

研究报告

Research Report

Cd 胁迫对 11 个青稞品种种子萌发和幼苗生长的影响

罗巧玉¹ 周连玉¹ 蒋礼玲² 杨昊虹¹ 桂兰³ 张国婷¹ 马永贵^{1*}

¹ 青海师范大学生命科学学院, 青海省青藏高原药用动植物资源重点实验室, 西宁, 810008; ² 青海大学农科院作物所, 西宁, 810008; ³ 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁, 810008

* 通信作者, swxmyg@126.com

摘要 重金属污染土壤的修复治理工作迫在眉睫。为研究适合在青藏高原种植的 Cd 污染土壤修复植物, 以 11 个青稞品种为试验材料, 研究不同浓度 Cd (0, 5, 10, 20, 40, 80, 160 和 320 mg/L) 胁迫对青稞种子萌发情况及幼苗生长的影响。结果显示 (1) 重金属 Cd 对青稞种子萌发表现出低浓度 [ρ (CdCl₂)=20 mg/L] 促进和高浓度 (ρ (CdCl₂) \geq 80 mg/L) 抑制效应, Cd 胁迫对青稞幼苗生长过程的抑制效应强于种子萌发过程。(2) 11 个品种青稞种子耐 Cd 胁迫能力加权隶属函数 D 值依次为‘昆仑 14 号’>‘昆仑 10 号’>‘黑青稞’>‘柴青 1 号’>‘门农 1 号’>‘门源亮兰’>‘昆仑 15 号’>‘北青 3 号’>‘昆仑 12 号’>‘肚里黄’>‘北青 6 号’。结果表明: ‘昆仑 14 号’及‘昆仑 10 号’对重金属 Cd 的耐受性最强, 能较好地适应重金属土壤环境, 具有作为青藏高原地区 Cd 污染土壤修复植物的潜力。

关键词 青稞; Cd 胁迫; 种子萌发; 幼苗生长; 品种

Effects of Cd Stress on Different Varieties of *Hordeum vulgare* L. to Germination and Seedling Growth

Luo Qiaoyu¹ Zhou Lianyu¹ Jiang Liling² Yang Haohong¹ Gui Lan³ Zhang Guoting¹ Ma Yonggui^{1*}

¹ Key Laboratory of Medicinal Plant and Animal Resources of Qinghai-Tibet Plateau in Qinghai Province, Qinghai Normal University, Xining, 810008; ² Institute of Crops, Academy of Agricultural Sciences, Qinghai University, Xining, 810008; ³ Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008

* Corresponding author, swxmyg@126.com

DOI: 10.13271/j.mpb.019.003709

Abstract The remediation of heavy metal contaminated soil is extremely urgent. In order to study the Cd contaminated soil remediation plants suitable for planting on the Qinghai-Tibet Plateau, 11 barley varieties were used as experimental materials to study the effects of different concentrations of Cd (0, 5, 10, 20, 40, 80, 160 and 320 mg/L) stress on the seed germination and seedling growth of barley. The results are listed as follows, (1) Low concentration Cd treatment (ρ (CdCl₂)=20 mg/L) promoted the germination of barley seeds, and high concentration Cd treatment (ρ (CdCl₂) \geq 80 mg/L) inhibited the germination of barley seeds; seedling growth was significantly inhibited when ρ (CdCl₂) \geq 40 mg/L, so Cd stress on the growth of barley seedling was stronger than that of seed germination. In addition, the inhibitory effect of heavy metal Cd on radicle was more than that of germ. (2) For different varieties, the seed germination index were descending in the order of 'Kunlun NO.14'>'Kunlun NO.10'>'Hei'>'Chaiqing NO.1'>'Nongmen NO.1'>'Menyuanlianglan'>'Kunlun NO.15'>'Beiqing NO.3'>'Kunlun NO.12'>'Duli huang'>

基金项目: 本研究由第二次青藏高原综合科学考察研究项目(SQ2019QZKK2206)、青海省科技厅项目(2020-ZJ-Y40)和青海师范大学校级中青年科研基金项目(2018zr012)共同资助

引用格式: Luo Q.Y., Zhou L.Y., Jiang L.L., Yang H.H., Gui L., Zhang G.T., and Ma Y.G., 2021, Effects of Cd stress on different varieties of *Hordeum vulgare* L. to germination and seedling growth, *Fenzi Zhiwu Yuzhong* (Molecular Plant Breeding), 19(11): 3709-3719.

(罗巧玉, 周连玉, 蒋礼玲, 杨昊虹, 桂兰, 张国婷, 马永贵, 2021, Cd 胁迫对 11 个青稞品种种子萌发和幼苗生长的影响, 分子植物育种, 19(11): 3709-3719.)

'Beiqing NO.6'. The results show that: 'Kunlun No.14' and 'Kunlun No.10' have the strongest tolerance to Cd stress, which can adapt to the soil environment of heavy metals and have the potential to be used as a phytoremediation plant for Cd contaminated soil in the Qinghai Tibet plateau.

Keywords *Hordeum vulgare* L.; Cd stress; Germination; Seeding growth; Varieties

随着人类活动的加剧,土壤重金属污染问题日益突出,严重威胁地球生态系统健康(Lu et al., 2015)。镉(cadmium, Cd)是自然界中毒性最大的重金属元素之一,因其可移动性强、毒性大、污染面积广被称“五毒(Cd, Hg, Pb, Cr, As)”之首(Rai, 2016; Sankhla et al., 2016)。当 Cd 含量超过一定浓度时会破坏土壤生态系统稳定性,改变土壤微生物群落的多样性和丰富度,抑制微生物活性(Lata et al., 2018),改变植物根系系统,破坏叶片组织,影响植物的新陈代谢,阻碍植株的正常生长发育,甚至 Cd 浓度超过一定阈值时会导致植物死亡(Rai, 2016)。Cd 还能够通过食物链、呼吸和皮肤接触等途径进入体内,富集到一定浓度时危害动物和人类的神经、泌尿、心血管、内分泌、免疫等系统和器官(Skórzyńska-Polit et al., 2010; Sankhla et al., 2016)。

青藏高原地域辽阔,蕴藏着丰富的矿藏。截至 2011 年,西藏和青海已探明的 Cd、Pb、Zn、Ag 等金属资源矿床、矿点和矿化点分别达到 834 余处、42 余处(龙涛, 2013)。金属矿产资源的开发利用是国民经济和社会发展的重要物质基础。但是在大规模矿产开采、加工过程中会产生大量矿区废弃物,破坏自然生态系统,影响人类健康(Oliver and Gregory, 2015)。青藏高原分布着独特的生态系统类型和丰富珍稀的动植物资源,是全球生物多样性保护的重要区域之一(Yan et al., 2013);同时,高原冰冻圈和高寒环境条件下的生态系统十分脆弱,抗干扰能力极低,是亚洲乃至北半球环境变化的“敏感区”和“感应器”(Wang et al., 2015)。土壤一旦遭到污染,将很难在短期内恢复。已有研究表明,三江源区土壤中 Cd、As 和 Hg 存在较强的富集现象,其中 Cd、As 超出国家土壤环境质量一级标准(何林华和高小红, 2016)。因此,青藏高原也面临着重金属污染的危险。目前,关于青藏高原高原退化生态系统恢复与重建(Hu et al., 2016)、隆升与环境效应(Favre et al., 2015)、气候和冻土冰川变化(Song et al., 2015)等方面研究较多,但有关青藏高原重金属污染土壤修复问题尚未被广泛关注。一般的 Cd 超积累植物生长缓慢、生物量小,很多都不适宜在青藏高原地区生长。因此,研究适合青藏高原种植的重金属修复植物具有重要的生态价值和现实意

义。开展植物修复的首要工作是确保植物材料在重金属污染土壤上成功定植。种子萌发和幼苗生长是植物对外界环境有所反应的开始,也是对外界反应的敏感时期(Rajjou et al., 2012)。研究重金属胁迫对种子萌发的影响是探索植物修复材料的基础。

