

# 锌、镉胁迫对青稞种子萌发及幼苗生长的影响

李路<sup>1,2</sup>, 米玛<sup>2</sup>, 郭天麒<sup>1,3</sup>

(1. 省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室, 西藏 拉萨 850032; 2. 西藏自治区农牧科学院农业质量标准与检测研究所/西藏自治区农产品质量安全重点实验室, 西藏 拉萨 850032; 3. 嘉应学院, 广东 梅州 514015)

**摘要:** 为探究锌(Zn)与镉(Cd)对植物的联合毒性, 为降低青稞对Cd的吸收提供理论依据, 采用发芽试验, 研究了Zn、Cd单一胁迫和复合胁迫对青稞种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明: 在单一胁迫条件下, 10  $\mu\text{mol/L}$ 的Zn和0.5 mg/L的Cd对青稞种子萌发和幼苗生长均有促进作用; 100  $\mu\text{mol/L}$ 的Zn和20~50 mg/L的Cd则表现为抑制作用; Cd胁迫下, 青稞不同生长阶段与部位呈现出差异化响应: 相较于种子萌芽, 青稞幼苗生长对Cd胁迫的响应更为显著; 同时, 幼苗根部对Cd胁迫的敏感性高于地上部。在复合胁迫条件下, 青稞种子萌芽和幼苗发育整体表现出低浓度的协同效应和高浓度的拮抗效应, 表明Cd对青稞种子萌芽和幼苗发育的影响程度略大于Zn, 适量添加Zn能够减轻Cd对青稞生长的毒害作用。

**关键词:** 锌; 镉; 青稞; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: S19

文献标识码: A

## Effects of Zinc and Cadmium Stress on Seed Germination and Seedling Growth of Hulless Barley

LI Lu<sup>1,2</sup>, MI Ma<sup>2</sup>, GUO Tianqi<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hulless Barley and Yak Germplasm Resources and Genetic Improvement, Lhasa Xizang 850032, China; 2. Institute of Agricultural Product Quality Standard and Testing Research, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences / Key Laboratory of Quality of Safety of Agro-products of Xizang Autonomous Region, Lhasa Xizang 850032, China; 3. Jiaying University, Meizhou Guangdong 514015, China)

**Abstract:** To explore the combined toxicity of zinc (Zn) and cadmium (Cd) to plants and provide a theoretical basis for reducing Cd uptake by hulless barley, a germination experiment was conducted to investigate the effects of single and combined stresses of Zn and Cd on seed germination and seedling growth of hulless barley. The results showed that under single stress, 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Zn and 0.5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd promoted seed germination and seedling growth of hulless barley, while 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Zn and 20–50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd showed inhibitory effects. Under Cd stress, different growth stages and parts of hulless barley exhibited differential responses; seedling growth was more sensitive to Cd stress than seed germination, and seedling roots were more sensitive to Cd stress than shoots. Under combined stress, seed germination and seedling development of hulless barley showed synergistic effects at low concentrations and antagonistic effects at high concentrations. The effects of Cd on seed germination and seedling development of hulless barley were slightly greater than those of Zn, and appropriate addition of Zn could alleviate the toxic effects of Cd on the growth of hulless barley.

**Key words:** Zn; Cd; hulless barley; seed germination; seedling growth

近年来,随着工农业的快速发展和人类活动范围的进一步扩大,土壤重金属污染问题日益严

峻,2014年由环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤

收稿日期:2025-07-09

基金项目:省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室课题(XZNKY-CZ-2022-016-05);拉萨市中央引导地方科技发展资金项目(LSKJ202450);国家现代农业产业技术体系项目(CARS-05-02A-13);西藏自治区现代农业产业技术体系项目(XZARS-QK-2025-01);西藏自治区财政预算内项目(XZNKYZBS-2025-C-001)。

