

锌、镉胁迫对 4 种杂草种子萌发特征的影响*

吴羽晨, 邓小莉, 张家洋, 毛雪飞

(新乡学院 生命科学技术学院, 河南 新乡 453000)

摘要:【目的】探讨农田中重金属锌(Zn)和镉(Cd)污染对杂草种子萌发指标的影响。【方法】以 4 种农田杂草种子为试材, 比较不同质量浓度锌 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 单一胁迫对麦家公(*Buglossoides arvensis*)、麦瓶草(*Silene conoidea*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)和播娘蒿(*Descurainia sophia*)种子一系列萌发指标间的影响。采用隶属函数法综合评价 4 种农田杂草对重金属 Zn、Cd 的耐性。【结果】随着 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 质量浓度的升高, 除麦瓶草的发芽率、发芽势和发芽指数在 Zn^{2+} 质量浓度为 50~400 mg/L 和 Cd^{2+} 质量浓度为 25~200 mg/L 之间时出现一定的波动, 表现出低抑制、高刺激的现象外, 4 种农田杂草种子的各项萌发指标均有不同程度的降低。隶属函数评价表明: 4 种农田杂草的耐 Zn 胁迫能力为麦瓶草>刺儿菜>播娘蒿>麦家公; 4 种农田杂草的耐 Cd 胁迫能力为刺儿菜>麦瓶草>播娘蒿>麦家公。【结论】麦瓶草对重金属 Zn 的耐受能力最强, 刺儿菜对重金属 Cd 的耐受能力最强, 而麦家公对 Zn、Cd 的耐受能力均最弱。

关键词: 锌; 镉; 麦家公; 麦瓶草; 刺儿菜; 播娘蒿; 萌发期

中图分类号: X 171.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2020)06-1089-07

Effects of Zinc and Cadmium Stresses on the Germination Characteristics of Four Weed Species Seeds

WU Yuchen, DENG Xiaoli, ZHANG Jiayang, MAO Xuefei

(School of Science and Technology, Xinxiang University, Xinxiang 453000, China)

Abstract: [Purpose] In order to investigate the effects of heavy metal zinc and cadmium pollution on weed seed germination indicators in farmland soil. [Method] Using 4 species of seeds as test materials, the difference between a series of germination indicators of weeds (*Buglossoides arvensis*, *Silene conoidea*, *Cirsium setosum* and *Descurainia sophia*) were compared under the single stress of zinc (Zn^{2+}) and cadmium (Cd^{2+}). The subordinate function method was used to comprehensively evaluate the tolerance of 4 species of farmland weeds under Zn and Cd stress. [Result] With the increase of Zn^{2+} and Cd^{2+} mass concentration, the germination indicators of the 4 species of weed seeds decreased to different degrees, except for *S. conoidea*, which showed a certain fluctuations in its germination rate, germination potential and germination index when the Zn^{2+} mass concentration of 50-400 mg/L and Cd^{2+} mass concentration of 25-200 mg/L. According to the comprehensive membership function analysis, the tolerance of 4 species of weeds under the Zn stress was *S. conoidea*>*C. setosum*>*D. sophia*>*B. arvensis*, the tolerance of 4 species of weeds under the stress was *C. setosum*>*S. conoidea*>*D. sophia*>*B. arvensis*. [Conclusion] The *S. conoidea* had the strongest tolerance to heavy metal zinc, *C. setosum* had the strongest tolerance to heavy metal cadmium. However,

收稿日期: 2019-11-15

修回日期: 2020-06-29

网络首发时间: 2020-11-20 08:44:53

*基金项目: 河南省农业领域科技攻关项目(162102110028)。

作者简介: 吴羽晨(1988—), 女, 河南新乡人, 硕士, 实验师, 主要从事植物与植被修复研究。

E-mail: selinssa@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20201119.1605.005.html>



B. arvense had the weakest tolerance to both zinc and cadmium.

Keywords: zinc; cadmium; *Silence conoidea* ; *Cirsum setosum*; *Descurainia sophia*; *Buglossoides arvense*; germination

近年来，土壤中重金属污染随着废水排放、农药化肥使用和污泥农用等，对土地资源可持续利用和农业可持续发展的影响日趋严重^[1-5]。锌 (Zn) 和镉 (Cd) 是 2 种土壤重金属污染的主要元素，过量时会对植物产生明显的毒害，不仅会影响植物细胞的代谢和生长、改变植物的形态结构，还会恶化生态环境。筛选并利用具有超富集土壤重金属能力的植物具有成本低廉、原位修复、改善生态环境、不造成二次污染、不破坏土壤理化性质和生态环境及可以大规模应用等优点^[6]。植物种子萌发期作为植物生长周期的最初阶段，容易受到机械伤害、病害和环境胁迫的影响，种子在重金属胁迫下的耐性强弱直接影响植物修复的效果。截至目前，现有文献研究成果多集中在水生植物、木本植物和草坪草等种类^[7-9]，并大多侧重于重金属对植物胁迫后的生理生化指标的影响研究上^[10-12]。而针对不同重金属在植物体内富集及积累的研究不多，尤其对农田杂草受重金属胁迫后萌发特征的变化研究鲜有报道。杂草类植物生长周期短、生物量大，环境竞争力更强，对土壤重金属污染修复更为实用^[13-17]。赵雅曼等^[18]研究表明：金丝草对 Cd 具有较强的耐受性，且在 Cd 胁迫下表现出低促进高抑制；朱红霞等^[19]研究

