,采用水培法,播种在塑料钵内(100 株/盆),在 25 ℃ 的植物生长箱中培养。稻苗长至三叶一心时备用。

1.2.3 镉胁迫浓度的筛选 当水稻幼苗长至三叶一心时,分别向培养液中加入 0 μmol/ml、5 μmol/ml、25 μmol/ml、50 μmol/ml、75 μmol/ml、150 μmol/ml、300 μmol/ml 的 Cd^{2+} ,每 3 d 观察水稻叶片胁迫情况,共观察 9 d。以叶片枯萎程度作为筛选标准,将叶片枯萎程度分为 4 级,分别用+++、++、+、-表示,其中+++表示正常生长,-表示枯死。

1.2.4 功能性微生物制剂对镉胁迫下水稻幼苗抗逆指标的影响 取采用方法 1.2.2 培养的水稻幼苗 4 盆,分别喷洒 50 ml 功能性微生物制剂 RD、X、J 和含有 0.1%吐温-20 的蒸馏水(对照)。诱导处理后 3 d,向培养液中加入 50 μmol/ml Cd^{2+} 。加入 Cd^{2+} 后 0 d、3 d、6 d、9 d 分别取水稻幼苗叶片 0.4 g 左右(4 片叶片),测定抗逆相关指标,3 次重复。

1.2.5 盆栽试验 盆栽试验参照文献[8]进行,栽培桶直径为 30 cm,每桶种植 3 穴,每穴单株种植,每个处理 8 桶。每桶装入 30 kg 栽培土,1 kg 土壤中加入 1 mmol $CdCl_2$,以不加 $CdCl_2$ 的土壤为对照。水稻苗移栽前 1 d,分别用微生物制剂 RD、J、X 制剂喷淋水稻苗包括根部(同方法 1.2.4),扬花期再用相同浓度微生物制剂 RD、J、X 喷施水稻。每桶施复合肥 5 g。其中土壤中不加氯化镉且水稻苗未经功能性微生物制剂处理的用 CK-空表示,土壤中加氯化镉且水稻苗未经功能性微生物制剂处理的用 CK 表示,土壤中加氯化镉且水稻苗经不同功能性微生物制剂处理的分别以功能性微生物制剂的代号表示。盆栽水稻放置于具有防雨水功能的露天盆栽场中,培养期从水稻苗移栽到收获为

止。待盆栽水稻生长成熟后,测定水稻的分蘖数、株高及千粒质量。

1.3 抗逆相关指标的测定

过氧化氢酶(CAT)活性测定参照唐勇军等的方法^[23]。过氧化物酶(POD)活性测定参照张穗等的方法^[24]。超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽还原酶(GR)活性测定参照李忠光等的方法^[25]。超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)活性测定参照郝建军等的方法^[26]。

1.4 统计分析

利用 Microsoft Excel 2010 对不同处理条件下抗性酶活性变化趋势进行分析,采用 SPSS 13.0 分析功能性微生物制剂对镉胁迫下水稻生长的影响。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫水稻幼苗的浓度筛选

培养液中加入不同浓度的 Cd^{2+} 后水稻幼苗开始枯萎,浓度越大,叶片枯萎越快。当 Cd^{2+} 浓度小于 $5 \mu\text{mol/ml}$ 时,水稻幼苗生长未受到影响;当 Cd^{2+} 浓度为 $25 \sim 75 \mu\text{mol/ml}$ 时,6 d 后开始有叶片卷曲现象;当 Cd^{2+} 浓度大于 $150 \mu\text{mol/ml}$ 时,水稻幼苗生长受到严重影响,甚至植株死亡(表1)。因此,确定镉胁迫水稻幼苗的 Cd^{2+} 浓度为 $50 \mu\text{mol/ml}$ 。

表1 不同浓度镉胁迫下水稻叶片枯萎情况

Table 1 The withering status of rice leaves under Cd stress at different concentrations