作者简介:李路(1991—),女,助理研究员,主要从事农业产地环境与农产品质量安全研究,E-mail:lianlude@163.com。

通信作者:郭天麒(1985—),男,讲师,主要从事植物激素调控和信号转导研究,E-mail:202001172@jyu.edu.cn。

总点位超标率为 16.1%<sup>[1-2]</sup>。污染土壤上作物的安全生产,直接关系到人民群众的身体与健康与生活质量。镉(Cd)作为典型的重金属污染物也是五大毒物之首,易被植物吸收积累,干扰细胞渗透调节与酶活性,进而产生毒性损害;锌(Zn)是植物生长的必需营养元素之一,参与众多关键的生理过程,在植物生命过程中扮演着不可或缺的重要角色,但当植物摄入的 Zn 超过一定范围后也会产生毒性效应,最终阻碍其生长进程<sup>[3]</sup>。Cd 与 Zn 同属一个副族,物理性质和化学性质相近,在植物吸收转运过程中存在竞争或协同作用,且该交互作用因作物种类、品种及元素浓度而异<sup>[4-6]</sup>。种子萌发和幼苗生长是植物生长的最初阶段,也是响应重金属胁迫最敏感的时期,其响应特征可在一定程度上直观反映出植物的抗逆能力。目前,关于 Cd、Zn 胁迫对作物生长的影响已有较多研究,但不同植物响应 Cd、Zn 胁迫的表现不尽相同,如黑麦草的发芽率、芽长、生物量均与 Cd、Zn 浓度存在负相关关系<sup>[7]</sup>;对 8 个品种的紫花苜蓿种子研究发现,部分品种的种子发芽参数随 Cd-Zn 复合水平的增加呈现先增大后减小的变化趋势,另一部分品种则呈现出了减小趋势<sup>[8]</sup>。

青稞是植物中能够适应高原环境的典型作物,亦是青藏高原地区的主要粮食作物,青稞的安全生产对藏区农牧民增收、农牧业稳定与发展都具有重要的战略意义,然而,当前关于 Zn、Cd 胁迫对青稞种子萌发和幼苗生长的影响研究仍较为匮乏,二者交互作用的特征及调控机制尚不明确。基于此,本研究以青稞为材料,研究 Zn、Cd 胁迫下青稞种子萌发和幼苗发育的变化特征,探讨 Zn、Cd 对青稞生长的影响,旨在为降低青稞对 Cd 的吸收提供理论依据,为 Cd 污染土壤可能的修复技术提供思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验材料选用春青稞“藏青 2000”,系省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室自繁留种。

### 1.2 试验设计与方法

试验设计参照白哲等<sup>[7]</sup>、辛绢<sup>[9]</sup>、罗巧玉等<sup>[10]</sup>相关研究并加以改进,共设 4 个 Zn 水平:1、

10、50、100  $\mu\text{mol/L}$ ,分别以 Zn 1、Zn 10、Zn 50、Zn 100 计;设 5 个 Cd 水平:0、0.5、5、20、50  $\text{mg/L}$ ,分别以 Cd 0、Cd 0.5、Cd 5、Cd 20、Cd 50 计;进行 Zn、Cd 复合作用,两两交互。选用  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为 Zn 源,选用  $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$  为 Cd 源,所用试剂为分析纯。各个处理分别设置 3 次重复,各重复随机排列。

选用大小相近、相对饱满的青稞种子,将其浸泡在 0.5% 的  $\text{NaClO}$  溶液中 30 min,超纯水冲洗 4 次,70% 乙醇杀菌 30 s,再用超纯水清洗 4 次,晾至种子表面无明显水渍。取半径为 4.5 cm、经高温消毒的培养皿,铺上双层滤纸,每个培养皿中放置 50 粒种子整齐排列,加入 10 mL 对应浓度的处理液,置到人工气候室培养,温度  $24 \pm 1^\circ\text{C}$ ,光照时长为每天 12 h,相对湿度 70%。试验期间,每日 17 时补充适量处理液,保持种子湿润但无溶液聚积。

### 1.3 测定项目及方法

本研究中的萌芽是以胚根长达到种子长的 1/2 作为基准,每日固定时间观察种子萌发状态,并统计萌芽数量,最终以连续 5 d 未出现新的种子萌芽界定为萌发结束<sup>[10]</sup>。各处理的青稞种子集中发芽时间为第 5 d,结束萌芽时间为第 19 d。萌芽完成后,从每个重复中任意选取 8 棵发芽青稞作为样本,其中发芽数量不足 8 棵的处理以实际数量计。然后,将其置于滤纸上吸干水分,记录胚根和胚芽长度、胚根和胚芽鲜质量。分析种子萌发的各项参数(发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数),公式如下所示<sup>[11-12]</sup>:

$$\text{发芽率} = \frac{\text{完成萌芽的种子数量}}{\text{用于试验的种子数量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽势} = \frac{5 \text{ 天内完成萌芽的种子数量}}{\text{用于试验的种子数量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数} = \sum(Gt/t) \quad (3)$$

