

镉胁迫下锌硒交互作用对水稻镉毒害的缓解机制

呼艳姣^{1, 2} 陈美凤¹ 强瑀¹ 李海燕¹ 刘静^{1, 2} 秦樊鑫^{1, 2}

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550025; 2. 贵州师范大学贵州省植物生理与发育调控重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 研究镉、锌、硒及不同组合复合添加对水稻种子萌发、植株生长发育和不同部位镉含量的影响, 揭示锌、硒、锌硒交互作用对水稻镉毒害的缓解机制。以水稻品种南粳 9108 为研究对象, 采用萌发试验和水培试验, 测定其萌发、生长、生理指标及不同部位镉含量。结果表明: 不同镉浓度水平胁迫下, 种子萌发表现为低促高抑, 添加锌后可以缓解镉对种子生理指标的抑制作用, 减少镉含量的积累, 添加硒则不能缓解种子生理指标的抑制作用, 且高硒会加重毒害使种子生理指标值降低, 锌硒联用可以促进种子萌发, 但不能促进幼根幼芽生长; 在 5 mg/L 镉胁迫下, 添加不同浓度硒、锌均能显著增加水稻幼苗的根长、株高、叶片相对含水量、SPAD 值, 缓解镉对水稻生长发育的毒害, 显著降低水稻根系镉含量; 但锌硒联用会使水稻株高、SPAD 值显著降低, 而对水稻根长、叶片相对含水量的影响不显著。可见, 镉胁迫下添加适宜浓度的锌、硒可以有效降低镉在水稻中的积累, 缓解镉对水稻生长发育的毒害作用。

关键词: 锌; 硒; 镉胁迫; 水稻

DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2021-1127

Alleviation Mechanisms of Zinc-selenium Interaction on the Cadmium Toxicity in Rice Under Cadmium Stress

HU Yan-jiao^{1, 2} CHEN Mei-feng¹ QIANG Yu¹ LI Hai-yan¹ LIU Jing^{1, 2} QIN Fan-xin^{1, 2}

(1. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025; 2. Guizhou Key Laboratory of Plant Physiology and Developmental Regulation, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

Abstract: This work aims to study cadmium Cd, zinc (Zn), selenium (Se) and various combinations of them on the germination of rice seeds, growth and development of plants, and the Cd contents in different parts, as well as to explore the alleviation mechanisms of Zn or Se or Zn-Se interaction on the toxicity of Cd in rice. Having rice variety Nanjing 9108 as study object, germination and hydroponic experiment were conducted to measure the germination, growth, physiological indexes and Cd content in different parts. The experimental results showed that seed germination was promoted at low concentration of Cd, while inhibited at high concentration. The inhibitory effects of Cd on the physiological indexes of rice seeds were alleviated after Zn added, and accumulation of Cd was reduced. Instead, the inhibitory effects of Cd on the physiological indexes of rice seeds were not alleviated after Se added, and high concentration of Se increased the toxicity of Cd on the seeds and led to the physiological indexes of seeds reduced. The synergistic application of Zn and Se promoted seed germination, but did not facilitate the growth of rice seedlings. Under 5 mg/L Cd stress, adding Zn or Se at different concentrations both significantly increased the lengths of roots, the heights of seedlings, relative water contents of leaves and the value of SPAD, alleviated the toxicity of Cd to rice growth and development, as well as significantly reduced Cd contents in the roots of rice. The heights of seedlings and SPAD decreased dramatically, and lengths of roots and relative water contents did not change observably after Zn and Se were added together. Therefore, appropriate concentration of Zn and Se may effectively decrease the Cd accumulation in rice, and reduce the toxicity of Cd to rice.

Key words: zinc; selenium; cadmium stress; rice

收稿日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目 (U1812401), 贵州师范大学资助博士科研项目 (GZNUD [2018] 22 号)

作者简介: 呼艳姣, 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物化学; E-mail: 362481828@qq.com

通讯作者: 秦樊鑫, 男, 博士, 教授, 研究方向: 生态环境污染控制与恢复; E-mail: qinfanxin@126.com

随着现代社会经济的高速发展,工业活动使大量的镉排放到环境中,造成环境镉污染严重^[1]。镉是一种具有较高生物毒性、迁移能力强的重金属^[2]。经研究发现,水稻对镉的富集作用极强,不仅会使水稻的产量降低,更严重的是会通过食物链进入人体从而对人体健康^[3-5]。近年来稻米镉含量超标现象时常发生,反映出镉污染形势的严峻^[6]。2020年“中央一号”文件提出推进农用地土壤污染管控和修复利用^[7],由此可见镉米问题的解决已刻不容缓。

目前,许多科研人员对水稻镉积累^[8-9]、吸收转化机制^[10],以及镉胁迫下水稻的生理生化变化^[11]做了相关研究。为进一步缓解水稻镉积累的毒害,有研究者添加其他元素来探讨对镉胁迫水稻的影响,例如采用硫^[12-13]、磷^[14]、铜^[15]、硅^[16]均可缓解水稻对镉的积累。张云慧等^[17]发现锌能控制根表铁膜的形成来影响水稻吸收镉。朱秀红等^[18]研究白花泡桐幼苗在锌、镉胁迫下的生理生化响应,结果表明加入锌会缓解镉对植株生长的抑制作用及镉造成的膜质过氧化伤害,锌镉表现为拮抗作用。Huang等^[19]发现施硒可减轻水稻中镉诱导的氧化胁迫;梁欢婷等^[20]、刘永贤等^[21]也发现通过叶面施硒均可有效降低稻米镉含量。可见,锌和硒可以缓解植物镉毒害,然而同时添加锌、硒对水稻镉毒害影响如何,目前研究尚未报道。本试验以南粳9108为研究对象,通过萌发试验和水培试验来探讨锌硒对镉胁迫下水稻种子萌发、幼苗生长及不同部位镉含量的影响,从而揭示锌、硒、锌硒交互作用对水稻镉毒害的缓解机制,为缓解水稻镉毒害提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻为南粳9108(苏审稻201306),属迟熟中粳水稻品种,由江苏省农业科学院粮食作物研究所采用武香粳14号与关东194杂交育成。

试剂:氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{H}_2\text{O}$)、亚硒酸钠($\text{Na}_2\text{O}_2\text{Se}$)、硫酸锌($\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$)、过氧化氢(H_2O_2)、硝酸(HNO_3)、霍格兰(Hoagland)营养液、无水乙醇($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)、氯化钠(NaCl)、醋酸(CH_3COOH)、

