

镉胁迫对不同水稻品种种子萌发特性的影响

孙亚莉[#] 刘红梅[#] 徐庆国^{*}

(湖南农业大学 农学院, 长沙 410128; [#]共同第一作者; ^{*}通讯联系人, E-mail: huxu0309@aliyun.com)

Effects of Cadmium Stress on Rice Seed Germination Characteristics

SUN Yali[#], LIU Hongmei[#], XU Qingguo^{*}

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; [#]These authors contributed equally to this work; ^{*}Corresponding author, E-mail: huxu0309@aliyun.com)

Abstract: 【Objective】In order to reveal the differences in cadmium stress for different rice varieties, 【Method】fifty rice varieties with different genetic background were used to analyze the effects of cadmium stress (0 mmol/L, 0.5 mmol/L, 0.1 mmol/L, 0.2 mmol/L) on seed germination rate, germination index, vigor index, germ length, radicle length, germ fresh weight and germ dry weight of different rice varieties. 【Result】Cd had an increased inhibition to the germination and growth of rice with the increasing cadmium concentration. 0.05 mmol/L cadmium stress had no significant impact on the germination rate and germination index, but it had a significant effect on seed vigor index and the growth of roots and shoots. The inhibitory effects of various cadmium treatments on the radicle of rice seeds were significantly greater than that on their germs. Under 0.1 mmol/L and 0.2 mmol/L cadmium stress, there are highly significant and positive correlation among indexes. Significant differences of cadmium tolerance were noted in different rice varieties. 【Conclusion】According to the results of cluster analysis based on the relative value of each trait at germination stage under cadmium stress, the 50 rice varieties were divided into three types: sensitive, intermediate and tolerant.

Key words: cadmium stress; rice; variety; seed; germination period; trait

摘 要: 【目的】为了研究不同水稻品种的镉胁迫抗性差异, 为早期预测镉污染, 选育镉低积累水稻提供参考。【方法】采用 50 个不同遗传背景的水稻品种(系)种子, 研究了 0(蒸馏水, 对照)、0.5、1.0、2.0 mmol/L 等 4 种不同镉浓度胁迫对不同水稻品种种子发芽率、发芽指数、活力指数、胚芽长、胚根长、胚芽鲜质量与胚芽干质量等性状的影响。【结果】镉胁迫对水稻种子的萌发及幼苗生长具有抑制作用, 且随着镉胁迫浓度的增高, 抑制作用逐渐加强。0.5 mmol/L Cd²⁺胁迫浓度对各水稻品种种子的发芽率和发芽指数影响不显著, 而对其种子活力指数、胚根与胚芽生长则具有显著的抑制作用; 不同镉胁迫浓度对水稻种子胚根的抑制作用明显大于胚芽; 1.0 mmol/L 和 2.0 mmol/L Cd²⁺两种胁迫浓度处理下, 不同水稻品种种子萌发期的各性状指标间差异达极显著水平, 且达到极显著正相关。不同水稻品种对不同镉胁迫浓度的耐性存在明显差异。【结论】根据不同水稻品种萌发期不同镉胁迫浓度处理的各性状指标与对照的相对值进行聚类分析, 可将 50 个供试水稻品种(系)分为镉胁迫敏感型、中间型和耐受型等 3 种类型。

关键词: 镉胁迫; 水稻; 品种; 种子; 萌发期; 性状

中图分类号: Q948.116; S511.041

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216 (2017) 04-0425-07

近年由于工矿业与农业等人为活动导致土壤环境污染背景值增高, 中国土壤环境污染严重, 耕地土壤环境问题突出。近期颁布的《全国土壤污染状况调查公报》^[1]显示, 我国南方土壤污染较北方严重; 重金属污染中, 镉污染程度又位居首位, 污染超标率达 7%。镉具有极强的生物迁移性, 易被植物吸收和积累, 而且可随着生物链危及人类的健

康和生存, 有关镉污染的毒害效应越来越引起人们的关注, 因此, 研究镉污染对作物的影响具有重要的理论和实践意义^[2]。

水稻是中国主要粮食作物之一, 全国一半以上的人口以稻米为主食, 在长江流域及以南地区种植面积很大^[3]。水稻具有较强的吸附镉的能力, 其种子萌发和幼苗生长期是最先受重金属镉危害的阶

