

镉胁迫下玉米幼苗的生理响应和抗氧化系统特征

宋琳, 刘梦宇, 周航, 曾鹏, 廖柏寒, 辜娇峰

引用本文:

宋琳, 刘梦宇, 周航, 曾鹏, 廖柏寒, 辜娇峰. 镉胁迫下玉米幼苗的生理响应和抗氧化系统特征[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 752–762.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0526>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响

悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 刘领

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2118–2126 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0242>

EDDS对Cd胁迫下三叶鬼针草生长和抗氧化酶系统及Cd积累的影响

杨波, 陈银萍, 柯昀琪, 闫志强, 余沛东, 师小平

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 875–882 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1116>

Pb、Cd和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗生长及体内抗氧化酶活性的影响

陈顺钰, 韩航, 薛凌云, 张韵, 侯晓龙, 蔡丽平, 周垂帆

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 647–655 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1510>

外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1650–1658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0145>

氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响

赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 吴希, 云振宇

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1167–1173 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1104>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

宋琳, 刘梦宇, 周航, 等. 镉砷胁迫下玉米幼苗的生理响应和抗氧化系统特征[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 752–762.

SONG L, LIU M Y, ZHOU H., et al. Physiological response and antioxidant system characteristics of maize (*Zea mays* L.) seedlings under cadmium and arsenic stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(4): 752–762.



开放科学 OSID

镉砷胁迫下玉米幼苗的生理响应和抗氧化系统特征

宋琳, 刘梦宇, 周航, 曾鹏, 廖柏寒, 辜娇峰*

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

摘要:为探究玉米幼苗在镉(Cd)和砷(As)胁迫下的生理性状、重金属累积和抗氧化系统特征,以具有Cd低累积特性的玉米DJ26为试品种,开展水培试验。结果表明:在单一As胁迫下,玉米植株鲜质量和叶片总叶绿素含量分别显著下降76.0%和52.8%,而在单一Cd及低浓度Cd和As复合胁迫下,玉米的生长性状差异小,表现出一定耐受性。随培养液Cd浓度的增大,玉米各部位Cd含量增大,As的加入进一步使根系Cd含量增大14.1%~103.5%,但使茎叶Cd含量降低28.9%~72.6%;相比单一As胁迫,Cd的加入对茎叶As含量有增大效应,增大170.1%~198.8%,表明复合胁迫下As促进了Cd在根系中的累积并降低了Cd向地上部转运,Cd则促进了As向地上部的转运。复合胁迫下玉米具有较强的抗氧化调节能力,玉米根系超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性随培养液中Cd浓度的增加呈现先增大后降低的趋势,而过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性均显著高于单一Cd胁迫,在叶片中分别增大了366.0%~1 409.8%和1 372.7%~4 366.7%,根系中分别增大了27.4%~702.2%和230.0%~1 004.0%。复合胁迫下丙二醛(MDA)含量玉米叶片中增大而根系中降低,叶片受到Cd和As的显著毒害。研究表明,玉米幼苗对单一Cd及低浓度Cd和As复合胁迫具有耐受性,其根系对Cd和As具有较强富集能力和有限转运能力,具备在单一Cd或Cd和As复合污染严格管控区安全生产的潜力。

关键词:玉米;镉;砷;胁迫;生理性状;抗氧化系统

中图分类号:X53;S513 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2024)04-0752-11 **doi:**10.11654/jaes.2023-0526

Physiological response and antioxidant system characteristics of maize (*Zea mays* L.) seedlings under cadmium and arsenic stress

SONG Lin, LIU Mengyu, ZHOU Hang, ZENG Peng, LIAO Bohan, GU Jiaofeng*

(College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: To investigate the physiological traits, heavy metal accumulation, and antioxidant system characteristics of maize seedlings under cadmium (Cd) and arsenic (As) stress, hydroponic experiments were conducted, and cultivar DJ26 with low Cd accumulation characteristics was used. The results showed that under single As stress, plant fresh weight and leaf total chlorophyll concentration of maize decreased by 76.0% and 52.8%, respectively. The growth traits of maize under single Cd and combined stress with low concentrations of Cd and As showed small differences and certain tolerance. Cd content in all parts of maize increased as Cd concentration increased in the solution; furthermore, root Cd content increased by 14.1%–103.5% after adding As to the solution, with stem and leaf Cd content decreasing by 28.9%–72.6%. Compared with single As stress, adding Cd to the solution increased stem and leaf As content by 170.1%–198.8%. Therefore, As promoted Cd accumulation in the root and reduced Cd transport to the aboveground part under combined stress, whereas Cd promoted As transport to the aboveground part. Maize has strong antioxidant regulation ability under combined stress. The

收稿日期:2023-07-03 录用日期:2023-09-25

作者简介:宋琳(1999—),女,湖南永州人,硕士研究生,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:sl01232021@163.com

*通信作者:辜娇峰 E-mail:gujiaofeng@csuft.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1700104)

Project supported: National Key Research and Development Program of China(2022YFD1700104)

activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in maize root under compound stress showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase in Cd concentration in the solution. In contrast, catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) activities were significantly higher than those under single Cd stress. CAT and APX activities increased by 366.0%–1 409.8% and 1 372.7%–4 366.7%, respectively, in the leaf and 27.4%–702.2% and 230.0%–1 004.0%, respectively, in the root. Malondialdehyde (MDA) content increased in the maize leaves and decreased in the roots under combined stress. The leaves were significantly affected by Cd and As. This study demonstrated that DJ26 seedlings have a certain tolerance to single Cd or combined stress at low concentrations of Cd and As; the roots showed strong accumulation capacity and limited translocation capacity for Cd and As, expressing the potential for safe production in farmlands under strict control for single Cd pollution or combined Cd and As pollution.

Keywords: maize; cadmium; arsenic; stress; physiological characteristics; antioxidant system

受工业“三废”排放、矿山开采冶炼以及含重金属肥料施用等影响,我国农田土壤受到不同程度的重金属污染,其中镉(Cd)、镍(Ni)、砷(As)、铜(Cu)和汞(Hg)是主要污染元素^[1-2]。农田中过量的重金属会经由植物吸收^[3],并通过食物链迁移到人体富集,危害人体健康^[4]。

重金属Cd和类金属As因为赋存形态和性质不同而较难同时治理^[5],Cd和As复合污染已成为土壤污染修复的难点。当前,在重金属污染安全利用区通过选育抗性强且累积低的水稻品种实现安全种植,或者通过种植结构调整种植非水稻粮食作物实现污染农田的安全利用^[6],已被证实是一项行之有效的技术措施。玉米(*Zea mays* L.)是我国主要的粮食作物之一,具有生物量大,叶片、茎秆重金属富集能力强,向籽粒转运能力弱的特点,是重金属污染农田的理想替代作物^[7]。张宁等^[8]的田间试验发现,新单58、美加303等29个玉米品种的籽粒Cd含量低,可在优先保护区和安全利用区耕地试种;汤彬等^[9]研究34个玉米品种对土壤重金属Cd的累积特性发现,康农玉999对Cd富集能力较强,而苏玉20、康农18和青青515富集能力较弱;刘华琳等^[10]的研究发现,DH3622、SY511、XQ74-2、ND5、LY18是As富集量相对较高的玉米品种,而H11、JZN218、QL1等则相反。目前,已报道的玉米重金属低累积品种研究大多适用于优先保护区和安全利用区农田,而将玉米真正应用到严格管控区农田的较少。因此,筛选、研究适用于Cd、As污染严格管控区农田的低累积玉米品种,实现农业安全种植,对保持严格管控区农田耕地属性和区域经济发展具有重要意义。

