

# 镉、盐胁迫对不同谷子品种萌发的影响

严加坤, 刘 莉, 周 奇

(榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000)

**摘 要:**用不同浓度的氯化镉( $\text{CdCl}_2$ )溶液和盐( $\text{NaCl}$ )溶液对不同年代谷子品种(豫谷1号(1980s)、豫谷18号(2000s)、豫谷31号(2010s))进行处理,其目的在于通过测定萌发期的生长指标和生理生化指标差异探究重金属镉及盐对不同年代谷子品种的出芽及早期生理生化指标的影响,旨在探讨随品种更替谷子对盐和重金属胁迫的适应性演化趋势,为本区谷子优质高抗育种提供理论基础。研究表明:镉胁迫对谷子萌发期的胚根抑制作用大于胚芽,3种谷子的脯氨酸(Pro)含量呈现先升后降的趋势,在 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉浓度时3种谷子均达到最大值,豫谷31号增长的最多,增长了 $726.6916 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。氧自由基含量的活性呈现上升趋势,在镉浓度为 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,达到最大值,豫谷31号增长的最多,增长了 $5.8824 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 。丙二醛(MDA)的含量呈先下降后上升的变化,豫谷31号下降的幅度最大,下降了 $1.0153 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 。通过比较各品种的增长幅度可以得出:随着品种改良,抗性逐渐增强。盐胁迫下的生理生化性质跟镉的类似。综上所述,不同年代谷子品种随着年代的推进抗逆性逐渐增强。谷子在品种更替过程中,在不同浓度的镉处理下,各品种间均达到显著水平,表明豫谷31号综合抗逆性最强。因此,新品种选育要按照性状互补原则培育成优良新品种。

**关键词:**镉胁迫;盐胁迫;谷子;品种更替;萌发

## 1 引言

谷子(*Setaria italica*)是禾本科狗尾草属大型谷物,是世界上栽培历史最悠久的日常食用的作物之一<sup>[1]</sup>。榆林市作为陕西谷子的主要盛产区,是特色杂粮之一,去壳即为小米,米脂县因盛产优质小米而得名。谷子是世界上被驯化的最古老作物之一,栽培历史悠久,并有众多证据证明我国是谷子的起源中心和遗传多样性中心<sup>[2]</sup>。在未来几年,谷子的可持续发展以及遗传选育的观念越来越被人们关注。

自然界中很多环境因子如盐、重金属、干旱等都会影响植物的正常生长发育,其中盐和重金属是影响最普遍的2种胁迫因子<sup>[3]</sup>。随着我国农业化学品的大量应用,农田土壤重金属污染日益严重,重金属由于其生物降解性和持久性受到广泛的关注。其中,镉(Cd)元素具有高移动性和高毒性,被认为是危害公众健康主要物质之一<sup>[4]</sup>。镉是植物的非必需元素,它的生物毒性极强,毒害贯穿于动物、植物、微生物的整个生命史和其生命现象的各个过程,通过植物的吸收在植物的根、茎、叶、籽实中累积<sup>[5]</sup>。目前,对谷子体内镉的分

布规律、存在形态及毒害机理等方面的研究较多,而镉的危害首先发生在谷子种子萌发期和幼苗期。众多的研究发现:在镉的毒害下,可诱导自由基产生,使谷子的保护酶活性降低,水稻幼苗叶片膜脂过氧化产物含量增加,从而抑制水稻幼苗生长发育<sup>[11]</sup>。当谷子幼苗镉浓度富集过高时,谷子就会出现中毒症状,比如叶片生长迟缓、叶片变卷曲变黄、产量下降等症状,严重时甚至会导致谷子苗死亡。研究表明,用镉处理不同年代谷子种子,谷子品种的芽长、根长、发芽势、发芽率均低于对照组,高浓度抑制时,均表现为根长的降低大于芽长的降低<sup>[6]</sup>。