时间 (d)	Cd ²⁺ 浓度 ($\mu\text{mol/ml}$)						
	0	5	25	50	75	150	300
0	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
3	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++
6	+++	+++	+++	+++	+++	++	+
9	+++	+++	++	++	++	+	-

+表示叶片伸展,-表示叶片枯萎。

2.2 功能性微生物制剂对水稻叶片过氧化氢酶(CAT)活性的影响

图1显示,在水稻3叶1心期,镉胁迫0 d时不同功能性微生物制剂处理叶片CAT活性在 $44.74 \text{ U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 至 $64.86 \text{ U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 之间,均高于对照CK。镉胁迫后3 d, RD、X、J处理和对照CK的叶片CAT活性明显降低,分别比0 d时降低了55.74%、60.28%、39.96%和35.49%。随着胁迫时间的延长,叶片CAT活性不断升高。胁迫6 d时,处理组叶片CAT活性基本稳定在 $107.71 \sim 119.72$

$\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$,比CK高38.51%。当胁迫9 d时,CK叶片CAT活性与J处理基本相同,低于活性最高的RD处理10.85%。

虽然在未受到镉胁迫时,喷施功能性微生物制剂有助于提高叶片CAT活性,但镉胁迫前期(0~3 d),在代谢产物的协助下,植株本身并未立即启动保护机制,而是当植株本身自由基达到一定浓度时才启动,此时外施的功能性微生物制剂才起到保护作用,迅速提高叶片CAT活性,缩短由于镉胁迫给植株造成伤害的时间,进而提高植株抗镉胁迫的能力,起到保护植株的作用。

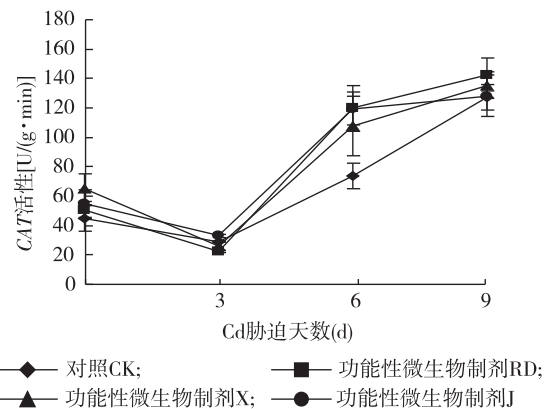


图1 功能性微生物制剂对水稻叶片CAT活性的影响

Fig.1 Effects of functional microorganism agents on CAT activity of rice leaves

2.3 功能性微生物制剂对水稻叶片过氧化物酶(POD)活性的影响

镉胁迫0 d时,各处理水稻幼苗叶片POD活性为 $659.61 \sim 673.95 \text{ U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。镉胁迫3 d时,叶片POD活性明显降低,平均降幅达30%左右。胁迫6 d时,叶片POD活性与胁迫3 d时无明显差异。胁迫9 d时,POD活性升高,且对照CK叶片POD活性最高,CK与X处理叶片POD活性高于未受镉胁迫时的活性,而RD和J处理POD活性低于未受镉胁迫时的活性(图2)。

2.4 功能性微生物制剂对水稻叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

图3显示,镉胁迫0 d时各处理水稻幼苗叶片SOD活性为 $200.87 \sim 236.04 \text{ U/g}$ 。随着镉胁迫时间的延长,不同处理叶片SOD活性变化趋势不尽相同。RD处理中,镉胁迫3 d时叶片SOD活性降为 189.93 U/g ,下降19.54%,3~9 d叶片SOD活性基本未发生