过量的重金属会破坏植株叶绿体结构,影响叶绿素合成,进而影响光合速率,同时使植物产生过量的活性氧(ROS),导致氧化胁迫并干扰抗氧化系统[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)],影响植株正

常生长^[11-13]。丙二醛(MDA)是膜脂氧化的最终分解产物,能体现细胞膜受伤害程度^[14]。研究发现,随Cd和Pb复合胁迫浓度的升高,玉米幼苗叶片内MDA含量增大,SOD和POD活性则降低,而在耐性玉米品种中各指标变化幅度较小^[15];不同水平Cd胁迫下玉米叶片与根中MDA含量和CAT活性随胁迫浓度的增大而增大^[16],而玉米叶片APX活性则先增大后降低^[17]。可见,植物体内抗氧化系统酶活性的诱导可在一定程度上反映该植株对重金属的耐性。

本试验假设玉米籽粒低Cd累积品种也具有As的低累积特性,通过水培试验,探究该玉米品种面对Cd和As复合胁迫下的生理性状、重金属累积和抗氧化系统特征,以期为严格管控区Cd和As复合污染农田替代种植提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用大京九农业开发有限公司培育的玉米品种DJ26为应试品种,前期田间试验发现其具有籽粒Cd低累积特性。水培试验中基础营养液为改良版霍格兰氏营养液^[18],Cd、As溶液由分析纯CdCl₂·2.5H₂O和NaAsO₂配制。试验所用分析纯试剂主要由国药集团化学试剂有限公司生产。

1.2 试验设计

挑选均匀饱满的玉米种子若干,用10% H₂O₂消毒30 min,后用自来水冲洗,再用去离子水冲洗后浸泡6 h。采用水培法将种子置于放有湿润滤纸的培养皿中催芽,每皿20粒,于光照培养箱中培养。培养温度25℃,暗处理48 h后光控,间隔12 h补充等量去离子水。播种5 d后,挑选生长一致的幼苗(两片叶子,株高约5 cm)转移至水培桶中(规格:口径12 cm,高13 cm,容量1 L),置于自然环境中培养。水培时依次用1/4和1/2营养液进行培养,最后换成全营养液。经过全营养液培养至五叶一心后进行Cd、As胁迫。

参照文献^[19-20], 试验设置 12 个处理, 具体如表 1 所示, 且以不添加外源 Cd、As 的处理作为对照 (CK), 每个处理 3 次重复。试验每 3 d 更换一次营养液并对应加入 Cd 和 As 溶液, 同时添加 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 或 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液调节营养液 pH 在 6.0~6.5 之间。

表 1 不同胁迫浓度处理

Table 1 Treatment of different experimental concentration

胁迫设置 Stress setting	处理 Treatment	浓度 Concentration/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
		Cd	As
对照	CK	0	0
Cd 胁迫	Cd1	5	0
	Cd2	25	0
	Cd3	50	0
	Cd4	100	0
	Cd5	200	0
Cd 和 As 复合胁迫	Cd0As	0	20
	Cd1As	5	20
	Cd2As	25	20
	Cd3As	50	20
	Cd4As	100	20
	Cd5As	200	20

1.3 样品采集与分析

在外源 Cd、As 胁迫处理 5 d 后, 测量玉米幼苗株高和根长 (精度 0.1 cm), 分茎叶和根系取样, 部分样品称量鲜质量后置于超低温冰箱 ($-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 中储存待测生理指标, 部分样品用自来水、超纯水洗净晾干后于烘箱 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青, $75 \sim 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干, 质量恒定后称质量、粉碎、密封保存备测。

玉米幼苗叶片叶绿素含量采用丙酮:乙醇 (1:1) 浸提^[21], 紫外可见分光光度计 (UV2700, Shimadzu, 日本) 在波长 645 nm 和 663 nm 处测定。玉米幼苗各部位 SOD、POD、CAT、APX 活性以及 MDA 含量使用试剂盒 (南京建成生物工程研究所) 分析, 试剂盒型号依次是 A001-1 羟胺法、A084-3-1 分光光度法、A007-1-1 钼酸铵法、A123-1-1 分光光度法、A003-1 TBA 法。测定过程中严格按照试剂盒的说明书进行操作, 使用紫外可见分光光度计依次在波长 550 、 420 、 405 、 290 nm 和 532 nm 处测定, 试剂盒分析有效率为 $96.0\% \sim 105.0\%$ 。

玉米幼苗各部位 Cd 和 As 的总量采用干灰法消解 (GB/T 5009.15—2014、GB/T 5009.11—2014), 浸提液中 Cd 含量使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-6300, Thermo Fisher, 美国) 测定, As 含量使用原

子荧光分光光度计 (AFS-8220, 北京吉天, 中国) 测定。样品分析过程中以生物成分标准物质 (GBW-10010) 进行质量控制, 同时做空白试验, Cd 和 As 的回收率分别为 $98.0\% \sim 101.0\%$ 和 $97.0\% \sim 100.0\%$ 。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 21.0 统计分析数据, Origin 8.0 绘制图形, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$)。试验处理间差异采用独立样本 T 检验、单因素方差分析 (One-way ANOVA) Duncan 法进行检验 ($P<0.05$), 并采用 Pearson 系数分析数据间相关关系 ($P<0.05$ 和 $P<0.01$)。玉米植株 Cd、As 富集系数 (Bioconcentration factor, BCF)、根系向茎叶的 Cd、As 转运系数 (Transfer factor, TF) 和玉米各部位重金属累积量^[22]的计算方法如下:

富集系数 (BCF) = 植株中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 培养液中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

转运系数 (TF) = 植株茎叶中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 植株根系中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

重金属累积量 ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$) = 植株中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\times$ 植株干物质质量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$) $\times 10^{-3}$

2 结果与分析

2.1 镉砷胁迫对玉米幼苗生长性状和叶绿素含量的影响

如表 2 所示, 试验各处理玉米幼苗株高和根长分别为 $25.0 \sim 46.5 \text{ cm}$ 和 $29.0 \sim 53.7 \text{ cm}$, 茎叶和根系鲜质量分别为 $3.3 \sim 21.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $2.1 \sim 8.7 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。与 CK 相比, Cd0As 处理均显著 ($P<0.05$) 降低了株高、根长、根系鲜质量和茎叶鲜质量, 同时 Cd 和 As 复合胁迫处理降低了茎叶鲜质量, Cd0As~Cd5As 处理显著 ($P<0.05$) 降低了 $19.4\% \sim 81.6\%$ 。对比同一 Cd 浓度的单一胁迫和复合胁迫, As 的加入使得茎叶鲜质量下降, Cd1As~Cd5As 处理茎叶鲜质量均低于 Cd1~Cd5 处理, 降低了 $30.0\% \sim 66.7\%$ 。综上分析可知, DJ26 玉米幼苗在外观生长性状上表现出对 Cd 的耐受性较强, 而对 As 的较弱 (Cd0As 处理), 且高浓度复合胁迫 (Cd4As 和 Cd5As 处理) 有缓解 As 毒害的趋势。

