

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.02.034

重金属镉对 8 个水稻(*Oryza sativa* L.) 品种(系)萌发和出芽生长的影响

夏芳¹, 康海岐², 侯勇³, 徐莺¹

(1. 四川大学生命科学学院生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065;
2. 四川省农业科学院作物研究所, 成都 610066; 3. 四川省农业科学院生物技术核技术研究所, 成都 610066)

摘要: 为了探明不同水稻品种间抗镉能力差异及不同镉胁迫水平对水稻种子萌发和出芽生长的影响, 对轻、中、重度镉胁迫下 8 个水稻品种(系)萌发和出芽生长间的相关性状指标进行收集, 并通过聚类分析法进行分析评价。结果表明: 不同水稻品种抗镉能力存在较大差异, 轻度镉胁迫对水稻萌发的影响, 更多的体现为对水稻种子活力的单抑制效应, 该水平下的综合性状表现更符合相关性拟合曲线, 适合用于抗镉品种的筛选。水稻出芽期间受镉胁迫影响最大的是转绿时间和根系生长。三个杂交水稻主要亲本(保持系岗 46B、II-32B 和恢复系成恢 3203)都属于高抗型, 三个常规籼稻品种(桂朝 2 号、桂育 7 号及五山丝苗)都属于敏感型。

关键词: 水稻; 镉; 胁迫; 种子萌发; 出芽生长

中图分类号: S511.01; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)02-0407-07

The effect of heavy metal cadmium on germination and post-germination growth of eight rice varieties

XIA Fang¹, KANG Hai-Qi², HOU Yong³, XU Ying¹

(1. Key Laboratory of Bio-resources and Eco-Environment, Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 3. Biotechnology and Nuclear Technology Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Sichuan Chengdu 610066, China)

Abstract: To explore the differences of cadmium resistant ability among rice varieties and the effects of cadmium stress at different levels on their germination and post-germinating growth, the related phenotypic indices of eighty varieties under low, moderated and high stress levels, respectively, were collected and analyzed by clustering methodology. The results showed that there was a great difference in the ability to resist cadmium in different rice varieties. The effect of mild cadmium stress on rice germination was more reflected by the single inhibitory effect on seed vigor. The comprehensive characters at this level were more consistent with the correlation fitting curve, which was suitable for screening cadmium resistant varieties. The most effects of cadmium stress during rice germination were the green time and root growth. The three hybrid rice parents (maintainer lines Gang 46B, II-32B and restorer line Chenghui 3203) belonged to the high resistant type, the three classic indica rice varieties (Guichao 2, Gui Yu 7 and Wushansimiao) were sensitive.

Keywords: *Oryza sativa*; Cadmium; Stress; Germination; Post-germination growth

收稿日期: 2017-04-11

基金项目: 四川省应用基础研究项目(2016JY0013); 四川省财政能力提升工程项目(2016ZYPZ-011); 四川省育种攻关项目(2016NYZ0028); 四川省农业科学院青年基金(2015QNJJ-002)