表明：马齿苋 (*Portulaca oleracea*) 种子同样在 Cd 胁迫下表现出低促进高抑制；陈丽丽等^[20]研究发现：地肤 (*Kochia scoparia*) 和稗草 (*Echinochloa crusgalli*) 2 种杂草种子相对于小麦种子有较强的耐 Zn 和 Cd 能力；侯晓龙等^[21]研究发现：超富集植物金丝草 (*Pogonatherum crinitum*) 具有较强的抗铅 (Pb) 胁迫能力和富集能力。麦家公 (*Buglossoides arvensis*)、麦瓶草 (*Silence conoidea*)、刺儿菜 (*Cirsum setosum*) 和播娘蒿 (*Descurainia sophia*) 是常见的农田杂草，生长快且抗逆性强，生物量大。本研究以上述 4 种农田杂草为试验材料，采用种子萌发试验，测定重金属 Zn、Cd 单一胁迫下对 4 种种子萌发特征的影响，应用隶属函数法对 4 种杂草的抗胁迫能力进行综合评价，以期筛选出重金属抗性较强的杂草品种，为 Zn、Cd 污染土壤的植物修复应用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的麦家公、麦瓶草、刺儿菜和播娘蒿种子均购自市场见表 1，供试的重金属元素为 Zn、Cd，且均以硫酸盐 (ZnSO₄、CdSO₄) 溶液的形态进行处理。

表 1 所选杂草一览表
Tab. 1 The selected weed species

杂草 weed species	科名 family name	分布 distribution
麦家公 <i>Buglossoides arvense</i>	紫草科 Boraginaceae	华北 North China
麦瓶草 <i>Silence conoidea</i>	石竹科 Caryophyllaceae	华北、西北、西南 North, Northwest and Southwest of China
刺儿菜 <i>Cirsum setosum</i>	菊科 Compositae	全国 nationwide
播娘蒿 <i>Descurainia sophia</i>	十字花科 Cruciferae	东北、华北、西北、西南 North, Northeast, Northwest and Southwest of China

1.2 试验设置

试验于 2018 年 4 月进行，精选麦家公、麦瓶草、刺儿菜和播娘蒿种子，经消毒后置于垫有一层滤纸的培养皿中，分别加入 Zn²⁺质量浓度为 0、50、100、200、400、800 和 1600 mg/L 的 Hoagland 营养液，Cd²⁺质量浓度为 0、25、50、100、200、400 和 800 mg/L 的 Hoagland 营养

液。置于 25 ℃、90% 相对湿度的恒温培养箱中，每天加入约 5 mL 相应溶液，保持滤纸湿润。在播后 7 d 用游标卡尺 (精确到 0.1 mm) 对幼苗的芽和根分别进行测量并统计 4 种种子芽长、根长及发芽率。试验设置 3 个重复，每皿 50 粒。

1.3 数据处理与分析

根据种子发芽数计算相关指标：

发芽率=(供试种子的发芽数/供试种子数)×100%;

发芽势=(正常发芽种子的总数/供试种子总数的百分比)×100%;

相对根长=(处理草种平均根长/对照平均根长)×100%;

相对芽长=(处理草种平均芽长/对照平均芽长)×100%;

相对胚芽长=(处理草种胚芽长/对照胚芽长)×100%;

相对胚根长=(处理草种胚根长/处理草种胚根长)×100%;

发芽指数 = $P \sum G_i / D_i$;

式中, G_i 为试验期内不同阶段 (t, d) 的发芽数, D_i 为其相应的发芽试验时间。

采用 Excel 进行初步分析并建立数据库, 运用 SPSS 19.0 软件对相关发芽指标进行统计分析。应用 one-way ANOVA 分析各处理间的差异显著性。对每种植物的系列发芽指标进行隶属函数值计算并求平均值, 以评价其重金属抗性顺序。采用模糊学隶属函数法对 4 种农田杂草进行抗污能力分析。

隶属函数 (R_{Xi}) = $\frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$;

