

日本引进芸薹属白菜型种质资源耐镉性评价鉴定

管文杰, 张付贵, 肖欣, 李浩, 伍晓明

(农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室 / 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062)

摘要: 为了丰富我国芸薹属资源中低镉资源的多样性, 本研究对日本引进的 79 份白菜型资源在幼苗期进行较高 (30 mg/L) 和中等 (10 mg/L) 的镉胁迫处理, 从而对其开展耐镉性和镉积累特性研究, 相较于传统采用镉污染的土壤进行培养的方法, 具有省时、省力、稳定性高等优点。结果显示, 79 份资源的耐镉性变异丰富, 较高 (30 mg/L) 和中等 (10 mg/L) 的镉胁迫处理下筛选到稳定耐镉和镉敏感的材料各 3 份。镉积累特性分析发现, 稳定耐镉材料地上部和胚根的 Cd 含量均显著低于镉敏感材料, 并且 D069 胚根和地上部的镉含量都显著低于其他材料, D125 的迁移系数相对较低, 具有较高的育种利用价值。本研究筛选得到的 D069 和 D125 两份耐镉和低积累资源丰富了国内芸薹属资源中低积累镉的基因库, 将极大促进芸薹属污染安全新品种培育进程, 可有效推动镉污染农田的安全利用效率。

关键词: 种质资源; 芸薹属; 耐镉性; 镉积累; 污染安全品种

Evaluation of Cadmium Tolerance in *Brassica rapa* L. Resources Imported from Japan

GUAN Wen-jie, ZHANG Fu-gui, XIAO Xin, LI Hao, WU Xiao-ming

(Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/
Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062)

Abstract: Application of pollution-safe cultivars (PSCs) was recognized as one of the most effective strategies for safe utilization in farmland polluted by Cd. However, breeding for PSCs Brassica cultivar in China has been restricted due to the availability of fewer Cd-excluder and low-Cd-accumulation resources. *Brassica rapa* is one of the diploid species in Brassica, and this could provide genomic resource for breeding of Brassica cultivars (such as rapeseed and Chinese cabbage). This study aimed at identifying elite genomic resources with Cd-tolerant and low-Cd-accumulation in 79 *B. rapa* germplasms which were collected from Japan. An abundant variation on Cd tolerance was observed under high-cadmium stress condition (30 mg/L). Three Cd-tolerant (SCT) and three Cd-sensitive (SCS) accessions were identified under both high and medium (10 mg/L) cadmium stress conditions. We found that Cd concentration in both radicle and shoots of SCT accessions were significant lower than these of SCS accessions. Finally, two SCT accession D069 (lowest Cd concentration in both radicle and shoot) and D125 (lowest translocation factors) were identified with a potential use for PSCs Brassica cultivar breeding.

Key words: Germplasm; *Brassica*; cadmium tolerance; cadmium accumulation; pollution-safe cultivars

收稿日期: 2019-11-08 修回日期: 2019-11-28 网络出版日期: 2019-12-26

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20191108001>

第一作者研究方向为油菜种质资源, E-mail: 82101186041@caas.cn

通信作者: 伍晓明, 研究方向为油菜种质资源, E-mail: wuxm@oilcrops.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (31470088); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0100202)

Foundation project: The National Natural Science Foundation of China (31470088), The National Key Program for Research and Development (2016YFD0100202)

随着全球工业化和城市化迅速发展的进程,大量的污染物被排放到环境中,严重破坏了自然生态^[1]。2014年中国发布的全国土壤污染调查公报显示,全国范围内土壤镉(Cd, cadmium)的点位超标率高达7.0%^[2]。另外,研究表明土壤中的镉会通过食物链富集到人体中,并引起包括肾功能不全、骨质疏松、心血管疾病和癌症等的发生,严重威胁着人类的健康^[3-5]。为了切实加强土壤污染防治,2016年5月28日国务院印发了《土壤污染防治行动计划》,提出了10个方面的计划用于解决受污染土壤安全利用的问题。并且研究发现,实现镉污染农田安全利用最有效的策略之一是污染安全品种(PSCs, pollution-safe cultivars)的利用^[6-7],该策略旨在培育低积累甚至不积累的作物新品种,使其在污染土壤中生长时,食用部分污染物的浓度低于中国国家食品卫生标准(NFHSC)规定安全食用的最大允许浓度^[6,8]。