盐酸(HCl)。

1.2 方法

1.2.1 萌发试验 选取适量籽粒饱满、均匀的水稻种子,用30%过氧化氢浸泡15 min消毒,再用去离子水反复冲洗3次后铺放在培养皿上。按以下镉浓度进行处理:对照组CK(0 mg/L),Cd0.1(0.1 mg/L),Cd0.5(0.5 mg/L),Cd1(1.0 mg/L),Cd2(2.0 mg/L),Cd4(4.0 mg/L),Cd8(8.0 mg/L),Cd10(10.0 mg/L);另外不同浓度镉锌硒处理,镉浓度5.0 mg/L记Cd5,锌浓度5.0 mg/L、10.0 mg/L,记Zn5、Zn10,硒浓度1.0 mg/L、5.0 mg/L,记Se1、Se5。共设置8个处理组:CK, Cd5, Cd5+Zn5, Cd5+Zn10, Cd5+Se1, Cd5+Se5, Cd5+Zn5+Se1, Cd5+Zn10+Se5。以上每个处理3个重复,空白为去离子水处理,种子遮光催芽1 d后,放入光照培养箱中培养7 d,光照12 h, 28.0℃, 黑暗12 h, 25.0℃, 湿度90.0%。

1.2.2 水培试验 将水稻培养到四叶一心期时,移栽至一系列添加镉、锌、硒的营养液中。镉添加浓度为0、0.5 mg/L,记CK、Cd0.5;锌添加浓度为0、1.0 mg/L,记Zn0、Zn1;硒添加浓度为0、0.1 mg/L,记Se0、Se0.1。共7个处理:CK、Cd0.5、Zn1、Se0.5、Cd0.5+Zn1、Cd0.5+Se0.5、Cd0.5+Zn1+Se0.5。培养在2 L的聚苯乙烯泡沫箱中,每盆放置6株水稻,设置3个重复置于光照培养箱(光照12 h, 32.0℃, 黑暗12 h, 25.0℃, 湿度90.0%)。

1.2.3 测定项目与方法 发芽试验第3天统计发芽势,第7天统计发芽率、幼根长、幼芽长、根鲜重、芽鲜重。发芽势=(调查时间内(3 d)的种子发芽数/供试种子总数)×100%;发芽率=发芽种子数/供试种子总数;幼根长和幼芽长:取幼根和幼芽最长的5个种子,取平均值;发芽指数=不同天的种子发芽数/发芽天数;活力指数=发芽指数×幼芽长度或幼芽重量(取幼根长);幼苗的根鲜重与芽鲜重用天平称量,按每皿计算。将根和芽分别装入信封中,于烘箱中105℃杀青15 min,70℃烘干至恒重,记录根和芽的干重,研磨后称取样品于聚四氟乙烯消解罐中,加入9 mL硝酸和1 mL过氧化氢放置过夜,再用电热板进行消解,过滤定容后用ICP-MS测定镉元素的含量。测定过程中采用生物成分分析标准物

质 NCS 202006（665#）菠菜和空白样品进行全程质量控制。

水稻胁迫水培 30 d 后，用叶绿素仪（Konica Minolta Sensing, SPAD-502 Plus）测定叶绿素值。测量水稻株高、根长，分离地上部和地下部，测量鲜重。取 3–6 片完全展开叶，记录鲜重 m_1 ，将叶片放入试管中用自来水浸泡 2 h 后称重 m_2 ，置于 60℃干燥箱 10–15 h，称量干重 m_3 ，计算相对含水量。另部分鲜样分成根、茎、叶，样品同上述方法进行烘干、研磨、消解，测定镉含量。

1.2.4 数据处理与分析 用 Excel 2016 统计数据，SPSS 24.0 进行 LSD 显著性差异分析，Origin 2019 绘制图。

2 结果

2.1 锌硒对镉胁迫下水稻种子萌发的影响

2.1.1 不同浓度镉对水稻种子萌发的影响 由表 1 可知，随着镉浓度的升高，水稻种子的发芽势、发芽率、根鲜重、芽鲜重、幼根长、幼芽长、发芽指数、

活力指数均呈现出先升高后降低的趋势。低浓度镉处理对种子萌发的各项生理指标均产生不同程度的促进作用；高浓度镉处理则会产生不同程度的抑制作用。Cd1 处理下，对萌发各生理指标的促进作用最强，与对照相比，水稻种子的各项生理指标（按上述顺序）分别提高了 0.54%、15.25%、29.17%、46.88%、18.45%、6.64%、0.79%、19.05%。Cd10 处理时，与对照相比，种子各项生理指标分别降低了 63.74%、43.22%、50%、15.63%、60.84%、6.64%、60.58%、63.74%，且除幼芽长外，其他生理指标均和对照间差异显著。由此可见，低浓度镉促进萌发，高浓度镉抑制萌发。

2.1.2 锌硒对镉胁迫下水稻种子萌发的影响 由表 1 可知，与对照相比，Cd1 处理下水稻种子萌发的各项生理指标优势明显，Cd2 处理下水稻种子萌发各生理指标几乎与对照持平，差异均不显著，Cd4 处理下种子萌发各生理指标与对照相比显著降低。综合各生理指标考虑，选择镉浓度在（4–10）mg/L 内