分析叶片总叶绿素含量可知 (图 1), 与 CK 相比, Cd 胁迫下总叶绿素含量随胁迫浓度 ($5 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的增大而增大, 增幅为 $13.2\% \sim 109.4\%$, 其中 Cd3~Cd5 处理较 CK 差异显著 ($P<0.05$); Cd 和 As 复合胁迫下玉米幼苗总叶绿素含量则整体下降, Cd0As~Cd5As 处理下降了 $5.7\% \sim 64.2\%$ ($P<0.05$)。对比同一 Cd 浓度下

表2 不同浓度处理下玉米幼苗生理性状

Table 2 The physiological characteristics of maize seedlings under different treatments

处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	根长 Root length/ cm	根系鲜质量 Root fresh weight/(g·株 ⁻¹)	茎叶鲜质量 Stem and leaf fresh weight/(g·株 ⁻¹)
CK	40.0±6.0Aab	46.0±2.0Aab	4.5±1.2BCc	18.0±3.2Aa
Cd1	34.0±1.7A	44.0±9.5A	4.0±0.1C	14.1±1.4A
Cd2	39.0±9.0A	40.3±8.3A	4.3±1.1C	18.7±8.4A
Cd3	42.0±10.0A	48.5±5.5A	6.7±1.3AB	16.9±8.7A
Cd4	37.5±2.5A	41.3±7.3A	6.7±2.0AB	17.4±6.1A
Cd5	37.0±1.0A	49.1±1.6A	7.9±0.4A	21.0±1.4A
Cd0As	25.0±4.0c	29.0±1.0c	2.1±0.4d	3.3±0.8e
Cd1As	33.7±2.3b	43.3±3.5b	2.6±0.3cd*	4.7±1.2e*
Cd2As	33.0±2.0b	41.7±2.1b	4.2±1.1c	7.9±0.4cd
Cd3As	38.0±6.6b	53.7±2.9a	4.5±0.3c*	6.4±1.2de
Cd4As	46.5±1.5a*	53.0±11.3a	6.6±2.0b	10.0±1.8c
Cd5As	46.5±2.5a*	47.8±3.5ab	8.7±1.4a	14.5±1.9b*

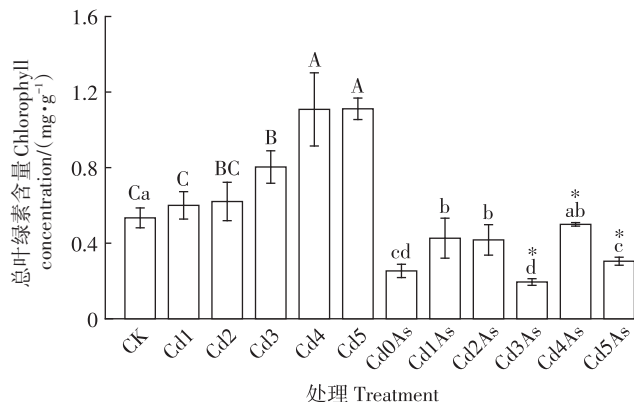
注:同列不同大写字母表示CK和单一Cd胁迫处理间差异显著($P<0.05$),同列不同小写字母表示CK和Cd-As复合胁迫处理间差异显著($P<0.05$),*表示同一Cd浓度下单一Cd胁迫处理与Cd-As复合胁迫处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different capital letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) between CK and single Cd stress treatments, different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) between CK and Cd-As composite stress treatments, and * indicates significant differences ($P<0.05$) between single Cd stress treatments and Cd-As composite stress treatments at the same Cd concentration. The same below.

的单一胁迫和复合胁迫,复合胁迫Cd3As~Cd5As处理的总叶绿素含量均显著($P<0.05$)低于单一Cd3~Cd5处理,降低了73.0%~76.3%。由此可知,Cd和As复合胁迫会破坏叶绿素的稳定,影响植物正常光合作用。

2.2 镉砷胁迫对玉米幼苗各部位镉含量的影响

如图2所示,Cd胁迫、Cd和As复合胁迫下玉米幼苗茎叶和根系Cd含量均随培养液中Cd浓度(5~200 mg·L⁻¹)的增大而增大,且各处理根系Cd含量均大于茎叶。分别与Cd1和Cd1As相比,Cd2~Cd5和Cd2As~Cd5As茎叶Cd含量分别增大了17.6%~163.4%和45.4%~583.5%,根系Cd含量分别增大了191.6%~619.7%和129.3%~218.5%。对比同一Cd浓度的单一胁迫和复合胁迫,复合胁迫Cd1As~Cd4As处理茎叶Cd含量显著($P<0.05$)低于单一Cd1~Cd4处理,降低了28.9%~72.6%;根系Cd含量则整体呈现复合胁迫大于单一胁迫,其中Cd1As、Cd2As处理显著($P<0.05$)高于单一Cd1、Cd2处理,增大了60.1%~103.5%。综上可知,随Cd胁迫浓度的增大,玉米幼苗



不同大写字母表示CK和单一Cd胁迫处理间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示CK和Cd-As复合胁迫处理间差异显著($P<0.05$),*表示同一Cd浓度下单一Cd胁迫处理和Cd-As复合胁迫处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different capital letters indicate significant differences ($P<0.05$) between CK and single Cd stress treatments, different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between CK and Cd-As composite stress treatments, and * indicates significant differences ($P<0.05$) between single Cd stress treatments and Cd-As composite stress treatments at the same Cd concentration. The same below.

图1 不同浓度处理下玉米幼苗总叶绿素含量

Figure 1 Chlorophyll concentration of maize seedlings under different treatments

各部位的Cd含量均增大;As胁迫的加入,使得根系吸收的Cd进一步增加,而茎叶Cd含量整体降低。

如图3所示,Cd和As复合胁迫下随培养液中Cd浓度(5~200 mg·L⁻¹)的增大,玉米幼苗茎叶As含量呈现先增大后降低的趋势,而根系As含量处理间无显著差异。与Cd0As处理相比,Cd1As~Cd3As处理的茎叶As含量显著($P<0.05$)增大了170.1%~198.8%,而Cd4As和Cd5As处理时无显著变化。

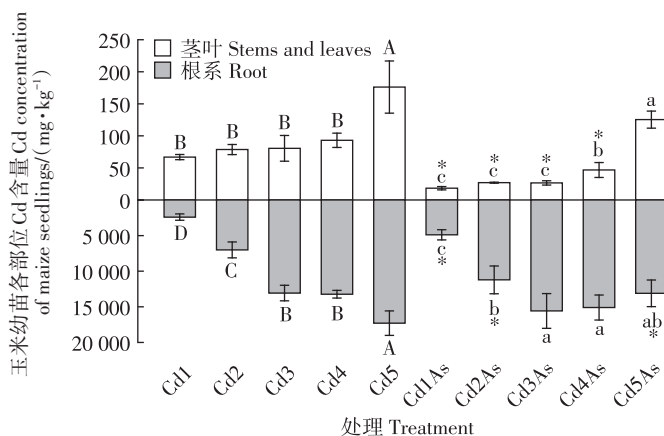


图2 不同浓度处理玉米幼苗各部位Cd含量

Figure 2 Cd concentration of maize seedlings under different treatments

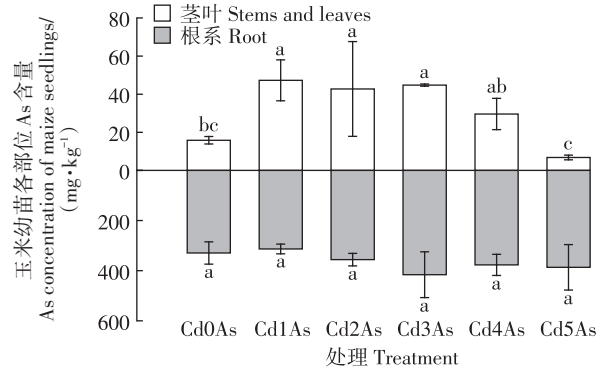


图3 不同浓度处理玉米幼苗各部位As含量
Figure 3 As concentration of maize seedlings under different treatments