白菜(*Brassica rapa* L., 2n=20, AA)是十字花科芸薹属最重要的一个基本种,还是油菜主栽种甘蓝型油菜的祖先种,其栽培历史悠久,种内变异丰富,有白菜型油菜、结球白菜、青菜、菜薹、芜菁等多个亚种,是油菜育种的重要基因资源供体^[9-11]。可见,鉴定发掘携带低镉积累优异基因的白菜资源用于培育芸薹属污染安全品种(PSCs),可有效提升我国油菜和芸薹属蔬菜的食用安全性,对于降低我国居民镉暴露风险,解决镉污染农田的安全利用具有重要的意义^[4]。虽然国内一些单位开展了一些关于低积累镉的白菜资源筛选的工作,但是仅在部分大白菜和青菜资源中进行鉴定和筛选,而且参试资源多来源于国内,筛选的资源遗传背景狭窄^[12-15]。

20世纪50-70年代在日本富山县神通川流域发生了世界上最早的镉污染公害事件,发生区的居

民因为饮食了镉超标的食物和水而患上严重的公害病——“骨痛病”^[15]。此后日本便开展了镉污染土地安全利用和污染治理方面的大量研究,植物镉积累机制及污染安全品种的培育起步较早,引进日本的芸薹属作物品种有望丰富我国芸薹属作物种质资源库中低积累镉优异基因源^[16-17]。

Lin等^[18]根据植物在镉胁迫下的反应,可将该植物分为敏感型、排异型、低积累和超积累4种基因型。因此,本研究首先在较高的镉处理条件下筛选日本引进的包括菜薹、大白菜、青菜、芜菁的79份白菜资源的耐镉材料,并进一步测定耐镉性资源的镉积累量,旨在从中高效地筛选出白菜耐镉性和低积累镉的优异基因资源,为芸薹属作物污染安全新品种的培育奠定坚实的物质基础。

1 材料与方法

1.1 材料

2014年从日本引进的79份白菜种质资源,包括菜薹、大白菜、青菜、芜菁等(表1)。

1.2 耐镉性表型初筛

2016年3月,每份材料选取健康饱满种子,用70%酒精消毒5 min,并用蒸馏水冲洗干净,最后用滤纸吸干种子表面的水分备用。将上述处理的种子置于铺有4层滤纸的培养皿内,每皿置30粒。本团队前期研究表明,最适合开展芸薹属耐镉性资源筛选的处理条件为30 mg/L的Cd胁迫^[19],故加入30 mg/L的Cd²⁺溶液(CdCl₂·21/2 H₂O配制)20 mL进行处理,对照组(CK)加入20 mL蒸馏水,每个处理重复3次。于人工气候箱内23℃黑暗培养2 d,然后置23℃,16 h光照、8 h黑暗的光周期培养至第7天。

Cd胁迫第7天,每皿选取生长一致的10株幼

表1 日本引进79份白菜种质资源信息

Table 1 Information of 79 *Brassica rapa* L. germplasm resources which were introduced from Japan

类别 Categories	数量 Count	引进编号 Accession number
菜薹 <i>Brassica campestris</i> L. subsp. <i>chinensis</i> var. <i>utilis</i> Tsen et Lee	6	D053, D054, D055, D056, D063, D064
大白菜 <i>Brassica pekinensis</i> (Lour.) Rupr.	19	D045, D086, D087, D089, D138, D140, D141, D142, D143, D144, D145, D146, D147, D148, D149, D150, D151, D152, D153
青菜 <i>Brassica chinensis</i> L.	29	D042, D043, D047, D048, D049, D050, D051, D052, D062, D065, D066, D067, D068, D069, D070, D071, D072, D073, D074, D075, D076, D077, D078, D080, D081, D082, D083, D084, D094
塌棵菜 <i>Brassica narinosa</i> L. H. Bailey	9	D090, D091, D092, D093, D095, D096, D097, D044, D058
芜菁 <i>Brassica rapa</i> L.	16	D019, D020, D021, D022, D023, D024, D026, D027, D028, D029, D030, D125, D126, D127, D128, D129

苗,测量其胚根长度(RL, radicle length),计算各品种相对胚根长度(RRL, relative radicle length)作为耐 Cd 性衡量指标。

