

引用格式:

吴月莹, 邓思情, 刘松芹, 罗红兵, 易镇邪, 邓敏. 镉胁迫对不同品种玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(5): 509–515.

WU Y Y, DENG S Q, LIU S Q, LUO H B, YI Z X, DENG M. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of maize seedlings from different varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(5): 509–515.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 镉胁迫对不同品种玉米幼苗生长及生理特性的影响

吴月莹<sup>1,2</sup>, 邓思情<sup>1,2</sup>, 刘松芹<sup>1,2</sup>, 罗红兵<sup>1,2</sup>, 易镇邪<sup>1,2</sup>, 邓敏<sup>1,2\*</sup>

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省玉米工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 为探究不同品种玉米苗期对镉胁迫的响应差异, 筛选出耐镉性较强的品种, 选用4个玉米杂交种(京农科728、郑单958、正大999、豫单9953), 通过水培的方法进行镉胁迫(6 mg/L CdCl<sub>2</sub> 2.5H<sub>2</sub>O)处理, 在镉胁迫3、6、9、12 d后对4个玉米品种苗期的生长指标和生理指标进行检测分析, 并采用主成分分析和隶属函数法进行耐镉性综合评价。结果表明: 镉胁迫后4个品种幼苗的根长、株高、地上部干质量、地上部鲜质量、地下部干质量、地下部鲜质量和总叶绿素含量整体低于对照(蒸馏水处理), 豫单9953在整个胁迫过程中叶片和根部的POD活性以及MDA含量高于对照组; 镉胁迫下, 与其他品种相比, 豫单9953的株高、根长和干质量下降幅度较大, 但其鲜质量受影响较小, 且其叶片MDA含量增加幅度小, POD活性强。耐镉性综合评价结果显示, 豫单9953、京农科728、正大999、郑单958的耐镉性依次减弱, 豫单9953可作为耐镉性品种培育。

**关键词:** 玉米; 镉胁迫; 生理指标; 主成分分析; 隶属函数法

中图分类号: S513.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)05-0509-07

## Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of maize seedlings from different varieties

WU Yueying<sup>1,2</sup>, DENG Siqing<sup>1,2</sup>, LIU Songqin<sup>1,2</sup>, LUO Hongbing<sup>1,2</sup>, YI Zhenxie<sup>1,2</sup>, DENG Min<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Maize Engineering Technology Research Center of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** This study aimed to explore the differences of cadmium stress response in the different maize varieties seedling stage and screen out varieties with strong cadmium tolerance. The four maize hybrids Jingnongke728, Zhengdan958, Zhengda999 and Yudan9953 were selected in this study. Through laboratory hydroponics, they were treated with cadmium stress(6 mg/L CdCl<sub>2</sub> 2.5H<sub>2</sub>O). The growth indexes and physiological indexes of four maize varieties at seedling stage were detected and analyzed after 3, 6, 9 and 12 days of cadmium stress, and the comprehensive evaluation of cadmium tolerance was carried out using principal component analysis and membership function method. The results showed that the root length, plant height, dry and fresh weight and total chlorophyll content of the seedlings of the four varieties after cadmium stress were lower than those of the control(distilled water treatment), and the POD activity and MDA content of leaves and roots of Yudan9953 were higher than those of the control during the whole stress process. Under cadmium stress, Yudan9953 decreased significantly in plant height, root length and dry weight compared with other varieties, but its fresh weight was less affected, and its leaf MDA content increased less and POD activity was strong. The comprehensive evaluation results of cadmium tolerance showed that the cadmium tolerance of Yudan9953, Jingnongke728, Zhengda999 and Zhengdan958 weakened sequentially, and

收稿日期: 2023-03-21

修回日期: 2023-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101700); 湖南省科技创新计划(2021RC2082); 中国博士后基金项目(2022M711122)

作者简介: 吴月莹(2000—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事作物栽培与耕作学研究, wuyueying2022@163.com; \*通信作者, 邓敏, 博士, 副教授, 主要从事玉米遗传学及功能基因组学研究, hdengmin@163.com

Yudan9953 could be cultivated as a cadmium-tolerant variety.