表 1 不同浓度镉处理对水稻种子萌发及生长的影响

Table 1 Effects of different concentrations of cadmium on the germination and growth of rice seed								
处理 Treatment/ (mg · L ⁻¹)	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	根鲜重 Root fresh weight/ (g/ 皿)	芽鲜重 Shoot fresh weight / (g/ 皿)	根长 Root length/cm	芽长 Shoot length/cm	发芽指数 Germination index	活力指数 Vitality index
CK	60.67 ± 0.02a	78.67 ± 0.02b	0.24 ± 0.02cd	0.32 ± 0.03c	3.09 ± 0.21b	3.01 ± 0.18ab	59.87 ± 3.06a	169.90 ± 24.42a
Cd0.1	60.67 ± 0.03a	82.67 ± 0.03b	0.25 ± 0.01c	0.32 ± 0.01c	3.43 ± 0.25ab	2.98 ± 0.18ab	59.69 ± 3.08ab	175.63 ± 12.00a
Cd0.5	54.00 ± 0.02b	84.00 ± 0.02b	0.29 ± 0.01b	0.39 ± 0.01b	3.32 ± 0.12b	3.01 ± 0.13ab	56.56 ± 3.05ab	177.86 ± 29.51a
Cd1	61.00 ± 0.04a	90.67 ± 0.04a	0.31 ± 0.02a	0.47 ± 0.02a	3.66 ± 0.14a	3.21 ± 0.19a	60.34 ± 2.43ab	202.26 ± 22.37a
Cd2	58.67 ± 0.03ab	85.33 ± 0.05ab	0.21 ± 0.01d	0.31 ± 0.02c	2.26 ± 0.03c	3.01 ± 0.05ab	55.85 ± 0.82b	172.61 ± 4.19a
Cd4	52.67 ± 0.01b	66.00 ± 0.02c	0.17 ± 0.01e	0.29 ± 0.01cd	1.99 ± 0.10d	2.73 ± 0.16b	46.33 ± 0.67c	119.38 ± 3.60b
Cd8	42.00 ± 0.03c	60.00 ± 0.04d	0.16 ± 0.00e	0.28 ± 0.02d	1.54 ± 0.13e	2.66 ± 0.19b	37.55 ± 1.98d	91.43 ± 10.69b
Cd10	22.00 ± 0.02d	44.67 ± 0.03e	0.12 ± 0.01f	0.27 ± 0.02d	1.21 ± 0.07f	2.81 ± 0.13b	23.60 ± 1.03e	61.60 ± 3.55c

注：表中数据为平均值 ± 标准差，不同小写字母表示差异显著（P<0.05），下同
Note：The data in the table are mean ± standard deviation, and different lowercase letters indicate significant difference（P<0.05）, the same below

既可以产生镉毒害抑制种子萌发生长，又可以防止镉毒害过重致使种子失活，因此本试验选择镉浓度为 5 mg/L 来研究锌硒对镉胁迫下水稻种子萌发的适宜浓度。如表 2 所示，与对照相比，经该浓度的镉处理后水稻种子的各项生理指标显著降低，表明较高浓度的镉可以显著抑制水稻种子萌发生长，对水稻种子产生毒害作用；而且在镉胁迫下添加不同浓

度锌时，水稻种子的各项生理指标同样显著降低。与镉处理相比，水稻种子萌发的各项生长发育指标优势明显，且差异显著，表明添加锌可以缓解镉对水稻种子萌发生长的抑制作用；与镉处理相比，在镉胁迫下添加不同浓度硒时，除 Se1 处理幼根指标外，硒处理使种子各项生理指标显著降低，表明硒会加重镉对水稻种子萌发的抑制作用；在镉胁迫下

添加不同浓度锌硒组合时，在 Cd5+Se5+Zn10 处理下，与镉处理相比，种子发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数均显著升高，在 Cd5+Se1+Zn5 处理下，种子各项生理指标均明显降低，除幼根长差异不显著

外，其他生理指标均差异显著。试验结果表明在 5 mg/L 镉浓度下，同时添加 5 mg/L 硒和 10 mg/L 锌可有效促进种子萌发，但不能促进根和芽的生长；而同时添加 1 mg/L 硒和 5 mg/L 锌则不能有效缓解镉对

表 2 不同锌硒镉浓度对水稻种子萌发和生长的影响

Table 2 Effects of different concentrations of zinc, selenium and cadmium on the germination and growth of rice seed								
处理 Treatment (mg · L ⁻¹)	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	根鲜重 Root fresh weight/ (g/ 皿)	芽鲜重 Shoot fresh weight / (g/ 皿)	根长 Root length/cm	芽长 Shoot length/cm	发芽指数 Germination index	活力指数 Vitality index
CK	46.00 ± 0.02a	82.67 ± 3.06a	0.24 ± 0.03a	0.329 ± 0.05a	2.76 ± 0.04a	3.01 ± 0.18a	50.94 ± 1.02a	153.48 ± 9.47a
Cd5	11.33 ± 0.03d	47.33 ± 3.06d	0.14 ± 0.04d	0.29 ± 0.04b	0.48 ± 0.04e	2.75 ± 0.11b	17.13 ± 0.82e	47.08 ± 3.52e
Cd5+Zn5	31.33 ± 0.11c	74.00 ± 2.00b	0.20 ± 0.06c	0.25 ± 0.04c	1.32 ± 0.05c	3.12 ± 0.14a	38.91 ± 0.53c	121.41 ± 6.22c
Cd5+Zn10	39.33 ± 0.08b	82.67 ± 5.03a	0.23 ± 0.08b	0.33 ± 0.05a	1.61 ± 0.03b	3.12 ± 0.04a	44.85 ± 1.57b	139.96 ± 6.67b
Cd5+Se1	8.33 ± 0.05e	29.33 ± 1.15e	0.14 ± 0.05d	0.24 ± 0.04c	0.48 ± 0.03e	1.94 ± 0.02d	10.78 ± 1.36f	20.92 ± 2.67f
Cd5+Se5	6.00 ± 0.01e	24.67 ± 3.05e	0.01 ± 0.06g	0.11 ± 0.04e	0.45 ± 0.04f	1.80 ± 0.01d	7.39 ± 0.45g	13.30 ± 0.81f
Cd5+Se1+Zn5	6.67 ± 0.05e	15.33 ± 1.15f	0.07 ± 0.03f	0.12 ± 0.03e	0.46 ± 0.03ef	2.21 ± 0.06c	8.25 ± 0.81g	18.28 ± 2.20f
Cd5+Se5+Zn10	30.00 ± 0.09c	57.33 ± 2.31c	0.12 ± 0.11e	0.16 ± 0.05d	0.50 ± 0.03de	2.72 ± 0.12b	32.66 ± 0.42d	88.81 ± 2.82d