作者简介: 夏芳(1993-), 女, 湖南岳阳人, 硕士, 主要从事生物安全研究. E-mail: woshixiafang@126.com

通讯作者: 徐莺. E-mail: xuying@scu.edu.cn; 康海岐. E-mail: kanghq@126.com

1 引言

农田土壤镉污染已成为一个日益严重的普遍性问题^[1,2]。即使在镉浓度很低的土壤中,有毒重金属镉也能通过植株转运作用,在作物可食用部分积累^[3]。大量或长期食用镉富集食物,会导致人体重金属中毒^[4,5]。包括水稻在内的禾本科植物,由于其特殊的生理特性,能直接感受到根系或者叶面受到的包括镉在内的多种重金属胁迫作用。镉胁迫会降低种子的发芽率,发芽指数等,进而直接影响种子的抗性情况。不仅不同水稻品种对重金属镉胁迫表现出抗性差异^[6],不同浓度胁迫下水稻种子的发芽情况也有所差异。国际上广泛使用种子萌发及幼苗生长阶段进行重金属抗性评估试验^[7,8]。对水稻重金属抗镉胁迫能力的研究主要试验浓度存在很大差异,且以单一性状作为评判胁迫下植株抗镉能力强弱依据的研究也居多^[9-12]。尽管各个胁迫下水稻的相应表征性状都有一定变化,但何种镉胁迫条件下何种测定指标才是辨别污染抗性能力强弱的依据没有一个明确的定论。本研究通过收集 8 个不同水稻品种镉胁迫下种子萌发期间相应生长数据,采用相关性分析与聚类分析,对其抗镉胁迫能力进行综合评价,并将它们分为高抗、低抗以及中间型三种,为研究水稻抗镉机理以及抗镉植物品种的培育提供了有价值的材料和参考依据。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验水稻品种(系)由四川省农业科学院作物研究所提供,选择了杂交水稻保持系 II-32B 和岗 46B、恢复系绵恢 725 和成恢 3203 等杂交水稻主要亲本和常规籼稻桂育 7 号、五山丝苗、桂朝 2 号及常规粳稻日本晴等。

2.2 方法

2.2.1 试验设计与处理 采用水培试验进行镉胁迫处理。首先选取健康饱满的参试水稻种子清洗干净,用 1% NaClO 溶液浸泡 20 min,再用双蒸水反复清洗后,将种子先浸泡 12 h,再从水中取出沥干,暗处理 2d 等待种子露芽白。设 0、10、30、50、100 μM 共 5 个 CdCl_2 浓度梯度处理,每处理重复 3 次,每个处理下 50 粒种子。露白后的种子置于培养皿中。在光照 14h/黑暗 10h,光强 3000lx,温度

28 $^{\circ}\text{C}$ /20 $^{\circ}\text{C}$,湿度 70% 的条件下培养^[16]。发芽前每天更换营养液,防止水分蒸发影响胁迫浓度。

2.2.2 检测性状指标和方法 为了消除水稻品种间固有差异,统一采用相对性状值进行综合抗镉胁迫能力分析^[13]。种子发芽期间每隔 1d 观察种子发芽情况,以芽长达到种子长度的一半为发芽标准,并记录下发芽种子数,计算不同品种的种子相对发芽率、相对发芽势、相对活力指数、相对发芽指数、相对抗逆萌发指数^[7]。选取系列指标进行相关性分析及聚类分析,对不同水稻抗镉能力进行的综合性评价。

种子发芽率 = 8d 内发芽种子数 / 供试种子数

种子相对发芽率 = 胁迫下种子发芽率 / 对照下种子发芽率

种子发芽势 = 4d 内发芽种子数 / 供试种子数

种子相对发芽势 = 胁迫下种子发芽势 / 对照下种子发芽势

种子相对发芽指数 = 胁迫下种子发芽指数 / 对照下种子发芽指数

种子发芽指数 $GI = \Sigma(Gt/Dt)$

种子抗逆萌发指数 = 逆境下萌发数 / 对照萌发数

($PIS/PIC = 1nd_2 + 0.75nd_4 + 0.50nd_6 + 0.25nd_8$)

种子活力指数 (VI) = $S \times Gt$

种子相对活力指数 = 胁迫下种子活力指数 / 对照下种子活力指数

式中, Gt 为 t 天的发芽数, Dt 为发芽日数, S 为幼苗根长 (cm)

抗镉系数 (CR) = 胁迫下水稻芽长 / 对照下水稻芽长

抗镉指数 (CRI) = 抗镉系数 (CR) \times 胁迫下水稻的芽长 / 所有水稻胁迫下的平均芽长

2.2.3 数据处理与分析 采用 Excel 2003 进行基础数据处理归类,采用 SPSS13.0 软件进行相关系数分析及聚类分析。

3 结果分析

3.1 轻度重金属镉胁迫下水稻种子萌发表现

轻度重金属镉胁迫对水稻造成的损伤较小,对不同水稻品种种子萌发的抑制作用并不显著。由表 1 知,当设定溶液镉胁迫浓度为 10 μM 时,水稻萌芽期相对生长指标都有所下降。相对发芽率就对照