**Keywords:** maize; cadmium stress; physiological index; principal component analysis; membership function method

玉米(*Zea mays* L.)是一种重要的粮食作物、饲料作物和工业原料。由于矿石开采、污水灌溉、化肥农药过量施用等原因,使得重金属污染问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。据估算,全世界每年排放到环境中的镉约  $1.0 \times 10^6$  t<sup>[3]</sup>。镉进入农田土壤后会难以降解而造成土壤污染,不仅会影响农作物的产量与品质,而且还会通过食物链富集危害人类。据全国土壤污染状况调查公报<sup>[4]</sup>显示,中国的镉污染点位超标率达到了 7.0%。

研究表明,镉胁迫会导致植株根系发黑、形态异常、叶片萎蔫黄化、叶片透气性降低、光合色素含量降低、光合速率下降<sup>[5]</sup>,影响植株总根长、总根表面积、根干质量、侧根密度、根尖数<sup>[6]</sup>,破坏线粒体结构,降低膜通透性,影响呼吸速率<sup>[7]</sup>,还会促使细胞内活性氧含量上升,造成细胞膜氧化损伤<sup>[8]</sup>,影响植物对 Mg、Ca 等离子和水分的吸收<sup>[9-10]</sup>,最终造成植物生长发育异常。但植物会以多种响应方式缓解镉胁迫对其造成的影响,如通过合成某些物质参与渗透调节来维持细胞膜的完整性或通过抗氧化酶系统清除植物体内过量的活性氧来抵抗胁迫<sup>[11-12]</sup>。

本研究以 4 个玉米品种为试验材料,研究玉米幼苗在镉胁迫 3、6、9、12 d 后的生长指标和生理指标的变化情况,通过主成分分析和隶属函数法对 4 个玉米品种的耐 Cd 性进行综合评价,以筛选出苗期耐 Cd 性较强的玉米品种,为选育镉胁迫下苗势强、苗壮、苗齐的玉米新品种提供材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

4 个玉米品种分别是玉米杂交种郑单 958、豫单 9953、正大 999、京农科 728。

### 1.2 试验设计

整个试验过程在人工气候室中进行。玉米种子发芽前温度设置为 25 °C,暗培养;发芽后昼夜温度设置为  $(22 \pm 1)/(20 \pm 1)$  °C,昼夜时长为 14 h/10 h,光照度为 20 000 lx。

选择大小基本一致且无病害的种子置于 10%  $H_2O_2$  中浸泡 15 min,用去离子水洗净,摆放在铺有湿润滤纸的发芽盘中,当玉米种子的芽伸长至 1 cm 左右时,选取长势一致的种子置于玉米幼苗生长专用培养盒中,每盒 100 株。用去离子水培养 1 d 后,更换为 1/4(体积分数)的 Hoagland 营养液(溶液需没过滤纸下边缘),期间每隔 3 d 更换 1 次营养液。1 叶 1 心期后进行镉(T, 6 mg/L  $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ , 国产分析纯)浸泡处理,并设置对照组(CK, 蒸馏水)。每个处理 3 次重复,随机区组排列。

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 生长指标的测定

于镉胁迫处理的第 3、6、9、12 天,随机选取对照和处理组各 5 株幼苗,用去离子水冲净后去掉玉米种子,以幼苗基部为中心,分成地上、地下两部分,测其长度和鲜质量;在 105 °C 烘箱中杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重,测量其干质量。

#### 1.3.2 生理指标的测定

于镉胁迫处理的第 3、6、9、12 天,从对照和处理组中各选取 3 株幼苗,测其叶片中的叶绿素含量;其余幼苗经液氮冷冻后置于 -80 °C 超低温冰箱中保存,用于后期幼苗 POD 活性和 MDA 含量的测定。采用丙酮浸提法<sup>[13]</sup>测定叶绿素含量;采用愈创木酚法<sup>[14]</sup>测定 POD 活性;采用硫代巴比妥酸法<sup>[14]</sup>测定 MDA 含量。