同时由于本区盐碱化严重,盐害又称为影响作物生长的另一个环境因子。研究表明,盐分可延迟水稻种子的萌芽和出苗<sup>[7]</sup>。水稻种子在萌发阶段受到盐碱胁迫,常会导致种子发芽不齐,发芽势和发芽率下降<sup>[8]</sup>。盐分对水稻萌发期的影响主要是限制种子的生理吸水,影响谷子的萌发生长,造成出苗不全<sup>[9]</sup>。Herralde等的研究表明:即使在植物中去除氯化钠,盐胁迫对植物的毒性也不会消失<sup>[10]</sup>。

以往许多学者对镉胁迫和盐胁迫的谷子积累

收稿日期:2018-09-11 修回日期:2018-10-09

基金项目:榆林学院高层次人才启动经费(17GK19,17GK18),国家自然科学基金(3175100011)。

第一作者简介:严加坤(1988-),男,山东临沂人,博士,讲师,研究方向植物生理生态学。

规律及其对其生长发育的影响等做了许多研究,取得了可喜的成果,然而有关镉胁迫对不同年代谷子品种的种子萌发的影响研究较少<sup>[11]</sup>,同时谷子地方品种具有丰富的遗传变异,目前对谷子耐盐性的相关研究也很少<sup>[12]</sup>。鉴于此,本课题以不同年代谷子品种为材料,研究重金属镉及盐对不同年代谷子品种的出芽及早期生理指标的影响,并对其机理进行了初步探讨,为本区谷子优质高抗育种提供理论依据,此内容尚未见报道。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

实验的谷子品种为豫谷 1 号、豫谷 18 号、豫谷 31 号,安阳市农科所提供。

### 2.2 实验试剂

磷酸缓冲液(PBS)、氯化镉、氯化钠、次氯酸钠溶液、三氯乙酸(TCA)、硫代巴比妥酸(TBA)、石英砂、GaCO<sub>3</sub>、3%磺基水杨酸、2.5%茚三酮显色液、冰乙酸、50 μg · mL<sup>-1</sup>脯氨酸标准液、17 mmol · L<sup>-1</sup>对氨基苯磺酸、7 mmol · L<sup>-1</sup>α-萘胺、10 mmol · L<sup>-1</sup>盐酸羟胺、亚硝酸钠标准、磷酸等,所有试剂均为分析纯(AR)。

### 2.3 谷子种子的实验方法

(1)选种:精心挑选颗粒饱满且形态大致均匀的不同年代谷子种子若干粒,先用自来水冲洗数次,洗去包衣。

(2)消毒:用 1%的次氯酸钠进行消毒处理 20 min,

(3)洗涤:用蒸馏水冲洗已消毒的种子若干次。

(4)沥干:使用漏斗沥干。

(5)置床:取 30 粒种子放入铺有 2 层滤纸贴上标签的培养皿(φ=8.0 cm)中,在培养皿中分别加入 3 mL 的相应的氯化镉溶液和盐溶液,相同浓度均设 3 组重复,然后置于智能光照培养箱中进行培养,控制温度为 25℃使其萌发。

(6)观察记录数据,加溶液。

### 2.4 种子测定的指标及方法

分别于处理后第 3 天和第 7 天调查发芽率和发芽势,从各处理中随机挑选 10 粒正常发芽的种子测量其根长和芽长并且进行各项生理生化指标的测定。

发芽率、发芽势参照刘锦川<sup>[15~16]</sup>的方法,Pro 采用磺基水杨酸法<sup>[20]</sup>测定,MDA 的测定采用硫代巴比妥酸法<sup>[18]</sup>,氧自由基含量测定参考裴帅帅的实验方法<sup>[19]</sup>。

$$\text{发芽率(GR)}(\%) = (n/N) \times 100\%$$

$$\text{发芽势(GE)}(\%) = (n/N) \times 100\%$$

为消除各品种间的各种子发芽性状差异,对各供试水稻品种的萌发期的各性状指标均采用相对值,即采用不同 CdCl<sub>2</sub>(NaCl)溶液胁迫浓度下的指标值/对照的指标值<sup>[17]</sup>。