组而言平均降幅为 11%。其中, 绵恢 725、II-32B 及桂朝 2 号三个品种的相对发芽率降幅变化最小, 分别为 2%、6% 和 7%。受胁迫影响最大的则是五山丝苗及日本晴两个基因型, 降幅分别是 28% 和 20%。而对于种子的相对发芽势, 10 μ M 的轻度重金属镉胁迫下 8 个受试品种整体降幅为 10%, 其中基因型五山丝苗种子在该浓度胁迫下相对发芽势受到显著影响, 降幅高达 35%。但绵恢 725, 日本晴, 桂朝 2 号三个基因型水稻的相对发芽势较正常处理而言比值大于 1, 说明轻度重金属镉胁迫还增加了该 3 种类型基因型水稻的相对发芽势。种子的相对发芽指数及相对活力指数能反映出种子质量的高低, 两者都与胁迫成反比关系。本浓度胁迫下除五山丝苗降幅高达 45% 外, 其他各水稻品种整体降幅较小, 均在 10%~20% 以内。以绵恢 725 与桂朝 2 号种子相对发芽指数受影响最小, 降幅仅为 3.5%。种子活力指数有一个大的跨越, 降幅从 12%~55% 不等。其受影响从小到大依次是桂朝 2 号, 日本晴, 桂育 7 号, 绵恢 725, 岗 46B, II-32B, 成恢 3203, 以及五山丝苗。种子活力的整体平均降幅为 37%。而该轻度重金属镉胁迫下水稻种子抗逆萌发指数与种子相对发芽率数值上较为接近, 平均降幅为 15%。桂育 7 号机 II-32B 抗逆萌发指数受到胁迫影响最小, 降幅分别为 2% 和 7%。

表 1 轻度镉胁迫下不同水稻品种种子萌发表现

Tab. 1 Seed germination of different rice varieties under mild cadmium stress level

指标	种子相对发芽率	种子相对发芽势	种子相对发芽指数	种子相对活力指数	种子抗逆萌发指数
绵恢 725	0.980	1.000	0.965	0.638	0.760
II-32B	0.940	0.848	0.902	0.582	0.926
岗 46B	0.894	0.826	0.856	0.604	0.787
桂育 7 号	0.900	0.818	0.860	0.640	0.983
五山丝苗	0.714	0.647	0.552	0.469	0.827
日本晴	0.792	1.048	0.820	0.681	0.830
成恢 3203	0.896	0.861	0.852	0.568	0.828
桂朝 2 号	0.933	1.148	0.965	0.881	0.876

3.2 中度重金属镉胁迫下水稻种子萌发表现

当镉胁迫浓度达到 30 μ M 和 50 μ M 时, 水稻的种子发芽受到明显抑制。30 μ M 镉浓度胁迫时各水稻品种的相对发芽率平均降幅达到 27%, 受镉胁迫影响小的品种分别为绵恢 725, 成恢 3203 及 II-32B, 降幅分别为 16%, 18%, 20%。受镉胁迫影响最大的三个品种为五山丝苗、日本晴及桂育 7 号, 其降幅分别为 38%, 37%, 36%。50 μ M 浓度水平下

的情况类似 30 μ M 浓度水平, 只是种子的相对发芽率平均降幅进一步升至达到 39%。仍然是绵恢 725 种子相对发芽率受影响最小, 降幅仅为 22%, 受影响最大的基因型水稻日本晴的降幅高达则 50%。而相对发芽势在 30 μ M 胁迫下桂育 7 号与桂朝 2 号基因型受影响最小, 降幅分别为 32% 和 34%, 岗 46B 和五山丝苗基因型受胁迫影响最大, 降幅都为 34%, 在 50 μ M 下, 受影响最大的品种五山丝苗其降幅达到 82%。除日本晴有明显低于平均的降幅外, 中度胁迫下水稻各品种的相对发芽势平均降幅达差异稳定在 40%~50% 左右。且与水稻种子的相对发芽指数平均降幅接近。但在 50 μ M 条件下, 五山丝苗该指标受到的影响相较相对发芽指数的 82% 略有减小, 降幅为 78%。中度胁迫下各水稻品种种子的相对活力指数有明显下降。此前相对发芽指数数值较高的绵恢 725, 桂朝 2 号及桂育 7 号品种的相对活力指数都有明显下降, 平均降幅在 70% 左右。而此前一直受抑制较为严重的五山丝苗及日本晴在 30 μ M 时与整体平均能力差异不大。而此前受影响相对较小的成恢 3203 在中度胁迫下该活力指数指标降幅最大, 30 μ M 胁迫下的相对活力指数降幅为 79%, 50 μ M 胁迫下的相对活力指数降幅为 89%。中度胁迫下各水稻品种的种子抗逆萌发指数相对稳定。数值上与种子相对发芽指数数值接近。30 μ M 胁迫时, 绵恢 725, 桂育 7 号受影响相对较小, 降幅为 40% 左右。II-32B 受的影响相对较大, 降幅为 60%。而当胁迫浓度为 50 μ M 时, 水稻各品种的抗逆萌发指数差异不大, 降幅都在 60% 左右。