### 1.4 玉米耐 Cd 性的综合评价

按照刘梦霜等<sup>[15]</sup>的方法,采用隶属函数法综合评价 4 个玉米品种的耐 Cd 性。

### 1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析,选用 Duncan 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉胁迫对玉米幼苗株高和根长的影响

由表 1 可知,与对照相比,镉胁迫处理下,4 个玉米品种的株高降低,根长缩短。豫单 9953 的株高在镉胁迫 3 d 时显著降低,在镉胁迫 12 d 时降低幅度更大,降幅为 29.9%;郑单 958 和京农科 728 在镉胁迫 6 d 时显著下降;正大 999 在镉胁迫 12 d 时才显著降低,降幅为 26.3%。正大 999 的根长在

镉胁迫 9 d 时显著短于对照的,为对照的 53.4%;其余品种的根长均在镉胁迫 6 d 时显著短于对照的,且随胁迫时间延长,差距越明显,在镉胁迫 12 d 时差距最大,京农科 728、郑单 958 和豫单 9953 的根长分别较对照短 46.4%、50.4%、42.3%。可见,镉胁迫对郑单 958 和豫单 9953 的株高和根长有较大影响;在胁迫前期,对正大 999 的影响较小。另外,根长的下降幅度大于株高的下降降幅,即镉胁迫对根长的影响比对株高的影响更大。

表 1 供试玉米的株高和根长

品种	处理	株高				根长			
		3 d	6 d	9 d	12 d	3 d	6 d	9 d	12 d
京农科 728	CK	18.47a	27.32a	31.45a	37.77a	17.10ab	24.78a	28.37a	35.72a
	T	18.12a	20.70bc	26.33bc	27.45bc	16.13abc	14.97d	17.65b	19.15c
郑单 958	CK	16.87ab	25.25a	31.95a	35.70a	15.48abc	21.58b	27.93a	28.37b
	T	17.37ab	21.17b	25.42bc	28.30b	13.80c	14.72d	15.27b	14.07d
正大 999	CK	14.87c	18.48c	27.40b	36.07a	16.55ab	19.97bc	28.58a	33.02a
	T	14.22c	18.55c	27.20b	26.57bc	18.05a	19.72bc	15.27b	18.45c
豫单 9953	CK	17.97a	27.45a	32.50a	36.47a	16.60ab	26.03a	28.92a	32.82a
	T	15.63bc	22.38b	23.98c	25.55c	14.58bc	17.52cd	17.17b	18.93c

同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

### 2.2 镉胁迫对玉米干质量和鲜质量的影响

由表 2、表 3 可知,与对照相比,在镉胁迫处理下,各个玉米品种的干质量和鲜质量总体上是下降的,但不同品种的变化趋势并不完全相同。郑单 958 在镉胁迫 6 d 时地上部鲜质量和地下部鲜质量下降幅度最大,分别降低 30.6%、32.4%;京农科 728、正大 999 和豫单 9953 在镉胁迫 12 d 时下降幅度最大,其地上部鲜质量分别下降 39.0%、33.8%、27.6%,地下部鲜质量分别下降 30.1%、21.9%、16.5%。4 个品种地上部干质量降幅最大的时期与鲜质量降

幅最大的时期一致。郑单 958 在镉胁迫 6 d 时地上部干质量为对照的 82.3%;京农科 728、正大 999 和豫单 9953 在镉胁迫 12 d 时地上部干质量分别是对照的 66.9%、79.7%、75.4%。郑单 958 和京农科 728 的地下部干质量在镉胁迫 6 d 时降幅最大,分别下降 14.8%、22.4%;正大 999 在 9 d 时下降幅度最大,豫单 9953 在 12 d 时下降幅度最大,分别下降 16.7%、25.8%。整个胁迫过程中,与对照相比,豫单 9953 的地上、地下部鲜质量的降幅较小,郑单 958 的地上、地下部干质量降幅最小,说明镉胁迫会影响玉米幼苗的干物质积累和对水分的吸收。