收稿日期: 2016-10-25; 修改稿收到日期: 2017-03-18。

基金项目: 国家教育部“创新团队发展计划”资助项目(IRT1239); 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ3072); 湖南省科学技术厅重点研发计划项目(2015NK3013); 湖南农业大学大学生创新性项目(XCX16134)。

段, 水稻萌发期的生长状况直接影响以后各生长发育阶段及产量和品质, 而且水稻种子萌发和幼苗期的生长状况是评价其重金属镉耐性的重要指标^[2,4,5]。为此, 本研究以 50 个水稻品种种子为材料, 研究了不同镉胁迫浓度对不同水稻品种种子萌发期各性状指标的影响, 以便为水稻生产实践中早期预测重金属镉污染、选育镉低积累水稻品种提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料采用了如下 50 个不同遗传背景的水稻品种(系)作为供试材料: 黄华占、惠选优小粒 1 号、惠选优小粒 2 号、齐占稻、复选 201 选、丰青矮选中粒、黄粤占、黄粤占选、丰华占、丰矮占 1 号、丰丝占、丰澳占、茉莉新占、28 占、象牙香占、桂晶丝苗、粤农丝苗、黄软秀占、黄莉丝苗、粤丰丝苗、粤晶丝苗 2 号、五山丰占、黄秀丝苗、黄广油占、Lemont、矮秀占、长伦占、BG367、竹稻、丰银占、丰合占、齐粒丝苗、齐粒丝苗选、新宁丝苗、湘晚粳 5 号、Remant、香特占、粤优选 1 号、七秀占、粤优选 2 号、粤优选长穗、广源占 12、齐丰占、丰香油占、竹稻 4 号、湘彩糯、华占、R777、希望 R141。该 50 个水稻品种(系)种子均来自湖南农业大学水稻科学研究所。

1.2 试验方法

分别取各供试水稻品种饱满种子, 用 0.5% NaClO 溶液灭菌 20 min 后用无菌水反复冲洗, 50 mL 蒸馏水浸种 60 min 后将种子摆放于铺有 2 层滤纸的培养皿内, 每皿摆放种子 100 粒。分别加入 5 mL 的 0(蒸馏水, 对照)、0.5、1.0、2.0 mmol/L 等 4 种不同浓度镉溶液(通过设置不同浓度镉溶液进行数次预试验后, 确定该组浓度为最终试验浓度), 于培养箱内发芽, 培养箱光周期为光照 12 h/黑暗 12 h, 温度

设为 25℃^[6], 每个处理 3 次重复。每天用移液管补充对应浓度镉溶液 1 mL, 使滤纸保持湿润, 以幼芽达到种子长度一半, 根长与种子等长作为发芽标准, 第 7 天统计计算发芽率、平均胚根长与胚芽长、幼苗鲜质量、幼苗干质量。胚根长度与胚芽长度用 1/10 cm 尺子人工测量。不同水稻品种的发芽率、发芽指数与活力指数按如下公式计算:

发芽率 (%) = 供试种子的发芽数 / 供试种子数 × 100。发芽指数 (GI) = $\sum G_t / D_t$, 公式中 G_t 为在 t 日的种子发芽数, D_t 为发芽天数。活力指数 (VI) = $GI \times S$, 公式中 GI 为发芽指数, S 为胚芽的长度。

为消除各水稻品种间的各发芽性状差异, 对供试各水稻品种(系)的萌发与幼苗生长期的各性状指标均采用相对值, 即采用不同镉溶液胁迫浓度下的指标值/对照^[6]。

1.3 数据处理方法

数据均利用 Excel 2007 进行数据统计与制图, 并用 DPS 7.05 进行方差分析与聚类分析。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对不同水稻品种种子发芽率、发芽指数与活力指数的影响