3.3 重度重金属镉胁迫下水稻种子萌发表现

当镉胁迫浓度达到 100 μ M 时, 水稻各品种种子萌发都受到严重影响。各测定指标都有明显的降幅。由表 3 可知, 萌发期的相对指标的受影响程度都相似, 种子相对发芽率降幅均在 45% 左右, 种子相对发芽势降幅为 65% 左右, 种子相对发芽指数降幅为 70%, 种子相对活力指数降幅为 90%, 种子抗逆萌发指数为 75%。各品种各指标的变化并不能明显判断出水稻品种受影响程度的差异性。但值得一提的是, 重度胁迫下, 水稻种子的相对发芽指数与种子抗逆萌发指数降幅接, 种子相对活力指数受胁迫影响最大, 成恢 3203 种子相对活力指数降幅高达 96%。五山丝苗种子相对发芽势降幅高达 94%。

表 2 中度镉胁迫下不同水稻品种种子萌发表现

Tab. 2 Seed germination of different rice varieties under moderate cadmium stress level

镉浓度 (μM)	种子相对发芽率		种子相对发芽势		种子相对发芽指数		种子相对活力指数		种子抗逆萌发指数	
	30	50	30	50	30	50	30	50	30	50
绵恢 725	0.840	0.780	0.525	0.625	0.655	0.574	0.378	0.305	0.639	0.452
II-32B	0.800	0.660	0.587	0.435	0.612	0.423	0.382	0.255	0.406	0.315
岗 46B	0.745	0.617	0.478	0.609	0.617	0.527	0.309	0.178	0.467	0.344
桂育 7 号	0.640	0.540	0.682	0.773	0.646	0.526	0.454	0.307	0.605	0.399
五山丝苗	0.619	0.524	0.471	0.118	0.479	0.289	0.363	0.179	0.491	0.313
日本晴	0.625	0.500	0.571	0.619	0.571	0.433	0.437	0.282	0.482	0.324
成恢 3203	0.813	0.583	0.639	0.500	0.654	0.424	0.218	0.115	0.546	0.350
桂朝 2 号	0.733	0.622	0.667	0.630	0.607	0.446	0.448	0.288	0.549	0.382

表 3 重度镉胁迫下不同水稻品种种子萌发表现

Tab. 3 Seed germination of different rice varieties under heavy cadmium stress level

指标	种子相对发芽率	种子相对发芽势	种子相对发芽指数	种子相对活力指数	种子抗逆萌发指数
绵恢 725	0.520	0.425	0.380	0.111	0.296
II-32B	0.400	0.217	0.214	0.105	0.210
岗 46B	0.489	0.304	0.367	0.094	0.213
桂育 7 号	0.480	0.591	0.402	0.171	0.266
五山丝苗	0.452	0.059	0.231	0.131	0.196
日本晴	0.438	0.286	0.255	0.144	0.219
成恢 3203	0.458	0.417	0.333	0.042	0.276
桂朝 2 号	0.511	0.481	0.369	0.128	0.265