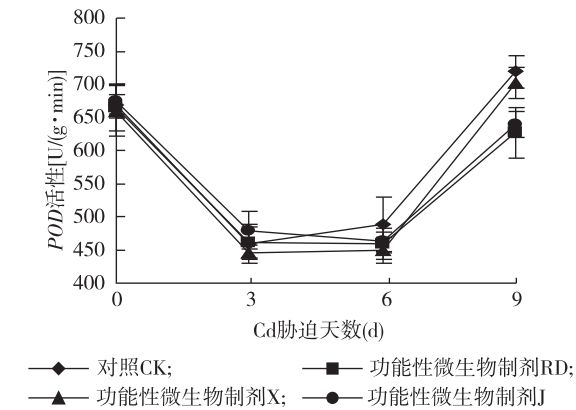


图2 功能性微生物制剂对水稻叶片 POD 活性的影响

Fig.2 Effects of functional microorganism agents on POD activity of rice leaves

变化。X 处理中, 镉胁迫 3 d 时叶片 SOD 活性降为 161.01 U/g, 下降 25.90%, 6 d 时叶片 SOD 活性升高并达到稳定, 其活性与 RD 处理基本相同。J 处理中, 镉胁迫 3 d 时叶片 SOD 活性降为 166.27 U/g, 下降 17.23%, 6 d 时 SOD 活性未发生变化, 9 d 时叶片 SOD 活性升高, 且比 RD 处理高 5.86%。对照 CK 中, 随着镉胁迫时间的延长, 叶片 SOD 活性逐渐降低, 3 d 时叶片 SOD 活性下降较快, 3~9 d 时下降缓慢并趋于稳定。

镉胁迫状态下, 植物自身启动防御机制时, SOD 活性也只能维持在较低水平, 而在功能性微生物制剂的协助下, 植株叶片 SOD 活性升高, 但低于未受胁迫时的活性。

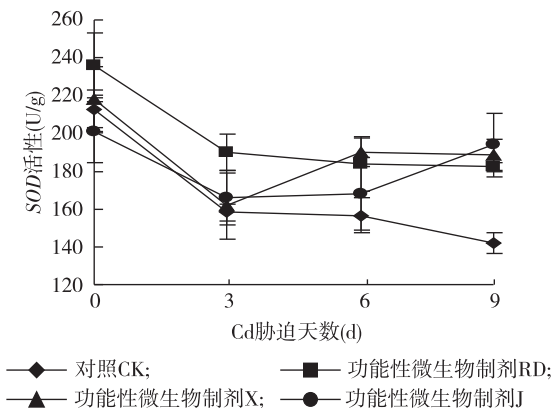


图3 功能性微生物制剂对水稻叶片 SOD 活性的影响

Fig.3 Effects of functional microorganism agents on SOD activity of rice leaves

2.5 功能性微生物制剂对水稻叶片谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性的影响

镉胁迫 0 d 时水稻幼苗叶片 GR 活性为 0.213~

0.250 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$, 随着胁迫时间的延长 GR 活性呈不断下降趋势 (图 4)。镉胁迫 3 d 时, J 处理叶片 GR 活性下降 35.68%, 其他 3 个处理降幅在 15% 左右。6 d 时, 叶片 GR 活性下降幅度顺序为 X 处理 < RD 处理 < CK 对照 < J 处理。9 d 时, 叶片 GR 活性下降幅度均超过 50%, 降幅顺序与 6 d 时相同。