青稞(*Hordeum vulgare* L.)为禾本科大麦属大麦种的变种,是青藏高原最具特色的植物之一(Pan et al., 2007)。青稞有 3 500 年的栽培历史,是青藏高原极端环境条件下植物适应性的典型代表。青稞根系发达、分枝多、生物量大,具有重要的经济、科研和生态价值(孟亚雄等, 2015)。本课题组通过研究不同浓度 Cd 胁迫对 11 个青稞品种种子萌发和幼苗生长的影响,探讨青稞种子对 Cd 胁迫的响应机理,挑选具有修复青藏高原地区重金属污染土壤潜力的青稞品种,以期利用青稞开展 Cd 污染土壤的植物修复工作提供理论依据。

1 结果与分析

1.1 青稞种子萌发特性

培养 1 d 后青稞种子开始萌发,第 3 天集中萌发,4 d 后新萌发种子变少。第 14 天观察青稞种子形态发现 $\rho(\text{CdCl}_2) \leq 20 \text{ mg/L}$ 处理中,随着 CdCl_2 浓度升高,青稞种子的须根数量及长度明显增加,表明低浓度 CdCl_2 能促进青稞种子须根生长。当 $\rho(\text{CdCl}_2)$ 为 80 mg/L 时,对青稞种子的须根生长和芽生长均产生了明显的抑制效应。随着 CdCl_2 浓度的进一步升高,青稞种子表现为须根数目减少、缩短变粗,颜色由嫩白转黄,有的根系腐烂,甚至出现不长根的状况。

青稞品种、 $\rho(\text{CdCl}_2)$ 处理及其互作均对青稞种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数具有极显著影响($P < 0.001$) (表 1)。由结果可见,未施 Cd 的品种 H、N1 的发芽率最高,C1、K14、K15 的发芽率次之。当 CdCl_2 的浓度较低时,青稞种子的发芽率较高,随着 CdCl_2 浓度升高,发芽率呈现先升高后降低的趋势, $\rho(\text{CdCl}_2)$ 为 20 mg/L 时青稞种子的发芽率最高, $\rho(\text{CdCl}_2)$ 高于 20 mg/L 时,发芽率呈现下降趋势,说明 $\rho(\text{CdCl}_2)$ 为 20 mg/L 时对青稞种子发芽率具有促进作用。当 $\rho(\text{CdCl}_2)$ 为 240 mg/L 时各品种青稞种子的发芽率均极低,当 $\rho(\text{CdCl}_2)$ 达到 320 mg/L

表 1 品种和 ρ (CdCl_2)及其互作对青稞种子萌发参数的影响Table 1 Effects of varieties and ρ (CdCl_2) on the germination parameters of barley seed by double factor analysis of variance

变量来源	发芽率	发芽势	发芽指数	活力指数
Sources of variation	Germination rate	Germination potential	Germination index	Vigor index
品种 \square	***	***	***	***
Varieties \square				
ρ (CdCl_2) \square	***	***	***	***
品种 $\times\rho$ (CdCl_2) \square	***	***	***	***
Varieties $\times\rho$ (CdCl_2)				

注: 品种 $\times\rho$ (CdCl_2)为青稞品种和不同质量浓度 CdCl_2 处理的交互作用; ***: $P<0.001$

Note: Varieties $\times\rho$ (CdCl_2) is the interaction between highland barley varieties and CdCl_2 treatment; ***: $P<0.001$

时发芽率受到显著抑制作用。

根据不同 ρ (CdCl_2)处理条件下青稞种子的发芽率(表 2) ,对于未进行 Cd 处理的青稞种子 ,不同品种发芽势的高低顺序为 $H>N1>K14>M>C1>D>K15>K12>B6>B3>K10$ 。不同品种间 CdCl_2 浓度对发芽势的影响作用虽然存在差异 ,但总体来说 ,随着 CdCl_2 浓度的升高 ,种子发芽势呈现先升高后降低趋势。当 CdCl_2 的浓度较低即 ρ (CdCl_2)为 5、10、20 mg/L 时种子发芽势较高 ,当 ρ (CdCl_2)为 20 mg/L 时除品种 M 和 K10 以外所有品种的发芽势均最高($P<0.01$)。随着 ρ (CdCl_2)升高发芽势逐渐降低 ,当 ρ (CdCl_2)达到 320 mg/L 时各品种青稞种子的发芽势均受到显著的抑制作用。

通过不同 ρ (CdCl_2)处理条件下青稞种子的发芽势(表 3)可知 ,未施加 Cd 的青稞种子 ,不同品种的发芽指数高低顺序依次为 $K14>D>H>N1>C1>K12>M>B6>K15>B3>K10$ 。品种 N1、M、D、K12、B6 在 CdCl_2 浓度为 5、10、20、40 mg/L 时的发芽指数显著高于 80、160、240、320 mg/L 时的发芽指数($P<0.05$)。 CdCl_2 浓度低于 20 mg/L 时 ,发芽指数随着 CdCl_2 浓度的升高而减小 , ρ (CdCl_2)为 20 mg/L 时 ,发芽指数达到最大值。 CdCl_2 浓度为 240 mg/L 时 ,发芽指数显著降低 ,当 CdCl_2 浓度为 320 mg/L 时 ,发芽指数最小。

从结果可知(表 4) ,未施加 Cd 的青稞种子 ,不同品种的发芽指数高低顺序依次为 $K14>D>K12>N1>H>B6>C1>M>K15>B3>K10$ 。品种 N1、M、D、K12、B6 在 CdCl_2 浓度为 5、10、20、40 mg/L 时的发芽指数显著高于 80、160、240、320 mg/L 时的发芽指数($P<0.05$)。 CdCl_2 浓度低于 20 mg/L 时 ,发芽指数随着 CdCl_2 浓度升高而减小 , ρ (CdCl_2)为 20 mg/L 时 ,发芽指数达到最大值。 CdCl_2 浓度为 240 mg/L 时 ,发芽指数显著降低 ,当 CdCl_2 浓度为 320 mg/L 时 ,发芽指数最小。

由不同 ρ (CdCl_2)处理条件下青稞种子的活力指数(表 5)可知 ,未进行 Cd 处理的 11 个青稞种子的活力指数大小依次为 $B6>K14>N1>D>C1>M>K15>K12>B3>H>K10$ 。随着 ρ (CdCl_2)浓度的升高 ,活力指数呈现降低趋势。不加 Cd 处理的对照组青稞种子的活力指数显著高于 Cd 处理组($P<0.05$)。当 ρ (CdCl_2)为 160 mg/L 时 ,活力指数降低显著。当 ρ (CdCl_2)达到 320 mg/L 时 ,11 个品种青稞的活力指数均达到最小。

1.2 青稞幼苗生长特性

根据不同 ρ (CdCl_2)处理条件下青稞种子的胚芽/根长及胚芽/根鲜重(图 1)可以看出 ,青稞品种对幼苗根重和芽重的影响极显著影响($P<0.001$) , CdCl_2 浓度处理及品种与 CdCl_2 浓度互作处理对青稞幼苗生长指标根长、芽长、根重、芽重均产生极显著影响($P<0.001$)。未进行 Cd 处理的 11 个青稞种子的根长依次为 $B6>B3>M>D>C1>K15>K10>N1>K14>K12>H$,芽长依次为 $B6>B3>N1>K14>K15>D>C1>M>K12>H>K10$ 。进行 Cd 处理后青稞种子的根长和芽长受到明显抑制作用($P<0.05$)。随着 CdCl_2 浓度的升高 ,抑制作用增强。当 ρ (CdCl_2)为 40 mg/L 时 ,品种 H 的根长极短 ,受到显著抑制效应。当 ρ (CdCl_2)达到 160 mg/L 甚至更高时 ,几乎所有青稞品种的根长和芽长均受到显著抑制。未施加 Cd 条件下的 11 个青稞幼苗的根鲜重依次为 $C1>M>K15>D>N1>B6>K10>K12>K14>H>B3$,芽鲜重依次为 $N1>B6>D>M>C1>K10>B3>K12>K14>K15>H$ 。进行 Cd 处理后青稞幼苗的根鲜重和芽鲜重受到明显抑制作用($P<0.05$)。随着 Cd 处理浓度升高 ,Cd 毒害对青稞幼苗的抑制作用增强 ,且对青稞种子根鲜重的抑制作用更显著。当 ρ (CdCl_2)为 40 mg/L 时 ,品种 H 的根和芽鲜重显著降低。当