如表3所示,玉米幼苗对Cd和As的累积量均呈现出根系>茎叶的规律。Cd胁迫、Cd和As复合胁迫下玉米幼苗各部位Cd累积量和根系As累积量均随培养液中Cd浓度(5~200 mg·L⁻¹)的增大而增大,而茎叶As累积量呈现先增大后减小的趋势。其中,Cd0As处理玉米茎叶As累积量最低,Cd4As处理最高,表明Cd胁迫浓度的增大会促进玉米As累积,但超过一定阈值(Cd 100 mg·L⁻¹),玉米生长受到伤害,对As的累积减少。

2.3 镉砷胁迫对玉米幼苗各部位抗氧化酶活性的影响

如图4(A)所示,玉米幼苗各部位SOD活性在Cd胁迫下无显著差异;在Cd和As复合胁迫下,随培养液中Cd浓度(5~200 mg·L⁻¹)增大,叶片SOD活性增大,根系SOD活性降低。对比同一Cd浓度的单一胁

迫和复合胁迫,复合胁迫Cd2As和Cd3As处理的叶片SOD活性显著低于单一Cd2和Cd3处理,降低了23.0%~28.2%,而Cd5As处理则显著(P<0.05)高于Cd5处理,增大了34.4%;根系SOD活性则与之相反,复合胁迫Cd1As~Cd3As处理根系SOD活性显著(P<0.05)增大了52.4%~60.0%,而Cd5As处理则显著(P<0.05)降低了39.4%。综上可知,低浓度Cd和As复合胁迫(Cd1As~Cd3As处理)会显著降低玉米幼苗叶片SOD活性,但增强根系SOD活性,高浓度复合胁迫(Cd5As处理)下则相反。

如图4(B)所示,各处理玉米幼苗叶片POD活性无显著差异,根系POD活性在Cd胁迫或Cd和As复合胁迫下随培养液中Cd浓度(5~200 mg·L⁻¹)增大均呈现先增大后降低的趋势。对比同一Cd浓度的单一胁迫和复合胁迫,复合胁迫Cd4As、Cd5As处理根系POD活性显著(P<0.05)低于单一Cd4、Cd5处理,降低了30.4%~33.3%。综上,Cd胁迫对玉米叶片和根系POD活性无显著影响,复合胁迫对叶片POD活性无影响,但高浓度复合胁迫(Cd4As、Cd5As处理)会使根系POD活性下降。

如图4(C)和图4(D)所示,玉米幼苗各部位CAT和APX活性在Cd单一胁迫和Cd、As复合胁迫下均整体增大。与CK相比,Cd0As~Cd5As处理的叶片CAT和APX活性显著(P<0.05)增大了14.3~20.7倍和26.0~76.0倍,根系CAT和APX活性显著(P<0.05)增大了1.5~4.4倍和1.0~4.0倍;分析Cd和As复合胁迫发现,随培养液Cd浓度(5~200 mg·L⁻¹)增大,叶片

表3 不同浓度处理玉米幼苗各部位Cd、As累积量
Table 3 Accumulation of Cd and As of maize seedlings under different treatments

处理 Treatment	茎叶Cd累积量 Stem and leaf Cd accumulation/ (mg·株 ⁻¹)	根系Cd累积量 Root Cd accumulation/ (mg·株 ⁻¹)	茎叶As累积量 Stem and leaf As accumulation/ (mg·株 ⁻¹)	根系As累积量 Root As accumulation/ (mg·株 ⁻¹)
CK	—	—	—	—
Cd1	0.072±0.004B	3.028±0.570C	—	—
Cd2	0.085±0.024B	8.684±1.303B	—	—
Cd3	0.079±0.014B	13.628±0.772A	—	—
Cd4	0.079±0.008B	14.541±4.376A	—	—
Cd5	0.141±0.029A	15.843±0.682A	—	—
Cd0As	—	—	0.007±0.001c	0.091±0.032c
Cd1As	0.009±0.002b*	1.285±0.169c*	0.023±0.005b	0.082±0.004c
Cd2As	0.027±0.004b*	3.720±0.539bc*	0.017±0.002b	0.120±0.027c
Cd3As	0.025±0.003b*	5.692±0.933b*	0.043±0.001a	0.152±0.034bc
Cd4As	0.079±0.025b	9.544±2.748a	0.049±0.012a	0.238±0.075ab
Cd5As	0.292±0.092a	9.694±1.682a*	0.015±0.001bc	0.294±0.117a