### 2.5 数据处理方法

所有的数据都使用 3 次重复组实验结果计算的,采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 23.0 软件对数据进行分析与处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 CdCl<sub>2</sub> 对谷子种子萌发的影响

#### 3.1.1 CdCl<sub>2</sub> 对谷子芽长、根长的影响

表 1 不同浓度对不同年代谷子品种芽长的影响

CdCl <sub>2</sub> 浓度/ (μmol · L <sup>-1</sup> )	芽长±标准误		
	豫谷 1 号	豫谷 18 号	豫谷 31 号
0	4.030 0±	4.073 3±	34.803 3±
	0.289 3a	0.121 9a	0.133 4a
75	4.046 7±	3.893 3±	3.980 0±
	0.1140a	0.121 7 ab	0.236 4a
150	4.036 7±	3.873 3±	3.900 0±
	0.112 9a	0.096 9 ab	0.144 2a
300	3.403 3±	3.640 0±	3.603 3±
	0.190 9a	0.070 2b	0.105 2 ab
600	3.040 0±	3.246 7±	3.133 3±
	0.235 9a	0.096 1c	0.175 7b
1 200	1.953 3±	1.570 0±	2.006 7±
	0.512 7b	0.060 8c	0.118 9c

注:同一列相同字母代表没有显著性差异,反之具有显著性差异,P<0.05。下表同。

表 2 不同浓度对不同年代谷子品种根长的影响

CdCl <sub>2</sub> 浓度/ (μmol · L <sup>-1</sup> )	芽长±标准误		
	豫谷 1 号	豫谷 18 号	豫谷 31 号
0	3.130 0±	2.953 3±	2.790 0±
	0.336 5a	0.148 6a	0.188 2a
75	2.446 7±	2.783 3±	2.553 3±
	0.089 5 ab	0.170 3a	0.101 0 ab
150	2.463 3±	2.483 3±	2.356 7±
	0.159 3 ab	0.173 3a	0.123 3b
300	1.926 7±	2.043 3±	2.143 3±
	0.189 8 bc	0.052 3b	0.085 1 ab
600	1.900 0±	1.836 7±	2.070 0±
	0.231 6 bc	0.089 5b	0.040 4b
1 200	1.166 7±	1.020 0±	1.060 0±
	0.211 8c	0.111 3c	0.137 4c

从图 1 和图 2 可知,在 75 μmol · L<sup>-1</sup> 镉浓度

下,3个谷子品种的芽长略低于对照,豫谷1号谷子芽长比对照少了0.68 cm,豫谷18号芽长比CK少了0.17 cm,豫谷31号的芽比CK短0.24 cm,镉对谷子发芽具有抑制作用。

不同浓度 CdCl<sub>2</sub> 溶液对不同年代的谷子发芽率和发芽势的影响如图1、图2所示。除豫谷18号1200 μmol·L<sup>-1</sup>镉浓度处理下发芽率明显下降以外,其他镉浓度处理的3种谷子的发芽率和发芽势受镉浓度的影响不显著。这说明 CdCl<sub>2</sub> 能在一定程度上抑制谷子种子的正常萌发, CdCl<sub>2</sub> 胁迫处理的发芽率和发芽势能较好的反映谷子萌发期的抗逆性。