3.4 种子萌发指数与抗镉系数、抗镉指数的相关系数

除少数品种在轻度重金属镉胁迫下表现出促进的相对发芽势外,大部分水稻品种的相关发芽指标改变都与种子的抗镉能力呈负相关.将收集到的 4 个镉浓度胁迫下的发芽指标,采用相关系数法,与水稻抗镉胁迫能力进行相关性分析.由表 2 可知,最符合其负相关性规律的数据组为 $10\mu\text{M}$ 浓度下测定的系列指标.在 $10\mu\text{M}$ 胁迫下,水稻的种子相对发芽率,种子相对发芽势,种子活力指数及种子抗逆指数都与胁迫呈现显著相关,最符合相关性拟合曲线.而中度及重度重金属镉胁迫下,各组数据的指标都没有呈现出完全相关性.这表明, $10\mu\text{M}$ 浓度镉胁迫下测定的相关数据可以用来作为评价该组试验中 8 个基因型水稻发芽期的抗镉胁迫能力.前人试验中也表明,胁迫试验需要关注低剂量拟合效应^[14].

3.5 镉胁迫下水稻发芽期的相关表现

镉胁迫除影响水稻出芽外,对发芽期水稻根芽生长也有一定影响.由图 1 可明显看出,同一品种随着镉胁迫浓度的增大,萌发受到影响的严重程度增加.除出芽率以外,发芽后芽色转绿时间也存在区别.胁迫越大,转绿需要的时间越久.其中以桂朝 2 号为甚.出芽成功后一段时间,其芽色在胁迫下呈现出棕褐色.浓度胁迫为 $30\mu\text{M}$ 变为明显的棕褐色的.胁迫下水稻的芽生长也受到明显抑制,并且根尖细胞受损严重,桂育 7 号就表现出芽尖脆弱易断现象,五山丝苗重度镉胁迫下部分根尖糜烂.成恢 3203 则表现出芽生长极度扭曲,根粗短的形态,且胁迫浓度越大,该现象越明显.说明水稻可以通过调节根与芽的生长抵抗胁迫带来的不利影响.不过 II-32-B 在出芽成功后,根的生长受抑制程度相对较小,在其他品种受到抑制的情况下,仍然有须根生长.水稻胁迫下的出芽情况及根与芽的生长状况可以作为衡量重金属镉抗性强弱的有利指标.

3.6 基于萌发性状的水稻品种聚类分析

由于观测分析发现,每单个测定指标下分析出抗镉能力强弱的品种都不一样,因此需对 8 类基因型水稻抗镉胁迫能力进行综合聚类分析.依据水稻种子萌发期相关性状,采用卡方距离中的最短距离法^[17],将受测水稻分为 3 组.第一组为高抗型品种,包含岗 46B,成恢 3203 以及 II-32-B 三个品种.第二组为敏感型品种,包含绵恢 725,桂朝 2 号,桂育 7 号以及五山丝苗.其中以五山丝苗的性状受影响程度最大,表现出的抗性最弱.第三组中间型品种仅有日本晴一个品种.

表 4 种子萌发指数与抗镉系数、抗镉指数的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between the germination index with Cd resistance coefficients and Cd resistance index

	镉胁迫处理(μM)	相对发芽率	相对发芽势	相对发芽指数	相对活力指数	种子抗逆萌发指数
抗镉系数 CR	10	0.873 **	0.932 **	0.931 **	0.916 **	0.955 **
	30	0.601	0.951 **	0.945 **	0.939 **	0.978 **
	50	0.450	0.775 *	0.835 **	0.922 **	0.856 **
	100	0.143	0.629	0.614	0.830 **	0.540
抗镉指数 CRI	10	0.800 *	0.781 *	0.910 **	0.709 *	0.895 **
	30	0.601	0.841 **	0.928 **	0.831	0.936 **
	50	0.540	0.462	0.627	0.821 *	0.659
	100	0.271	0.309	0.144	0.516	0.198

CR: Cadmium resistance Coefficients, CRI: Cadmium resistance Index

*, mean significant at the 5% probability levels. **, mean significant at the 1% probability levels