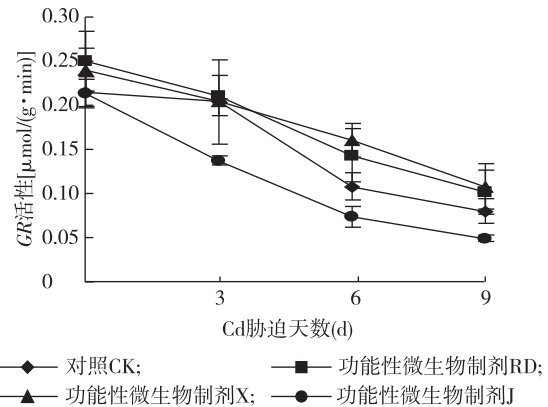
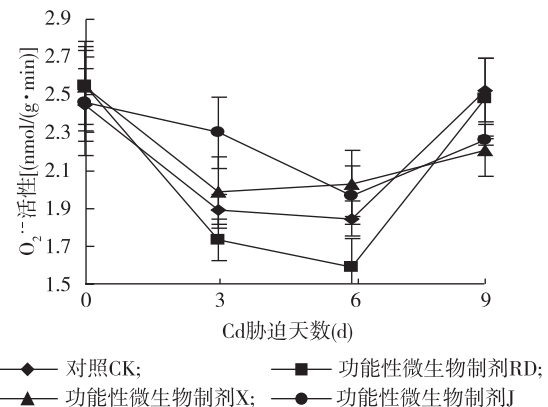


图4 功能性微生物制剂对水稻叶片 GR 活性的影响

Fig.4 Effects of functional microorganism agents on GR activity of rice leaves

2.6 功能性微生物制剂对水稻叶片超氧阴离子 ($\text{O}_2^{\cdot-}$) 活性的影响

图 5 显示, 镉胁迫 0 d 时, 水稻幼苗叶片 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 活性为 2.448~2.578 $\text{nmol}/(\text{g} \cdot \text{min})$, 随着镉胁迫时间的延长各处理均呈现先降低后升高的趋势。X 处理在镉胁迫 3 d 时 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 活性最低, 随后升高, 而其他 3 个处理在镉胁迫 6 d 时 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 活性最低, 随后升高。镉胁迫 9 d 时, CK 和 RD 处理叶片 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 活性高于未

图5 功能性微生物制剂对水稻叶片 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 活性的影响Fig.5 Effects of functional microorganism agents on $\text{O}_2^{\cdot-}$ activity of rice leaves

受胁迫时的活性,而 X 和 J 处理低于未受胁迫时的活性。

2.7 功能性微生物制剂对盆栽水稻生长的影响

水稻成熟后,单株收获,晾干后脱粒,并测定水稻株高、分蘖数及千粒质量。从表 2 可知,在镉胁迫条件下,施加功能性微生物制剂对水稻株高和千粒质量影响显著,而对分蘖数影响不显著。镉胁迫条件下水稻植株较矮,施用功能性微生物制剂可促进植株的生长发育,降低或解除镉对株高的影响。施加功能性微生物制剂后,千粒质量增加 2.51%~4.45%,增幅为 RD 处理>X 处理>J 处理。

表 2 功能性微生物制剂对镉胁迫下水稻生长指标的影响

Table 2 Effects of functional microorganism agents on the growth index of rice under Cd stress

处理	株高 (cm)	分蘖数	千粒质量 (g)
RD	91.17 ± 0.92Cb	7.00 ± 0.92Aa	23.61 ± 0.20BCbc
X	89.92 ± 3.10BCb	7.25 ± 1.25ABa	23.14 ± 0.04ABb
J	85.63 ± 3.82ABa	6.17 ± 1.60Aa	23.26 ± 0.29ABCb
CK	82.80 ± 5.54Aa	6.08 ± 2.34Aa	22.56 ± 0.19Aa
CK-空	89.15 ± 4.19BCb	8.83 ± 1.96Bb	23.95 ± 0.12Cc

处理 RD、X、J、CK;土壤中加入氯化镉且水稻苗分别喷施功能性微生物制剂 RD、X、J 和蒸馏水;CK-空:土壤中不加氯化镉且水稻苗不喷施功能性微生物制剂。同列数值后不同大、小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平下差异显著。