1.3 极端表型材料的耐镉稳定性和镉积累特性研究

为了对在不同镉处理条件下耐性稳定的优异材料进行镉积累量的分析,本研究进一步监测 1.2 初筛得到的耐镉性和镉敏感材料在 10 mg/L 的 Cd^{2+} 溶液胁迫条件的表型稳定性,并分析其不同部位镉积累量^[20]。具体操作为:2016 年 4 月,在对初筛得到的材料种子进行消毒后,加入 10 mg/L 的 Cd^{2+} 溶液($\text{CdCl}_2 \cdot 21/2 \text{H}_2\text{O}$ 配制)20 mL 进行处理,对照组(CK)加入 20 mL 蒸馏水,每个处理重复 3 次。10 mg/L Cd 胁迫第 7 天,每皿选取生长一致的 10 株幼苗,测量其胚根长度。并用蒸馏水冲洗每皿中全部幼苗 3 次以上,洗净表面可能残留的 Cd^{2+} ,吸干幼苗表面的水分,分离并收集胚根和地上部,分别称重记为胚根鲜重(RFW, radicle fresh weight)和地上部鲜重(SFW, shoot fresh weight),收集完成后,将材料置于烘箱中在 105 °C 条件下杀青 15 min,然后在烘箱中 60 °C 烘干 48 h 至恒重,分别称量胚根干重(RDW, radicle dry weight)和地上部干重(SDW, shoot dry weight)。分别计算相对胚根鲜重、相对地上部鲜重、相对胚根干重、相对地上部干重。

镉含量的测定参考 GB/T 5009.15—2014(食品安全国家标准 食品中 Cd 的测定)中湿式消解法。将上述完全烘干的 10 mg/L Cd 处理的 3 次重复的地上部和胚根样品粉碎,并称取 0.3~0.5 g 于聚四氟乙烯消化管内,加入 10 mL 混合酸($\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 = 9 : 1$)浸泡过夜(12 h),然后置于电热板上消煮,采用逐步升温:60 °C, 30 min; 150 °C, 60 min; 200 °C 消煮至溶液透明澄清。放冷后的消化液洗入 10 mL 容量瓶中,用少量 1% 硝酸溶液洗涤锥形瓶 3 次入容量瓶中,并用 1% 硝酸溶液定容至刻度,混匀后经定量滤纸过滤备用,样品消解同时增加试剂空白对照作为质控。样品采用电感耦合等离子体发射光谱(仪器型号:热电 Intrepid XSP 等离子体原子发射光谱仪)检测其中的金属 Cd 含量。分别计算地上部、胚根镉含量(Cd_{shoot} 、 Cd_{root})和迁移系数($\text{TFs} = \text{Cd}_{\text{shoot}} / \text{Cd}_{\text{root}}$)。

1.4 统计分析

运用 Excel 2013 计算数据的极值(Max. 和 Min.)、中值(Median)、均值(Means)、标准误(SE, standard error)、变异系数(CV, coefficient of variation)等统计量。利用 SAS 9.1 进行数据的

多重比较,采用 Duncan 的变量多重极差测验进行分析。

2 结果与分析

2.1 白菜资源耐镉性表型初筛

统计镉处理和对照组的胚根长度(图 1A)发现,79 份材料在无镉处理条件下的胚根长度变异范围是 23.30~116.70 mm,均值为 63.83 ± 2.02 mm; 镉处理的胚根长度变异范围是 2.70~77.50 mm,均值为 19.16 ± 1.74 mm,镉处理组的胚根长度的变异范围与均值明显低于对照组,可见 30 mg/L 的镉胁迫严重抑制了各材料胚根的生长。

研究不同材料的耐镉性差异发现,各材料相对胚根长度的均值为 $28.89\% \pm 2.23\%$,变异范围为 2.95%~89.05%,变异系数高达 68.61%(图 1B)。从相对胚根长度的分布图(图 1B)中可以看出,本次镉处理浓度超过了镉对白菜胚根长度的抑制中浓度,能够筛选出极耐受型资源。根据 30 mg/L 镉胁迫下的白菜耐性表现,本研究筛选出 5 份耐镉($\text{RRL} > 60\%$)材料,包括 D069、D097、D125、D126 和 D129; 5 份镉敏感($\text{RRL} < 5\%$)材料,包括 D048、D050、D087、D089 和 D092(表 2)用于开展进一步的鉴定评价研究。

2.2 极端材料表型稳定性分析

因为 30 mg/L 超过了镉对白菜胚根长度的抑制中浓度,在筛选出极耐受型资源的同时,可能会因为超过部分材料的防御极限,导致耐性鉴定的不稳定。故本研究用 10 mg/L 镉胁迫处理上述初筛得到的极端材料,以鉴定筛选耐镉性相对稳定的白菜资源。