表 2 供试玉米的鲜质量

品种	处理	单株地上部鲜质量				单株地下部鲜质量			
		3 d	6 d	9 d	12 d	3 d	6 d	9 d	12 d
京农科 728	CK	0.74a	1.00ab	0.97bc	1.59a	0.40a	0.50bc	0.51bc	0.83ab
	T	0.60bc	0.69c	0.89c	0.97bc	0.30b	0.46bc	0.53bc	0.58cd
郑单 958	CK	0.64ab	1.11a	1.34a	1.61a	0.40a	0.74a	0.85a	0.92a
	T	0.65ab	0.77c	1.12b	1.18b	0.47a	0.50bc	0.66b	0.65bcd
正大 999	CK	0.52c	0.65c	0.96bc	1.42a	0.27bc	0.49bc	0.51bc	0.64bcd
	T	0.42d	0.65c	0.90c	0.94c	0.21c	0.42c	0.41c	0.50d
豫单 9953	CK	0.61bc	0.97b	1.11b	1.45a	0.28bc	0.52b	0.53bc	0.79abc
	T	0.60bc	0.90b	0.90c	1.05bc	0.25bc	0.51bc	0.45c	0.66bcd

同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

表3 供试玉米的干质量

品种	处理	单株地上部干质量				单株地下部干质量			
		3 d	6 d	9 d	12 d	3 d	6 d	9 d	12 d
京农科 728	CK	0.075a	0.107a	0.112b	0.160a	0.052abc	0.067bc	0.065def	0.077b
	T	0.068abc	0.075de	0.103b	0.107d	0.045cde	0.052de	0.057f	0.068b
郑单 958	CK	0.073ab	0.113a	0.135a	0.150ab	0.057ab	0.088a	0.093a	0.098a
	T	0.080a	0.093b	0.132a	0.132c	0.058a	0.075b	0.092ab	0.098a
正大 999	CK	0.060cd	0.070e	0.107b	0.138bc	0.040de	0.052de	0.072cd	0.078b
	T	0.050d	0.078cde	0.108b	0.110d	0.038e	0.047e	0.060ef	0.067b
豫单 9953	CK	0.062bcd	0.092bc	0.108b	0.130c	0.048bcd	0.073b	0.082bc	0.097a
	T	0.058cd	0.087bcd	0.097b	0.098d	0.045cde	0.060cd	0.070de	0.072b

同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.3 镉胁迫对玉米叶绿素含量的影响

由表4可知,与对照相比,在镉胁迫处理下,各个玉米品种的叶绿素含量整体上下降。在镉胁迫3 d时,4个品种的叶绿素含量与对照相比均无显著差异。郑单958的叶绿素含量在镉胁迫6 d时降幅最大,下降32.1%;豫单9953、正大999和京农科728的叶绿素含量在镉胁迫12 d时降幅最大,分别下降26.4%、38.3%、33.7%。整体而言,在镉胁迫下,正大999的叶绿素含量的降幅较大,而豫单9953的降幅较小。

表4 供试玉米的叶绿素含量

品种	处理	叶绿素含量/(mg g <sup>-1</sup> )			
		3 d	6 d	9 d	12 d
郑单 958	CK	1.44b	1.68ab	1.49ab	1.54a
	T	1.42b	1.14c	1.21bc	1.18bc
豫单 9953	CK	1.79ab	1.68ab	1.52a	1.48ab
	T	1.56ab	1.4bc	1.22abc	1.09c
正大 999	CK	1.85a	1.84a	1.40ab	1.49ab
	T	1.52ab	1.39bc	1.33abc	0.92c
京农科 728	CK	1.64ab	1.51ab	1.49ab	1.78a
	T	1.64ab	1.37bc	1.08c	1.18bc