由表 1 可知, 随着镉浓度的升高, 不同水稻品种种子平均发芽率、发芽指数、活力指数均逐渐下降。在 0.5 mmol/L Cd²⁺胁迫处理浓度下, 50 个供试水稻品种(系)种子的平均发芽率与发芽指数分别为 90.8% 与 13.0, 与对照无显著差异; 其活力指数为 41.7, 相比对照值则降低了 17.3, 差异达到了极显著水平。1.0 mmol/L 和 2.0 mmol/L Cd²⁺胁迫处理浓度下, 50 个供试水稻品种种子的平均发芽率分别为 66.9% 和 14.5%; 其平均发芽指数分别为 9.6 和 2.1; 其平均活力指数分别为 25.4 和 4.0, 与其他镉胁迫处理浓度的平均发芽率、平均发芽指数、平均活力指数相比较, 均达极显著相关。而且镉胁迫处理浓

表 1 不同浓度镉处理对不同水稻品种种子发芽率、发芽指数、活力指数的影响

Table 1. Effects of different cadmium concentrations on seed germination rate, germination index and vigor index of different rice varieties (n=50).

镉浓度 Cd concentration/(mmol·L ⁻¹)	发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
0.0	95.6±3.8 aA	13.7±0.5 aA	59.0±9.3 aA
0.5	90.8±8.7 aA	13.0±1.2 aA	41.7±8.5 bB
1.0	66.9±21.0 bB	9.6±3.0 bB	25.4±11.2 cC
2.0	14.5±14.1 cC	2.1±1.9 cC	4.0±4.9 dD

数据后跟不同大小写字母表示 0.01 和 0.05 水平上差异显著。下同。

Values followed by various uppercase and lowercase letters are significantly different at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same as below.

度越大, 各水稻品种的萌发期发芽性状指标值的降幅越大。

2.2 镉胁迫对不同水稻品种种子胚芽长、胚根长的影响

不同 Cd^{2+} 浓度溶液处理对水稻品种(系)种子胚芽与胚根生长均具有抑制作用, 且其抑制程度随 Cd^{2+} 溶液浓度的升高而上升(图 1)。随着 Cd^{2+} 溶液处理浓度的上升, 各品种种子萌发幼苗期的相对胚芽长与相对胚根长均减小, 0.5 mmol/L、1.0 mmol/L 和 2.0 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 各品种种子的平均胚芽长与对照的相对值分别为 0.74、0.59 和 0.36, 其平均胚根长与对照的相对值分别为 0.13、0.03 和 0, 各 Cd^{2+} 溶液处理的平均胚芽与胚根长度间差异均达极显著水平, 且各 Cd^{2+} 溶液处理对各品种种子胚根的影响大于胚芽, 在 0.5 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 各水稻品种种子平均胚根长度与对照的相对值仅为 0.13。可见, 较高的 Cd^{2+} 溶液浓度会对各品种种子根系产生较大影响, 在 2.0 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下各水稻品种种子的根系几乎完全不能生长。

2.3 镉胁迫对不同水稻品种种子胚芽鲜质量与干质量的影响

Cd^{2+} 胁迫对不同水稻品种(系)胚芽鲜质量与干质量的影响同对其他萌发期性状的影响情况基本相似。如图 2 所示, 各水稻品种相对胚芽鲜质量与胚芽干质量均随 Cd^{2+} 溶液浓度增大而下降, 0.5 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 各水稻品种的平均胚芽鲜质量和干质量与对照的相对值相同, 均为 0.73; 1.0 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 各水稻品种的平均胚芽鲜质量与干质量的相对值分别为 0.58 与 0.50; 2.0 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 各水稻品种的胚芽鲜质量与干质量的相对值分别为 0.33 与 0.24, 1.0 mmol/L 与 2.0 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 各水稻品种的平均胚芽干质量与对照的相对值较胚芽鲜质量与对照的相对值减小, Cd^{2+} 胁迫浓度处理的各水稻品种的平均胚芽鲜质量与干质量两指标间无显著差异, 但各 Cd^{2+} 溶液处理间的胚芽鲜质量与干质量差异均达到显著水平。

2.4 不同镉胁迫处理下各水稻品种萌发期各性状的相互关系

由表 2 可见, 0 mmol/L、0.5 mmol/L Cd^{2+} 浓度处理下, 50 个供试水稻品种的发芽率与发芽指数、活力指数均分别极显著正相关; 发芽指数与活力指数极显著正相关, 其相关系数分别为 0.519(0 mmol/L)和 0.677(0.05 mmol/L)。蒸馏水处理条件下, 不同水稻品种的发芽率与胚芽长显著正相关, 而