式中, i 为每种参试植物; X_i 为参试植物某一指标的测定值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为所有材料中该指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 Zn、Cd 胁迫对 4 种农田杂草植物发芽率和发芽势及发芽指数的影响

由表 2、3 可知: 在不同质量浓度的 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 处理下, 4 种农田杂草种子的发芽率、发芽势和发芽指数均明显受到抑制, 且随着质量浓度的升高总体呈现递减的趋势。在不同质量浓度的 Zn 胁迫下, 麦家公、麦瓶草、刺儿菜和播娘蒿的发芽率最大降幅分别为 50.70%、80.97%、82.92% 和 70.63%, 且均达到显著差异, 其中 Zn 胁迫对刺儿菜的发芽率影响最大。

Zn^{2+} 胁迫下麦家公种子发芽率和发芽势在 0~100 mg/L 之间均无显著差异 ($P>0.05$), 在 200~400 mg/L 之间各发芽指标均显著低于对照值 ($P<0.05$); Cd^{2+} 处理质量浓度在 50~200 mg/L 下麦家公种子各发芽指标均显著低于对照 ($P<0.05$)。当 Zn^{2+} 处理质量浓度为 50 mg/L 时, 麦瓶草种子发芽率仅约为对照的一半, 随后 (100~400 mg/L) 发芽率略有升高但均显著低于对照 ($P<0.05$); Cd^{2+} 胁迫下麦瓶草种子的发芽指数在 25~100 mg/L 质量浓度范围内出现波动, 其中在 50 mg/L 质量浓

表 2 Zn 对 4 种杂草植物萌发期发芽率、发芽势和发芽指数的影响
Tab. 2 Effect of Zn on the seed germination percentages, germination potential and germination indices of 4 species of weeds during germination

发芽指标 germination index	杂草 weeds	$\rho(Zn^{2+})/(mg \cdot L^{-1})$						
		0	50	100	200	400	800	1 600
GR/%	麦家公 BA	65.97±5.75 a	56.97±4.36 a	54.00±3.32 a	41.04±2.25 b	33.03±2.79 b	0	0
	麦瓶草 SC	63.26±5.26 a	36.99±4.14 b	47.97±4.35 b	45.99±6.79 b	43.02±4.38 b	12.04±2.76 c	0
	刺儿菜 CS	68.73±6.40 a	59.83±6.83 b	48.27±4.42 b	46.78±7.82 c	36.88±3.26 c	11.74±3.45 d	0
	播娘蒿 DS	47.84±4.96 a	42.96±5.56 b	38.75±1.76 b	26.61±4.26 c	14.05±2.75 d	0	0
GV/%	麦家公 BA	47.70±1.01 a	42.03±0.99 a	36.00±2.55 a	20.97±3.87 b	9.99±1.39 c	0	0
	麦瓶草 SC	61.47±1.99 a	36.99±3.13 b	45.99±5.69 b	45.99±6.79 b	41.04±2.97 b	26.12±2.77 c	0
	刺儿菜 CS	58.83±1.72 a	52.12±2.09 a	47.13±4.32 b	22.03±2.32 c	16.35±2.19 c	8.36±1.39 e	0
	播娘蒿 DS	42.74±2.15 a	38.83±1.87 a	27.45±3.25 b	22.84±3.24 c	7.63±2.01 d	0	0
GI/%	麦家公 BA	20.31±0.66 a	15.73±0.86 a	13.84±0.91 b	10.46±1.12 b	8.19±0.53 b	0	0
	麦瓶草 SC	20.83±2.02 a	11.57±0.70 b	14.31±0.73 b	14.14±1.13 b	12.82±0.71 b	4.56±0.81 c	0
	刺儿菜 CS	19.74±2.69 a	16.38±1.17 a	12.44±1.57 b	10.92±0.74 b	8.55±0.82 c	3.74±0.49 d	0
	播娘蒿 DS	18.45±3.04 a	14.38±0.64 b	10.23±0.83 b	6.36±0.59 c	4.26±0.79 d	0	0

注: GR. 发芽率; GV. 发芽势; GI. 发芽指数。不同小写字母表示同种植物不同质量浓度处理之间差异显著 ($P<0.05$); 下同。
Note: GR. germination rate; GV. germination vigor; GI. germination index. Different lowercase letters indicate significant differences of the same plant at different mass concentrations ($P<0.05$); the same as below.