式中:  $Gt$  为第  $t$  天的萌芽种子数量,  $t$  为相对应发芽天数,  $d$ 。

$$\text{活力指数} = GI \times S \quad (4)$$

式中:  $GI$  为发芽指数,  $S$  为对应时间内幼苗高度,  $\text{cm}$ 。

### 1.4 数据处理

相关试验数据使用 Excel 进行初步汇总, SPSS 20.0 进行分析,单因素方差分析采用 Duncan-test( $p < 0.05$ )法,作图软件为 Origin 2022。

Zn、Cd、青稞幼苗各参数的相关性分析采用皮尔森(Pearson)双尾检验法。

## 2 结果与分析

### 2.1 锌、镉胁迫对青稞种子萌发各项参数的影响

不同 Zn、Cd 条件下青稞种子萌芽情况有较大差异。单一 Cd 胁迫(Zn 1 处理)条件下,与 Cd 0 相比,Cd 0.5 和 Cd 5 处理均能一定程度提高青稞种子萌发参数,Cd 20 处理对青稞种子活力指数有显著降低效应,但对其他参数的影响并不显著,Cd 50 处理显著降低青稞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数,降幅分别为 72.88%、58.59%、62.84%、90.84%(表 1)。Zn 10、Zn 50、Zn 100 处理下,青稞种子萌发 4 项参数均随 Cd 浓度的提高呈现先缓慢增高后显著下降趋势,并在 Cd 0.5 或 Cd 5 处理条件下达到最大值,说明适量的 Cd(0.5~5 mg/L)能够一定程度促进种子萌发,但过量的 Cd(20~50 mg/L)对种子萌发

抑制作用显著。

单一 Zn 胁迫(Cd 0 处理)下,与 Zn 1 相比,Zn 10 处理下的青稞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均有所提高,增幅分别为 3.64%、8.08%、5.99%、4.58%,Zn 50 和 Zn 100 处理下青稞种子萌发各项参数均随 Zn 浓度的提高呈现下降趋势,各参数在 Zn 100 处理下的降幅分别为 6.35%、4.05%、7.64%、20.01%,表明 10 μmol/L 的 Zn 促进青稞种子萌发,50~100 μmol/L 的 Zn 抑制青稞种子萌发。Cd 0.5、Cd 5 处理下,青稞种子发芽率、发芽势随 Zn 水平的提高均表现为先升后降的变化特征,然而,发芽指数和活力指数却表现出下降的趋势。Cd 20 处理条件下,青稞种子的发芽率随 Zn 水平的提高呈现先上升后降的特征,其他 3 项参数则呈下降趋势。在 Cd 50 处理下,与 Zn 1 相比,Zn 10、Zn 50、Zn 100 处理均能够一定程度提高青稞种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数。

表 1 锌、镉胁迫下的青稞种子萌发各项参数变化

	处理	Cd 0	Cd 0.5	Cd 5	Cd 20	Cd 50
发芽率/%	Zn 1	73.33±1.76aA	79.01±3.52aA	75.78±6.64aA	67.33±5.70aA	33.33±6.57aB
	Zn 10	76.00±4.00aA	80.67±2.91aA	84.00±1.15aA	67.33±9.68aA	43.33±2.40aB
	Zn 50	70.00±3.46aAB	80.00±3.06aA	76.67±3.71aA	56.67±7.51aB	36.00±2.00aC
	Zn 100	68.67±2.67aA	69.33±5.93aA	75.33±5.81aA	48.67±2.40aB	35.33±6.36aC
发芽势/%	Zn 1	66.00±3.06aA	72.53±4.65aA	72.78±7.58aA	64.67±5.33aA	27.33±7.42aB
	Zn 10	71.33±2.91aA	74.00±6.11aA	76.67±0.67aA	62.00±8.08aA	37.33±2.40aB
	Zn 50	64.67±4.37aAB	70.67±2.40aA	70.67±3.71aA	54.67±6.36abB	28.00±1.15aC
	Zn 100	63.33±1.76aA	66.67±5.81aA	72.00±5.03aA	40.00±1.15bB	30.67±5.21aB
发芽指数	Zn 1	14.53±0.55abB	17.79±1.28aAB	18.66±0.99aA	15.00±1.19aB	5.40±0.81aC
	Zn 10	15.40±0.76aA	16.55±1.78aA	17.87±0.23aA	14.64±1.92aA	6.35±0.14aB
	Zn 50	14.24±0.45abAB	16.58±0.63aA	15.86±0.84abA	12.10±1.93abB	6.00±0.10aC
	Zn 100	13.42±0.28bA	14.10±0.91aA	14.20±1.43bA	8.85±0.44bB	6.19±1.14aB
活力指数	Zn 1	141.34±8.00abB	230.13±28.08aA	160.20±10.09aB	75.60±8.36aC	12.95±2.07aD
	Zn 10	147.82±14.46aB	219.30±16.09aA	142.23±6.92abB	66.66±10.83aC	15.25±0.45aD
	Zn 50	124.51±8.22abB	193.90±11.50abA	126.43±13.05bcB	52.88±9.16abC	14.69±0.53aD
	Zn 100	113.06±1.94bB	140.35±5.51bA	105.77±5.44cB	31.43±1.72bC	14.20±2.72aD