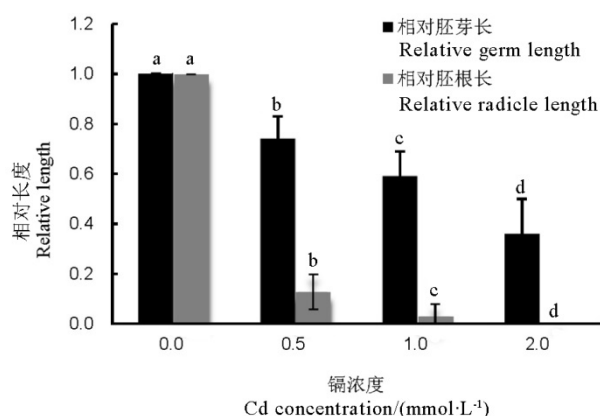


图 1 不同浓度镉处理对不同水稻品种相对胚根长与胚芽长的影响

Fig. 1. Effects of Cd treatment on relative radical length and germ length of different rice varieties ($n=50$).

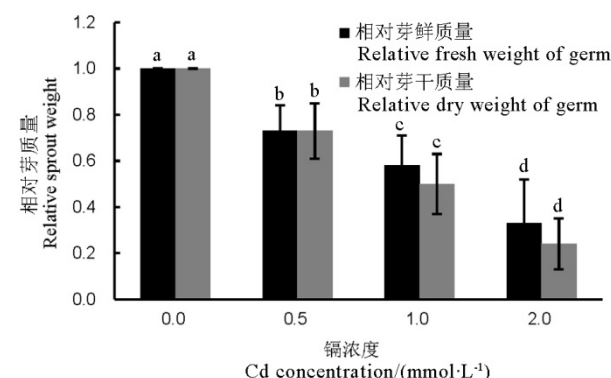


图 2 不同浓度镉处理对不同水稻品种相对胚芽鲜质量与干质量的影响

Fig. 2. Effects of Cd treatment on relative fresh weight and relative dry weight of germ of different rice varieties ($n=50$).

胚根长、胚芽鲜质量、胚芽干质量间相关均未达显著水平; 活力指数与胚芽长、胚芽鲜质量、胚芽干质量分别极显著正相关, 与胚根长显著正相关; 胚芽长、胚芽鲜质量、胚芽干质量间分别极显著正相关; 胚根长与胚芽长显著正相关, 与胚芽鲜质量、胚芽干质量相关均未达显著。0.5 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 不同水稻品种的发芽率与胚芽长、胚根长分别显著正相关, 而其与胚芽鲜质量、胚芽干质量相关均未达显著水平; 发芽指数与胚芽长、胚根长分别极显著正相关, 与胚芽鲜质量、胚芽干质量相关未达显著; 不同水稻品种的活力指数、胚芽长、胚根长、胚芽鲜质量、胚芽干质量均分别呈极显著正相关。1.0 mmol/L 与 2.0 mmol/L Cd^{2+} 溶液处理下, 50 个供试水稻品种种子萌发幼苗生长期各性状指

表 2 不同浓度镉处理下不同水稻品种种子不同性状的相关系数

Table 2. Correlation coefficients of each trait of different rice varieties under Cd treatment during seed germination(*n*=50).