度发芽指数显著低于其他质量浓度 ($P<0.05$), 而与 200 mg/L 质量浓度时的发芽指数差异不显著 ($P>0.05$)。Zn²⁺胁迫对刺儿菜种子各发芽指标在 100~800 mg/L 质量浓度范围内均呈递减趋势且具有显著性差异 ($P<0.05$); Cd²⁺胁迫下刺儿菜种子发芽率在 50~200 mg/L 质量浓度范围内差异不显著 ($P>0.05$), 发芽势和发芽指数在 25~100 mg/L 质量浓度范围内差异不显著 ($P>0.05$)。Zn²⁺胁迫下播娘蒿种子发芽率和发芽指数除在 50 和 100 mg/L

质量浓度下差异不显著 ($P>0.05$) 外, 其他各处理质量浓度下各发芽指标间差异均显著 ($P<0.05$); Cd²⁺胁迫下播娘蒿种子发芽指数在 25 和 50 mg/L 质量浓度下差异不显著 ($P>0.05$), 其余各质量浓度均较对照呈显著性下降 ($P<0.05$)。综合发芽率、发芽势和发芽指数 3 项指标, 4 种农田杂草种子萌发期抗 Zn 胁迫能力的强弱顺序为刺儿菜>麦瓶草>麦家公>播娘蒿, 4 种杂草萌发期抗 Cd 胁迫能力的强弱顺序为麦瓶草>刺儿菜>播娘蒿>麦家公。

表 3 Cd 对 4 种农田杂草萌发期发芽率、发芽势和发芽指数的影响

Tab. 3 Effect of Cd on the seed germination percentages, germination potential and germination indices of 4 species of weeds during germination

发芽指标 germination index	杂草 weeds	$\rho(\text{Cd}^{2+})$						
		0	25	50	100	200	400	800
GR/%	麦家公 BA	67.44±5.32 a	47.01±5.09 b	3.72±1.42 c	6.16±2.56 c	3.04±0.56 c	0	0
	麦瓶草 SC	64.78±5.13 a	53.18±6.74 b	46.00±4.67 b	54.19±4.85 b	47.01±3.75 b	20.82±1.48 c	0
	刺儿菜 CS	63.28±6.65 a	57.82±8.23 a	48.73±3.96 b	42.14±1.33 b	37.52±2.73 b	18.43±1.55 c	0
	播娘蒿 DS	66.74±7.19 a	56.29±7.32 a	40.37±3.75 b	32.84±2.15 b	14.83±3.12 c	0	0
GV/%	麦家公 BA	48.76±3.72 a	42.96±4.86 a	1.01±0.35 d	5.17±1.69 c	2.84±0.39 d	0	0
	麦瓶草 SC	62.84±8.43 a	48.02±6.76 b	43.98±4.14 b	48.02±3.78 b	30.64±2.02 c	14.75±1.71 d	0
	刺儿菜 CS	60.32±6.10 a	49.25±5.90 b	41.04±3.15 b	37.45±1.44 b	29.45±1.64 b	12.33±1.15 c	0
	播娘蒿 DS	50.25±6.75 a	44.25±5.19 a	37.84±5.79 b	20.55±1.77 c	13.38±2.33 d	0	0
GI/%	麦家公 BA	20.76±1.35 a	13.28±1.01 b	0.31±0.11 d	0.75±0.21 d	3.95±0.49 c	0	0
	麦瓶草 SC	21.29±1.47 a	15.69±3.08 b	13.71±1.71 c	15.99±1.58 b	11.17±0.94 c	6.55±1.07 d	0
	刺儿菜 CS	20.45±1.79 a	16.84±1.86 b	12.74±2.45 b	11.46±0.94 b	9.62±0.81 c	4.24±0.89 d	0
	播娘蒿 DS	17.37±2.17 a	12.48±1.75 b	11.66±1.44 b	7.39±1.02 c	3.02±0.58 d	0	0