水稻种子萌发生长的抑制作用。

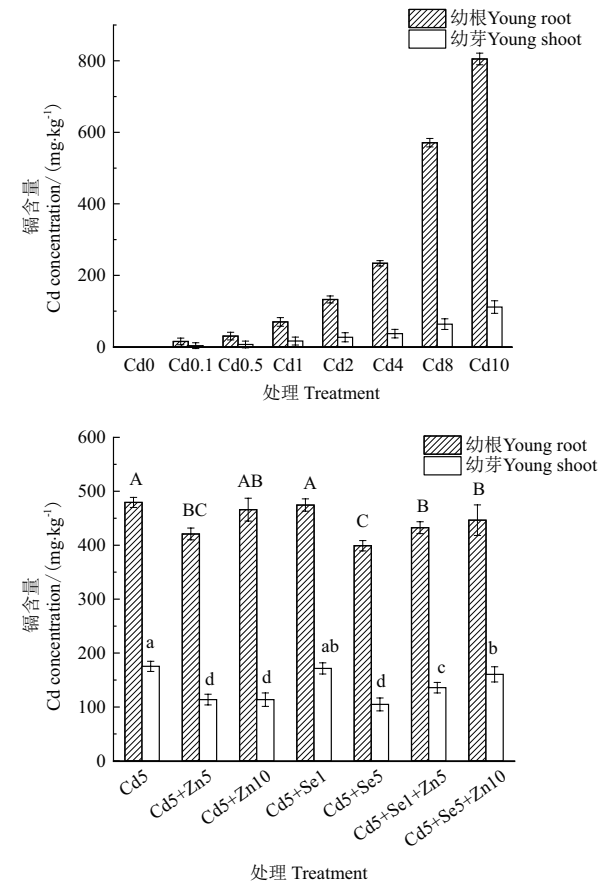
2.1.3 锌硒对水稻幼苗镉含量的影响 如图 1 所示，不同浓度镉对水稻幼根和幼芽镉积累呈显著性正相关 ($r_{\text{幼根}}=0.993$, $r_{\text{幼芽}}=0.973$, $P<0.05$)，表明在本试验条件下，随着镉处理浓度的增加，水稻幼根和幼芽镉含量也明显增加。当镉胁迫下分别添加不同浓度锌、硒及同时添加锌硒时，与镉处理相比，Zn5、Zn10 处理使水稻幼根镉含量分别降低 12.19%、2.79%，幼芽镉含量分别降低 35.14%、35.21%；Se1、Se5 处理使水稻幼根镉含量分别降低 1.01%、16.76%，幼芽镉含量分别降低 2.18%、40.26%；Cd5+Se1+Zn5、Cd5+Se5+Zn10 处理使水稻幼根镉含量分别降低 9.77%、6.87%，幼芽镉含量分别降低 22.54%、8.48%。结果表明，在镉胁迫下分别添加锌、硒和同时添加锌硒的情况下，均会降低水稻幼根和幼芽中的镉含量，除 Se1 处理外，其余浓度处理差异均极显著，幼芽镉含量的降幅均显著高于幼根镉含量的降幅；与分别添加锌、硒相比，同时添加不同浓度锌硒会有效降低 Se1 处理下镉含量，而且提高 Zn10 处理下镉含量，并且可抑制锌对水稻幼根和幼芽的缓解作用。

2.2 锌硒对水稻生长发育的影响

由表 3 可知，与对照相比，单一元素处理时，

Cd0.5、Se0.5 处理分别使水稻根长降低了 15.38%、2.20%，Zn1 处理使水稻根长显著提高了 25.27%；与 Cd0.5 处理相比，Cd0.5+Zn1、Cd0.5+Se0.5、Cd0.5+Zn1+Se0.5 处理分别使水稻根长提高了 38.96%、23.38%、7.14%，表明单一元素处理时，锌可使水稻根长显著增加，硒对水稻根长无显著影响，镉导致水稻根长显著降低；与镉处理相比，镉胁迫下分别添加锌、硒和同时添加锌硒均使水稻根长增加，分别添加锌、硒的效果显著，同时添加锌硒的效果不显著。与对照相比，单一元素处理时，Cd0.5、Se0.5、Zn1 处理分别使水稻株高降低了 36.60%、18.29%、1.43%；与 Cd0.5 处理相比，Cd0.5+Zn1、Cd0.5+ Se0.5 处理分别使株高显著增加了 11.41%、21.52%，Cd0.5+Zn1+Se0.5 处理使株高显著降低了 22.59%。表明单一元素处理时，镉、锌均使水稻株高显著降低，锌效果不显著；与镉处理相比，在镉胁迫下分别添加锌、硒均使株高显著增加，但同时添加锌硒会显著降低株高。

与对照相比，单一元素处理时，Cd0.5、Se0.5、Zn1 处理使叶片相对含水量分别降低了 16.08%、7.72%、0.46%，SPAD 值分别降低了 33.29%、7.50%，但 Zn1 处理使 SPAD 值提高了 2.95%。结果表明单一元素处理时，锌对水稻相对含水量和 SPAD



图中误差线表示标准偏差。不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$), 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同
The error line in the figure refers to the standard deviation. Different uppercase letters show significant differences ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$), the same below

图 1 不同处理对水稻种子幼根幼芽镉含量的影响
Fig.1 Effects of different treatments on the cadmium content in the young roots and shoots of rice seed

值无显著影响, 镉、硒均导致水稻相对含水量和 SPAD 值降低, 其中水稻相对含水量和 SPAD 值受

镉毒害影响较大; 与 Cd0.5 处理相比, Cd0.5+Zn1、Cd0.5+Se0.5 处理后叶片相对含水量分别显著提高了 8.98%、17.05%, Cd0.5+Zn1+Se0.5 处理后叶片相对含水量降低了 1.64%; Cd0.5+Zn1、Cd0.5+Se0.5 处理后 SPAD 值分别显著提高了 29.23%、11.35%, Cd0.5+Zn1+Se0.5 处理后 SPAD 值显著降低了 16.32%。结果表明在镉胁迫下添加锌、硒均可显著提高叶片相对含水量和 SPAD 值, 但同时添加锌硒会显著降低 SPAD 值。

2.3 锌硒对水稻镉累积的影响

水稻各器官中镉含量的分布特征为: 根 > 茎 > 叶, 由此可见, 根部是吸收积累镉的主要部位。不同处理对水稻根、茎、叶各部位镉含量的影响如图 2 所示, 与 Cd0.5 处理相比, Cd0.5+Zn1、Cd0.5+Se0.5、Cd0.5+Zn1+Se0.5 处理均可导致水稻各部位镉含量降低, 经各上述顺序处理后根系镉含量分别显著降低了 10.63%、12.60%、27.18%, 茎中镉含量分别降低了 9.58%、58.45%、47.97%, 叶中镉含量分别显著降低了 27.41%、63.82%、44.46%。结果表明, 在镉胁迫下分别添加锌、硒和同时添加锌硒均显著降低镉在根、茎、叶中的累积, 其中, 同时添加锌硒对降低水稻根系镉含量效果较好。由表 4 可知, Cd0.5+Se0.5、Cd0.5+Zn1+Se0.5 处理均显著降低镉由根系向茎的转运系数和根系向叶片的转运系数, 而 Cd0.5+Zn1 处理对镉转运系数的影响不明显。