性状 Trait	发芽率 GR	发芽指数 GI	活力指数 VI	胚芽长 GL	胚根长 RL	幼苗鲜质量 FW	幼苗干质量 DW
发芽率 GR		0.987**	0.634**	0.319*	0.340*	0.214	0.237
发芽指数 GI	1.000**		0.677**	0.365**	0.392**	0.262	0.277
活力指数 VI	0.518**	0.519**		0.930**	0.664**	0.694**	0.597**
胚芽长 GL	0.299*	0.301*	0.971**		0.658**	0.751**	0.619**
胚根长 RL	0.203	0.204	0.323*	0.314*		0.560**	0.469**
幼苗鲜质量 FW	0.196	0.197	0.693**	0.721**	0.278		0.791**
幼苗干质量 DW	0.091	0.091	0.447**	0.470**	0.096	0.748**	
发芽率 GR		1.000**	0.980**	0.696**	0.372**	0.707**	0.549**
发芽指数 GI	1.000**		0.980**	0.696**	0.372**	0.705**	0.549**
活力指数 VI	0.940**	0.940**		0.706**	0.501**	0.709**	0.507**
胚芽长 GL	0.733**	0.733**	0.901**		0.527**	0.895**	0.641**
胚根长 RL	0.372**	0.372**	0.501**	0.527**		—	—
幼苗鲜质量 FW	0.683**	0.683**	0.806**	0.820**	0.544**		0.608**
幼苗干质量 DW	0.493**	0.493**	0.586**	0.618**	0.492**	0.695**	

左下角由上到下分别表示 0 mmol/L、1.0 mmol/L Cd²⁺处理下各指标间相关性，右上角由上到下分别表示 0.5 mmol/L、2.0 mmol/L Cd²⁺处理下各指标间相关性；*表示 0.05 水平上显著相关，**表示 0.01 水平上显著相关；—，数据缺失。

The lower-left corner represent for 0 mmol/L and 1.0 mmol/L Cd²⁺ stress, the upper right corner represent for 0.5 mmol/L and 2.0 mmol/L Cd²⁺ stress. * significantly correlated at 0.05 levels, ** significantly correlated at 0.01 levels. GR, Germination rate; GI, Germination index; VI, Vigor index; GL, Germ length; RL, Radicle length; FW, Fresh weight; DW, dry weight. —, Unavailable.