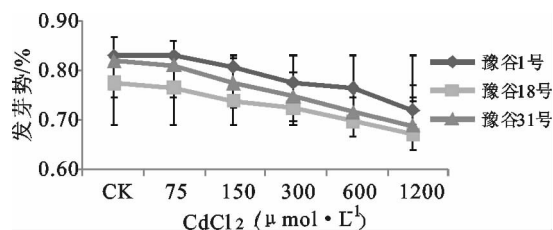


图1 不同浓度 CdCl<sub>2</sub> 处理对不同年代谷子种子发芽势的影响

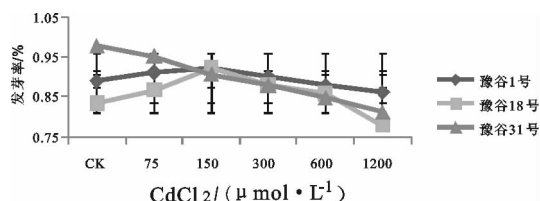


图2 不同浓度 CdCl<sub>2</sub> 处理对不同年代谷子种子发芽率的影响

### 3.1.2 CdCl<sub>2</sub> 对谷子丙二醛(MDA)含量的影响

表3 CdCl<sub>2</sub> 对谷子丙二醛(MDA)含量的影响

CdCl <sub>2</sub> 浓度 /(μmol·L <sup>-1</sup> )	MDA/(μmol·L <sup>-1</sup> FW)±标准误		
	豫谷1号	豫谷18号	豫谷31号
0	1.432 3± 0.007 1d	1.460 7± 0.025 9e	1.706 1± 0.016 5d
75	0.600 1± 0.032 4e	0.762 6± 0.026 7f	0.690 8± 0.006 5f
150	1.464 8± 0.003 9d	1.537 4± 0.012 0d	1.631 3± 0.032 9e
300	3.284 2± 0.011 2b	3.107 7± 0.004 5b	3.052 9± 0.015 5b
600	3.624 9± 0.033 4c	3.989 2± 0.005 8c	3.147 7± 0.001 3c
1200	4.091 3± 0.038 5a	4.120 7± 0.025 8a	4.455 9± 0.019 4a

MDA 是衡量氧化胁迫程度的常用指标之

一,能反映植物体细胞膜过氧化的程度,是植物抗性生理研究中的重要指标。由图3可得,在不同浓度镉溶液处理后3种不同年代谷子的MDA含量均呈现出先下降后上升的变化趋势,且在750 μmol·L<sup>-1</sup>的浓度时达到最低时,3种谷子品种基本均有显著性差异( $p < 0.05$ ),当浓度为150 μmol·L<sup>-1</sup>时,豫谷1号的MDA含量为1.4648 μmol·L<sup>-1</sup>,与CK无显著性差异( $p > 0.05$ ),75 μmol·L<sup>-1</sup>能有效抑制MDA的产生,增强植物体的抗性。当镉浓度上升到1200 μmol·L<sup>-1</sup>时,谷子种子MDA含量则达到最高,植物生长被严重抑制。

通过图3可以看出,用不同浓度的CdCl<sub>2</sub>处理过的谷子品种均对游离脯氨酸(Pro)含量有一定的影响,在CdCl<sub>2</sub>溶液浓度为300 μmol·L<sup>-1</sup>时,3种谷子的游离脯氨酸(Pro)含量均达到最高值,随着品种的更替,其中豫谷31号的脯氨酸含量最高,是905.8048 μg·g<sup>-1</sup>。脯氨酸含量的相对大小与抗逆性的强弱没有关系。

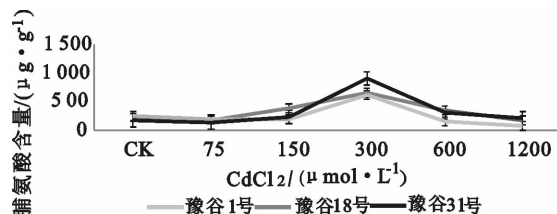


图3 CdCl<sub>2</sub> 对不同年代谷子脯氨酸含量的影响

### 3.1.3 CdCl<sub>2</sub> 对氧自由基含量的影响

由表4可以看出,CdCl<sub>2</sub>胁迫处理组的氧自由基含量都要比CK的要高,说明CdCl<sub>2</sub>胁迫能够促使谷子

表4 CdCl<sub>2</sub> 对不同年代谷子自由基含量的影响

CdCl <sub>2</sub> 浓度 /(μmol·L <sup>-1</sup> )	氧自由基/(μg·g <sup>-1</sup> ·FW)±标准误		
	豫谷1号	豫谷18号	豫谷31号
0	7.011 0± 0.003 7b	4.977 9± 0.007 3c	5.334 5± 0.009 7b
75	8.025 7± 0.007 3e	6.125 0± 0.003 7d	5.602 9± 0.006 4b
150	8.411 8± 0.006 4c	8.507 3± 0.007 3f	7.551 4± 0.946 7a
300	9.731 6± 0.016 8f	9.202 2± 0.022 1b	8.525 7± 0.440 7a
600	10.3493± 0.029 2a	9.702 2± 0.031 4e	10.496 3± 0.019 1a
1200	11.187 5± 0.079 1d	10.786 8± 0.000 0a	11.216 9± 0.003 7b