同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.4 镉胁迫对玉米 POD 活性的影响

由表5可知,在镉胁迫3 d时,郑单958和京农科728的叶片POD活性低于对照的;在镉胁迫6 d时,仅郑单958的叶片POD活性显著低于对照的,其他3个玉米品种的叶片POD活性均显著高于对照的;在镉胁迫9、12 d时,4个玉米品种的叶片POD活性均显著高于对照的,其中,豫单9953的增幅最大,在镉胁迫9 d时,达到对照的4.29倍。

在镉胁迫3 d时,郑单958和正大999的根部POD活性均显著低于对照的,豫单9953和京农科728的则显著高于对照的;在镉胁迫6、9 d时,4个品种的根部POD活性均高于对照的,其中,京农科728的增幅最大,分别是对照的1.29倍、1.60倍;在镉胁迫12 d时,正大999和京农科728的根部POD活性低于对照的,但差异并不显著。总体上看,在镉胁迫下,豫单9953的叶片和根部POD活性以及京农科728的根部POD活性增加更为明显;镉胁迫对叶片POD活性的影响大于对根部POD活性的影响。

表5 供试玉米叶片和根部的POD活性

品种	处理	叶片 POD 活性				根部 POD 活性			
		3 d	6 d	9 d	12 d	3 d	6 d	9 d	12 d
郑单 958	CK	84.42c	79.17a	82.83d	87.75c	271.50a	159.67b	156.42e	261.75a
	T	84.25c	59.33c	126.25c	115.92b	253.67b	167.75b	163.25de	264.92a
豫单 9953	CK	91.33b	41.33d	44.09e	58.25d	229.00c	162.58b	192.67bc	142.33c
	T	127.67a	80.92a	188.92a	173.42a	252.50b	183.67b	210.58a	149.92c
正大 999	CK	63.92e	34.58d	94.75d	72.00cd	154.67d	171.25b	178.00cd	170.50bc
	T	71.33d	70.17b	133.58c	117.33b	120.08f	174.17b	197.17ab	158.58c
京农科 728	CK	61.67e	67.50b	81.75d	89.33c	116.75f	181.83b	131.58f	198.17b
	T	48.33f	78.25a	150.83b	132.33b	135.00e	235.17a	210.25a	197.33b

同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.5 镉胁迫对玉米丙二醛含量的影响

由表 6 可知, 在镉胁迫 3、6 d 时, 仅京农科 728 的叶片 MDA 含量低于对照的, 但差异并不显著; 在镉胁迫 9、12 d 时, 其叶片 MDA 含量显著高于对照的, 其中在镉胁迫 12 d 时增幅最大, 增加 55.3%; 在整个胁迫过程中, 郑单 958、豫单 9953、正大 999 的叶片 MDA 含量均显著高于对照的, 且在镉胁迫 9 d 时增幅最大, 分别增加了 114.6%、33.3%、110.4%。整体而言, 豫单 9953 和京农科 728 的 MDA 含量增幅较小。

在镉胁迫 3 d 时, 京农科 728 和正大 999 的根部 MDA 含量低于对照的, 分别为对照的 89.1%、90.2%; 在镉胁迫 6 d 时, 分别为对照的 88.3%、77.0%; 在镉胁迫 9、12 d 时, 其根部 MDA 含量高于对照的, 且在镉胁迫 12 d 时, 增幅最大, 分别增加 145.7%、61.3%。豫单 9953 的根部 MDA 含量在整个胁迫过程中均高于对照的, 在镉胁迫 9 d 时增幅最大, 增加 149.3%。郑单 958 的根部 MDA 含量在镉胁迫 3、6、9 d 时高于对照的, 在镉胁迫 12 d 时低于对照的, 为对照的 80.5%。