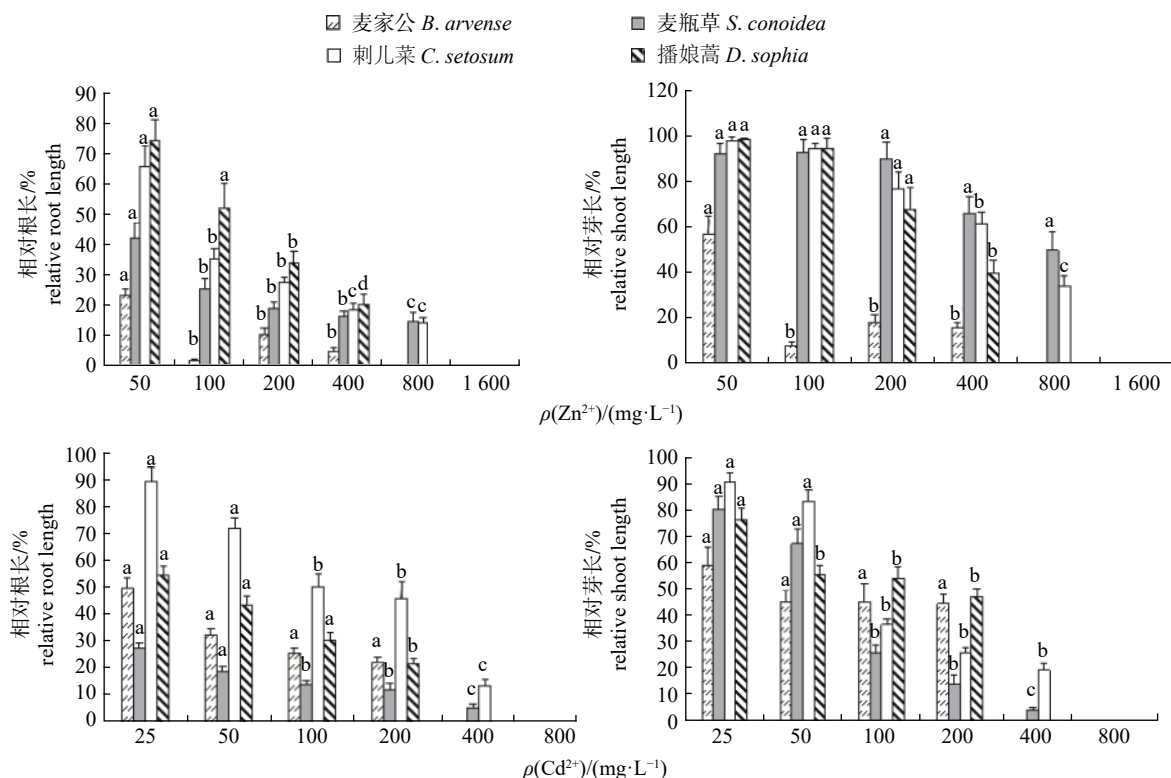
2.2 Zn、Cd 胁迫对 4 种杂草植物根长和芽长的影响

由图 1 可见: 4 种农田杂草的相对根长和相对芽长随着 Zn²⁺、Cd²⁺质量浓度的增高均呈现递减趋势, 说明 Zn²⁺、Cd²⁺均对 4 种杂草植物的根和芽有抑制作用, 且质量浓度越高抑制作用越显著。Zn²⁺胁迫下麦家公的相对根长和相对芽长在 100~400 mg/L 范围内差异不显著 ($P>0.05$), 但均显著低于 50 mg/L ($P<0.05$); Cd²⁺胁迫下麦家公相对根长和相对芽长在各质量浓度下差异均不显著 ($P>0.05$)。Zn²⁺胁迫下麦瓶草相对根长在 100~400 mg/L 范围内差异不显著 ($P>0.05$); 而相对芽长在各质量浓度范围内均无差异显著 ($P>0.05$)。Zn²⁺胁迫下刺儿菜相对芽长在 50~200 mg/L 时显著高于其他质量浓度 ($P<0.05$)。由相对根长和相对芽长的递减幅度可以看出: Zn、Cd 胁迫对 4 种杂草根长的抑制作用明显高于对芽长的抑制作用。4 种农田杂草在不同质量浓度 Zn²⁺胁迫下

的根长和芽长抑制作用的顺序均为播娘蒿>刺儿菜>麦瓶草>麦家公, 在不同质量浓度 Cd²⁺胁迫下的根长和芽长抑制作用的顺序均为刺儿菜>播娘蒿>麦家公>麦瓶草。

2.3 Zn、Cd 胁迫对 4 种杂草植物胚根和胚芽的影响

由图 2 可知: Zn²⁺胁迫下麦家公、麦瓶草、刺儿菜和播娘蒿的相对胚根长变化分别为 21.07%~0.84%、37.66%~9.77%、35.93%~9.44% 和 20.73%~8.39%, Zn²⁺胁迫下麦家公相对胚芽长在 100~400 mg/L 范围内差异均不显著 ($P>0.05$), Cd²⁺胁迫下相对胚根长和相对胚芽长在 25~100 mg/L 范围内差异均不显著 ($P>0.05$)。麦瓶草在 Zn²⁺质量浓度为 0~200 mg/L 范围内相对胚芽长均超过 80%, 在 Cd²⁺质量浓度为 0~50 mg/L 范围内相对胚芽长均超过 60%, 相较于其他 3 种杂草植物表现出较好的抗 Zn、Cd 胁迫能力。Zn²⁺胁迫下刺儿菜相对胚根长在 200~800 mg/L 范围内显著



注: 不同小写字母表示同种植物不同浓度处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences of the same plant at different concentrations ($P < 0.05$); the same as below.