ρ (CdCl_2)达到 160 mg/L 甚至更高时,11 个青稞品种的根鲜重和芽鲜重均受到显著抑制,当 ρ (CdCl_2)为 320 mg/L 时,严重抑制青稞幼苗根的生长,有的甚至出现不长根的情况。

1.3 不同品种青稞种子耐 Cd 能力综合评价

品种、 ρ (CdCl_2)处理及其互作均对青稞种子耐Cd能力有极显著影响($P<0.001$) (表 6)。不同 ρ (CdCl_2)处理下,青稞种的 Cd 毒害指数显示,品种 C1、K15 对 Cd 毒害敏感性最强,在所有 Cd 处理下其 Cd 毒害指数均为负值(表 7)。当 ρ (CdCl_2)较低时,Cd 对 H、N1、K14 等 9 个品种青稞种子的萌发具有促进效应,且随 Cd 浓度增大,对其促进效应增大;当 ρ (CdCl_2)为 20 mg/L 时,促进效应最显著($P<0.05$) 随着 CdCl_2 浓度继续增大,对青稞种子萌发产生抑制效应;当 ρ (CdCl_2)为 240 mg/L 时,所有品种青稞种子均受到极显著抑制效应。

根据标准差系数赋予权重法综合评价,品种 K14 加权隶属函数值最大为 1.20,品种 B6 加权隶属函数值最小为 -6.53。不同品种青稞种子耐 Cd 能力综合能力次为 $\text{K14}>\text{K10}>\text{H}>\text{C1}>\text{N1}>\text{M}>\text{K15}>\text{B3}>\text{K12}>\text{D}>\text{B6}$ (图 2)。

2 讨论

植物修复是解决土壤重金属污染问题的有效手段。现有的超富集植物大多生物量小,生长缓慢,具有地域性,适于青藏高原地区 Cd 污染土壤的修复植物很少。因此,“环保育种”已经成为当下育种工作的新方向。环保育种是应用传统和现代育种技术培育出能够富集或耐受重金属的植物新品种以用于重金属污染土壤的植物修复工作(吴大付等, 2013)。青稞是青藏高原极端环境条件下植物适应性进化的典型代表,拥有悠久的驯化栽培历史(Pan et al., 2007),其须根系统发达,具有抗逆性强、分蘖能力强、地上生

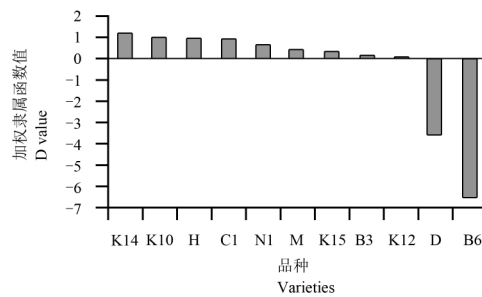


图 2 标准差系数赋予权重法综合评价

Figure 2 The comprehensive evaluation of standard deviation coefficient allocation weighted method

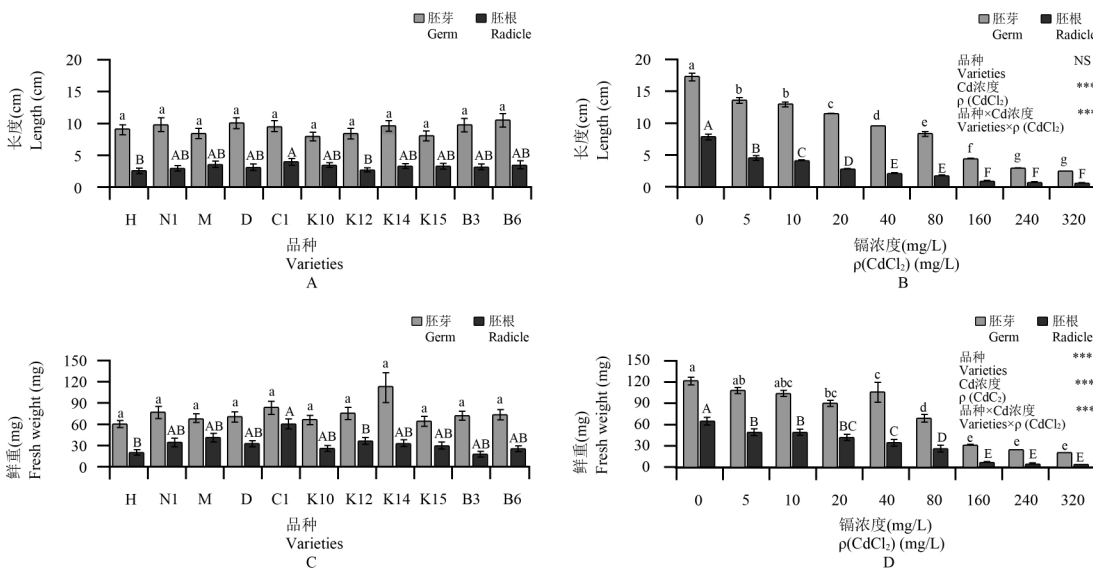


图 1 不同 ρ (CdCl_2)处理条件下青稞种子的胚芽/根长(cm)和胚芽/根鲜重(mg)

注: A: 不同青稞种子的胚芽/根长; B: 不同 Cd 处理条件下青稞种子的胚芽/根长; C: 不同青稞种子的胚芽/根鲜重; D: 不同 Cd 处理条件下青稞种子的胚芽/根鲜重; 图中数据为平均值 \pm 标准误($n=5$); 不同小写字母表示青稞种子的胚芽长度/鲜重间差异性显著($P<0.05$); 不同大写字母表示青稞种子的根长度/鲜重间差异性显著($P<0.05$); F-test, $P>0.05$; ***: $P<0.001$; NS: 无显著性

Figure 1 The germ and radicle length/weight of the barley seed under the condition of different ρ (CdCl_2)

Note: The data is mean \pm standard error ($n=5$); Different lowercase letters indicated that the difference of germ length/fresh weight of highland barley seeds was significant ($P<0.05$); Different capital letters indicated that the root length/fresh weight of highland barley seeds was significantly different ($P<0.05$); F-test, $P>0.05$; ***: $P<0.001$; NS: No significance

表2 不同 ρ (CdCl₂)处理条件下青稞种子的发芽率Table 2 The germination rate of the barley seed under the condition of different ρ (CdCl₂)