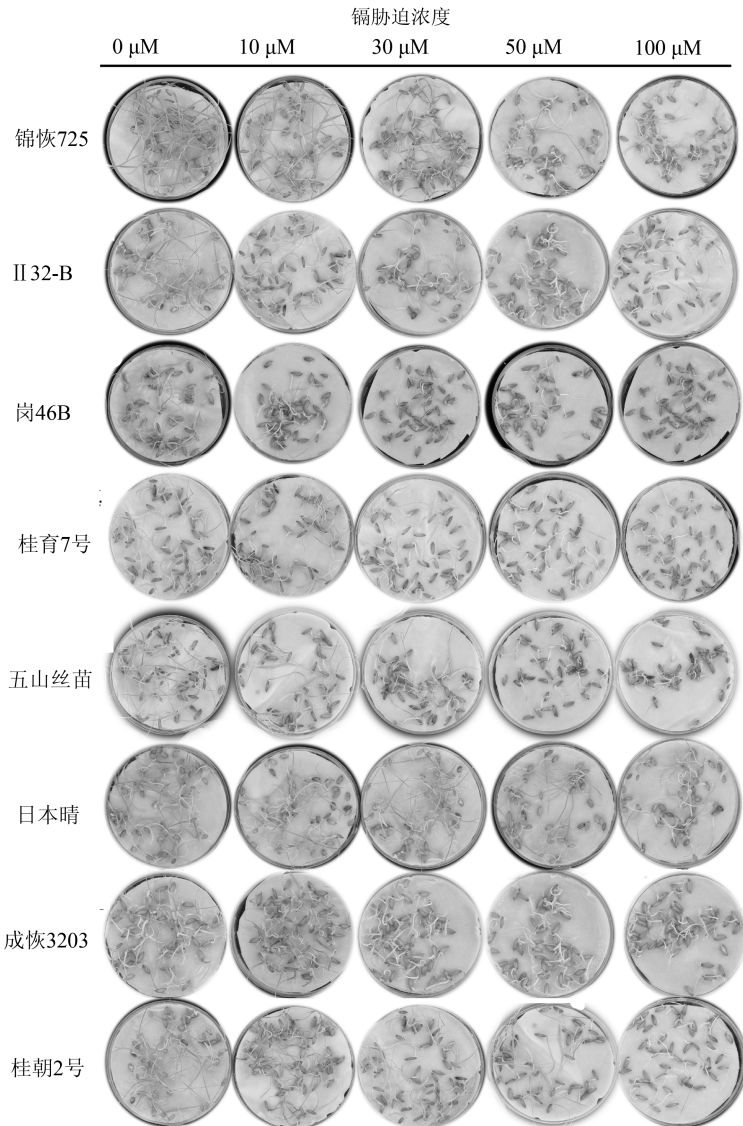


图 1 不同镉胁迫程度下不同水稻虫芽生长表型

Fig. 1 The seedling growth phenotypes of different rice varieties under different cadmium stress levels

4 讨 论

了解水稻种子萌发对镉胁迫的反应,是系统认识水稻重金属镉伤害机理的途径之一.从文献调研看,镉胁迫下水稻种子萌发期相关数据一般为选择多指标单浓度或者单指标多浓度,多浓度多指标的综合研究及对轻中重度重金属镉胁迫后水稻表现再进行品种(系)的集中归类分析较少.关于评判水稻发芽期抗镉能力强弱的指标,不同学者有不同的研究方法及其结果.何俊瑜^[7]的研究以水稻表征性状为评判标准,刘洋^[15]以光合作用为评判标准,王贵明^[16]的研究根据胁迫下酶活系统的表现情况作为评判标准.张磊王凯荣等做过常规稻及杂交稻之间抗性差别的分析^[17,18],龙小林做过粳稻与籼稻之间抗镉能力的差异分析^[19],张洪江对水稻亲本材料进行过镉含量筛选试验^[20],石时来研究过不同水稻保持系材料镉抗性实验^[21].以上学者由于所选浓度不一样,研究的侧重点方面不一样,所展现出来的抗性差异结果也就不一样.