3 讨论

3.1 锌硒对镉胁迫水稻种子萌发及镉积累的影响
本试验结果表明, 低浓度镉可促进水稻种子萌发, 高浓度镉则起抑制作用。其中, 高浓度镉对水稻种子的根长和根鲜重抑制效果显著, 而对幼芽长

表 3 不同锌硒镉浓度对水稻生长和生理指标的影响				
Table 3 Effects of different concentrations of zinc, selenium and cadmium on the growth and physiological indexes of rice				
处理 Treatment/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	根长 Root length/cm	株高 Plant height/cm	相对含水量 Relative water content/%	SPAD 值 Arbitrary units
CK	18.20 $\pm$ 1.35c	54.46 $\pm$ 6.15a	97.41 $\pm$ 1.05a	41.33 $\pm$ 1.11a
Cd0.5	15.40 $\pm$ 0.89d	34.53 $\pm$ 3.10e	81.75 $\pm$ 1.46c	27.57 $\pm$ 0.83e
Zn1	22.80 $\pm$ 0.95a	53.68 $\pm$ 4.67a	96.96 $\pm$ 0.77a	42.55 $\pm$ 1.01a
Se0.5	17.80 $\pm$ 1.05c	44.50 $\pm$ 4.39b	89.89 $\pm$ 1.60b	38.23 $\pm$ 1.17b
Cd0.5+Zn1	21.40 $\pm$ 1.30a	38.47 $\pm$ 3.55d	89.09 $\pm$ 2.22b	35.63 $\pm$ 1.22c
Cd0.5+Se0.5	19.00 $\pm$ 0.56b	41.96 $\pm$ 6.22c	95.69 $\pm$ 1.06a	31.10 $\pm$ 0.92d
Cd0.5+Zn1+Se0.5	16.50 $\pm$ 0.89d	26.73 $\pm$ 3.61f	80.41 $\pm$ 1.24c	23.07 $\pm$ 0.67f

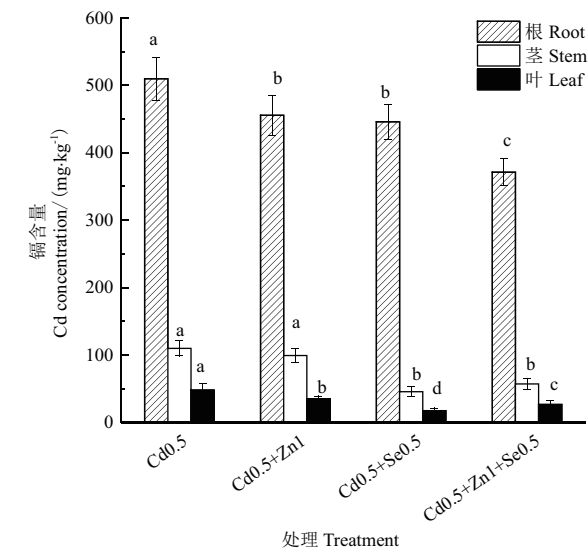


图2 不同处理对水稻根、茎、叶各部位镉含量的影响
Fig.2 Effects of different treatments on the cadmium content in the roots, stems and leaves of rice

表4 不同处理对镉在水稻体内转运的影响
Table 4 Effects of different treatments on the cadmium transport in rice

处理 Treatment	根 - 茎 Root-Stem	根 - 叶 Root-Leaf
Cd0.5	0.22 ± 0.04a	0.09 ± 0.01a
Cd0.5+Zn1	0.22 ± 0.02a	0.08 ± 0.00ab
Cd0.5+Se0.5	0.10 ± 0.00c	0.04 ± 0.00c
Cd0.5+Zn1+Se0.5	0.15 ± 0.01b	0.07 ± 0.00b

注:转运系数:根-茎即茎中镉含量/根中镉含量,根-叶即叶中镉含量/根中镉含量
Note : Translocation factors : Root-stem refers to the cadmium content in stem/ cadmium content in root, and root-leaf refers to the cadmium content in leaf/ the cadmium content in the root

抑制效果却不显著。其原因可能是种子的根是最先接触镉的部位,所以根是镉胁迫的最敏感的反应部位。这种低促高抑的现象与多位研究学者的试验结果一致^[22-26]。锌、硒是维系植物生长过程中必需的微量元素,在镉胁迫下添加锌或硒时,适宜浓度锌可以缓解镉对种子萌发的毒害作用,而硒则加重对种子萌发的毒害作用。前人的研究表明^[27-29],在一定锌浓度范围内,锌可以刺激种子萌发;低浓度硒可参与细胞防御机制,对水稻细胞膜有保护作用,降低了植物体内镉诱导的活性氧自由基,促进早期种子萌发,但高浓度的硒会促进过氧化作用,抑制

种子内淀粉酶、蛋白酶活性,从而影响种子萌发所需要的物质和能量^[30],与本试验硒处理结果有差异可能是因为硒浓度相较镉浓度而言设置较高,而且对于不同的植物种类,硒能产生抑制作用的阈值和硒镉计量比也存在差异。当镉胁迫下加入适宜浓度的锌硒时可促进种子萌发,有效缓解镉对种子萌发的抑制作用,但不能促进根系和芽的生长。其原因可能是萌发后的胚芽较黄,此情况虽计入萌发,但发芽率已不能良好地体现种子受抑制程度,而根长则能比较准确的反映抑制情况^[31]。锌硒镉交互作用机制比较复杂,还需要通过更精确的浓度范围进一步探讨锌硒对镉胁迫下水稻种子的萌发机制。