3 讨论

生物修复技术 (Bioremediation) 是指通过生物手段减少和净化土壤中的污染物含量^[27]。20 世纪 80 年代中期开始研究此技术。1993 年, Wilson 等成功应用细菌辅助植物修复技术修复土壤中有机污染物和重金属污染物^[28]。目前,微生物修复研究和应用最为广泛。Glick 将植物和微生物的作用结合,建立植物-微生物联合修复体系^[29]。以菌根菌、内生菌与植物形成联合体,可提高植物抗重金属毒性的能力,增强植物抗逆性,提高植物存活率和生长速率^[30]。本研究采用的功能性微生物制剂,在不同程度上缓解了重金属镉对水稻幼苗抗性酶系的影响,提高了水稻对镉胁迫的抗性,为进一步研究利用功能性微生物制剂修复重金属镉污染奠定了基础。

在重金属胁迫下,微生物可诱导植物抗氧化防御系统的快速启动,以抵御 ROS 对植物的伤害。抗氧化防御系统能力的增强,可提高植物对重金属的

耐受性,降低重金属对植物的毒害。重金属胁迫造成 ROS 累积,破坏体内平衡,引起膜脂的过氧化伤害,而植物通过产生抗氧化酶 (CAT、POD、SOD、GR 等) 形成高效的抗氧化防御系统清除过量积累的活性氧基团 ($O_2^{\cdot-}$) 进行自我保护。本研究采用的 3 种功能性微生物制剂对水稻抗性酶系中 CAT 和 SOD 活性影响显著,而 Zhang 等^[13]应用内生菌 *Neotyphodium gansuense* 显著提高了植物叶片 POD 和 CAT 活性,对 SOD 和 $O_2^{\cdot-}$ 活性影响不显著。在尹艺等^[1]的研究中, CAT 活性受镉胁迫的影响明显, SOD 活性随着胁迫时间的延长而降低,其抗性酶系变化及幼苗生长趋势与本研究结果一致。

本研究中所施用的具有促进水稻生长发育、增强抗逆性的 *Alternaria* sp. 和 *Coprinus micaceus* 次生代谢产物混合物,以及具有吸附重金属、抑制水稻根系镉吸收的 *Rhizopus oryzae* 和 *Bacillus cereus* 发酵产物,对镉胁迫的水稻幼苗抗性酶系的影响不同。这 3 种功能性微生物制剂对 CAT 活性的影响趋势一致,但影响力 RD>X>J;对 POD 活性的影响均低于植株本身启动的抗性反应;对 SOD 活性的影响趋势不一,植物本身随着镉胁迫时间的延长 SOD 活性持续降低,微生物制剂 RD 使 SOD 活性保持稳定,微生物制剂 J 和 X 使 SOD 活性先降低后升高;对 GR 活性的影响呈整体下降趋势;对 $O_2^{\cdot-}$ 活性的影响呈先下降后升高的趋势。

镉胁迫条件下水稻植株矮化,施加功能性微生物制剂可促进植株的生长发育,降低或解除镉对株高的影响。施加功能性微生物制剂还可提高千粒质量,进而增加水稻产量。

参考文献:

- [1] 尹艺,赵颖,马莲菊,等. 碱蓬内生真菌对镉胁迫水稻幼苗生长及生理生化指标的影响[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(3): 23-26.
- [2] WAISBERG M, JOSEPH P, HALE B, et al. Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis [J]. Toxicology, 2003, 192:95-117.
- [3] HASSAN M J, SHFI M, ZHANG G P, et al. The growth and some physiological responses of rice to Cd toxicity as affected by nitrogen form [J]. Plant Growth Regul, 2008, 54:125-132.
- [4] 王永强,肖立中,李诗殷,等. 铅镉复合污染对土壤和水稻叶片生理生化特性的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 369-373.
- [5] 马孟莉,卢丙越,苏一兰,等. 铜、铅、镉对不同水稻品种种子萌