注:不同小写字母表示相同 Cd 浓度、不同 Zn 处理在  $p < 0.05$  水平下具有显著性差异;不同大写字母表示相同 Zn 浓度、不同 Cd 处理在  $p < 0.05$  水平下具有显著性差异。下同。

### 2.2 锌、镉胁迫对青稞幼苗生长发育的影响

同一 Zn 水平下,青稞幼苗地上部、根部生物量随 Cd 水平的升高呈先升后降的趋势,且与对照(Cd 0)相比,Cd 20、Cd 50 处理均呈现出显著性差异,且青稞根部生物量的下降幅度高于地上部,这表明过量的 Cd 能够显著抑制青稞幼苗生长,其对根部的影响相较于地上部来说更为显著(图 1)。同一 Cd 浓度下,青稞幼苗地上部和地下部生物量在不同 Zn 处理间的差异不显著,但

Zn 100 处理对青稞幼苗生物量有轻微抑制。

青稞胚根长度、胚芽长度变化特征与生物量基本保持一致(图 2)。

### 2.3 锌、镉污染与青稞各项参数间的相关性分析

Pearson 相关结果显示:Zn 与各项参数的相关系数绝对值均小于 0.3,且除发芽指数外,其他参数与 Zn 的相关性均不显著( $p > 0.05$ ),表明 Zn 对青稞幼苗生长和种子萌发的影响较弱(图 3)。相反,Cd 与各项参数均呈极显著负相关

( $p < 0.001$ ), 与各项参数的相关系数绝对值均大于 0.84, 表明 Cd 对青稞幼苗生长和种子萌发具有显著的抑制作用。与 Zn 相比, Cd 对青稞种子萌芽和幼苗发育的抑制效应更为显著。