结果表明,10 mg/L 镉处理在影响胚根长度的同时还不同程度上影响了胚根鲜重、胚根干重、地上部鲜重和地上部干重等指标。如图 2A 所示,D125 和 D129 的相对胚根长度值显著高于除 D087、D089 以外的其余材料,D050 和 D092 的相对胚根长度值最低。D050 和 D097 的相对胚根鲜重值显著低于其余材料(图 2B),且 D097 的相对胚根干重值最低(图 2C)。D069 的相对地上部鲜重和相对地上部干重值显著低于其余 9 个品种,且除 D069 之外,其余材料的相对地上部鲜重和相对地上部干重值均大于 100(图 2D、E),可见镉胁迫下显著抑制了白菜根系生长的同时促进了地上部生物量的积累。白菜种子萌发期的养分来源于储存在种子的能量,镉胁迫条件下可能通过限制养分向胚根的供应而显著抑制了胚根的生长,这可能也导致养分向地上部胚根和子叶的

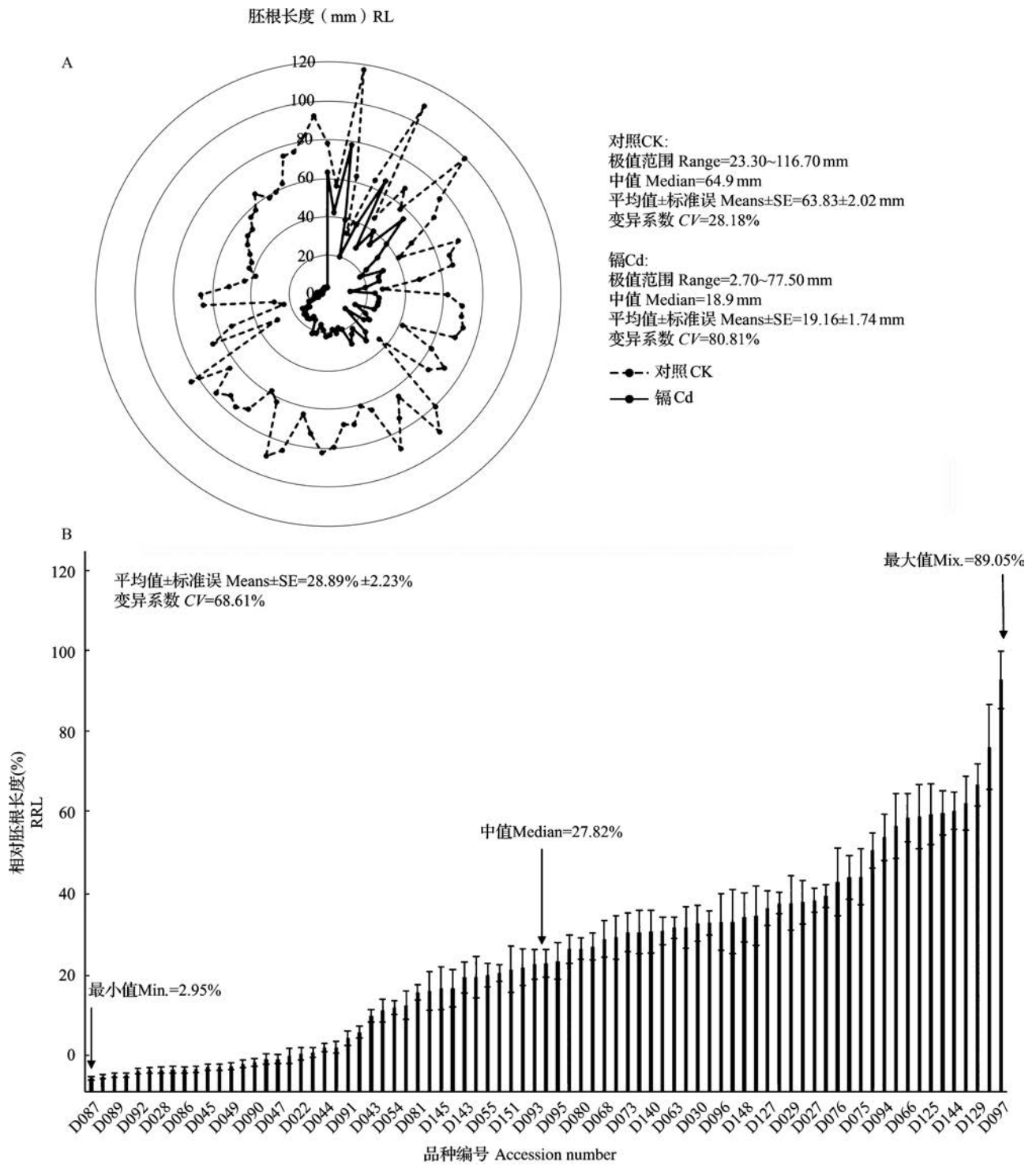


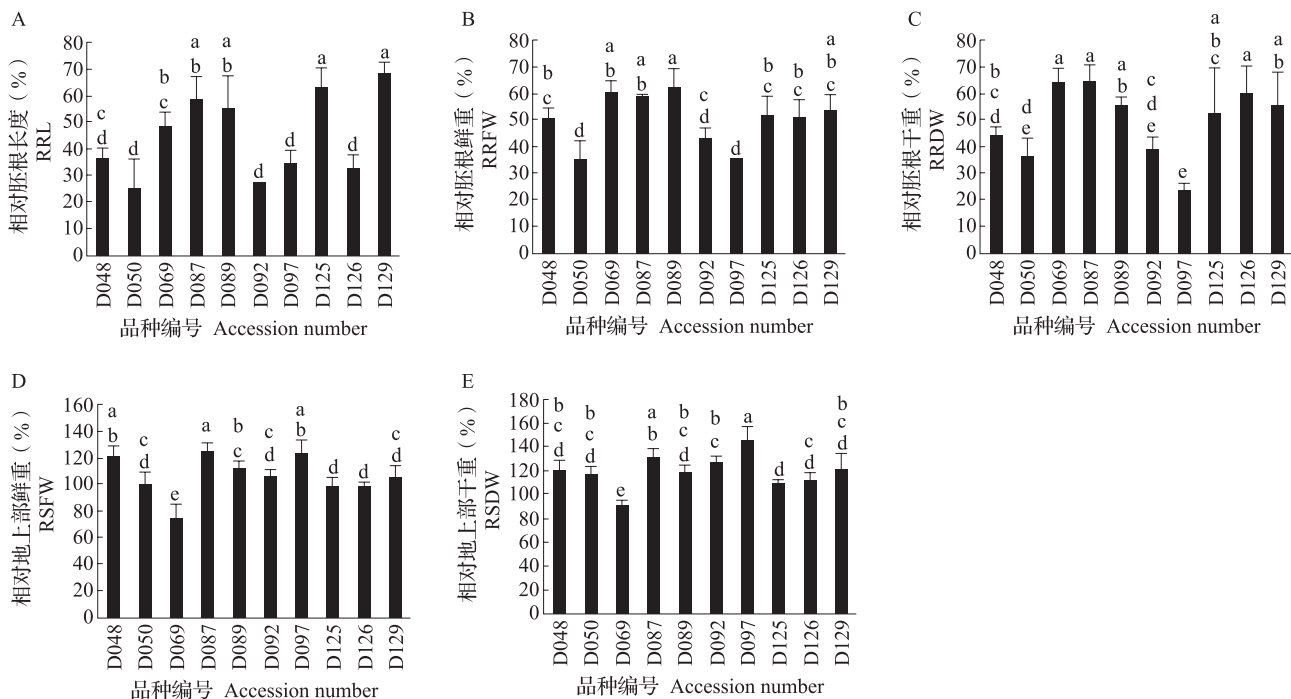
图1 初筛条件下耐镉性指标分布

Fig. 1 The distribution of Cd tolerance indexes under prescreening

表 2 初筛到的耐镉和镉敏感极端材料信息

Table 2 The information of Cd tolerance and sensitive accessions under pre-screening experiments