标间均分别呈极显著正相关。

2.5 不同水稻品种种子萌发期、幼苗期镉胁迫耐性的聚类分析

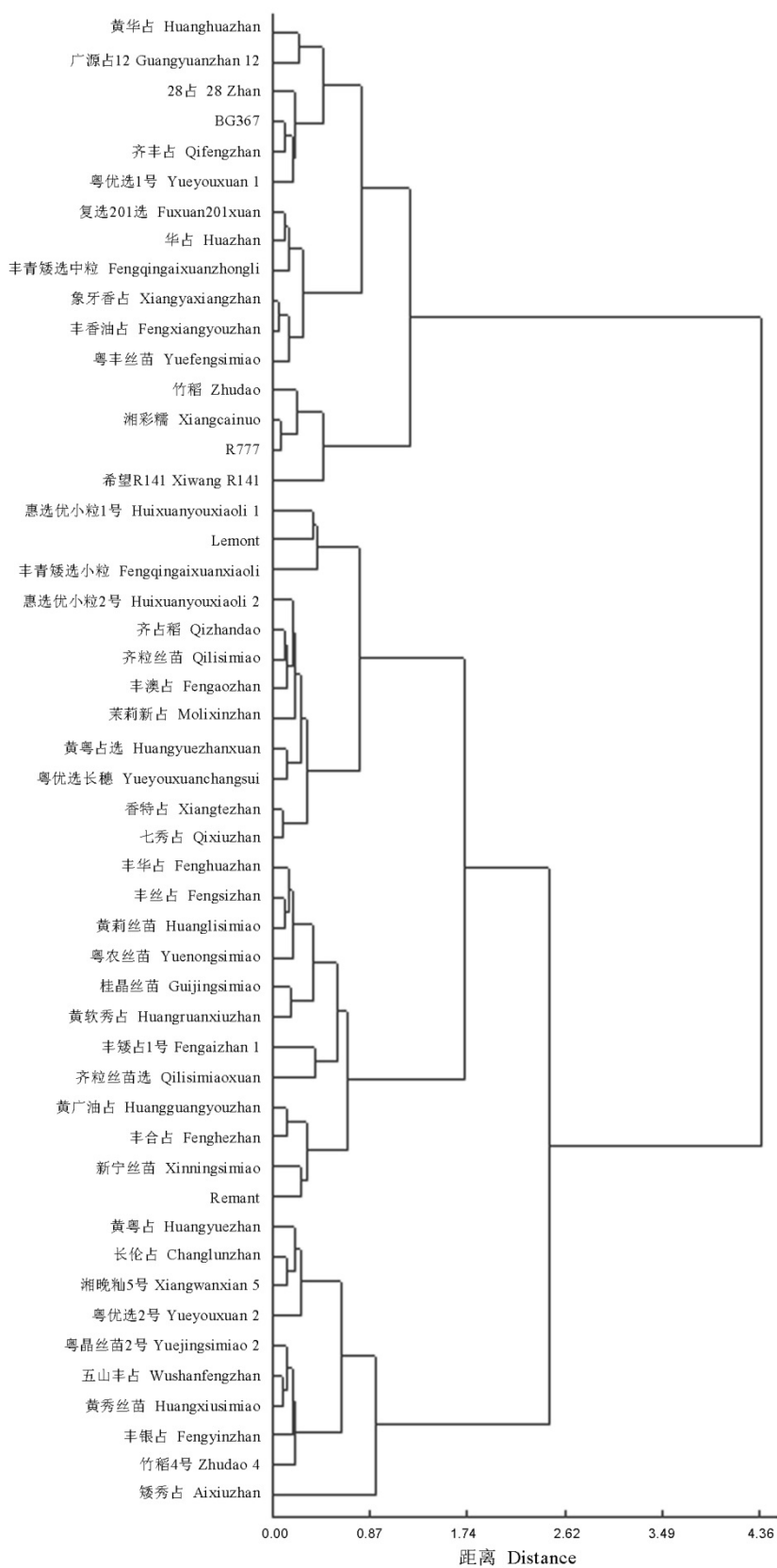
将不同镉溶液处理下水稻品种(系)种子萌发幼苗期各性状指标的相对值采用 Ward(离差平方和法)进行聚类分析。如图 3 所示,根据不同水稻品种种子在 4 个 Cd²⁺浓度处理下的各性状表现,将 50 个供试水稻品种(系)萌发幼苗期的镉胁迫耐性分为如下 3 种类型:第一类为耐镉性水稻品种(系),包括黄华占、复选 201 选、丰青矮选中粒、广源占 12、28 占、象牙香占、粤丰丝苗、BG367、竹稻、粤优选 1 号、齐丰占、丰香油占、湘彩糯、华占、R777、希望 R141 等 16 个水稻品种(系);该类水稻品种(系)在镉胁迫处理条件下的发芽情况较好。第二类为水稻中等耐镉品种(系),包括惠选优小粒 1 号、惠选优小粒 2 号、齐占稻、丰青矮选小粒、黄粤占选、丰华占、丰矮占 1 号、丰丝占、丰澳占、茉莉新占、桂晶丝苗、粤农丝苗、黄软秀占、黄莉丝苗、黄广油占、Lemont、丰合占、齐粒丝苗、齐粒丝苗选、新宁丝苗、Remant、香特占、七秀占、粤优选长穗等 24 个水稻品种(系)。第三类为不耐镉(敏感)水稻品种(系),包括黄粤占、粤晶丝苗 2 号、五山丰占、黄秀丝苗、矮秀占、长伦占、丰银占、湘晚粳 5 号、粤优选 2 号、竹稻 4 号等 10 个水稻品种(系)。

该类水稻品种(系)的种子萌发及幼苗生长易受镉胁迫影响。

通过对 50 个不同镉耐性的水稻品种进行分类可知,黄华占、复选 201 选、丰青矮选中粒等 16 个耐镉性强的水稻品种可以耐镉水稻品种进行推广,进行下一步大田试验,而黄粤占、粤晶丝苗 2 号、五山丰占等 10 个对镉敏感水稻品种则不宜在镉污染较严重的南方土壤种植。这样对于水稻生产实践中早期预测重金属镉污染、简化水稻低镉积累水稻新品种(组合)种质筛选鉴定方法与技术,提高水稻选育低镉积累新品种(组合)选育成效,预防水稻生育前期遭受镉等重金属毒害并保证水稻安全生产;探索水稻镉胁迫耐性育种机制等提供理论依据。