表 6 供试玉米叶片和根部的 MDA 含量

品种	处理	叶片 MDA 含量				根部 MDA 含量			
		3 d	6 d	9 d	12 d	3 d	6 d	9 d	12 d
郑单 958	CK	16.56b	8.13e	6.87f	9.06de	2.41e	4.26bc	1.70cd	4.40a
	T	20.63a	10.97d	14.74c	10.77c	3.65d	7.34a	2.12c	3.54ab
豫单 9953	CK	17.29b	13.60c	12.69d	8.63e	1.91e	3.78c	1.46d	1.63c
	T	19.58a	14.89bc	16.91a	10.39cd	2.34e	6.39a	3.64a	2.00c
正大 999	CK	13.94c	11.44d	7.40f	7.89e	7.68bc	6.35a	3.01b	2.25c
	T	17.01b	17.52a	15.57bc	15.01b	6.93c	4.89bc	4.02a	3.63ab
京农科 728	CK	17.00b	15.10b	10.77e	10.70c	9.37a	5.05b	2.06cd	1.38c
	T	16.68b	14.59bc	16.58ab	16.62a	8.35b	4.46bc	2.30c	3.39b

同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

### 2.6 不同品种玉米耐镉性综合评价

已有研究<sup>[16-17]</sup>表明, 玉米多个性状的耐镉指数间存在显著或极显著相关, 可以先通过主成分分析把多个性状转换成综合指标, 再利用隶属函数法综合评价各个品种的耐镉性。本研究中, 各个品种的耐镉指数如表 7 所示。通过主成分分析, 从 11 个单项指标中提取了 3 个主成分, 其贡献率分别为 55.36%、28.00%、16.63%, 可以解释 Cd 胁迫下 11 个单项指标 99.99% 的变化。再根据贡献率计算出权重, 进而计算出隶属函数值, 得到耐镉性综合评价值( $D$  值)。 $D$  值越大, 说明该品种的耐 Cd 性越强。由表 8 可知, 豫单 9953、京农科 728、正大 999、郑单 958 的耐 Cd 性依次减弱。

表 7 镉胁迫下供试玉米的耐镉指数

指标	耐镉指数			
	郑单 958	豫单 9953	正大 999	京农科 728
株高	0.84	0.77	0.89	0.81
根长	0.62	0.65	0.73	0.64
地上部鲜质量	0.79	0.83	0.82	0.73
地下部鲜质量	0.78	0.88	0.80	0.83
地上部干质量	0.93	0.87	0.92	0.78
地下部干质量	0.96	0.82	0.88	0.85
总叶绿素含量	0.80	0.81	0.79	0.82
叶片 POD 活性	1.15	2.43	1.48	1.36
根部 POD 活性	1.00	1.10	0.96	1.24
叶片 MDA 含量	0.71	0.85	0.62	0.83
根部 MDA 含量	0.77	0.61	0.99	0.96

表 8 镉胁迫下供试玉米的综合指标值、隶属函数值、综合评价值及排序

品种	C1	C2	C3	M1	M2	M3	D 值	排序
郑单 958	-1.36	-0.75	-1.80	0.28	0.31	0.00	0.24	4
豫单 9953	2.24	2.07	-0.26	1.00	1.00	0.51	0.92	1
正大 999	-2.79	0.67	1.23	0.00	0.66	1.00	0.35	3
京农科 728	1.90	-1.99	0.82	0.93	0.00	0.86	0.66	2
权重				0.55	0.28	0.17		

C1、C2、C3 为综合指标值; M1、M2、M3 为综合指标的隶属函数值; D 为综合评价值。

### 3 结论与讨论

本研究结果表明,在镉胁迫下,供试玉米的株高、根长、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量、叶片叶绿素含量整体低于对照的,叶片和根部的 POD 活性以及 MDA 含量整体上高于对照的。这与前人<sup>[17-20]</sup>的研究结果基本一致。