图1 Zn、Cd胁迫对4种杂草植物萌发期相对根长和相对芽长的影响

Fig. 1 Impacts of Zn and Cd on the relative root length and relative shoot length of 4 species of weeds during germination

低于 50~100 mg/L ($P < 0.05$), 相对胚芽长在 25~200 mg/L 范围差异不显著 ($P > 0.05$), Cd^{2+} 胁迫下相对胚根长在各质量浓度范围内差异显著 ($P < 0.05$)。 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫下播娘蒿相对胚根长和相对胚芽长在各质量浓度差异均不显著 ($P > 0.05$)。整体上 Zn、Cd 单一胁迫下相对胚根长受到的影响比相对胚芽长显著, 即胚根受到的抑制强于胚芽。

2.4 Zn、Cd 胁迫对 4 种杂草植物的综合评价

采用模糊数学隶属函数法, 对 4 种杂草种子萌发期的发芽率、发芽势、发芽指数、相对根长、相对芽长、相对胚根长和相对胚芽长进行隶属函数值计算 (表 4), 得出 4 种杂草植物种子萌发期对于耐 Zn 胁迫能力为麦瓶草>刺儿菜>播娘蒿>麦家公, 耐 Cd 胁迫能力为刺儿菜>麦瓶草>播娘蒿>麦家公。

3 讨论

土壤是植物赖以生存的基础, 种子能否正常发芽是植物生长的前提。尤其以种子为主要繁殖

方式的植物, 其种子萌发和幼苗生长的启动更为重要。不同重金属对不同的植物有不同的影响, 这可能与重金属对不同植物种子的萌发期生长特性以及重金属对种子的毒性反应有关^[22-23]。本研究中的 4 种杂草种子, 其萌发指标在设置的 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 质量浓度范围内均呈现下降趋势, 且对根生长的抑制明显大于对芽生长的抑制, 这与陈丽丽等^[20]对小麦、地肤和稗草种子、刘茵^[24]对黑麦草和鱼小军等^[25]对豆科 7 种牧草的试验结果一致。低浓度的重金属会造成植物种子发芽受阻和能力降低, 然而随重金属浓度的升高, 超出植物的耐性与抗逆性, 会造成植物完全丧失发芽能力。现已有研究表明: 过量的重金属胁迫会造成种子内细胞膜脂过氧化, 使植物体内产生活性氧自由基 (ROS), 导致抗氧化防御系统之间的失衡, 从而影响植物正常萌发^[22-25]。植物容易受重金属污染导致根生长受阻, 在设置的 Zn^{2+} 质量浓度范围为 0~100 mg/L 的刺激下, 4 种杂草种子中对麦瓶草相对根长的影响最大, 当 Zn^{2+} 质量浓度为 100 mg/L 时, 麦瓶草的相对根长几乎不生长, 仅为 $1.67\% \pm$