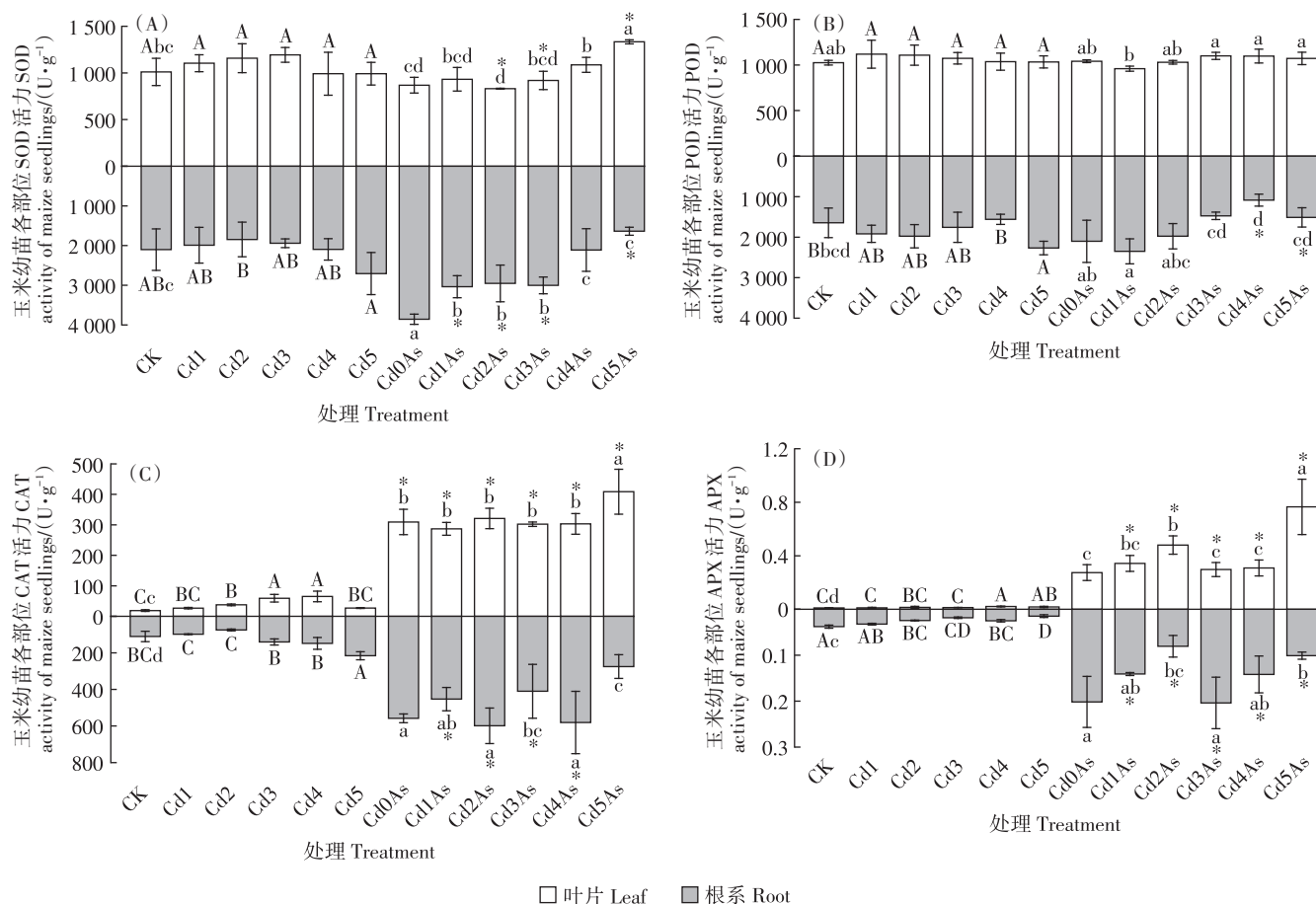


图4 不同浓度处理玉米幼苗各部位抗氧化酶活性

Figure 4 Activity of antioxidant enzymes of maize seedlings under different treatments

CAT和APX活性呈现增大趋势,而根系中呈降低趋势。对比同一Cd浓度单一胁迫和复合胁迫,复合胁迫Cd1As~Cd5As处理时,玉米幼苗各部位CAT和APX活性均显著($P<0.05$)高于单一Cd1~Cd5处理,叶片分别增大了3.7~14.1倍和13.7~43.7倍,根系分别增大了27.4%~702.2%和2.3~10.0倍。综上,Cd和As复合胁迫会增大玉米幼苗各部位CAT和APX活性。

2.4 镉砷胁迫对玉米幼苗各部位MDA含量变化的影响

如图5所示,随Cd胁迫浓度($5\sim 200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)增大,玉米幼苗叶片MDA含量在Cd单一胁迫下呈增大趋势;在Cd和As复合胁迫下也呈增大趋势,其中Cd3As~Cd5As处理显著($P<0.05$)大于CK,增大了0.9~4.5倍。根系MDA含量随Cd胁迫浓度($5\sim 200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)增大,在Cd单一胁迫下呈先降低后增大的趋势,在复合胁迫下则整体呈下降趋势,Cd1As~Cd5As处理均显著($P<0.05$)低于CK,降低了20.6%~53.9%。对比同一浓度Cd单一胁迫和复合胁迫发现,叶片MDA含量显著增大,根系MDA含量则显著降低,其

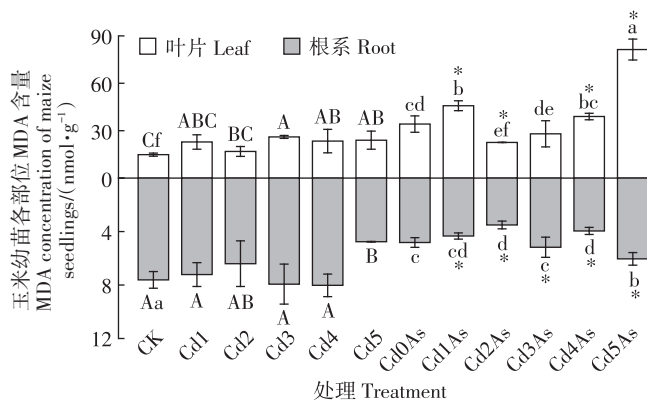


图5 不同浓度处理玉米幼苗各部位MDA含量

Figure 5 MDA concentration in different parts of maize seedlings

中叶片MDA在Cd4As和Cd5As处理时显著($P<0.05$)高于Cd4和Cd5处理,增大了0.7~2.4倍;根系MDA含量在Cd1As~Cd4As处理时显著($P<0.05$)低于Cd1~Cd4处理,降低了34.8%~50.6%。综上,Cd和As复合胁迫增大了玉米幼苗叶片MDA含量而降低了根

系MDA含量。

2.5 相关性分析

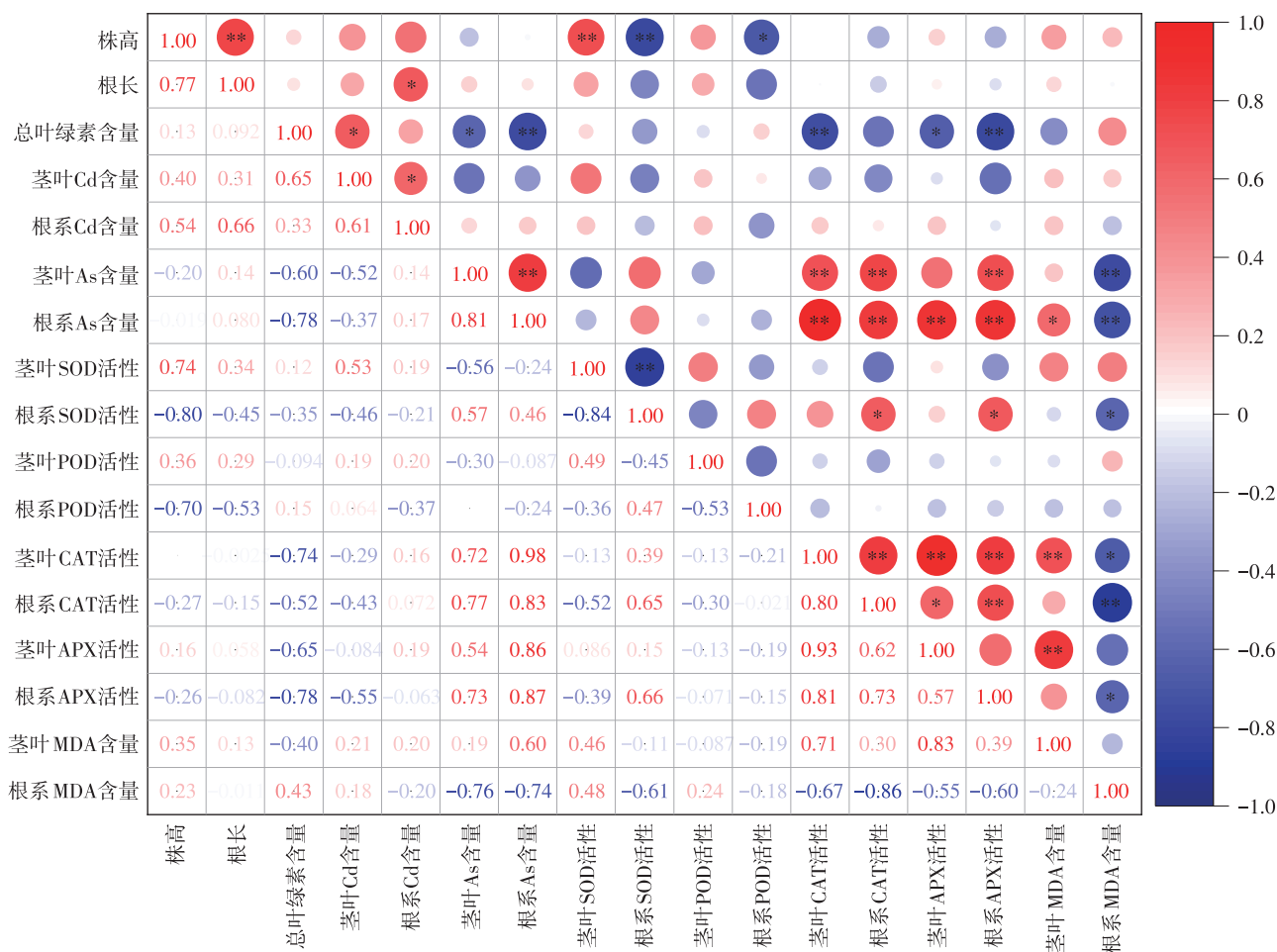
为探究玉米幼苗各部位Cd、As含量和抗性生理特征之间的相关性,分别对其进行相关性分析。如图6所示,玉米茎叶Cd含量与根系Cd含量呈显著正相关关系($P<0.05$),玉米各部位Cd含量与玉米各部位抗氧化酶活性无显著相关关系。玉米幼苗总叶绿素含量与茎叶As含量($P<0.05$)、根系As含量($P<0.01$)呈显著负相关关系,表明玉米叶片中总叶绿素含量主要受As胁迫的影响。玉米幼苗茎叶、根系As含量与玉米幼苗各部位CAT活性和APX活性呈显著正相关关系($P<0.01$),而与玉米幼苗根系MDA含量呈显著负相关关系($P<0.01$),这表明玉米幼苗中CAT活性和APX活性主要受As胁迫的影响。