产生氧自由基。随着 CdCl<sub>2</sub> 浓度的增加, CdCl<sub>2</sub> 胁迫程度加剧, 氧自由基含量呈现上升趋势, 但是上升程度不明显, 这是因为植物体内有自己的一套清除系统。当谷子受到胁迫时, 体内会产生 POD, POD 的主要作用就是分解氧自由基, 而在 CdCl<sub>2</sub> 胁迫下, 氧自由基增加, 同时 POD 也会增加, 但是氧自由基在 CdCl<sub>2</sub> 胁迫下的分解能力较强, 因此谷子的氧自由基呈现上升波动。

### 3.2 NaCl 对谷子种子的影响

#### 3.2.1 NaCl 对不同年代谷子芽长和根长的影响

表 5 不同浓度 NaCl 胁迫下谷子的芽长

品种	NaCl 浓度/(mmol · L <sup>-1</sup> )			
	0	50	150	300
豫谷 1 号	4.030 0±0.289 3a	4.033 3±0.066 9a	1.393 3±0.149 0b	0
豫谷 18 号	4.073 3±0.122 0a	3.553 3±0.111 0b	1.329 9±0.115 3c	0
豫谷 31 号	3.803 3±0.133 4a	3.553 3±0.069 6a	1.510 0±0.0216 3b	0

表 6 不同浓度 NaCl 胁迫下谷子的根长

品种	NaCl 浓度/(mmol · L <sup>-1</sup> )			
	0	50	150	300
豫谷 1 号	3.130 0±0.336 5a	2.759 9±0.280 0a	1.243 3±0.081 7b	0
豫谷 18 号	2.953 3±0.148 6a	2.746 6±0.293 8a	1.080 0±0.105 0b	0
豫谷 31 号	2.790 0±0.188 2a	2.353 3±0.052 4b	1.190 0±0.050 4c	0

3.2.2 NaCl 对丙二醛(MDA)含量的影响 由表 7 可得, 经过不同浓度的 NaCl 处理后的 3 种不同年代的谷子, 其丙二醛含量均呈现先降低然后升高的趋势。NaCl 浓度为 50 mmol · L<sup>-1</sup> 时, 3 种谷子的丙二醛含量低于 CK, 达到显著性水平, 对谷子生长有利; 而高浓度 NaCl 溶液处理谷子后丙二醛含量上升幅度较为明显。

表 7 NaCl 胁迫对丙二醛(MDA)含量的影响

CdCl <sub>2</sub> 浓度 /(μmol · L <sup>-1</sup> )	MDA/(μmol · L <sup>-1</sup> · FW) ± 标准误		
	豫谷 1 号	豫谷 18 号	豫谷 31 号
0	0.822 9±	0.923 8±	0.771 3±
	0.005 4b	0.0032 7b	0.000 4b
50	0.627 2±	0.560 8±	0.517 3±
	0.002 1c	0.000 3c	0.000 1c
150	1.025 6±	1.319 7±	0.995 8±
	0.000 8a	0.000 9a	0.000 2a

3.2.3 NaCl 对脯氨酸(Pro)含量的影响 通过图 4 可以看出, 3 种谷子被不同浓度的 NaCl 溶液处理后, 其游离脯氨酸(Pro)含量均高于 CK。

在 NaCl 溶液为 50 mmol · L<sup>-1</sup> 时, 对豫谷 1 号胚芽具有促进作用, 豫谷 18 和豫谷 31 号均呈现抑制状态。150 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫对 3 种谷子的芽长和根长表现出强烈的抑制作用, 而且对根长受到的抑制比芽长大。表 5 和表 6 中的数据表明谷子生长过程中胚根对 NaCl 胁迫的反应比胚芽敏感。研究结果表明: 豫谷 1 号生长的比较好。说明豫谷 1 号耐盐性较强。