品种 Varieties	ρ (CdCl ₂) (mg/L)								
	0	5	10	20	40	80	160	240	320
H	96.00±1.79 ^{abA}	98.40±0.98 ^{aA}	97.60±0.98 ^{aA}	97.60±1.60 ^{aA}	97.60±0.98 ^{aA}	98.40±0.98 ^{aA}	98.40±0.98 ^{aA}	89.60±3.25 ^{cD}	91.20±2.33 ^{bA}
NI	96.00±2.19 ^{aA}	97.60±1.60 ^{aB}	98.40±0.98 ^{cD}	98.40±1.60 ^{aA}	91.20±3.20 ^{aBC}	86.40±5.60 ^{aB}	68.80±6.62 ^{bCDE}	64.80±7.63 ^{BE}	60.00±2.83 ^{bBCD}
M	83.20±2.33 ^{abc}	92.00±3.10 ^{aBC}	92.00±5.06 ^{aB}	86.40±5.00 ^{aBC}	84.00±4.00 ^{bCDE}	60.00±3.58 ^{bd}	68.00±1.79 ^{bCDE}	60.80±2.33 ^{BB}	64.00±4.56 ^{BB}
D	84.00±4.56 ^{abc}	86.40±5.46 ^{abc}	86.40±2.04 ^{abc}	90.40±2.04 ^{abc}	91.20±1.96 ^{aABC}	80.80±3.67 ^{abc}	81.60±5.15 ^{abc}	59.20±2.94 ^{bBCD}	62.40±4.12 ^{bBC}
C15	92.80±1.50 ^{aB}	86.40±2.71 ^{abBC}	80.80±6.86 ^{bA}	84.00±1.26 ^{abCDE}	81.60±2.04 ^{bCDE}	77.60±1.60 ^{bABC}	69.60±2.04 ^{dCDE}	75.20±3.44 ^{cdBCD}	60.00±4.00 ^{abCD}
K10	62.40±2.99 ^{abcd}	59.20±5.57 ^{bE}	70.40±4.12 ^{abcd}	78.40±3.92 ^c	72.80±6.12 ^{abE}	71.20±5.85 ^{abCD}	65.60±7.11 ^{abCDE}	50.40±6.14 ^{cA}	31.20±7.20 ^{dE}
K12	75.20±2.65 ^{abc}	84.00±2.53 ^{cd}	79.20±2.94 ^{abcd}	78.40±9.00 ^{abc}	76.00±3.35 ^{abDE}	77.60±6.27 ^{abBC}	64.00±4.38 ^{bCDE}	55.20±4.80 ^{cdE}	44.80±2.94 ^{dE}
K13	92.80±1.50 ^{aB}	90.40±3.71 ^{aABC}	96.00±1.26 ^{aB}	94.40±3.71 ^{aAB}	92.80±2.33 ^{aB}	96.00±2.19 ^{aA}	92.00±1.79 ^{aB}	91.20±3.44 ^{cdE}	71.20±2.94 ^{BB}
K13	85.60±2.40 ^{aBC}	74.40±2.71 ^{abd}	76.00±4.20 ^{abcd}	77.60±4.83 ^{abc}	80.80±2.33 ^{abCDE}	70.40±5.74 ^{abCD}	76.00±6.45 ^{abcd}	66.40±4.31 ^{bA}	58.40±8.16 ^{abcd}
B3	80.80±3.20 ^{ac}	82.40±4.49 ^{abcd}	86.40±1.60 ^{abc}	86.40±2.71 ^{aABC}	59.20±6.50 ^{BF}	66.40±6.01 ^{bcd}	64.80±3.44 ^{dDE}	56.80±3.88 ^{abC}	56.00±8.29 ^{bBCD}
B6	78.40±7.76 ^{bc}	89.60±2.71 ^{abABC}	94.80±1.16 ^{aB}	89.60±2.71 ^{abABC}	85.60±3.25 ^{abBCD}	87.20±6.25 ^{abAB}	58.40±4.12 ^{dE}	42.40±7.76 ^{acDE}	47.20±4.45 ^{abcd}

注:表中数据为平均值±标准误(n=5);不同大写字母表示同一浓度Cd处理条件下不同品种间差异性显著(P<0.05);不同小写字母表示同一品种下不同浓度Cd处理间差异性显著(P<0.05)

Note: The data is mean±standard error (n=5); Different capital letters indicate significant difference between different varieties under the same concentration of Cd (P<0.05); Different lowercase

letters indicate significant difference between different concentrations of Cd in the same variety (P<0.05)

表3 不同 ρ (CdCl₂)处理条件下青稞种子的发芽率Table 3 The germination potential of the barley seed under the condition of different ρ (CdCl₂)

品种 Varieties	ρ (CdCl ₂) (mg/L)								
	0	5	10	20	40	80	160	240	320
H	95.20±2.33 ^{abA}	98.40±0.98 ^{aA}	97.60±0.98 ^{aA}	97.60±1.60 ^{aA}	95.20±1.50 ^{abA}	98.40±0.98 ^{aA}	98.40±0.98 ^{aA}	88.80±2.94 ^{abC}	90.40±2.04 ^{bA}
NI	88.80±5.57 ^{aB}	94.40±3.49 ^{aB}	96.80±1.50 ^{bCD}	96.80±1.50 ^{aB}	84.00±4.56 ^{aBC}	81.60±9.26 ^{abBC}	67.20±6.50 ^{bBC}	61.60±7.33 ^d	55.20±5.28 ^{BC}
M	83.20±2.33 ^{abBC}	91.20±4.96 ^{aABC}	78.40±9.85 ^{bBCD}	83.20±4.96 ^{abBCD}	87.20±4.08 ^{aBC}	52.00±3.58 ^{DEFG}	69.60±2.40 ^{bBC}	60.80±2.33 ^{cdB}	63.20±4.08 ^{cdB}
D	80.00±5.51 ^{abBC}	72.80±11.48 ^{bcdDEF}	84.00±2.83 ^{abBC}	85.60±4.49 ^{abBCD}	86.40±3.71 ^{aBC}	66.00±8.87 ^{bCDEFG}	77.60±4.49 ^{abB}	56.80±3.67 ^{abC}	59.20±4.27 ^{abBC}
C15	83.20±3.20 ^{aBC}	80.00±1.79 ^{bCDE}	75.20±5.99 ^{aA}	78.40±2.04 ^{cd}	78.40±4.83 ^{aBC}	77.60±1.60 ^{bCDE}	66.40±2.04 ^{bBC}	66.40±3.92 ^{bBC}	57.60±4.83 ^{BC}
K10	40.80±4.63 ^{cd}	47.20±6.37 ^{cdE}	67.20±3.88 ^{bd}	68.80±8.89 ^{bd}	49.60±8.63 ^{abcd}	63.20±4.96 ^{abFG}	48.80±7.94 ^{abcd}	40.00±6.81 ^{cdA}	25.60±5.15 ^{DE}
K12	74.40±2.71 ^{bc}	77.60±3.25 ^{abCDE}	76.80±3.20 ^{bCD}	77.60±8.82 ^{cd}	75.20±3.88 ^{abBC}	76.00±4.90 ^{abCDE}	61.60±3.25 ^{bCD}	54.40±4.49 ^{cdB}	44.80±2.94 ^{cd}
K14	88.00±2.19 ^{aB}	89.60±3.71 ^{aBCD}	89.60±4.31 ^{aB}	92.00±5.22 ^{aBC}	92.00±2.19 ^{aB}	92.80±3.20 ^{aB}	91.20±1.50 ^{aA}	91.20±3.44 ^{abCD}	71.20±2.94 ^{BB}
K15	76.80±4.63 ^{bc}	65.60±4.66 ^{BE}	69.60±5.00 ^{bCD}	68.80±5.85 ^{bd}	72.80±4.96 ^{cd}	64.00±5.66 ^{bcDEFG}	72.00±5.80 ^{abBC}	60.80±4.63 ^{abA}	55.20±6.12 ^{bBC}
B3	52.00±2.83 ^{bd}	74.40±5.31 ^{abDEF}	76.00±3.10 ^{bCD}	77.60±3.71 ^{cd}	39.20±10.69 ^{cd}	47.20±3.88 ^{bcG}	61.60±4.49 ^{abcd}	49.60±4.83 ^{bBC}	55.20±8.71 ^{bBC}
B6	72.00±7.04 ^c	82.40±4.49 ^{aBCDE}	82.40±3.88 ^{bc}	80.80±3.44 ^{bBCD}	80.00±5.51 ^{aBC}	80.80±7.63 ^{abcd}	48.80±5.12 ^{bd}	40.00±7.38 ^{cd}	36.00±6.69 ^{DE}

注:表中数据为平均值±标准误(n=5);不同大写字母表示同一浓度Cd处理条件下不同品种间差异性显著(P<0.05);不同小写字母表示同一品种下不同浓度Cd处理间差异性显著(P<0.05)

Note: The data is mean±standard error (n=5); Different capital letters indicate significant difference between different varieties under the same concentration of Cd (P<0.05); Different lowercase

letters indicate significant difference between different concentrations of Cd in the same variety (P<0.05)

表 4 不同 ρ (CdCl_2) 处理条件下青稞种子的发芽指数Table 4 The germination index of the barley seed under the condition of different ρ (CdCl_2)