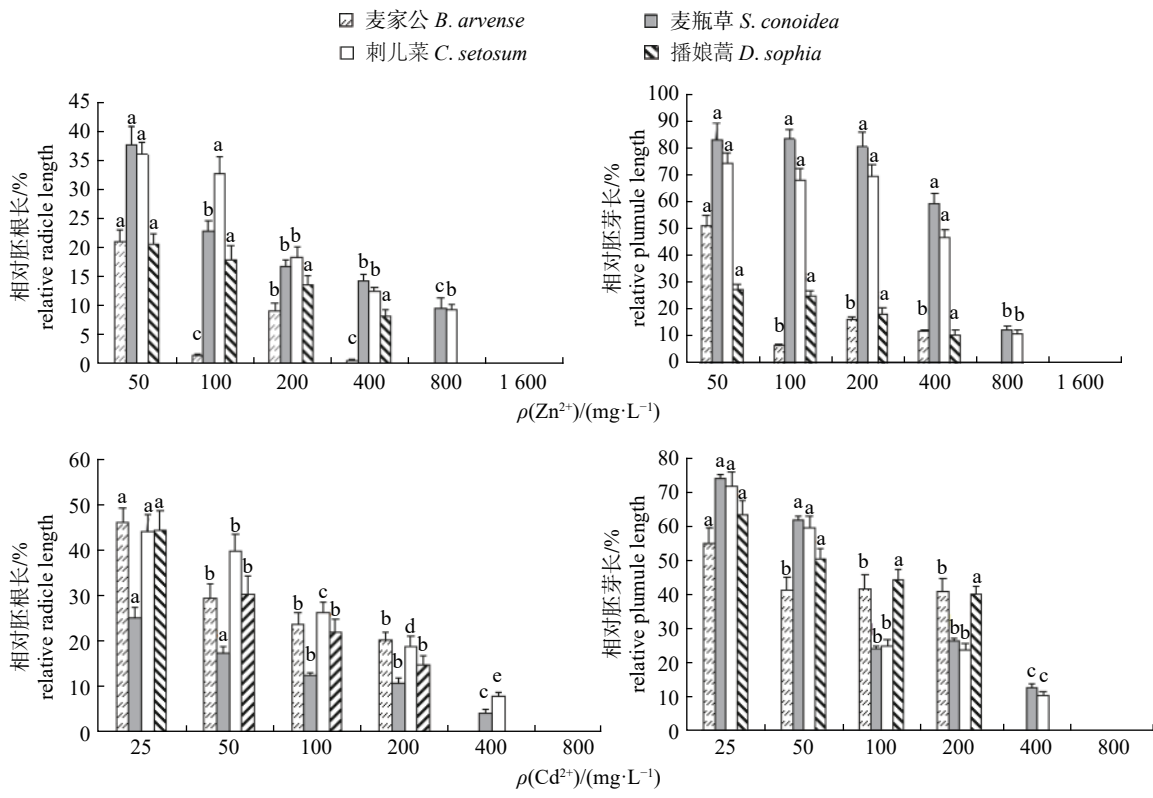


图 2 Zn、Cd 胁迫对 4 种杂草植物萌发期相对胚根和相对胚芽的影响

Fig. 2 Impacts of Zn and Cd on the relative radicle length and relative plumule length of 4 species of weeds during germination

表 4 4 种杂草植物种子萌发期对 Zn、Cd 的耐性隶属函数值 (R) 及综合评价

Tab. 4 The value of subordinate function (R) and comprehensive evaluation of the growth indexes of 4 species under Zn and Cd stress during seed germination period

胁迫 stress	杂草 weeds	R							R	排序 rank
		发芽率 germination percentage	发芽势 germination index	发芽指数 germination index	相对根长 relative root length	相对芽长 relative shoot length	相对胚根长 relative radicle length	相对胚芽长 relative plumule length		
Zn	麦家公 BA	0.4493	0.3025	0.1046	0.0580	0.2135	0.0390	0.1818	0.1927	4
	麦瓶草 SC	0.4519	0.5291	0.1264	0.2646	1.0000	0.2246	0.8095	0.4866	1
	刺儿菜 CS	0.4991	0.4106	0.1119	0.3836	0.9295	0.2446	0.6767	0.4651	2
	播娘蒿 DS	0.2804	0.2639	0.0712	0.4354	0.7576	0.1142	0.1696	0.2989	3
Cd	麦家公 BA	0.1103	0.0940	0.0000	0.3002	0.4734	0.1818	0.4312	0.2273	4
	麦瓶草 SC	0.5468	0.4503	0.1207	0.1579	0.4672	0.8095	0.4846	0.4339	2
	刺儿菜 CS	0.5021	0.4075	0.0986	0.6799	0.6395	0.6767	0.4621	0.4952	1
	播娘蒿 DS	0.3396	0.2633	0.0438	0.3543	0.5794	0.1696	0.4834	0.3191	3

0.25%, 因为植物根相较于芽对重金属离子有更强的吸收和积累能力, 且根系是植物物质能量输送和新陈代谢的基础, 因此评价植物萌发期根的生长可作为评价植物受重金属胁迫的重要指标之一。

在 Zn 胁迫下, 麦瓶草种子在 100~400 mg/L 质量浓度下各项发芽指标整体呈现下降趋势, 但都高于 50 mg/L 质量浓度, 说明麦瓶草种子在低浓度下较敏感, 随着 Zn^{2+} 质量浓度升高到一定阈

值时, 麦瓶草完全丧失发芽能力, 导致死亡; 麦瓶草种子在 Cd^{2+} 刺激下, 各项发芽指标在 50 mg/L 质量浓度时也低于在 100 mg/L 质量浓度, 说明中低质量浓度的 Zn^{2+} (100~400 mg/L) 和 Cd^{2+} (100~200 mg/L) 能刺激麦瓶草的发芽, 导致发芽率等指标有一定程度的升高, 其原因可能与麦瓶草种子内部的激素调控机制及平衡关系有关, 种子内部的酚类物质可以抑制种子发芽, 中低质量浓度

的 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 可能与酚类物质发生反应, 种子内部总酚含量降低, 淀粉酶和 POD 酶等酶类被活化, 促进种子休眠解除, 有效调动种子内的物质代谢, 为种子萌发积聚能量, 从而解除对于种子发芽的限制, 其具体调控机制我们将进一步探究。毛雪飞等^[26]对4种农田杂草幼苗的研究结果表明: 麦瓶草幼苗的 Zn、Cd 积累量最高, 说明麦瓶草从种子萌发期到幼苗都对 Zn、Cd 有一定的耐性, 在土壤重金属植物修复中有一定的应用潜力。

4 结论

Zn、Cd 胁迫会对麦家公、麦瓶草、刺儿菜和播娘蒿种子萌发、芽和根的伸长均产生抑制作用。在相同质量浓度下, Cd^{2+} 对种子萌发的抑制作用强于 Zn^{2+} 。在植物种子萌发期时 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫农田杂草超过植物耐受极限值, 均会死亡。4种杂草种子中, 麦瓶草具有更强的耐 Zn 胁迫能力, 刺儿菜具有更强的耐 Cd 胁迫能力, 麦家公对 Zn、Cd 的耐受能力均最弱。