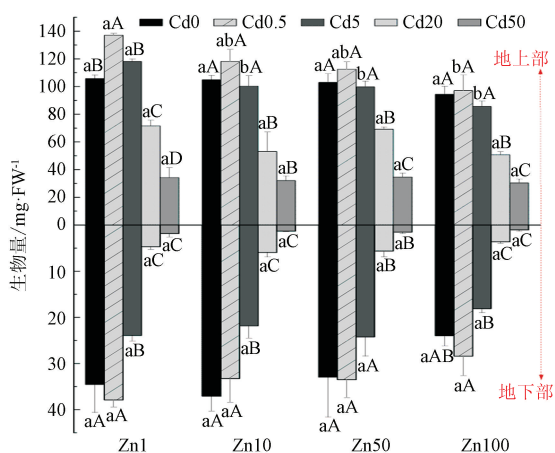


图1 锌、镉胁迫下的青稞幼苗生物量分析

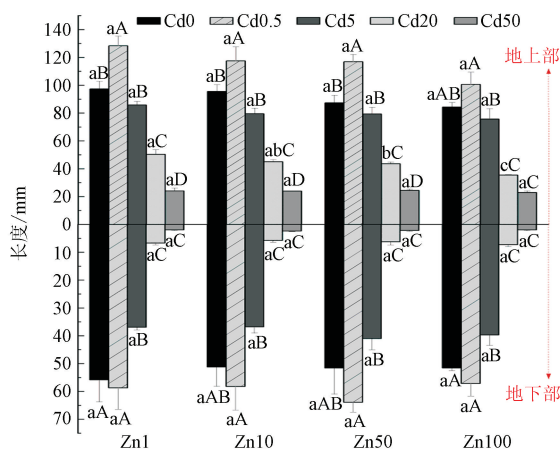
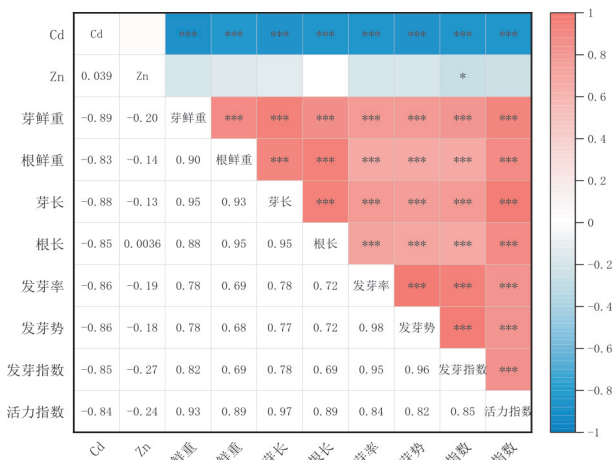


图2 锌、镉胁迫下的青稞幼苗长度分析



\* 表示  $p < 0.005$ , \*\* 表示  $p < 0.01$ ,

\*\*\* 表示  $p < 0.001$ ; 色柱表示相关系数; 数字表示 R 值

图3 Zn、Cd、青稞种子萌芽和幼苗发育各项参数间的相关性分析

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

种子萌发是植物恢复生理活性的关键过程,但同时又是植物最脆弱、易受生物和非生物胁迫的时期<sup>[8,13]</sup>。当植物受到重金属胁迫时,种子萌芽和幼苗发育情况与植物应对重金属的抗逆能力存在一定的关联,但不同植物及品种在重金属胁迫下的响应差异显著<sup>[14]</sup>。Zn 作为植物必需的微量元素,在超氧化物歧化酶的合成中占有十分重要的位置,此外,它还可以激活参与碳水化合物、蛋白质和核酸代谢的多种酶类,是植物生命过程中难以替代的重要组分,但是,当 Zn 含量超过一定阈值后,也会成为典型的重金属污染物<sup>[15-16]</sup>。研究发现,400~800 mg/kg 的 Zn 显著抑制黑麦草种子萌发<sup>[7]</sup>;对于粉黛乱子草,50 mg/L 的 Zn 促进种子萌发,但 Zn 浓度大于 200 mg/L 时则表现为显著的抑制作用<sup>[17]</sup>。本研究中,单一 Zn 胁迫时,10  $\mu\text{mol/L}$  的 Zn 能在一定程度提高青稞种子萌发各项参数,50~100  $\mu\text{mol/L}$  的 Zn 则会降低萌发指标,且 100  $\mu\text{mol/L}$  的 Zn 的抑制作用最为明显。这一结果表明,Zn 对青稞种子的萌发存在“低促高抑”的作用,与陈丽丽等<sup>[3]</sup>在小麦和杂草上的研究结论一致,推测低浓度的 Zn 能增强淀粉酶、蛋白酶等的活性,加速淀粉、蛋白质等储存物质的水解,为胚的生长供给足够的能量和营养物质,从而促进种子萌发,但高浓度的 Zn 引起青稞胚中积累过量的活性氧,影响了细胞的正常代谢与生理功能,最终抑制种子萌发<sup>[7,18]</sup>。Zn 对青稞幼苗生长的影响作用并不显著,可能与本研究中 Zn 的浓度相对较低有关;仅 100  $\mu\text{mol/L}$  的 Zn 对青稞幼苗生长表现为一定的抑制作用,推测该效应与其活力指数的显著下降相关。

众多研究结果显示,Cd 在植物种子萌芽、幼苗发育过程中主要表现强烈的抑制作用,甚至可导致植物死亡;然而,Cd 水平较低时,却能够在一定范围内对植物生长和发育产生促进效应。本研究中,单一 Cd 胁迫下,0.5~5 mg/L 的 Cd 促进青稞种子萌发,20 mg/L 的 Cd 显著降低青稞活力指数,50 mg/L 的 Cd 显著抑制青稞种子萌发,进一步验证了 Cd 对青稞生长同样具有“低促高抑”的效应<sup>[10]</sup>。0.5 mg/L 的 Cd 对青稞地上