品种 Varieties	ρ (CdCl_2) (mg/L)								
	0	5	10	20	40	80	160	240	320
H	7.05±0.38 ^{aB}	7.79±0.19 ^{aA}	7.75±0.11 ^{aA}	8.02±0.16 ^{aA}	7.96±0.10 ^{bA}	7.97±0.11 ^{aA}	8.35±0.25 ^{aA}	7.24±0.16 ^{cC}	7.55±0.12 ^{bA}
NI	7.11±0.28 ^{aB}	7.65±0.24 ^{aA}	7.63±0.10 ^{aCD}	7.53±0.18 ^{aAB}	7.17±0.40 ^{aAB}	7.16±0.67 ^{aAB}	5.49±0.51 ^{BD}	5.49±0.51 ^{BD}	5.11±0.59 ^{BB}
M	6.50±0.24 ^{aBC}	7.22±0.37 ^{aAB}	7.38±0.25 ^{aAB}	6.98±0.46 ^{aBC}	6.60±0.37 ^{aABC}	4.78±0.30 ^{cD}	5.50±0.24 ^{BC}	4.82±0.27 ^{bC}	5.07±0.36 ^{BB}
D	8.02±0.59 ^{aB}	6.36±0.96 ^{aBC}	5.93±0.38 ^{abBCD}	6.90±0.65 ^{aBC}	6.75±0.51 ^{aAB}	4.95±0.84 ^{aBC}	7.32±0.43 ^{AB}	4.96±0.44 ^{cC}	5.12±0.37 ^{BB}
C1	6.64±0.28 ^{aBC}	6.02±0.23 ^{abBC}	5.84±0.53 ^{abCA}	6.11±0.21 ^{abCD}	6.47±0.34 ^{abCD}	5.59±0.18 ^{bABC}	5.30±0.32 ^{cCD}	5.32±0.32 ^{cC}	4.46±0.34 ^{BB}
K10	4.15±0.37 ^{bd}	4.50±0.45 ^{abcd}	5.41±0.27 ^{abd}	5.92±0.60 ^{aCD}	3.93±0.65 ^{abcd}	4.98±0.44 ^{aCD}	4.17±0.67 ^{abcd}	3.38±0.53 ^{aC}	2.37±0.56 ^{DD}
K12	7.17±0.40 ^{aBC}	7.46±0.40 ^{aB}	7.51±0.44 ^{aBC}	7.37±0.86 ^{aBCD}	7.47±0.38 ^{aABC}	7.36±0.50 ^{aB}	7.10±0.44 ^{abBC}	5.79±0.53 ^{bd}	4.97±0.34 ^{aBC}
K13	8.70±0.26 ^{abA}	7.64±0.16 ^{aB}	8.10±0.49 ^{bCA}	8.40±0.44 ^{aA}	8.22±0.24 ^{abCA}	8.09±0.35 ^{abCA}	9.89±0.25 ^{abA}	10.00±0.5 ^{abC}	7.22±0.20 ^{aA}
K15	5.73±0.18 ^{aC}	4.83±0.19 ^{abcd}	4.95±0.26 ^{abcd}	5.30±0.33 ^{abd}	5.16±0.39 ^{abC}	4.56±0.37 ^{bCD}	5.38±0.31 ^{abC}	4.49±0.31 ^{bCA}	3.99±0.53 ^{aBC}
B3	4.21±0.15 ^{abcd}	5.07±0.25 ^{abc}	5.09±0.12 ^{abd}	5.28±0.18 ^{aCD}	3.23±0.69 ^{bd}	3.67±0.30 ^{abd}	5.03±0.47 ^{abcd}	4.23±0.37 ^{abC}	4.20±0.66 ^{bbdBC}
B6	6.87±0.98 ^{aBC}	6.96±0.59 ^{aB}	7.60±0.65 ^{aA}	6.30±0.50 ^{abCD}	6.18±0.51 ^{ab}	6.34±0.72 ^{ab}	4.41±0.43 ^{BD}	3.36±0.61 ^{bCD}	3.22±0.44 ^{bCD}

注:表中数据为平均值±标准误(n=5);不同大写字母表示同一浓度 Cd 处理条件下不同品种间差异性显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一品种下不同浓度 Cd 处理间差异性显著($P<0.05$)Note: The data is mean±standard error (n=5); Different capital letters indicate significant difference between different varieties under the same concentration of Cd ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations of Cd in the same variety ($P<0.05$)表 5 不同 ρ (CdCl_2) 处理条件下青稞种子的活力指数Table 5 The vigor index of the barley seed under the condition of different ρ (CdCl_2)

品种 Varieties	ρ (CdCl_2) (mg/L)								
	0	5	10	20	40	80	160	240	320
H	129.20±15.86 ^{ab}	121.20±7.91 ^{abB}	136.20±3.95 ^{aA}	118.00±5.02 ^{aB}	87.40±5.57 ^{baB}	84.00±6.69 ^{ba}	57.60±8.15 ^{aA}	32.20±4.84 ^{abC}	25.80±1.71 ^{aA}
NI	203.80±15.88 ^{abB}	150.00±12.90 ^{ba}	136.20±7.50 ^{ba}	112.20±7.21 ^{abc}	79.60±4.20 ^{db}	68.33±10.33 ^{abBC}	19.00±3.79 ^{ab}	10.40±2.01 ^{cd}	12.40±1.99 ^{abcd}
M	154.80±7.27 ^{cd}	141.40±11.03 ^{aA}	111.60±7.38 ^{aA}	94.20±7.28 ^{bCDE}	80.00±8.07 ^{cb}	43.00±3.35 ^{dDE}	28.20±2.37 ^{abB}	15.00±2.39 ^{ab}	12.60±1.21 ^{abCD}
D	200.00±9.25 ^{BC}	126.20±16.51 ^{baB}	99.40±6.82 ^{baB}	93.20±8.80 ^{abC}	98.20±7.78 ^{ba}	61.40±13.76 ^{abBC}	48.40±5.36 ^{aA}	19.00±1.64 ^{abCD}	17.00±1.14 ^{abC}
C1	165.80±11.14 ^{abCD}	95.80±3.31 ^{bBCD}	89.20±8.03 ^{bBCD}	92.40±5.17 ^{bCDE}	82.80±3.28 ^{aB}	77.00±6.27 ^{aB}	26.60±2.68 ^B	20.20±1.50 ^{abD}	10.60±1.29 ^{abD}
K10	82.60±8.51 ^{de}	80.80±9.04 ^{abD}	86.60±9.28 ^{ad}	73.00±11.96 ^{de}	32.60±5.53 ^{bd}	45.40±6.03 ^{bCDE}	28.20±5.89 ^{baB}	13.60±1.78 ^{abA}	9.80±2.46 ^{bd}
K12	142.40±15.51 ^{ad}	132.00±7.51 ^{abAB}	84.00±15.27 ^{abAB}	108.80±14.64 ^{abCD}	85.80±4.53 ^{abB}	77.20±6.27 ^{abB}	35.20±2.27 ^{ab}	21.60±3.11 ^{abCD}	12.40±1.21 ^{cd}
K14	224.40±9.20 ^{aB}	131.20±10.16 ^{baB}	150.80±13.77 ^{baB}	137.00±7.02 ^{ba}	93.00±3.44 ^{aB}	87.80±3.80 ^{aA}	57.00±4.21 ^{aA}	41.40±2.50 ^{abBC}	18.60±1.44 ^{ab}
K15	142.80±7.23 ^{cd}	80.00±6.34 ^{bD}	67.20±4.33 ^{bcd}	70.80±4.49 ^{de}	54.20±6.35 ^{cC}	36.80±3.15 ^{de}	28.40±2.64 ^{abB}	17.80±1.98 ^{abA}	11.20±1.07 ^{cd}
B3	130.40±7.60 ^{cd}	99.80±3.43 ^{bC}	90.40±4.21 ^{bBC}	77.60±2.25 ^{DE}	38.80±8.73 ^{cd}	30.80±4.86 ^{de}	19.40±3.80 ^{abB}	12.60±2.34 ^{abC}	10.20±2.15 ^{DD}
B6	240.60±32.17 ^{aA}	148.40±16.02 ^{ba}	138.60±12.65 ^{ba}	92.40±6.62 ^{bCDE}	83.40±8.04 ^{aB}	59.20±7.32 ^{abCD}	18.00±1.70 ^{ab}	10.60±2.48 ^{abD}	10.75±0.75 ^{DD}