NaCl 浓度为 50 mmol · L<sup>-1</sup> 时, 豫谷 31 号增加的幅度较大; 在 NaCl 溶液为 150 mmol · L<sup>-1</sup> 时, 3 种谷子的游离脯氨酸(Pro)含量达到最高。

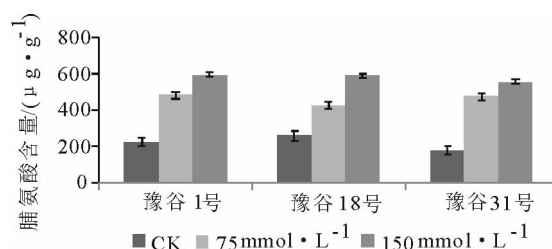


图 4 NaCl 胁迫下不同年代谷子脯氨酸的变化趋势

3.2.4 NaCl 对谷子氧自由基含量的影响 氧自由基含量随着 NaCl 浓度的增加而增加, 结果表明 NaCl 胁迫对 3 种谷子氧自由基含量影响差异显著。氧自由基能直接或间接地引起谷子衰变, 在这个过程中, 氧自由基可以对细胞组分产生作用, 也可以通过参与氧化分解产物或促进乙烯形成而起调节作用<sup>[21]</sup>。NaCl 胁迫浓度 50 mmol · L<sup>-1</sup> 时, 豫谷 31 号相对于 CK 影响比较小, 增长幅度不大; 高于该浓度时, 豫谷 18 号的影响最为显著, 增加了 197.6%。

表 8 NaCl 胁迫对谷子氧自由基含量的影响

CdCl <sub>2</sub> 浓度 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	MDA/( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{FW}$ ) $\pm$ 标准误		
	豫谷 1 号	豫谷 18 号	豫谷 31 号
0	85.011 0 $\pm$ 0.003 7c	5.977 9 $\pm$ 0.007 4c	58.334 50 $\pm$ 0.009 7c
50	9.3162 6 $\pm$ 0.009 7b	8.099 3 $\pm$ 0.016 0b	89.489 0 $\pm$ 0.067 5b
150	10.191 2 $\pm$ 0.020 5a	1 110.812 5 $\pm$ 1 0.022 9a	011.337 0 $\pm$ 0.318 7a

#### 4 讨论与结论

重金属镉和盐胁迫对谷子种子萌发有着抑制作用。实验中各指标均采用镉、盐胁迫环境的平均值进行研究,消除了品种间固有差异的影响,能更有效的评价不同年代谷子的抗逆性。

当加入不同浓度的镉溶液后,谷子种子的根长、芽长、发芽势、发芽率、丙二醛、氧自由基、脯氨酸等指标都受到镉胁迫的影响。由于谷子品种不同、年代不同受促进和抑制效果差压较大。高浓度镉对谷子抑制效果明显。不同的谷子品种对不同镉胁迫浓度的耐受力存在显著差异<sup>[13]</sup>。镉浓度大于  $600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,谷子生长受到抑制较为明显,谷子的抗逆性下降,且不同浓度梯度的镉对根的胁迫作用大于芽,如果胁迫强度过高,或胁迫时间延长,有可能植物会死亡<sup>[12]</sup>。

萌发期较强的耐盐性是盐渍化严重地区谷子品种必须优先具备的特性,相对芽长和相对根长值较大,是生产上保证苗全、苗壮的基础<sup>[14]</sup>。该实验研究结果表明:随 NaCl 浓度的升高种子的相对发芽率、相对盐害率均受到盐的明显影响,出现低促高抑现象,同时根对盐胁迫的反应比芽更敏感<sup>[11]</sup>。分析原因:植物生长必需元素的  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$ ,在低浓度下发挥作用,激活相关酶活性,促进种子萌发,但高浓度的盐处理会破坏细胞膜的完整性,选择膜渗透性减少或损失,细胞内代谢紊乱,增加溶液的渗透潜能,高盐浓度使种子吸力困难,从而抑制萌芽<sup>[12]</sup>。