玉米对镉胁迫的响应是由遗传特性和生长环境共同决定的,不同品种的玉米有着不同的遗传特性<sup>[10,16-17]</sup>。豫单 9953 的株高、地下部干质量受镉胁迫的影响明显大于京农科 728、正大 999 和郑单 958,根长、地上部干质量、总叶绿素含量受镉胁迫的影响处于中间水平,但其地上部鲜质量和地下部鲜质量在 4 个品种中受影响最小,说明豫单 9953 在面对胁迫时可以更好地维持对水分的吸收。VACULIN 等<sup>[21]</sup>、宇克莉等<sup>[22]</sup>和李陈贞等<sup>[20]</sup>研究表明,严重的镉胁迫会破坏叶绿体结构,影响光合色素的合成,扰乱植物生长。本研究结果显示,4 个玉米品种的叶绿素含量均低于对照的,其中正大 999 的叶绿素含量的降幅较大。在镉胁迫条件下,植物体内的活性氧(ROS)会不断积累,促使膜降解,从而导致丙二醛积累,而 POD 可以清除植物体过量的活性氧,减少植物损伤,对植物的正常生长具有重要作用<sup>[23]</sup>。本研究中,镉处理条件下,豫单 9953 的叶片 MDA 含量增加较少,但其叶片 POD 活性明显高于其他品种,且始终维持在一个较高的水平,说明在该胁迫条件下,豫单 9953 相比其他品种具有更好的耐镉性。

前人对植物耐镉性指标的筛选已有不少研究结果。顾丹丹等<sup>[24]</sup>认为,植株地上部干质量和叶片 SPAD 值的耐性指数可作为耐镉基因型筛选的指标;KOSOLSAKSAKUL 等<sup>[25]</sup>认为植株对镉的吸收和积累能力可以作为反映镉耐受性的指标。但是一直以来并没有统一的行业鉴定标准。本研究中,将玉米幼苗的株高、根长、地上部干质量、地下部干质量、地上部鲜质量、地下部鲜质量、总叶绿素含量、POD 活性、MDA 含量等 11 个单项指标转化为 3 个综合指标,通过隶属函数法得到豫单 9953、京农科 728、正大 999、郑单 958 的耐镉性依次减弱。推测在较低的镉胁迫浓度下,玉米品种豫单 9953 可作为耐镉性玉米培育优选品种。

### 参考文献:

- [1] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(1): 49-56.
- [2] GONG Y W, QU Y J, YANG S H, et al. Status of arsenic accumulation in agricultural soils across China(1985-2016)[J]. *Environmental Research*, 2020, 186: 109525.
- [3] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.
- [4] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报(2014年4月17日)[J]. 环境教育, 2014(6): 8-10.
- [5] 魏畅, 焦秋娟, 柳海涛, 等. 镉暴露条件下玉米生长及根系构型分级特征研究[J]. 草业学报, 2022, 31(3): 101-113.
- [6] 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.
- [7] SRIVASTAVA R K, RAJPOOT R, PANDEY P, et al. Cadmium alters mitochondrial membrane potential, inhibits electron transport chain activity and induces callose deposition in rice seedlings[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 37(1): 335-344.
- [8] 李洋, 于丽杰, 金晓霞. 植物重金属胁迫耐受机制[J]. 中国生物工程杂志, 2015, 35(9): 94-104.
- [9] SUN G Y, MENG Y, WANG Y, et al. Exogenous hemin optimized maize leaf photosynthesis, root development, grain filling, and resource utilization on alleviating cadmium stress under field condition[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(1): 631-646.
- [10] 樊玉, 庄重, 赵丽洁, 等. 不同玉米品种苗期对镉及营养元素的吸收转运特性[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 744-753.
- [11] 汪洪, 赵士诚, 夏文建, 等. 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 36-42.
- [12] 周蛟, 潘远智, 赵胤, 等. 黄果龙葵幼苗对镉胁迫的生理生长响应[J]. 广西植物, 2022, 42(4): 628-638.
- [13] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [14] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [15] 刘梦霜, 郭海峰, 陈观秀, 等. 不同水稻品种对 NaCl 胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 热带作物学报, 2023, 44(2): 326-336.
- [16] 徐天成, 宿惠渊, 黄允, 等. 不同甜玉米品种苗期耐镉胁迫响应分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(1): 276-284.
- [17] 姜昊梁, 黄允, 梁绍芳, 等. 镉胁迫对不同甜玉米自交系幼苗生长的影响及其相关简单重复序列分子标记