3 讨论

3.1 镉、砷胁迫下玉米幼苗对重金属的富集和转运能力

本试验发现,随着培养液中Cd浓度的增大,玉米幼苗各部位的Cd含量逐渐增大,且表现为根系大于茎叶(图2),这与前人的研究结果基本一致^[23],这一现象称为根系的“截留作用”。大部分受重金属污染的耐性植物会把重金属截留于根系以降低重金属从地下部转移到地上部的转移率,从而减轻重金属对植物地上部的胁迫作用^[24]。

Cd和As复合胁迫下玉米幼苗根系Cd含量因As的加入而增大,茎叶Cd含量则显著降低(图2);根系As含量变化差异不显著而茎叶As含量则随培养液中Cd浓度的增大呈现先增大后降低的趋势(图3)。这



*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关,**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关;色柱颜色从红色到蓝色表示相关性的数值大小,圆形大小表示相关性大小,数字表示相关性值。

* indicates significant correlation at $P<0.05$ level, and ** indicates significant correlation at $P<0.01$ level; The color of the bar from red to blue indicates the numerical size of the correlation, the circle size indicates the size of the correlation, and the number indicates the correlation value.

图6 玉米各部位镉、砷含量和抗性生理特征之间的相关系数

Figure 6 Correlation coefficients between cadmium and arsenic concentration in various parts of maize and resistance physiological traits

表明低浓度复合胁迫下 Cd 和 As 在根系中可能为协同作用,在茎叶中可能为拮抗作用,而高浓度复合胁迫下玉米受到严重的毒害作用,同时降低了对 Cd 和 As 的吸收。这一现象可能源于在 Cd 和 As 复合胁迫下,二者在植物体内转运时 As 会优先竞争转运子结合位点,降低 Cd 的迁移能力,从而抑制 Cd 从根部向地上部转移,使得根系 Cd 含量增大而茎叶 Cd 含量降低^[25]。此外,植物种类和作用器官的不同也会导致吸收量呈现较大差异^[26]。

富集系数体现植物对重金属的吸收富集能力,转运系数体现植物根系向地上部转移重金属的能力^[27]。如表 4 所示,玉米幼苗各部位 Cd、As 转运系数均小于 1 且随胁迫浓度的增大均呈下降趋势,这是因为作物,尤其是低累积作物会通过细胞解毒作用和代谢作用,将 Cd、As 以螯合物的形式截留在根细胞液泡中,并增大木质部的负载能力,以降低 Cd 和 As 向茎叶的转运,实现对营养器官的保护^[24]。其次,不同组织部位对重金属转运和区隔的能力不同,进而富集能力也不同,重金属离子被根吸收后,需要通过必需元素的运输途径或者离子通道转运至其他部位^[28],根系对 Cd 和 As 的转运能力相对较弱,因此茎叶积累的 Cd 和 As 就较少。

3.2 镉、砷胁迫下玉米幼苗抗性生理特征

重金属胁迫会导致植物体内产生大量的自由基,破坏细胞膜,引起植物的过氧化损伤^[29]。SOD、CAT、POD 和 APX 都是植物对膜脂过氧化的酶促防御系统中重要的保护酶,是植物的重要保护机制^[30]。SOD 催化歧化反应,使 ROS 生成 H_2O_2 和 O_2 , CAT 和 APX 将 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 , POD 则催化过多的 H_2O_2 降

解^[31]。MDA 是过氧化的最终产物,代表着细胞组织受氧化的程度^[32]。

研究表明,SOD 对玉米抵抗 Cd 胁迫有着重要作用,SOD 活性越强表明玉米耐受性越强^[33]。本试验中,玉米幼苗在低浓度 Cd 和 As 复合胁迫下(Cd1As~Cd3As 处理)根系 SOD 活性高于单一 Cd 处理,高浓度(Cd5As 处理)处理时则低于单一 Cd 处理(图 4),这是因为植物为清除 ROS 以达到保护自身的目的,但这种保护作用是有了一定限度的^[34],高浓度胁迫使植物组织细胞受到抗氧化损伤,Cd²⁺替代了 SOD 中的锌离子或锰离子,造成 SOD 结构损伤,影响了 SOD 的正常工作,使得其活性降低^[35-36]。试验结果显示,玉米幼苗在 Cd 胁迫下根系 POD 活性随胁迫浓度的增大先增后降,这源于植株是通过增大 POD 活性消除胁迫产生的 H_2O_2 ^[37],但这一保护作用同样是有限度的。玉米幼苗各部位 CAT 和 APX 活性在复合胁迫处理时均显著($P<0.05$)高于单一 Cd 处理(图 4),可能是 Cd 和 As 复合胁迫下植株 H_2O_2 和 OH 快速累积,致使 SOD 的金属辅基丢失而失活,因此 CAT、APX 活性增大以加强 ROS 清除能力^[38]。叶片 MDA 含量随着胁迫浓度的增大整体呈增大趋势(图 5),表明玉米幼苗受到胁迫后,其虽会增大抗氧化酶活性抵制外界胁迫,但胁迫浓度较高时,自由基积累过多无法完全清除,会引起细胞膜蛋白与膜内脂的变化,导致细胞内膜脂过氧化物不断增多,从而对植物造成不可恢复的伤害^[39]。

结合玉米幼苗生长性状和总叶绿素含量的变化,本试验结果表明,在不同浓度 Cd 胁迫处理时,由于玉米植株体内抗氧化酶之间相互协调以适应抗逆环境,

表 4 不同浓度处理玉米幼苗 Cd、As 富集系数和转运系数

Table 4 Bioaccumulation factor and transfer factor of Cd and As under different treatments