3 讨论

种子萌发与幼苗生长是植物生命的开始,也是植物最早接触外界环境、对外界做出反应的阶段,作物种子萌发期的生长状况直接影响作物的生长和生物量。发芽率、发芽势、发芽指数等是衡量农作物种子发芽能力的重要指标;活力指数是反映农作物种子品质的重要参数^[7,8]。而重金属镉胁迫对水稻种子萌发与幼苗生长具有不同程度的影响。陈杰^[9]研究表明,低浓度 Cd²⁺ 促进水稻种子萌发,随



横坐标表示特征向量之间的距离（把类间距离最小的两类合并成一个新类，计算此类与其他类的距离，再将距离近的两类合并，这样每次减少一类，直至所有的模式数据合并成一类。）

The abscissa represents the distance between the feature vectors(The two types with the smallest distance fall into a new class and so on, until all the schema data are classified into one class)

图3 不同水稻品种镉胁迫耐性的聚类分析

Fig 3. Cluster analysis of Cadmium resistance of different rice varieties.

着 Cd^{2+} 溶液浓度的增加, 水稻种子萌发逐渐受到抑制。本研究结果显示, 不同浓度 Cd^{2+} 溶液处理均对不同水稻品种种子的发芽率、发芽指数、活力指数、胚根长、胚芽长、胚芽鲜质量与干质量具有抑制作用, 这与前人的研究结果稍有差异, 可能是由于本研究的 Cd^{2+} 胁迫溶液浓度设置较高所致。

本研究结果还表明, 0.5 mmol/L 的 Cd^{2+} 胁迫溶液浓度处理下, 50 个供试水稻品种(系)种子的发芽率与发芽指数品种(系)差异未达显著水平; 1.0 mmol/L 与 2.0 mmol/L 的 Cd^{2+} 胁迫溶液浓度处理对不同水稻品种(系)种子萌发期各性状指标均有显著抑制作用, 其中, 对胚根的抑制作用最强。结合前人的研究结果分析, 这可能是因为水稻根系是最先接触外界环境的部位, 重金属镉离子最先被其根系吸收, 其根细胞内核仁及染色体遭到破坏, 同时诱导产生对其根细胞具有较强伤害作用的逆境乙烯, 从而严重抑制其胚根的生长^[10]。前人对水稻、玉米、小麦、草坪草、辣椒等作物种子萌发做了相似的研究, 其研究结果与本研究结果一致^[11-15]。曾翔等^[16]对 319 个水稻品种在镉溶液处理下进行发芽试验的研究结果发现, 不同水稻品种对镉胁迫的耐性具有明显的品种间差异, 并且不同类型水稻品种的镉胁迫耐性也不相同。本研究结果表明, 相同 Cd^{2+} 溶液浓度处理对不同水稻品种(系)种子的各萌发性状的抑制程度存在明显的品种(系)间差异。本研究供试 50 个水稻品种(系)中, 有黄华占、复选 201 选、丰青矮选中粒、广源占 12、28 占、象牙香占、粤丰丝苗、BG367、竹稻、粤优选 1 号、齐丰占、丰香油占、湘彩糯、华占、R777、希望 R141 等 16 个水稻品种(系)对镉胁迫的耐性较强。