- 初筛[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(8): 1582–1590.
- [18] 王金香, 张阿良, 秦敏, 等. 镉胁迫对玉米幼苗光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 天津农业科学, 2023, 29(1): 1–6.
- [19] 宇克莉, 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.
- [20] 李陈贞, 孙亚莉, 刘红梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种幼苗生长及光合性能的差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 147–152.
- [21] VACULÍK M, PAVLOVIČ A, LUX A. Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 120: 66–73.
- [22] 宇克莉, 孟庆敏, 邹金华. 镉对玉米幼苗生长、叶绿素含量及细胞超微结构的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 118–123.
- [23] 岳莉然, 刘曙光, 刘颖婕, 等. 干旱和镉胁迫对过表达 *cgr-MIR398a* 拟南芥生理的影响[J/OL]. 分子植物育种: 1–8 [2022–07–22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220722.0924.004.html>.
- [24] 顾丹丹, 姜维民, 王卓仁, 等. 玉米苗期耐镉胁迫的基因型差异[J]. 西北农业学报, 2014, 23(10): 76–81.
- [25] KOSOLSAKSAKUL P, FARMER J G, OLIVER I W, et al. Geochemical associations and availability of cadmium(Cd) in a paddy field system, northwestern Thailand[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 187: 153–161.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正

(上接第 508 页)

- [14] 潘清洁, 赵福胜, 罗洪发, 等. 5 个新选水稻三系不育系主要农艺性状配合力分析[J]. 南方农业学报, 2020, 51(1): 36–41.
- [15] 陈能刚, 鄢小青, 陈锋, 等. 贵州水稻三系不育系品资 5 A 的主要农艺性状配合力分析和食味评价[J]. 种子, 2021, 40(5): 139–142.
- [16] 姚姝, 陈涛, 张亚东, 等. 分子标记辅助选择改良宁恢 8 号的条纹叶枯病抗性[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(1): 85–91.
- [17] 金素娟, 柳武革, 朱小源, 等. 利用分子标记辅助选择改良温敏核不育系 GD-8S 的稻瘟病抗性[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 599–604.
- [18] 谢艳平, 何泽威, 贺继奎, 等. 分子标记辅助选育高饲用价值低硫甘油菜新品种[J]. 分子植物育种, 2022, 20(21): 7132–7142.
- [19] 马作斌, 全东兴, 时羽, 等. 分子标记辅助选育聚合抗稻瘟病基因 *Pi5* 及 *Pita* 的水稻新品系[J]. 分子植物育种, 2021, 19(1): 173–179.
- [20] 赵国超, 王冬翼, 张珍, 等. 分子标记辅助选育含有抗稻瘟病基因和软米基因两系不育系水稻新品系[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(5): 591–596.
- [21] 王石光, 陆展华, 刘维, 等. 应用 CRISPR/Cas9 技术与分子标记辅助选择创制广东丝苗米新种质[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 29–36.
- [22] 李晓雪, 鄢卫东, 彭田伟, 等. 利用分子标记辅助选择技术聚合多基因改良两系不育系创 5S 的褐飞虱抗性[J]. 杂交水稻, 2021, 36(6): 84–88.
- [23] 降好宇, 曾盖, 郝明, 等. 广谱抗稻瘟病种质 75-1-127 的褐飞虱抗性基因鉴定及分子标记辅助选择育种[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 227–234.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正