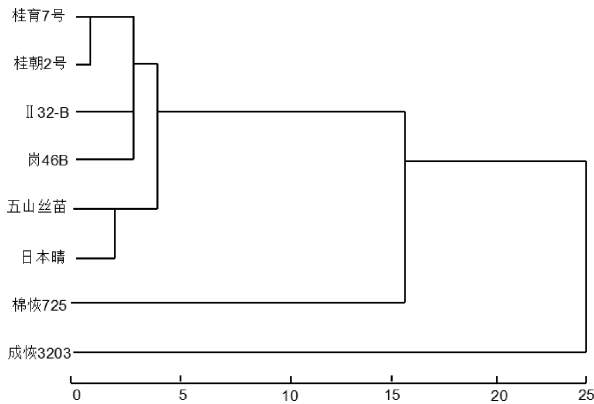


图 2 镉胁迫下不同基因型水稻较镉响应的综合聚类分析图

Fig. 2 The comprehensive cluster dendrogram of different rice varieties based on their responses to cadmium stress

本文的研究结果显示,种子萌发的本质是在水的活化作用下启动基因组中新基因的表达或原有基因的活化,使胚恢复代谢及生长.种子发芽前期胚内供应养分,轻度镉胁迫对种子发芽的毒害作用容易被部分掩盖,因而水稻胚所受伤害较轻.除种子活力指数受到较大的抑制作用外,其它相应指标的降幅都较小,皆在 10% 左右.从活力指数看出,轻度重金属镉胁迫对水稻种子萌发的影响,更多的体现为对水稻种子活力的单抑制效应.此结论与周青的研究结果相同^[22].且该胁迫下水稻响应的生

长表现表现为出芽缓慢,芽色及根生长受影响不大.

在中重度胁迫下水稻的镉检测指标降幅明显.中度镉胁迫下水稻种子相对发芽率,种子相对发芽势,种子相对发芽指数,种子相对抗逆指数,降幅相对接近,种子活力指数降幅最大为 60% 左右.同一指标之间水稻降幅差异明显.但达到重度重金属镉胁迫时,同一指标不同的水稻品种差异不明显.整体降幅在 70% 左右,种子活力指数降幅高达 90% 左右.单看重金属浓度对种子萌发的影响,种子活力指数是一个很具有代表性的指标.在中重度镉胁迫下成恢 3203 出现根生长粗短现象,施农农^[23]曾指出因为浓度过大抑制种子有氧呼吸,镉离子会阻碍氧分子向胚细胞内部扩散,从而使得胚根细胞缺氧,生长受阻,出现只长弱芽不长根的现象.这种通过抑制根生长,将重金属镉阻隔在水稻根部也是水稻抗性机制的一部分.正常情况下在幼芽从芽鞘中伸出不完全叶时,叶色会转绿.本试验中桂朝 2 号幼芽已长出胚芽鞘,但整体仍然不见转绿.说明在种子发芽期镉胁迫可以通过抑制水稻叶绿素的合成而抑制植株的生长发育.桂育 7 号及五山丝苗在重度镉胁迫下出现根尖脆弱甚至个别糜烂现象.主要原因是由于根尖最初就完全暴露在重金属溶液中,生长和发芽过程受浓度条件控制,毒害作用最为严重.故抗性弱的品种根尖受损严重.

通过对试验收集到的数量性状进行相关性分析发现,轻度重金属胁迫下的指标其综合性状表现更符合拟合曲线.故轻度胁迫下水稻的相对性状表现作为筛选重金属抗性指标,与实际环境情况最相符合.此结果也与廖钢^[24]的研究结果相同.且材料涵盖籼稻和粳稻,杂交稻和常规稻,以及保持系和恢复系三个方面.通过聚类分析将水稻分为三类.三个杂交水稻主要亲本品种保持系岗 46B、II-32B,和恢复系成恢 3203 都属于高抗性.中间型仅包含粳稻日本晴.三个常规籼稻品种桂朝 2 号、桂育 7 号及五山丝苗都属于敏感型.常规稻与杂交稻的研究结果与曾翔的研究结果一致^[25].II 32-B 的研究结果与何俊瑜相同,关于绵恢 725 的研究结果与喻华相同^[26].本文的工作可作为水稻重金属抗性实验的一个补充.