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 中国: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of the National Soil Pollution Survey. China: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [2] 廖芳芳, 付文婷, 韩世玉, 王永平, 邢丹. 镉胁迫对不同品种辣椒种子萌发的影响. 辣椒杂志, 2016(2): 27-30.
Liao F F, Fu W T, Han S Y, Wang Y P, Xing D. Effects of cadmium stress on seed germination of different hot pepper varieties. *J China Capsic*, 2016(2): 27-30. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘利成, 刘三雄, 黎用朝, 闵军, 黄海明. 水稻镉积累与调控研究进展. 中国农学通报, 2016, 32(24): 1-5.
Liu L C, Liu S X, Li Y C, Min J, Huang H M. Research progress of cadmium accumulation and regulation in rice. *Chin Agric Sci Bull*, 2016, 32(24): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马茉莉, 卢丙越, 苏一兰, 孟衡玲, 李春燕. 铜、铅、镉对不同水稻品种种子萌发的影响. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 79-81.
Ma M L, Lu B Y, Su Y L, Meng H L, Li C Y. Effects of copper, lead and cadmium on seed germination of different rice cultivars. *Jiangsu Agric Sci*, 2015, 43(4): 79-81. (in Chinese with English abstract)
- [5] Abedin M J, Meharg A A. Relative toxicity of arsenite and arsenate on germination and early seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil*, 2002, 243: 57-66.
- [6] 苏国利, 白谦, 杨洋, 张艳清, 王晔清, 黄河, 隋亚杰. 不同 PH 条件下镉对水稻种子萌发和幼苗生长的影响. 北方水稻, 2015, 45(1): 6-12.
Su G L, Bai Q, Yang Y, Zhang Y Q, Wang Y Q, Huang H, Sui Y J. Effect of cadmium on the germination of rice seeds and seedling growth under different PH. *North Rice*, 2015, 45(1): 6-12. (in Chinese with English abstract)
- [7] 于辉, 王俊丽, 向佐湘. 镉胁迫对白三叶和马蹄金种子萌发的影响. 草原与草坪, 2012, 32(1): 39-41.
Yu H, Wang J L, Xiang Z X. Influence of cadmium on seed germination of *Trifolium repens* and *Dichondra repens*. *Grasslands Lawns*, 2012, 32(1): 39-41. (in Chinese with English abstract)
- [8] 韩宝贺, 朱宏, 张艺馨. 镉对三种草坪草种子萌发与生长的影响. 中国草地学报, 2014, 36(3): 98-102.
Han B H, Zhu H, Zhang Y X. Effect of cadmium stress on the seed germination and growth of tress turf grasses. *Chin J Grassland*. 2014, 36(3): 98-102. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈杰. 不同浓度 Cd^{2+} 对水稻种子萌发的影响. 中国种业, 2013(3):50-53.
Chen J. Effects of different cadmium concentrations on seed germination of rice. *China Seed Ind*, 2013(3): 50-53. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孟桂元, 唐婷, 周静, 龙继瑞, 曾淑英. 不同水稻品种种子萌发及根芽生长的耐镉性差异研究. 杂交水稻, 2015, 30(5): 65-69.
Meng G Y, Tang T, Zhou J, Long J R, Zeng S Y. Studies on cadmium tolerance differences of seed germination and growth of roots and shoots in different rice varieties. *Hybrid Rice*, 2015, 30(5): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郭士伟, 李万昌, 强苏航, 彭陈, 项华. 镉(Cd) 对南粳 9108 种子萌发及发芽过程中保护酶活性的影响. 江西农业学报, 2015, 27(11): 11-14.
Guo S W, Li W C, Qiang S H, Peng C, Xiang H. Effects

- of cadmium(Cd) stress on seed germination and seedling protective enzymes activities of rice variety Nanjing 9108. *Acta Agric Jiangxi*, 2015, 27(11): 11-14. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘义富, 毛昆明. 镉对蓖麻种子萌发的影响. 西南农业学报, 2013, 26(3): 45-48.
Liu Y F, Mao K M. Effects of cadmium on *Ricinus communis* L. seed germination. *Southwest China J Agric Sci*, 2013, 26(3): 45-48. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韦新东, 黄一格, 王颖. 镉、铅胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响. 北方园艺, 2016(2): 71-74.
Wei X D, Huang Y G, Wang Y. Effect of heavy metal cadmium and lead stress on seed germination and seedlings growth of the *trifolium repens*. *Northern Hortic*, 2016(2): 71-74. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曲凯丽, 张艺馨, 朱宏. 镉胁迫对小麦种子萌发的影响. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2014, 30(6): 94-97.
Qu K L, Zhang Y X, Zhu H. The Effects of cadmium stress on wheat germination. *Nat Sci J Harbin Nor Univ*, 2014, 30(6): 94-97. (in Chinese with English abstract)
- [15] Meng G Y, Li M Y, Zhou J, Tang T, Xiao L, Zeng S Y. Study on Cadmium Tolerance of seed germination and seedlings growth of different rice varieties. *Agri Sci & Technol*, 2015, 16(11): 2451-2455, 2461.
- [16] 曾翔, 张玉焯, 王凯荣. 镉对水稻种子萌发的影响. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1665-1668.
Zeng X, Zhang Y Z, Wang K R. The Effects of cadmium stress on rice germination. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(7): 1665-1668. (in Chinese with English abstract)