部生物量和芽长有显著提高效应,但对根部生物量和根长的提高作用并不显著;5 mg/L的Cd对青稞幼苗发育呈现出一定的抑制效应;20~50 mg/L的Cd对青稞根部生物量和根长的抑制作用显著高于其对地上部生物量和芽长的影响。推测青稞对低浓度的Cd产生了“毒物兴奋效应”,加速了种子的新陈代谢,促进胚轴突破种皮,进而促进幼苗生长<sup>[19-20]</sup>;在种子萌发过程中,胚根最先突破种皮,与Cd直接接触的时间相对较长,能够吸收并累积更多的Cd,因此根部对Cd胁迫的响应较地上部更为敏感<sup>[21-22]</sup>。

Zn、Cd的联合作用是复杂的,且随植物类别、品系、胁迫水平的不同存在显著差异。张辉红等<sup>[23]</sup>研究发现,100  $\mu\text{mol/L}$ 和200  $\mu\text{mol/L}$ 的Zn可显著增强Cd胁迫下玉米幼苗的光合作用,从而缓解Cd对其生长的抑制效果。此外,在大麦、小麦、水稻等农作物中均发现了Zn对Cd毒害的缓解作用,二者表现为拮抗作用<sup>[24-26]</sup>。但也有研究表明,在油菜、玉米、番茄等植物中,Zn、Cd表现为协同作用<sup>[27-29]</sup>。本研究中,相较于Zn,青稞种子萌芽和幼苗发育对Cd胁迫的响应更为强烈。相同的Zn水平下,0.5 mg/L的Cd均能促进青稞种子萌发与幼苗发育;5 mg/L的Cd可促进种子萌发,但对幼苗发育表现出抑制作用;20~50 mg/L的Cd对种子萌发与幼苗发育过程均表现出抑制效应。从Zn的调控作用来看,低浓度Zn(10  $\mu\text{mol/L}$ )可在一定程度减轻Cd对青稞种子生长的毒性影响,但随Zn浓度的提高,其对Cd胁迫的缓解效应逐渐减弱。总体而言,Zn、Cd对青稞种子萌芽与幼苗发育的联合效应呈现出低浓度的协同作用、高浓度的拮抗作用。推测低浓度的Zn、Cd可通过影响青稞部分酶活性、植物激素水平、细胞膜透性,提高细胞代谢效率,进而促进青稞种子萌发和幼苗生长;而高浓度胁迫下,Zn、Cd竞争细胞内转运蛋白的结合位点,影响Zn的吸收和转运,破坏了青稞生理代谢平衡,最终抑制青稞种子萌发和幼苗生长,二者联合作用的具体机制有待在后续研究中进一步深入探讨<sup>[30-33]</sup>。

### 3.2 结论

单一Zn胁迫下,10  $\mu\text{mol/L}$ 的Zn对青稞种子萌发有促进作用,而100  $\mu\text{mol/L}$ 的Zn则抑制种子萌发,但两个浓度的Zn对青稞幼苗发育的

影响均较小。单一Cd胁迫下,0.5 mg/L的Cd可同时促进青稞种子萌发与幼苗生长,5 mg/L的Cd能促进青稞种子萌发,但会抑制幼苗生长,20~50 mg/L的Cd对青稞种子萌发与幼苗生长均表现为抑制作用。在Cd胁迫条件下,与幼苗生长相比,青稞种子萌芽的反应相对较弱;在幼苗发育阶段,相较于地上部,青稞根部的反应相对更强烈。Zn、Cd联合作用下,Cd对青稞种子萌芽和幼苗发育的作用远大于Zn;低浓度的Zn和Cd对青稞种子萌发与幼苗发育有促进效应,高浓度的Zn、Cd则呈现出相反的效果,表现为抑制作用。

总而言之,Zn的适量施用能够在一定程度上减轻Cd对青稞种子萌发和幼苗生长的毒害,为青稞抗Cd胁迫栽培提供技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 杜昊霖,王莺,王劲松,等.青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J].环境科学,2021,42(9):4422-4431.
- [2] 何林华,高小红.三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评价——以青海省玉树县为例[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1071-1080.
- [3] 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.
- [4] 史凯丽.镉对小白菜镉吸收积累的影响及其调控机制[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [5] LI T, YANG X, LU L, et al. Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1/2/3): 734-741.
- [6] YANG Y, CHEN W, WANG M, et al. Evaluating the potential health risk of toxic trace elements in vegetables: Accounting for variations in soil factors[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584-585: 942-949.
- [7] 白哲,董馨岚.镉、锌胁迫对黑麦草种子萌发及幼苗生长特性的影响[J].福建农业科技,2020(12):30-34.
- [8] 崔红慧,郝艳芹,李景柱,等.镉锌复合胁迫下不同品种苜蓿种子萌发特性[J].草业科学,2023,40(10):2571-2580.
- [9] 辛绢.镉高、低积累萝卜基因型筛选及其镉积累差异机理研究[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [10] 罗巧玉,周连玉,蒋礼玲,等.Cd胁迫对11个青稞品种种子萌发和幼苗生长的影响[J].分子植物育种,2021,19(11):3709-3719.