注:表中数据为平均值±标准误(n=5);不同大写字母表示同一浓度 Cd 处理条件下不同品种间差异性显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一品种下不同浓度 Cd 处理间差异性显著($P<0.05$)Note: The data is mean±standard error (n=5); Different capital letters indicate significant difference between different varieties under the same concentration of Cd ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations of Cd in the same variety ($P<0.05$)

表 6 品种和 ρ (CdCl_2) 处理对青稞种子 Cd 毒害指数影响的双因素方差分析Table 6 Effects of varieties and ρ (CdCl_2) on the Cd toxicity index of barley seed by double factor analysis of variance

变异来源	品种	Cd 浓度	品种×Cd 浓度
Sources of variation	Varieties	ρ (CdCl_2)	Varieties× ρ (CdCl_2)
显著性	***	***	***
Significance			

注: 品种× ρ (CdCl_2) 为青稞品种和不同质量浓度 CdCl_2 处理的交互作用; ***: $P < 0.001$ Note: Varieties× ρ (CdCl_2) is the interaction between highland barley varieties and CdCl_2 treatment; ***: $P < 0.001$

物量较大等优点(孟亚雄等, 2015), 是理想的高寒环境下重金属污染土壤的恢复物种之一。本研究探讨不同浓度 Cd 胁迫对 11 个青稞品种种子的萌发及幼苗生长的影响, 发现重金属 Cd 对青稞种子萌发表现出低浓度促进和高浓度抑制效应, Cd 胁迫对青稞幼苗生长过程的抑制效应强于种子萌发过程; ‘昆仑 14 号’及‘昆仑 10 号’对重金属 Cd 的耐受性最强。

种子萌发是一个阶段性复杂过程。萌发的首要阶段是干燥种子迅速恢复生理代谢活性, 进而完成种胚伸出种子周围结构的细胞事件, 为随后的幼苗生长和发育做准备。萌发阶段是植物生命周期中最关键的转折点, 种子能否成功萌发和正常成苗对大多数有花植物的生存与繁衍起着决定性作用(Rajjou et al., 2012)。但这一阶段也是植物最脆弱、对环境最敏感的阶段, 容易受到病虫害等生物因子和机械损伤、水分、重金属等非生物因子的胁迫(Nonogaki et al., 2010)。因此, 研究重金属胁迫下植物种子萌发及幼苗生长发育状况, 能够在一定程度上鉴定其对重金属的抗逆性(姜韵佳等, 2019)。本研究中, 当处理的 Cd 浓度为 20 mg/L 时, 青稞种子的萌发参数发芽率、发芽势、发芽指数和 Cd 毒害指数显著高于未进行 Cd 处理的空白对照组, 对青稞种子萌发具有促进作用, 随着 Cd 浓度升高, 青稞种子的萌发能力受到抑制, 当 ρ (CdCl_2) 为 80 mg/L 甚至更高时, 青稞种子的萌发参数显著降低, 抑制种子萌发。表现出重金属 Cd 对植物种子的萌发存在较低浓度下的促进效应和高浓度下的抑制效应。这与 Cd 对大豆(Sfaxi-Bousbih et al., 2010)、水稻(Lin et al., 2012)、紫花苜蓿(Aydinalp and Marinova, 2009)等种子萌发影响的研究结果一致。低浓度 Cd 促进植物种子萌发可能是种子受到 Cd 刺激后产生的一种应激反应。种子受到外界重金

属刺激后新陈代谢加强, 促进胚轴突破种皮而萌发(Aydinalp and Marinova, 2009)。高浓度 Cd 胁迫引起种子的氧化损伤, 抑制赤霉素(GA)等植物激素和 α -淀粉酶、蛋白酶等水解酶的合成, 使淀粉、蛋白质水解过程受阻, 抑制胚轴生长(Sfaxi-Bousbih et al., 2010)。

外施重金属 Cd 对青稞幼苗生长状况产生的抑制效应比种子萌发产生的抑制效应更显著, 且对胚根的抑制效应大于胚芽。当 ρ (CdCl_2) ≥ 40 mg/L 时对青稞幼苗生长抑制严重, 其胚根/芽长度、胚根/芽鲜重均显著降低。当 ρ (CdCl_2) 为 160 mg/L 甚至更高时严重抑制幼苗胚根生长, 有些种子甚至是“无根苗”。萌发过程中种子胚根最先突破种皮进入被重金属污染环境吸收水分等物质, 与胚芽相比根系吸收、积累的重金属含量更多及受胁迫时间更长(马敏等, 2012)。另外, 根部细胞壁上存在能够大量固定重金属离子的交换位点, Cd 元素进入植物体后, 大多数积累在根系生长部位, 对根细胞内的染色体和核仁产生破坏。随着积累的 Cd 不断增加, 抑制种子根系生长, 使植物根茎缩短, 侧根数量减少, 抗氧化酶活性降低, 活性氧积累, 细胞膜通透性降低, 导致细胞损伤, 进而抑制植物生长(Skórzyńska-Polit et al., 2010; Lin et al., 2012)。

本研究发现, 品种差异对不同浓度 CdCl_2 条件下青稞幼苗萌发参数发芽率、发芽势、活力指数、发芽指数及生长参数根鲜重、芽鲜重和 Cd 毒害指数均产生极显著影响($P < 0.01$)。根据 D 值可对各材料抗胁迫强弱进行排序(陈新等, 2014)。将 11 份青稞种质材料进行排序, 从大到小依次为 K14>K10>H>C1>N1>M>K15>B3>K12>D>B6。一个品种是一个基因库, 不同品种植物种子细胞内有关休眠的酶蛋白和 DNA 恢复活性的能力不同, 胚细胞中合成、分泌的赤霉素(GA)和乙烯(Ethylene)等植物激素含量不同, 对外界环境的适应能力和适应机制存在明显差异, 因此不同品种种子萌发能力及对 Cd 胁迫的响应存在很大差异。

综上所述, 重金属 Cd 对青稞种子萌发表现出低浓度 ρ (CdCl_2)=20 mg/L 促进和高浓度(ρ (CdCl_2) ≥ 80 mg/L)抑制效应; 当 ρ (CdCl_2) ≥ 40 mg/L 时对幼苗生长产生显著抑制效应, 即 Cd 胁迫对青稞幼苗生长过程的抑制效应强于种子萌发过程。通过标准差系数赋予权重法计算的 11 个品种青稞种子耐 Cd 能力加权隶属函数 D 值顺序为 K14>K10>H>C1>N1>M>K15>B3>K12>D>B6。表明‘昆仑 10 号’及‘昆仑

14号'对重金属Cd的耐受性最强,能较好地适应重金属土壤环境,具有作为青藏高原地区Cd污染土壤修复植物的潜力。本研究结果能够为以培育青藏高原地区Cd污染土壤的修复植物新品种为目标的“环保育种”工作提供理论依据。

3 材料与方法

3.1 试验材料

供试青稞种质材料11份(表8),其中1份由青海师范大学提供、10份由青海省农林科学院国家作物种质复份库提供。

3.2 CdCl₂ 溶液配制

精确称取不同质量CdCl₂试剂,用超纯水依次配制成质量浓度为0、5、10、20、40、80、160和320 mg/L的溶液(Sfazi-Bousbih et al., 2010; Lin et al., 2012)。CdCl₂试剂为分析纯,生产厂家是西亚试剂。

3.3 种质筛选及处理

精选大小一致、饱满无病害的青稞种子,先用2% NaClO消毒20 min,超纯水冲洗3次,再用70%乙醇消毒30 s,超纯水冲洗3次。

将消毒后的种子均匀排列在铺有双层滤纸的培养皿内,每个培养皿中放25粒种子。对青稞种子用不同质量浓度的CdCl₂溶液进行Cd处理,每个处理设5个重复。将培养皿置于人工气候箱,培养条件为昼夜恒温(25±1)℃、每天光照12 h、光照度3 500 lx、湿度85%。试验期间于每天18:00时左右用胶头滴管施加CdCl₂溶液,滴加量以倾斜时皿底无溶液积聚为宜。