本研究发现镉浓度与水稻幼苗镉累积量呈显著正相关,当在镉胁迫下分别添加锌、硒和同时添加锌硒均可不同程度降低幼芽和幼根中的镉含量,且幼芽镉含量的降幅均大于幼根镉含量的降幅,说明在萌发短期内分别添加锌、硒和同时添加锌硒均可以减少镉在水稻种子中的累积,对幼芽的缓解程度明显大于幼根。这与前人的相关研究结论大致相同^[32],与赵萍等^[33]的锌促进镉向地上部分运输结论有差异。这可能与本试验锌和镉的浓度以及水稻品种不同有关。硒能降低幼芽和幼根中的镉含量,表现为硒与镉拮抗作用,对于种子萌发各生理指标表现为抑制作用,可能是硒浓度较高,硒已失去对水稻种子萌发的促进作用。铁梅等^[34]研究表明适量的硒可以有效降低萝卜镉含量,在某浓度范围内硒与镉的拮抗作用表现明显。在镉胁迫下同时添加锌硒可以有效降低经镉处理的胚根镉累积量。说明适宜锌硒浓度组合可以有效缓解镉在种子萌芽短期的累积,表现为锌硒与镉拮抗作用。镉累积量与种子发芽势、发芽率不一致,可能是由于锌硒处理可以打破种子休眠,不影响种子萌发,但镉累积会抑制胚芽胚根对养分的摄取,可能在后续的生长中显现出来,具体的镉累积机制还需要进一步的研究。

3.2 锌硒对镉胁迫水稻生长发育及各部位吸收镉含量的影响

本研究中,与对照相比,镉胁迫可导致水稻幼苗的根长、株高、叶片相对含水量、SPAD 值显著降低,这与 Hasanuzzaman 等^[35]、Singh 等^[36]研究

结果相似,可能是镉诱导下增加了水稻的氧化应激、细胞活力丧失、电解质渗漏的形成,破坏了抗氧化酶系统,降低与组成叶绿素分子、PSII 氧化侧电子传递链相关的 Mg、Mn、Cu 含量,导致叶绿素含量降低,从而影响植株生长和光合作用^[37-38]。与镉处理相比,镉胁迫下添加不同浓度锌、硒,水稻幼苗的根长、株高、叶片相对含水量、SPAD 值均显著增加,这与李颖^[28]和王波等^[39]研究结果一致,说明添加锌、硒能缓解镉对水稻生长的毒害,提高水稻保水和抗逆能力,有效缓解镉对叶绿体中光合机制的损伤^[40]。分析水稻不同处理下根、茎、叶各部位镉含量及转运系数可知,在镉胁迫下添加锌、硒及同时添加锌硒均明显降低镉在根、茎、叶中的累积,锌硒对水稻根系镉含量降低效果较好;硒、锌硒均显著减少镉向茎、叶的转运,其中硒的效果较好。综合分析可知,锌可明显缓解镉对根系生长的抑制作用,显著降低根系对镉的吸收。可能是锌与镉离子半径相似,锌镉竞争离子通道,产生拮抗作用,从而降低根系对镉的吸收,减少根系膜系统的氧化损伤^[13, 41-42];硒可明显缓解镉对地上部分生长的抑制作用,显著降低根、茎、叶中镉含量,且显著减少镉向茎、叶的转运,这与 Zhao 等^[43]的结论一致,可能是硒通过影响水稻根表铁膜的形成间接影响镉吸收,降低水稻根系镉含量,硒对镉的缓解机制可能与抑制镉从根向茎、叶的吸收与转运或硒与镉在植物中产生螯合物有关^[44],且对提高光合色素含量起促进作用^[29];当添加锌硒时,与镉处理相比,使水稻株高、SPAD 值显著降低,加重了毒害作用,但显著降低根系镉含量及根向地上部分的转运,所以锌硒镉联用并不能缓解镉对水稻生长的抑制作用,锌硒与镉的拮抗作用使根系镉含量及向地上部分的转运减少,但所加入的锌硒可能会产生重金属过量,导致根长、株高、相对含水量、SPAD 值降低,进而影响水稻生长发育和光合作用,目前锌硒镉对水稻生长发育的作用机制还需进一步的研究。

4 结论

低浓度镉促进水稻种子萌发,高浓度镉抑制水稻种子萌发。在镉胁迫下添加适宜浓度锌、硒可有效降低镉在水稻中的积累,缓解镉对水稻生长发育

的毒害作用。

参考文献

- [1] Song Y, Jin L, Wang X. Cadmium absorption and transportation pathways in plants [J]. *Int J Phytoremediation*, 2017, 19 (2): 133-141.
- [2] 殷小林,孙志忠,袁定阳,等. 水稻体内镉离子代谢机制研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2018, 16 (3): 972-978.
Yin XL, Sun ZZ, Yuan DY, et al. Study advances on metabolic mechanism of cadmium in rice [J]. *Mol Plant Breed*, 2018, 16 (3): 972-978.
- [3] 林欣颖,谭祎,历红波. 稻米镉积累的影响因素与阻控措施 [J]. *环境化学*, 2020, 39 (6): 1530-1543.
Lin XY, Tan Y, Li HB. A review on drivers and mitigation strategies for elevated cadmium concentration in rice [J]. *Environ Chem*, 2020, 39 (6): 1530-1543.
- [4] 田茂苑,何腾兵,付天岭,等. 稻田土壤和稻米镉含量关系的研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (8): 25-28, 40.
Tian MY, HeTB, Fu TL et al. Research progress on relationship between paddy soil and cadmium content in rice grains [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, 47 (8): 25-28, 40.
- [5] Chen H, Yang X, Wang P, et al. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: a case study in Xiangtan, Southern China [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 639: 271-277.
- [6] 杨定清,严俊,雷绍荣,等. 稻米重金属镉含量预警方法研究 [J]. *中国农学通报*, 2016, 32 (3): 124-127.
Yang DQ, Yan J, Lei SR, et al. Study on early warning method of cadmium content in rice [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2016, 32 (3): 124-127.
- [7] 易春丽,刘汇川,李海英,等. 镉砷低积累水稻品种筛选 [J]. *湖南农业科学*, 2020 (6): 1-4.
Yi CL, Liu HC, Li HY, et al. Screening of rice varieties with low cadmium and arsenic accumulation [J]. *Hunan Agric Sci*, 2020(6): 1-4.
- [8] 陈光辉,周森林,易亚科,等. 不同生育期脱水对稻米镉含量的影响 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34 (3): 1-5.
Chen GH, Zhou SL, Yi YK, et al. Effects of drought stress in different growth stages on grain cadmium content of rice [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2018, 34 (3): 1-5.
- [9] 周静,孟桂元,马国辉,等. 镉胁迫对超级稻生长及稻米镉积累