参考文献:

- [1] Gallego S M, Pena L B, Barcia R A, *et al.* Unraveling cadmium toxicity and tolerance in plants: in-

- sight into regulatory mechanisms [J]. *Environ Exp Bot*, 2012, 83: 33.
- [2] 谢甜,冯刚,闫庆龙,等. 镉胁迫对转 PprI 基因油菜生理生化的影响[J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2017, 54: 387.
- [3] Arao T, Ae N. Genotypic variations in cadmium levels of rice grain[J]. *Soil Sci Plant Nutri*, 2003, 49: 473.
- [4] Aziz R, Rafiq M T, Li T, *et al.* Uptake of Cadmium by Rice Grown on Contaminated Soils and Its Bioavailability/Toxicity in Human Cell Lines (Caco-2/HL-7702) [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63: 3599.
- [5] 余红英,曹海军,宋鹏,等. 三种常见食用蕈菌对重金属的耐受与富集研究[J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2008, 45: 1263.
- [6] Yu H, Wang J, Fang W, *et al.* Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Sci Total Environ*, 2006, 370: 302.
- [7] 何俊瑜,任艳芳,任明见,等. 不同品种水稻种子萌发和幼苗生长的耐镉性评价[J]. *中国农学通报*, 2010, 26: 184.
- [8] Ahsan N, Lee S H, Lee D G, *et al.* Physiological and protein profiles alternation of germinating rice seedlings exposed to acute cadmium toxicity[J]. *C R Biol*, 2007, 330: 735.
- [9] Gu H H, Li F P, Guan X, *et al.* Effects of fly ash on heavy metal uptake of rice growing on multi-metal contaminated acidic soil [J]. *Adv Mater Res*, 2013, 680: 94.
- [10] Amanullah MAHAR, Wang P, Li R H, *et al.* Immobilization of lead and Cadmium in contaminated soil using amendments; A Review[J]. *Pedosphere*, 2015, 25: 555.
- [11] Rehman M Z, Rizwan M, Ghafoor A, *et al.* Effect of inorganic amendments for in situ stabilization of cadmium in contaminated soils and its phyto-availability to wheat and rice under rotation[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2015, 22: 16897.
- [12] Hu P, Ouyang Y, Wu L, *et al.* Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar[J]. *J Environ Sci*, 2015, 27: 225.
- [13] 严明建,黄文章,胡景涛,等. 聚类分析在水稻抗旱材料分类中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38: 9998.
- [14] 廖钢. 水稻对重金属镉胁迫响应的品种间差异[D]. 长沙:湖南农业大学, 2011.
- [15] 刘洋,张玉焯,方宝华,等. 栽培模式对水稻镉积累差异及其与光合生理关系的研究[J]. *农业环境与发展*, 2014: 450.
- [16] 王贵民,陈国祥,陈利,等. 镉胁迫下杂交稻2品种幼苗的抗性及其镉含量的差异[J]. *生态与农村环境学报*, 2004, 20: 44.
- [17] 张磊,杨惟薇,张超兰,等. 不同水稻类型对镉的耐性、累积性与转运性质研究[J]. *西南农业学报*, 2013, 26: 2185.
- [18] 王凯荣,龚惠群. 不同生育期镉胁迫对两种水稻的生长、镉吸收及糙米镉含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2006, 15: 1197.
- [19] 龙小林,向珣朝,徐艳芳,等. 镉胁迫下籼稻和粳稻对镉的吸收、转移和分配研究[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28: 177.
- [20] 张洪江. 镉安全水稻亲本材料的筛选及其生理机制研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2012.
- [21] 石时来,林丹青,朱昌兰,等. 不同水稻保持系材料萌发和幼苗生长的耐镉性评价[C]. *中国作物学会——2015年学术年会论文摘要集*. 2015.
- [22] 周青,黄晓华. 镉对种子萌发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2000, 19: 156.
- [23] 施农农,陈志伟,贾秀英. 镉胁迫下水稻种子的萌芽生长及体内水解酶的活性变化[J]. *农业环境科学学报*, 1999, 18: 213.
- [24] 廖钢. 水稻对重金属镉胁迫响应的品种间差异[D]. 长沙:湖南农业大学, 2011.
- [25] 曾翔. 水稻镉积累和耐性机理及其品种间差异研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2006.
- [26] 喻华,冯文强,秦鱼生,等. 镉胁迫对不同基因型水稻生长和镉吸收的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26: 878.