处理 Treatment	BCF 茎叶 Cd	BCF 根系 Cd	TF 根系 Cd	BCF 茎叶 As	BCF 根系 As	TF 根系 As
CK	—	—	—	—	—	—
Cd1	13.38±0.81A	480.62±88.07A	0.028A	—	—	—
Cd2	3.15±0.32B	280.29±44.60B	0.012B	—	—	—
Cd3	1.61±0.40C	257.65±15.49B	0.006C	—	—	—
Cd4	0.93±0.11C	132.35±5.24C	0.007BC	—	—	—
Cd5	0.88±0.20C	86.47±8.57C	0.010BC	—	—	—
Cd0As	—	—	—	0.79±0.10bc	16.48±2.22a	0.049c
Cd1As	3.67±0.51a*	978.28±141.81a*	0.004b*	2.36±0.54a	15.67±0.97a	0.151a
Cd2As	1.08±0.03b*	448.68±77.94b*	0.002b*	2.14±1.24a	17.80±1.24a	0.119ab
Cd3As	0.53±0.07c*	311.63±48.81b	0.002b*	2.24±0.03a	20.80±4.57a	0.111ab
Cd4As	0.47±0.12c*	151.03±17.55c	0.003b*	1.48±0.41ab	18.85±2.10a	0.080bc
Cd5As	0.63±0.07c*	66.51±9.35c*	0.010a	0.34±0.06c	19.33±4.53a	0.018c

清除机体积累过多的ROS,加大光合速率,可保证植株的正常生长,使得Cd胁迫下玉米生物量无较大差异。低浓度复合胁迫下(Cd1As~Cd3As处理)玉米生物量低于单一Cd胁迫,单一As胁迫下生物量最低,高浓度复合胁迫下(Cd4As和Cd5As处理)玉米生物量与单一Cd胁迫无较大差异(表2),表明玉米对As的耐受性弱。复合胁迫下玉米叶片中MDA含量增大(图5),过多的MDA积累使抗氧化系统紊乱,导致幼苗总叶绿素含量显著低于Cd单一胁迫(图1),叶绿体亚显微结构遭到破坏,光合色素合成、电子传递、类囊体蛋白质合成受阻^[40],致使叶绿素含量合成受到阻碍,玉米幼苗受到毒害作用。

综上分析,玉米品种DJ26对Cd单一及低浓度Cd和As复合胁迫(Cd1As~Cd3As处理)均表现出一定的耐受性,对单一As胁迫(Cd0As处理)耐受性弱,其根系对Cd和As具有较强的吸收能力,且从根系向茎叶转移的能力有限,具备在严格管控区Cd单一污染、Cd和As复合污染农田的安全生产潜力。

4 结论

(1)玉米对单一Cd及低浓度Cd、As复合胁迫有一定的耐受性,对单一As耐受性弱。在单一As胁迫下,玉米植株鲜质量和叶片总叶绿素含量分别显著下降76.0%和52.8%,而在单一Cd及低浓度Cd和As复合胁迫下,玉米的生长性状差异小。

(2)复合胁迫下As促进了Cd在玉米根系中的累积并降低了Cd向地上部转运,Cd则促进了As向地上部的转运。复合胁迫下玉米根系Cd含量增大14.1%~103.5%,而茎叶Cd含量降低28.9%~72.6%;相比单一As胁迫,Cd的加入使得茎叶As含量增大1.7~2.0倍。

(3)复合胁迫下玉米具有较强的抗氧化调节能力。低浓度Cd和As复合胁迫下玉米体内SOD、POD活性升高,而高浓度Cd和As复合胁迫下其活性受到抑制。同时,Cd和As复合胁迫下玉米体内CAT和APX活性均显著高于单一Cd胁迫,且MDA含量在玉米根系中降低。

参考文献:

- [1] SUN L, ZHANG X, OUYANG W, et al. Lowered Cd toxicity, uptake and expression of metal transporter genes in maize plant by ACC deaminase-producing bacteria *Achromobacter* sp. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127036.
- [2] 王亚丹, 乔冬梅, 陆红飞. 水分管理对重金属污染土壤植物修复效

- 果的影响研究综述[J]. *土壤通报*, 2022, 53(6): 1499–1505. WANG Y D, QIAO D M, LU H F. Effects of water management on phytoremediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(6): 1499–1505.
- [3] CAO L, LIN C, GAO Y, et al. Health risk assessment of trace elements exposure through the soil–plant (maize)–human contamination pathway near a petrochemical industry complex, northeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114414.
- [4] REN S, SONG C, YE S, et al. The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150322.
- [5] 赵宇, 艾雯妍, 文思颖, 等. 微生物-植物联合修复镉砷污染农田土壤技术与应用[J]. *生态毒理学报*, 2022, 17(6): 144–162. ZHAO Y, AI W Y, WEN S Y, et al. Microbe–plant combined remediation of cadmium and arsenic contaminated agricultural soils: a review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(6): 144–162.
- [6] 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 等. 镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5545–5553. WANG Y H, YANG L, KANG Y C, et al. Characteristics and influencing factors of cadmium accumulation in different rice varieties under cadmium contaminated field conditions[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5545–5553.
- [7] GUO J, ZHENG G, YANG J, et al. Safe utilization of cadmium–and lead–contaminated farmland by cultivating a winter rapeseed/maize rotation compared with two phytoextraction approaches[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114306.
- [8] 张宇, 陶荣浩, 张慧敏, 等. 不同玉米品种对镉积累和转运差异研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1208–1216. ZHANG N, TAO R H, ZHANG H M, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1208–1216.
- [9] 汤彬, 郭欢乐, 李涵, 等. 春夏不同播期玉米籽粒镉积累差异[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(2): 672–678. TANG B, GUO H L, LI H, et al. The difference of cadmium accumulation in maize kernels in spring and summer planting[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(2): 672–678.
- [10] 刘华琳, 郝玉波, 慈晓科, 等. 不同基因型玉米对砷胁迫的响应[J]. *核农学报*, 2010, 24(4): 704–712. LIU H L, HAO Y B, CI X K, et al. The response of different genotypic maize to arsenic[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(4): 704–712.
- [11] LI Y, ZHANG S, BAO Q, et al. Jasmonic acid alleviates cadmium toxicity through regulating the antioxidant response and enhancing the chelation of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 304: 119178.
- [12] MENG Y T, ZHANG X L, WU Q, et al. Transcription factor ANAC004 enhances Cd tolerance in *Arabidopsis thaliana* by regulating cell wall fixation, translocation and vacuolar detoxification of Cd, ABA accumulation and antioxidant capacity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 436: 129121.
- [13] ZHU Y, DONG Y, ZHU N, et al. Foliar application of biosynthetic nano–selenium alleviates the toxicity of Cd, Pb, and Hg in *Brassica chi-*