- 特性的影响 [J]. 分子植物育种, 2017, 15 (8): 3191-3198.
- Zhou J, Meng GY, Ma GH, et al. Effects of Cd stress on growth and Cd accumulation in super hybrid rice [J]. *Mol Plant Breed*, 2017, 15 (8): 3191-3198.
- [10] 刘文江, 曾宪平, 高方远. 不同栽培方式下早熟水稻品种的稻米镉吸附规律 [J]. 中国稻米, 2020, 26 (6): 46-48.
- Liu WJ, Zeng XP, Gao FY. Cadmium accumulate rule in rice grain for early matured hybrid rice under different cultivation methods [J]. *China Rice*, 2020, 26 (6): 46-48.
- [11] 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.
- Li CZ, Sun YL, Liu HM, et al. The difference of seedling growth and photosynthetic performance of different rice varieties under cadmium stress [J]. *J Hunan Agric Univ: Nat Sci*, 2021, 47 (2): 147-152.
- [12] 雷武生, 杨宝林, 戴金平. 硫肥对镉胁迫下不同基因型水稻抗氧化系统和光合特性的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2014, 37 (2): 12-17.
- Lei WS, Yang BL, Dai JP. Effects of sulfur on the antioxidant system and photosynthetic characteristics in different rice genotypes under Cadmium stress [J]. *J Agric Univ Hebei*, 2014, 37 (2): 12-17.
- [13] Cao ZZ, Qin ML, Lin XY, et al. Sulfur supply reduces cadmium uptake and translocation in rice grains (*Oryza sativa* L.) by enhancing iron plaque formation, cadmium chelation and vacuolar sequestration [J]. *Environ Pollut*, 2018, 238: 76-84.
- [14] 霍洋, 仇银燕, 周航, 等. 外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41 (10): 4719-4725.
- Huo Y, Qiu YY, Zhou H, et al. Effects of exogenous phosphorus on rice growth and cadmium accumulation and transportation under cadmium stress [J]. *Environ Sci*, 2020, 41 (10): 4719-4725.
- [15] 牟美睿, 刘洋, 贲蓓蓓, 等. 铜对镉胁迫下水稻矿质元素吸收与转运的影响 [J]. 南方农业学报, 2020, 51 (5): 1022-1028.
- Mu MR, Liu Y, Ben BB, et al. Effects of lanthanum on the absorption and translocation of mineral elements in rice under cadmium stress [J]. *J South Agric*, 2020, 51 (5): 1022-1028.
- [16] 潘伯桂, 莫汉乾, 王维, 等. 硅素对水稻幼苗镉积累及抗胁迫应答的调节效应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (3): 1096-1104.
- Pan BG, Mo HQ, Wang W, et al. Regulating effects of silicon on Cd-accumulation and stress-resistant responding in rice seedling [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, 32 (3): 1096-1104.
- [17] 张云慧, 杜平, 秦晓鹏, 等. 不同浓度锌处理下水稻幼苗对镉的累积效应 [J]. 环境科学研究, 2020, 33 (3): 761-768.
- Zhang YH, Du P, Qin XP, et al. Accumulation of cadmium in rice seedlings after treatment with different concentrations of zinc [J]. *Res Environ Sci*, 2020, 33 (3): 761-768.
- [18] 朱秀红, 程红梅, 季柳洋, 等. 锌、镉及其复合胁迫下白花泡桐幼苗的生理及富集特征 [J]. 生物工程学报, 2021, 37 (7): 2463-2473.
- Zhu XH, Cheng HM, Ji LY, et al. Physiological and enrichment characteristics of *Paulownia fortunei* seedlings under zinc, cadmium and their combined stress [J]. *Chin J Biotechnol*, 2021, 37 (7): 2463-2473.
- [19] Huang QQ, Liu YY, Qin X, et al. Selenite mitigates cadmium-induced oxidative stress and affects Cd uptake in rice seedlings under different water management systems [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 168: 486-494.
- [20] 梁欢婷, 何冰, 顾明华, 等. 施硒对镉污染稻米中镉、硒含量的影响及其膳食风险评估 [J]. 食品工业, 2021, 42 (3): 331-335.
- Liang HT, He B, Gu MH, et al. Foliar selenium application on the concentrations of selenium and cadmium in rice grain and health risk assessment [J]. *Food Ind*, 2021, 42 (3): 331-335.
- [21] 刘永贤, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 外源喷施硒与硅对水稻籽粒镉累积的影响 [J]. 西南农业学报, 2017, 30 (7): 1588-1592.
- Liu YX, Pan LP, Huang YF, et al. Effects of selenium or silicon foliar fertilizer on cadmium accumulation in rice [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2017, 30 (7): 1588-1592.
- [22] 鱼小军, 张建文, 潘涛涛, 等. 铜、镉、铅对 7 种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 草地学报, 2015, 23 (4): 793-803.
- Yu XJ, Zhang JW, Pan TT, et al. Effects of heavy metals: copper, cadmium and lead on the seed germination and seedling growth of leguminous forage [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2015, 23 (4): 793-803.
- [23] Li LL, Cui YH, Lu LY, et al. Selenium stimulates cadmium detoxification in *Caenorhabditis elegans* through thiols-mediated