- [11] 罗巧芝.适宜于青藏高原种植的耐镉牧草品种筛选[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
- [12] 王文斌,金樑,李晶,等.不同 pH 条件下 CdCl<sub>2</sub>对紫花苜蓿种子萌发的胁迫效应[J].环境科学研究,2013,26(10):1095-1102.
- [13] NONOGAKI H, BASSEL G W, BEWLEY J D. Germination—still a mystery [J]. Plant Science, 2010, 179(6):574-581.
- [14] 姜韵佳,吴丽群,杨军丽,等.镉胁迫对稗草(*Echinochloa crusgalli*)种子萌发及幼苗生理指标的影响[J].分子植物育种,2019,17(9):3064-3072.
- [15] BROADLEY M R, WHITE P J, HAMMOND J P, et al. Zinc in plants [J]. New Phytologist, 2007, 173(4):677-702.
- [16] FIGUEROA J C A J. Zinc tolerance and accumulation in the salt-marsh shrub *Halimione portulacoides* [J]. Chemosphere, 2012, 86(9):867-874.
- [17] 许志敏,陈琳,刘燕珍,等. Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>胁迫对粉黛乱子草种子萌发及抗氧化特征影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2020,49(3):326-333.
- [18] 刘焱,张薇,刘鸣达.镉-苯并(a)芘单一及复合污染对小麦种子萌发的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(2):265-269.
- [19] AYDINALP C, MARINOVA S. The effects of heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*) [J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2009, 15(4):347-350.
- [20] 张春荣,李红,夏立江,等.镉、锌对紫花苜蓿种子萌发及幼苗的影响[J].华北农学报,2005(1):96-99.
- [21] 马敏,龚惠红,邓泓.重金属对8种园林植物种子萌发及幼苗生长的影响[J].中国农学通报,2012,28(22):206-211.
- [22] 杨龙.重金属 Cd、Zn 胁迫对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[D].兰州:兰州大学,2015.
- [23] 张辉红,魏畅,柳海涛,等.外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响[J].环境科学,2024,45(2):1128-1140.
- [24] WU F B, ZHANG G. Genotypic differences in effect of Cd on growth and mineral concentrations in barley seedlings. [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, 69(2):219-227.
- [25] 易青松.小麦品种间镉吸收差异及铁和锌对镉吸收的调控研究[D].成都:四川农业大学,2024.
- [26] 赵萍,瞿华香,张玉焯.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.
- [27] JAOUHRA C, CHAMSEDDINE M, WIDED B A, et al. Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) [J]. Journal of environmental sciences (China), 2011, 23(5):837-844.
- [28] PAULA C, MARIUSZ G Z, IGOR C. Phytoextraction of Cd and Zn as single or mixed pollutants from soil by rape (*Brassica napus*) [J]. Environmental science and pollution research international, 2016, 23(11):10693-10701.
- [29] NAN Z, LI J, ZHANG J, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. Science of the Total Environment, 2002, 285(1):187-195.
- [30] XIN Z Y, YAO Z, HANG S X, et al. Interactions between cadmium and nutrients and their implications for safe crop production in Cd-contaminated soils [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2023, 53(24):2071-2091.
- [31] TIAN S, LIANG S, QIAO K, et al. Co-expression of multiple heavy metal transporters changes the translocation, accumulation, and potential oxidative stress of Cd and Zn in rice (*Oryza sativa*) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 380:120853.
- [32] ZARE A A, KHOSHGOFTARMANESH A H, MALAKOUTI M J, et al. Root uptake and shoot accumulation of cadmium by lettuce at various Cd : Zn ratios in nutrient solution [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 148:441-446.
- [33] 肖彩霞,杨华,陈星旺,等.镉、锌、铅交互对水稻幼苗蓄积镉、锌、铅的影响[J].环境科学与技术,2024,47(8):76-86.