由于作物的抗旱性是受多基因控制的复杂性状,是多个抗旱性状的综合反映,对任何单项机理的研究都有一定的局限性<sup>[22]</sup>。

#### 参 考 文 献:

[1] 贾小平,董普辉,张红晓,等.不同谷子品种(系)生长发育特性及抗倒性分析[J].河南农业科学,2015,44(08):27-31.  
[2] 张雪峰.中国谷子产业发展问题研究[D].哈尔滨:

东北农业大学,2013.  
[3] 韩会玲,张侠,尹海波,等.盐胁迫和镉胁迫下互花米草生理特性的变化[J].江苏农业科学,2013,41(02):361-363.  
[4] 王维.水稻 CdCl<sub>2</sub> 吸收的区域模型及其调控研究[D].南京:南京林业大学,2012.  
[5] 刘昭兵,纪雄辉,官迪,等.镉胁迫条件下淹水时间对水稻吸收累积镉的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(12):1 125-1 131.  
[6] 周青,黄晓华,张一.镉对种子萌发的影响[J].农业环境保护,2000(03):156-158.  
[7] 潘晓颺,谢留杰,陈剑,等.盐胁迫下杂交水稻种子发芽特性及耐盐性评价[J].中国农学通报,2014,30(21):75-79.  
[8] 徐晨,凌凤楼,徐克章,等.盐胁迫对不同水稻品种光合特性和生理生化特性的影响[J].中国水稻科学,2013,27(03):280-286.  
[9] 张永芳,宋喜娥,王润梅,等. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫对谷子种子萌发的影响[J].种子,2015,34(11):94-97.  
[10] 崔兴国,时丽冉.盐胁迫对不同品种谷子萌发及幼苗生长的影响[J].黑龙江农业科学,2011(06):14-16.  
[11] F. De Herralde, C. Biel, R. Savé, M. A. Morales, A. Torrecillas, J. J. Alarcón, M. J. Sánchez - Blanco. Effect of water and salt stresses on the growth, gas exchange and water relations in *Argyranthemum coronopifolium* plants [J]. Plant Science, 1998, 139(01):9-17.  
[12] 张雪峰.中国谷子产业发展问题研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.  
[13] 杨明,陈璐,徐庆国,等.镉胁迫对不同水稻品种种子萌发和幼苗生长的影响[J].作物研究,2017,31(06):659-663.  
[14] 田伯红,王素英,李雅静,等.谷子地方品种发芽期和苗期对盐胁迫的反应和耐盐品种筛选[J].作物学报,2008,34(12):2 218-2 222.  
[15] 刘向蕾.重金属对水稻生长发育影响的研究进展[J].现代化农业,2007(02):7-10.  
[16] 刘锦川,刘建设,赵慧,等.不同药剂浸种对糜子、谷子种子发芽特性的影响[J].种子,2017,36(01):33-35.  
[17] 王燕,牛瑞明,张婕,等.不同药剂浸种对干旱胁迫下谷子种子萌发特性的影响[J].种子,2014,33(07):43-46.  
[18] 庄华蓉.单盐和混合盐胁迫对沙冬青种子萌发的影响[J].节水灌溉,2015(02):15-20.  
[19] 裴帅帅.干旱胁迫对谷子生理特性的影响及赤霉素代谢关键酶基因表达分析[D].太原:山西农业大学,2014:12-15.  
[20] 岳彩鹏,黄进勇.植物生物学实验实习指导[M].郑州:郑州大学出版社,2009.  
[21] 王娇.水稻抗旱性相关性状的 QTL 定位分析[D].银川:宁夏大学,2015.