[参考文献]

- [1] KRAMI L K, AMIRI F, SEFIYANIAN A, et al. Spatial patterns of heavy metals in soil under different geological structures and land uses for assessing metal enrichments[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(12): 9871. DOI: 10.1007/s10661-013-3298-9.
- [2] ZHANG J R, LI H Z, ZHOU Y Z, et al. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: a case study in the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Pollution, 2018, 235(4): 710. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.12.106.
- [3] 高亚萍, 夏建东, 周葆华, 等. 我国耕地土壤重金属污染的阻控技术研究进展[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 25(2): 99. DOI: 10.13757/j.cnki.cn34-1328/n.2019.02.022.
- [4] LI Z Y, MA Z W, VAN DER KUIJP T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468(1): 843. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090.
- [5] NEDELKOSKA T V, DORAN P M. Characteristics of heavy metal uptake by plants species with potential for phytoremediation and phytomining[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(5): 549. DOI: 10.1016/S0892-6875(00)00035-2.
- [6] 黄明煜, 章家恩, 全国明, 等. 土壤重金属的超富集植物研发利用现状及应用入侵植物修复的前景综述[J]. 生态科学, 2018, 37(3): 194. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.03.026.
- [7] 张家洋. 重金属铅镉短期胁迫对蓬莱蕉生理生化指标的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 340. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.02.059.
- [8] 陈良, 隆小华, 郑晓涛, 等. 镉胁迫下两种菊芋幼苗的光合作用特征及镉吸收转运差异的研究[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 60. DOI: 10.11686/cyxb20110608.
- [9] 陈伟, 张苗苗, 宋阳阳, 等. 重金属胁迫对4种草坪草种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 561. DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2013.03.022.
- [10] 王萍, 张兴旭, 赵晓静, 等. 重金属胁迫对醉马草生长及生理生化指标的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(6): 1080. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2013-0337.
- [11] 孙健, 铁柏清, 钱湛, 等. 单一重金属胁迫对灯心草生长及生理生化指标的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 12. DOI: 10.3321/j.issn:0564-3945.2007.01.028.
- [12] LIU J H, YAO Z G. Effect of Pb stress on seed germination and seedling growth of two weed species seeds[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(12): 2726. DOI: 10.16175/j.cnki.1009-4229.20161216.006.
- [13] CASTILLO O S, DASGUPTA S N, ALVARADO C J, et al. The effect of the symbiosis between *Tagetes erecta* L. (marigold) and *Glomus intraradices* in the uptake of copper (II) and its implications for phytoremediation[J]. New Biotechnology, 2011, 29(1): 156. DOI: 10.1016/j.nbt.2011.05.009.
- [14] 杨贤均, 刘可慧, 李艺, 等. 锰污染土壤对酸模叶蓼氮素代谢的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1776. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.018.
- [15] 王玲仙, 曾民, 陈玲, 等. 蜈蚣草快繁及其组培苗对砷的富集研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(3): 623. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2018.3.034.
- [16] 鲁传涛, 楚桂芬, 徐洪乐, 等. 河南省小麦田杂草发生现状调查[J]. 河南农业科学, 2016, 45(8): 91. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2016.08.017.
- [17] 强胜. 杂草学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [18] 赵雅曼, 陈顺钰, 李宗勋, 等. 酸、镉胁迫对金丝草种子萌发、幼苗生长及亚显微结构的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(12): 63. DOI: 10.11686/cyxb2019280.
- [19] 朱红霞, 赵红艳, 陈丽丽, 等. 铅镉胁迫下马齿苋的种子萌发和幼苗生理响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(3): 1. DOI: 10.11929/j.swfu.201905067.
- [20] 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): 56. DOI: 10.11929/j.swfu.201805041.
- [21] 侯晓龙, 刘爱琴, 蔡丽平, 等. Pb胁迫对富集植物金丝草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报, 2013, 33(5): 54. DOI: 10.3969/j.jssn.2095-1914.2013.05.009.
- [22] 徐恒恒, 黎妮, 刘树君, 等. 种子萌发及其调控的研究进展[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1141. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.01141.
- [23] 陶玲, 任珺, 祝广华, 等. 重金属对植物种子萌发的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增): 54. DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2007.z1.012.
- [24] 刘茵. Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 对黑麦草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(18): 3800. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2011.18.049.
- [25] 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): 797. DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2015.04.019.
- [26] 毛雪飞, 杨洁. 锌镉胁迫下4种农田杂草生理生化特性及对重金属的累积特征[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(6): 16. DOI: 10.11929/j.swfu.201903086.

责任编辑: 何承刚