- nensis* by inhibiting heavy metal adsorption and improving antioxidant system in plant[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 240:113681.
- [14] 邹岭雁, 韩昊展, 谢永娟, 等. 玉米种子发芽生理和抗氧化系统对砷胁迫响应的基因型差异及其机制研究[J]. 核农学报, 2021, 35(4):969-979. ZOU M Y, HAN H Z, XIE Y J, et al. Genotypic differences of arsenic stress in germination physiology and antioxidant system of maize seeds[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(4):969-979.
- [15] 曹莹, 赵艺欣, 刘洋, 等. 铅镉复合胁迫对不同耐性玉米衰老特性的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6):70-73. CAO Y, ZHAO Y X, LIU Y, et al. Effect of the combined stress of cadmium and lead on senescence characteristics of maize with different tolerances[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(6):70-73.
- [16] 刘娟, 赵欢蕊, 刘永华, 等. 外源硫诱导玉米镉胁迫耐性的生理机制研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(5):101-108. LIU J, ZHAO H R, LIU Y H, et al. Physiological analysis of surplus sulfur on alleviating cadmium stress in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5):101-108.
- [17] 单长卷, 徐新娟, 孙海丽, 等. 茉莉酸对镉胁迫下玉米幼苗叶片生理特性的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(3):99-102. SHAN C J, XU X J, SUN H L, et al. Effects of jasmonic acid on the leaf physiological characteristics of maize seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(3):99-102.
- [18] 王芳, 李永生, 王汉宁, 等. 钙对铅胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3):202-207. WANG F, LI Y S, WANG H N, et al. Effect of calcium on growth and physiological characteristics of maize seedling under lead stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3):202-207.
- [19] 曹小霞. 玉米品种间对砷累积能力差异及其吸收与耐砷机制[D]. 北京:中国农业科学院, 2020:19-23. CAO X X. The difference of arsenic accumulation capacity among maize varieties and its mechanisms of arsenic uptake and tolerance[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020:19-23.
- [20] 曲梦雪, 宋杰, 孙菁, 等. 镉胁迫对不同耐镉型玉米品种苗期根系生长的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(11):2945-2952. QU M X, SONG J, SUN J, et al. Effects of cadmium stress on root growth of maize (*Zea mays* L.) varieties with different cadmium-tolerant at seedling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(11):2945-2952.
- [21] 郑泽其, 李剑涛, 吴佳妮, 等. 二氧化钛纳米颗粒对玉米幼苗吸收镉及其植物毒性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6):1217-1224. ZHENG Z Q, LI J T, WU J N, et al. Impact of titanium dioxide nanoparticles on cadmium uptake in maize seedlings and its phytotoxicity[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6):1217-1224.
- [22] 李梦然, 许学慧, 赵萌萌. 不同形态氮肥对苗期玉米镉富集的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4):289-294. LI M R, XU X H, ZHAO M L. Effects of different forms of nitrogenous fertilizer on cadmium accumulation in seedling stage of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4):289-294.
- [23] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对Cd、Pb、As积累与转运的差异研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9):1867-1875. DU C Y, YU X F, DU J L, et al. Variety difference of Cd, Pb and As accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9):1867-1875.
- [24] 任超, 肖建辉, 李竞天, 等. 不同玉米品种Cd、Pb、Zn和As积累与转运特性[J]. 环境科学, 2022, 43(8):4232-4252. REN C, XIAO J H, LI J T, et al. Accumulation and transport characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in different maize varieties[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8):4232-4252.
- [25] 周昶, 霍捷, 李鼎豪, 等. 生物炭对复合污染土壤-作物中镉砷累积和转运的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5):393-399. ZHOU C, HUO J, LI D H, et al. Effects of biochar application on accumulation and transport of cadmium and arsenic in system of contaminated soil-crops[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):393-399.
- [26] 伍钧, 吴传星, 孟晓霞, 等. 重金属低积累玉米品种的稳定性 and 环境适应性分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2160-2167. WU J, WU C X, MENG X X, et al. The analysis of stability and adaptability on low accumulation of heavy metals in various cultivars of *Zea Mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2160-2167.
- [27] 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 等. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. 环境科学, 2021, 42(3):1166-1176. SUN H Y, WEI X F, SUN X M, et al. Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil-maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical vanadium-titanium magnetite tailings[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3):1166-1176.
- [28] 冯英, 马璐瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11):2359-2370. FENG Y, MA L Y, WANG Q, et al. Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11):2359-2370.
- [29] ZHOU J, ZHANG C, DU B, et al. Soil and foliar applications of silicon and selenium effects on cadmium accumulation and plant growth by modulation of antioxidant system and Cd translocation: comparison of soft vs. durum wheat varieties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402:123546.
- [30] 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 等. 外源褪黑素对镉胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(4):2356-2364. CHU Y T, LI Y, HUANG Y Z, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on the growth and antioxidant system of rice seedlings under antimony stress[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4):2356-2364.
- [31] 赵龙飞, 徐亚军, 邵璇, 等. 两株内生芽孢杆菌对盐胁迫下大豆幼苗超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性影响[J]. 微生物学通报, 2022, 49(5):1664-1677. ZHAO L F, XU Y J, SHAO X, et al. Two endophytic *Bacillus* strains from soybean nodules affect superoxide dismutase and peroxidase activities in soybean seedlings under salt stress[J]. *Microbiology China*, 2022, 49(5):1664-1677.

- [32] TENG L, ZHANG X, WANG R, et al. miRNA transcriptome reveals key miRNAs and their targets contributing to the difference in Cd tolerance of two contrasting maize genotypes[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 256:114881.
- [33] SALEEM M H, PARVEEN A, KHAN S U, et al. Silicon fertigation regimes attenuates cadmium toxicity and phytoremediation potential in two maize (*Zea mays* L.) cultivars by minimizing its uptake and oxidative stress[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3):1462.
- [34] 宇克利, 邹婧, 邹金华. 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化酶系统及矿质元素吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1050-1056. YU K L, ZOU J, ZOU J H. Effects of cadmium stress on antioxidant enzyme system and absorption of mineral elements in maize seedlings [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1050-1056.
- [35] XU X, LIU C, ZHAO X, et al. Involvement of an antioxidant defense system in the adaptive response to cadmium in maize seedlings (*Zea mays* L.) [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 93:618-624.
- [36] 黄辉, 李升, 郭娇丽. 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化系统及光合作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):211-215. HUANG H, LI S, GUO J L. The influence of cadmium (Cd^{2+}) to the antioxidant system and photosynthesis of seedling of *Zea mays* L. [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):211-215.
- [37] 杨昞, 张羽, 尹秋霞, 等. 多功能复合菌对玉米幼苗镍和镉胁迫的解毒特征及其机理[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11):2448-2457. YANG Y, ZHANG Y, YIN Q X, et al. Detoxification characteristics and mechanism of nickel and cadmium stress in maize seedlings by multifunctional bacterial consortia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11):2448-2457.
- [38] 张婷婷, 朱叶心怡, 吴玉环, 等. 镉胁迫下外源IAA对栝楼生理变化和耐镉性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4):335-341. ZHANG T T, ZHU Y X Y, WU Y H, et al. Effects of exogenous IAA on physiological changes and cadmium tolerance of trichosanthes kirilowii maxim under cadmium stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4):335-341.
- [39] 陈佳月, 解静芳, 姜洪进, 等. 草甘膦与镉复合胁迫对玉米幼苗抗氧化酶活性及光合作用的影响[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(1):219-228. CHEN J Y, XIE J F, JIANG H J, et al. Effects of glyphosate and cadmium combined stress on antioxidant enzyme activity and photosynthesis of maize seedling[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(1):219-228.
- [40] 惠俊爱, 党志, 叶庆生. 镉胁迫对玉米光合特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):205-210. HUI J A, DANG Z, YE Q S. Influence of cadmium stress on photosynthetic characteristics of maize [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):205-210.