3.4 萌发和生长指标测定

每天18:00时观察种子萌发情况,并统计种子萌发数。发芽标准是胚根长达到种子长度的一半,连续5天没有种子萌发视为萌发结束(中华人民共和国国家标准,2001,中国标准出版社,pp.3-5)。试验中第18天时萌发结束,从每个培养皿中随机选取4株发芽种子,用滤纸吸干水分,测量胚芽/根鲜重、胚芽/根长度。计算发芽率、发芽势等指标,计算公式如下(Bhattacharjee, 2012):

发芽率(%)=发芽的种子数/供试种子数;

发芽势(GE)(%)=5 d内发芽的种子数/供试种子数;

发芽指数(GI)= $\sum(G_t/t)$,其中G_t为第t天内的发芽数,t为发芽天数;

活力指数(VI)=GI×S,其中S为一定时期内幼苗长度;

Cd 毒害指数(%)=[(Cd处理发芽率-对照发芽率)/对照发芽率]。

以指标发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、Cd毒害指数、胚芽长、胚根长、胚芽鲜重、胚根鲜重为依据,利用加权隶属函数法对11份青稞种质进行综合评价(陈新等,2014)。根据加权隶属函数值(D值)对供试青稞种质进行聚类分析。加权隶属函数法计算公式如下:

$$\mu(X)=(X_j-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \quad (1)$$

$$CV_j=\frac{1}{X_j} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij}-\bar{X}_j)^2} \quad (2)$$

$$W_j=CV_j / \sum_{i=1}^n CV_j \quad (3)$$

$$D=\sum_{i=1}^n [u(X_j) \cdot W_j] \quad (4)$$

式中 $\mu(X)$ 为各供试材料X的各个指标的隶属函数值, X_j 为各供试材料第j个指标值, X_{\min} 、 X_{\max} 分别为供试材料中第j个指标值的最大值和最小值, CV_j 为各供试材料 $\mu(X)$ 的变异系数, W_j 为 CV_j 在总变异中所占比率,D为加权隶属函数值。

3.5 数据分析

采用SPSS 17.0软件的完全随机设计模型,分析青稞品种、Cd浓度及其互作对青稞种子发芽率、发芽势、活力指数、发芽指数和Cd毒害指数等指标的影响,并进行不同品种或Cd浓度下的LSD多重比较。

作者贡献

罗巧玉是本研究的实验设计和实验研究的执行人,桂兰、罗巧玉、张国婷和杨昊虹完成数据分析,论文初稿的写作;周连玉、蒋礼玲参与实验设计,试验结果分析;冯永贵是项目的构思者及负责人,指导实验设计、数据分析、论文写作与修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

致谢

本研究由第二次青藏高原综合科学考察研究项目(SQ2019QZKK2206)、青海省科技厅项目(2020-ZJ-Y40)和青海师范大学校级中青年科研基金项目(2018-zr012)共同资助。

表 7 不同 $\rho(\text{CdCl}_2)$ 处理下青稞种子 Cd 毒害指数Table 7 The Cd toxicity index of the barley seed under the condition of different $\rho(\text{CdCl}_2)$

品种	$\rho(\text{CdCl}_2)$ (mg/L)										
	5	10	20	40	80	160	240	320			
H	2.57±1.05 ^{abcd}	1.74±1.07 ^{abc}	1.70±1.04 ^{abc}	1.74±1.07 ^{abcd}	2.57±1.05 ^{ab}	2.57±1.05 ^{ab}	-6.78±1.81 ^b	-5.04±0.92 ^{ba}			
NI	1.74±1.07 ^{abcd}	2.65±1.80 ^c	2.58±1.05 ^{abc}	-5.08±1.61 ^{abcd}	-10.31±4.15 ^{bcd}	-28.72±5.62 ^{de}	-33.04±6.77 ^{cd}	-37.62±1.75 ^{abc}			
M	10.55±1.82 ^{ab}	10.35±4.27 ^{ab}	3.53±3.66 ^{abc}	1.40±6.43 ^{abcd}	-28.12±2.43 ^{be}	-18.24±0.70 ^{cd}	-26.98±1.23 ^{bb}	-23.40±3.80 ^{bb}			
D	2.65±1.08 ^{abcd}	3.66±3.80 ^{abc}	8.48±4.08 ^{abc}	9.48±4.29 ^{abc}	-3.56±1.69 ^{abc}	-2.64±4.08 ^{bc}	-29.28±2.18 ^{abc}	-25.90±1.27 ^{ab}			
CI	-6.97±1.84 ^{de}	-13.29±6.31 ^{abc}	-9.46±0.77 ^{abc}	-12.11±0.96 ^{abcd}	-16.39±0.88 ^{bcd}	-25.06±1.12 ^{de}	-19.11±2.51 ^{cd}	-35.54±3.37 ^{abc}			
K10	-5.90±4.99 ^{de}	12.59±1.59 ^{ab}	25.83±3.40 ^{ab}	16.41±6.47 ^{ab}	13.32±4.33 ^{ab}	4.06±7.28 ^{bc}	-20.39±6.49 ^{da}	-51.86±9.80 ^{cd}			
K12	11.84±2.02 ^{ab}	5.35±1.68 ^{bc}	3.28±9.69 ^{abc}	0.95±0.95 ^{abcd}	2.57±4.60 ^{ab}	-15.27±3.12 ^{cd}	-27.03±4.54 ^{abc}	-40.66±2.13 ^{abcd}			
K14	-2.72±2.63 ^{cde}	3.48±0.87 ^{abc}	1.59±2.67 ^{abc}	-0.04±1.41 ^{abcd}	3.41±0.85 ^{ab}	-0.87±0.87 ^{abc}	-1.85±2.26 ^{bcd}	-23.39±2.12 ^{ab}			
K15	-13.10±1.71 ^{de}	-11.47±2.71 ^{abc}	-9.64±3.48 ^{bc}	-5.60±0.88 ^{bcd}	-18.23±4.46 ^{abde}	-11.68±5.50 ^{abcd}	-22.70±3.11 ^{bca}	-32.47±7.89 ^{ab}			
B3	1.89±3.45 ^{abcd}	7.33±2.82 ^{ab}	7.11±1.98 ^{abc}	-27.39±5.51 ^{be}	-18.29±4.99 ^{abde}	-19.92±1.76 ^{cde}	-29.88±2.97 ^{abc}	-31.37±8.61 ^{bb}			
B6	18.97±11.98 ^{ab}	27.09±16.18 ^{ab}	19.73±14.08 ^{ab}	13.58±11.42 ^{ab}	13.21±5.51 ^{ab}	-24.03±4.21 ^{bde}	-47.39±6.15 ^{bcd}	-54.52±6.22 ^{cd}			

注:表中数据为平均值±标准误(n=5);不同大写字母表示同一 Cd 浓度不同品种间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示同一品种不同 Cd 浓度差异显著(P<0.05)

Note: The data is mean±standard error (n=5); Different capital letters indicate that the same Cd concentration is significantly different among different varieties (P<0.05); Different lowercase letters indicate that the concentration of Cd in the same variety is significantly different (P<0.05)