- nanoparticles formation and secretion [J]. Environ Sci Technol, 2019, 53 (5): 2344-2352.
- [24] Ayano H, Miyake M, Terasawa K, et al. Isolation of a selenite-reducing and cadmium-resistant bacterium *Pseudomonas* sp. strain RB for microbial synthesis of CdSe nanoparticles [J]. J Biosci Bioeng, 2014, 117 (5): 576-581.
- [25] Liu L, Shang YK, Li L, et al. Cadmium stress in Dongying wild soybean seedlings: growth, Cd accumulation, and photosynthesis [J]. Photosynthetica, 2018, 56 (4): 1346-1352.
- [26] 杨馥榕, 王晓红, 肖琪, 等. 木槿品种对镉胁迫的生理响应及耐镉能力评价 [J]. 生物技术通报, 2022, 38 (1): 98-107.
Yang FR, Wang XH, Xiao Q, et al. Physiological response of hibiscus syriacus varieties to cadmium stress and evaluation of cadmium tolerance [J]. Biotechnol Bull, 2022, 38 (1): 98-107.
- [27] 吴羽晨, 邓小莉, 张家洋, 等. 锌、镉胁迫对4种杂草种子萌发特征的影响 [J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2020, 35 (6): 1089-1095.
Wu YC, Deng XL, Zhang JY, et al. Effects of zinc and cadmium stresses on the germination characteristics of four weed species seeds [J]. J Yunnan Agric Univ: Nat Sci, 2020, 35 (6): 1089-1095.
- [28] 李颖, 杨小环, 鲁一薇, 等. 外源硒对镉胁迫下紫苏幼苗生长发育毒害的缓解效应 [J]. 山西农业科学, 2021, 49 (4): 408-413.
Li Y, Yang XH, Lu YW, et al. Alleviating toxic effects of exogenous selenium on growth and development of *Perilla frutescens* seedlings under cadmium stress [J]. J Shanxi Agric Sci, 2021, 49 (4): 408-413.
- [29] 王海希, 周浩民, 李柳燕, 等. 硒预处理对镉胁迫下荷花幼苗生长和生理的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28 (2): 64-70.
Wang HX, Zhou HM, Li LY, et al. Effect of selenium pretreatment on growth and physiology of *Nelumbo nucifera* seedlings under cadmium stress [J]. J Plant Resour Environ, 2019, 28 (2): 64-70.
- [30] 代邹, 王春雨, 李娜, 等. 硒对不同水稻幼苗镉胁迫的缓解作用及其对矿质营养的影响 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2016, 42 (6): 720-730.
Dai Z, Wang CY, Li N, et al. Alleviation role and effects of selenium on mineral nutrients in rice (*Oryza sativa*) seedlings under cadmium stress [J]. J Zhejiang Univ: Agric Life Sci, 2016, 42 (6): 720-730.
- [31] 陈丽丽, 付媛媛, 王艳萍, 等. 镉胁迫对小麦和2种杂草种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2019, 39 (1): 50-57.
Chen LL, Fu YY, Wang YP, et al. Effects of Cd²⁺ and Zn²⁺ on seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* and 2 weed species [J]. J Southwest For Univ: Nat Sci, 2019, 39 (1): 50-57.
- [32] 王丙烁, 黄益宗, 李娟, 等. 镉胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发和镉吸收积累的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (4): 746-755.
Wang BS, Huang YZ, Li J, et al. Effects of different amendments on seed germination and cadmium uptake and accumulation in rice seedlings under cadmium stress [J]. J Agro Environ Sci, 2019, 38 (4): 746-755.
- [33] 赵萍, 瞿华香, 张玉烛. 锌对镉胁迫下水稻幼苗镉吸收转运及根系形态的影响 [J]. 广东农业科学, 2017, 44 (5): 99-105.
Zhao P, Qu HX, Zhang YZ. Effects of zinc on cadmium uptake, transfer and root morphology of rice seedlings under cadmium stress [J]. Guangdong Agric Sci, 2017, 44 (5): 99-105.
- [34] 铁梅, 刘阳, 李华为, 等. 硒镉处理对萝卜硒镉吸收的影响及其交互作用 [J]. 生态学杂志, 2014, 33 (6): 1587-1593.
Tie M, Liu Y, Li HW, et al. Uptake of Se and Cd in radish and their effects on growth [J]. Chin J Ecol, 2014, 33 (6): 1587-1593.
- [35] Hasanuzzaman M, Nahar K, Gill SS, et al. Hydrogen peroxide pretreatment mitigates cadmium-induced oxidative stress in *Brassica napus* L.: an intrinsic study on antioxidant defense and glyoxalase systems [J]. Front Plant Sci, 2017, 8: 115.
- [36] Singh P, Pokharia C, Shah K. Exogenous peroxidase mitigates cadmium toxicity, enhances rhizobial population and lowers root knot formation in rice seedlings [J]. Rice Sci, 2021, 28 (2): 166-177.
- [37] 王竹承, 刘辉, 李荣华. 外源硫对镉胁迫下马齿苋光合性状和矿质元素吸收的影响 [J]. 生物技术通报, 2020, 36 (3): 133-140.
Wang ZC, Liu H, Li RH. Effects of exogenous sulfur on photosynthetic characteristics and mineral elements absorption in *Portulaca oleracea* under cadmium stress [J]. Biotechnol Bull, 2020, 36 (3): 133-140.

- 133-140.
- [38] 王竹承, 刘辉, 李荣华, 等. 外源硫与乙烯缓解马齿苋镉胁迫的生理机制研究 [J]. 生物技术通报, 2019, 35 (10): 71-79.
- Wang ZC, Liu H, Li RH, et al. Physiological mechanism of exogenous ethylene and sulfur in alleviating cadmium stress in *Portulaca oleracea* [J]. *Biotechnol Bull*, 2019, 35 (10): 71-79.
- [39] 王波, 张然然, 杨如意, 等. 外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (12): 2710-2718.
- Wang B, Zhang RR, Yang RY, et al. Effect of exogenous selenium (Se) and Se-tolerant bacterium on the growth, physiology, and Se and cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown under Cd stress [J]. *J Agro Environ Sci*, 2020, 39 (12): 2710-2718.
- [40] Hussain A, Ali S, Rizwan M, et al. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity [M] // *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants*. Amsterdam : Elsevier, 2019 : 47-72.
- [41] 马欢欢, 高峰, 樊向阳, 等. 锌对镉胁迫下黄菖蒲抗氧化酶系统及富集镉的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39 (11): 104-111.
- Ma HH, Gao F, Fan XY, et al. The effects of Zn on antioxidant enzymes and accumulation of cadmium in *Iris pseudacorus* under Cd stress [J]. *J Irrigation Drainage*, 2020, 39 (11): 104-111.
- [42] 赵明香, 朱永立, 向蓉蓉, 等. 外源水杨酸对镉胁迫下烤烟生长及抗氧化特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48 (2): 34-41.
- Zhao MX, Zhu YL, Xiang RR, et al. Effects of exogenous salicylic acid on growth and antioxidant characteristics of flue-cured tobacco under cadmium and zinc stress [J]. *J Northwest A F Univ : Nat Sci Ed*, 2020, 48 (2): 34-41.
- [43] Zhao YY, Hu CX, Wu ZC, et al. Selenium reduces cadmium accumulation in seed by increasing cadmium retention in root of oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Environ Exp Bot*, 2019, 158 : 161-170.
- [44] Saidi I, Chtourou Y, Djebali W. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings [J]. *J Plant Physiol*, 2014, 171 (5): 85-91.
- (责任编辑 朱琳峰)