- 发的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 79-81.
- [6] 白 嵩, 纪秀娥, 白 岩, 等. 水体镉污染对水稻幼株生长及某些生理特性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2004, 26(3): 245-247.
- [7] 邹继颖, 刘 辉, 祝 惠, 等. 重金属汞镉污染对水稻生长发育的影响[J]. 土壤与作物, 2014, 1(4): 227-232.
- [8] GIMENEZ C, CABRERA R, REINA M, et al. Fungal endophytes and their role in plant protection [J]. Current Organic Chemistry, 2007, 11: 707-720.
- [9] 王 娜, 杨 镇, 曹 君, 等. 植物内生菌提取物对水稻生长发育的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2014, 36(10): 10-16.
- [10] 万 勇. 内生细菌在重金属植物修复中的作用机理及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [11] RAMESH A, SHARMA S K, JOSHI O P, et al. Phytase, phosphatase activity and p-nutrition of soybean as influenced by inoculation of bacillus [J]. Indian J Microbiol, 2011, 51(1): 94-99.
- [12] 刘 森. 抗稻瘟病的海洋枯草芽孢杆菌的分离鉴定与抗菌物质初探[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2014.
- [13] ZHANG X X, LI C J, NAN Z B. Effects of cadmium stress on growth and anti-oxidative systems in *Achnatherum inebrians* symbiotic with *Neotyphodiurn gansuense* [J]. Hazardous Materials, 2010, 175(1/3): 703-709.
- [14] 范仲学, 李晓晴, 孟静静, 等. 枯草芽孢杆菌对花生镉积累及生理性状的影响[J]. 山东农业科学, 2014, 46(3): 17-20, 24.
- [15] 朱红霞, 杨小勇, 葛才林, 等. 重金属对水稻过氧化物酶同工酶的影响[J]. 核农学报, 2004, 18(3): 233-236.
- [16] 葛才林, 杨小勇, 朱红霞, 等. 重金属胁迫对水稻叶片过氧化氢酶活性和同工酶表达的影响[J]. 核农学报, 2002, 16(4): 197-202.
- [17] 葛才林, 杨小勇, 金 阳, 等. 重金属胁迫对水稻不同品种超氧化物歧化酶的影响[J]. 核农学报, 2003, 17(4): 286-291.
- [18] 吴朝波, 郭建春, 符少萍, 等. 海雀稗对镉胁迫的生理响应及积累特性[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(6): 1337-1343.
- [19] 张美德, 艾伦强, 何银生, 等. 硒对镉胁迫下白术抗氧化能力的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(7): 1211-1214.
- [20] 孟力力, 闻 婧, 张 俊, 等. Cd^{2+} 胁迫对鸡爪槭 PS II 叶绿素荧光动力学特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(2): 398-404.
- [21] 许钦坤, 赵翠燕. 耐镉菌株的筛选及生物学特性[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(2): 317-318.
- [22] 陈 珣, 杨 镇, 肖 军, 等. 内生真菌 N0.51 的鉴定及其代谢产物对稻瘟病的诱导抗病研究[J]. 广东农业科学, 2012(24): 79-81.
- [23] 唐勇军, 彭丽莎, 邹 俊, 等. 几丁质酶产生菌发酵液对水稻生长及防御酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(3): 393-397.
- [24] 张 穗, 赵清华, 唐文华, 等. 井冈霉素 A 对水稻抗性相关酶活性的影响[J]. 植物保护学报, 2003, 30(2): 177-179.
- [25] 李忠光, 龚 明. 植物生理学综合性和设计性实验教程[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013: 56-57, 60-61.
- [26] 郝建军, 刘延吉. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994: 187-189.
- [27] 周际海, 袁颖红, 朱志保, 等. 土壤有机污染物生物修复技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 343-351.
- [28] WILSON C, JONES K C. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs): A review [J]. Environmental Pollution, 1993, 81(3): 229-249.
- [29] GLICK B R. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation [J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(3): 367-374.
- [30] 李韵诗, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 重金属污染土壤植物修复中的微生物功能研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6881-6890.

(责任编辑: 张震林)