表 8 供试种质材料的地理来源及编号

Table 8 Geographical origin and number of barley germplasm

序号 Serial number	编号 Number	品种名称 Varieties name	原产地 Original producing place	来源 Source place	备注 Remarks
1	H	黑青稞 Black barley	青海玉树 Yushu, Qinghai	QNU	地方品种 Local variety
2	N1	门农 1 号 Mennong NO.1	青海海北 Haibei, Qinghai	QAFCL	农家品种 Farm variety
3	M	门源亮兰 Menyuanlianglan	青海海北 Haibei, Qinghai	QAFCL	农家品种 Farm variety
4	D	肚里黄 Dulihuang	甘肃甘南 Gannan, Gansu	QAFCL	农家品种 Farm variety
5	C1	柴青 1 号 Chaiqing NO.1	青海海西 Haixi, Qinghai	QAFCL	育成品种 Breeding variety
6	K10	昆仑 10 号 Kunlun NO.10	青海西宁 Xining, Qinghai	QAFCL	育成品种 Breeding variety
7	K12	昆仑 12 号 Kunlun NO.12	青海西宁 Xining, Qinghai	QAFCL	育成品种 Breeding variety
8	K14	昆仑 14 号 Kunlun NO.14	青海西宁 Xining, Qinghai	QAFCL	育成品种 Breeding variety
9	K15	昆仑 15 号 Kunlun NO.15	青海西宁 Xining, Qinghai	QAFCL	育成品种 Breeding variety
10	B3	北青 3 号 Beiqing NO.1	青海海北 Haibei, Qinghai	QAFCL	育成品种 Breeding variety
11	B6	北青 6 号 Beiqing NO.6	青海海北 Haibei, Qinghai	QAFCL	育成品种 Breeding variety

注: QNU: 青海师范大学; QAFCL: 青海省农林科学院国家作物种质复份库

Note: QNU: Qinghai Normal University; QAFCL: National Crop Germplasm Database of Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences

参考文献

- Aydinalp C., and Marinova S., 2009, The effects of heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*), Bulgarian Journal of Agricultural Science, 15 (4): 347-350.
- Bhattacharjee S., 2012, An inductive pulse of hydrogen peroxide pretreatment restores redox-homeostasis and oxidative membrane damage under extremes of temperature in two rice cultivars, Plant Growth Regulation, 68: 395-410.
- Chen X., Zhang Z.W., and Wu B., 2014, Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of naked Oat (*Avena nuda* L.) at germination stage, Zhongguo Nongye Kexue (Scientia Agricultura Sinica), 47 (10): 2038-2046. (陈新, 张宗文, 吴斌, 2014, 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选, 中国农业科学, 47 (10): 2038-2046.)
- Favre A., Packert M., Pauls S.U., Jahnig S.C., Uhl D., Michalak I., and Muellner-Riehl A.N., 2015, The role of the uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau for the evolution of Tibetan biotas, Biol. Rev. Camb. Philos. Soc., 90(1): 236-253.
- He L.H., and Gao X.H., 2016, Assessment of potential ecological risk for soil heavy metals in Sanjiang source region: a case study of Yushu county, Qinghai Province, Nongye Huanjing Kexue Xuebao (Journal of Agro-Environment Science), 35 (6): 1071-1080. (何林华, 高小红, 2016, 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, 农业环境科学学报, 35(6): 1071-1080.)
- Hu Y.F., Peng J.J., Yuan S., Shu X.Y., Jiang S.L., Pu Q., Ma K. Y., Yuan C.M., Chen G.D., and Xiao H.H., 2016, Influence of ecological restoration on vegetation and soil microbiological properties in Alpine-cold semi-humid desertified land, Ecological Engineering, 94: 88-94.
- Jiang Y.J., Wu L.Q., Yang J.L., Wu S.J., and Wang X.P., 2019, Effects of Cd stress on seed germination and seedling physiological indexes of barnyard grass, Fenzi Zhiwu Yu-zhong (Molecular Plant Breeding), 17(9): 3064-3072. (姜韵

- 佳, 吴丽群, 杨军丽, 吴姝菊, 王晓萍, 2019, 镉胁迫对稗草 (*Echinochloa crusgalli*) 种子萌发及幼苗生理指标的影响, 分子植物育种, 17(9): 3064-3072.)
- Lata R., Chowdhury S., Gond S.K., and White Jr J.F., 2018, Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes, Lett. Appl. Microbiol., 66(4): 268-276.
- Lin L., Zhou W.H., Dai H.X., Cao F.B., Zhang G.P., and Wu F.B., 2012, Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice, J. Hazard. Mater., 235-236: 343-351.
- Long T., 2013, Feature analysis on the development of Qinghai-Tibet plateau metal mineral resources, Zhongguo Kuangye (China Mining Magazine), 22(6): 11-13. (龙涛, 2013, 青藏高原金属矿产资源开发的特征分析, 中国矿业, 22(6): 11-13.)
- Lu Y.L., Song S., Wang R.S., Liu Z.Y., Meng J., Sweetman A.J., Jenkins A., Ferriere R.C., Li H., Luo W., and Wang T.Y., 2015, Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China, Environ. Int., 77: 5-15.
- Ma M., Gong H.H., and Deng H., 2012, Effects of heavy metal stress on seed germination and seedling growth of eight urban plants, Zhongguo Nongxue Tongbao (Chinese Agricultural Science Bulletin), 28(22): 206-211. (马敏, 龚惠红, 邓泓, 2012, 重金属对8种园林植物种子萌发及幼苗生长的影响, 中国农学通报, 28(22): 206-211.)
- Meng Y.X., Meng Y.L., Wang J.C., Si E.J., Zhang H.J., Ren P.R., Ma X.L., Li B.C., Yang K., and Wang H.J., 2015, Genetic diversity and association analysis of agronomic characteristics with SSR markers in hulless barley, Zuowu Xuebao (Acta Agronomica Sinica), 42(2): 180-189. (孟亚雄, 孟祥林, 汪军成, 司二静, 张海娟, 任盼荣, 马小乐, 李葆春, 杨轲, 王化俊, 2015, 青稞遗传多样性及其农艺性状与SSR标记的关联分析, 作物学报, 42(2): 180-189.)
- Nonogaki H., Bassel G.W., and Bewley J.D., 2010, Germination—still a mystery, Plant Science, 179(6): 574-581.
- Oliver M.A., and Gregory P.J., 2015, Soil, food security and human health: a review, European Journal of Soil Science, 66(2): 257-276.
- Pan Z.F., Deng G.B., Zhai X.G., Wu F., and Yu M.Q., 2007, Genetic diversity of Acid-PAGE monomeric prolamins in cultivated hulless barley (*Hordeum vulgare* L.) from Qinghai-Tibet plateau in China, Genet. Resour. Crop Evol., 54(8): 1691-1699.
- Rai P.K., 2016, Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring, Ecotoxicol. Environ. Saf., 129: 120-136.
- Rajjou L., Duval M., Gallardo K., Catusse J., Bally J., Job C., and Job D., 2012, Seed germination and vigor, Annu. Rev. Plant Biol., 63: 507-533.
- Sankhla M.S., Kumari M., Nandan M., Kumar R., and Agrawal P., 2016, Heavy metals contamination in water and their Hazardous effect on human health—A Review, Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci., 5(10): 759-766.
- Sfaxi-Bousbih A., Chaoui A., and Ferjani E., 2010, Cadmium impairs mineral and carbohydrate mobilization during the germination of bean seeds, Ecotoxicol. Environ. Saf., 73(6): 1123-1129.
- Skórzyńska-Polit E., Drażkiewicz M., and Krupa Z., 2010, Lipid peroxidation and antioxidative response in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium and copper, Acta Physiol. Plant., 32: 169-175.
- Song C.Q., Ke L.H., Huang B., and Richards K.S., 2015, Can mountain glacier melting explain the GRACE-observed mass loss in the southeast Tibetan Plateau: From a climate perspective? Global and Planetary Change, 124: 1-9.
- Wang P., Lassoie J.P., Morreale S.J., and Dong S., 2015, A critical review of socioeconomic and natural factors in ecological degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau, China, The Rangeland Journal, 37: 1-9.
- Wu D.F., Zhu D.H., Wu H.Q., Zhang L., and Ren X.J., 2013, Requirement of 'Environmental breeding' for phytoremediation of heavy metal contaminated soils, Beifang Yuanyi (Northern Horticulture), (10): 190-194. (吴大付, 朱东海, 吴海卿, 张莉, 任秀娟, 2013, 重金属污染土壤的植物修复对“环保育种”的呼唤, 北方园艺, (10): 190-194.)
- Yan X.D., Gao D., Zhang F., Zeng C., Xiang W., and Zhang M., 2013, Relationships between heavy metal concentrations in roadside topsoil and distance to road edge based on field observations in the Qinghai-Tibet Plateau, China, Int. J. Environ. Res. Public Health, 10(3): 762-775.