分组 Group	编号 Number	对照组根长 (mm) RL _{Ck}	镉处理组根长 (mm) RL _{Cd}	相对根长 (%) RRL
镉敏感 Sensitive	D048	63.40	3.00	4.73
	D050	74.40	2.70	3.63
	D087	91.50	2.70	2.95
	D089	74.80	2.70	3.61
	D092	60.90	2.70	4.43
	D129	116.70	77.50	66.41
耐镉 Tolerance	D069	55.40	41.30	74.55
	D097	77.30	62.29	89.05
	D125	108.30	65.00	60.02
	D126	62.00	38.70	62.42
	D129	116.70	77.50	66.41
	D129	116.70	77.50	66.41



a, b, c, d, e 代表 Duncan 多重比较 $P=0.05$ 水平的差异显著性

a, b, c, d, e represent the difference significance of Duncan multiple comparison at $P=0.05$ level

图 2 重复鉴定条件下耐镉性指标分布

Fig. 2 The distribution of Cd tolerance indexes under repeat identification

偏向性增加,所以表现出镉胁迫促进地上部的生物量的增加。

本研究选择在镉处理条件下受抑制的相对胚根长度、相对胚根鲜重和相对胚根干重 3 个指标作为白菜耐镉稳定性评价鉴定指标,并将统计结果与初筛条件下的耐镉表型进行相关性分析(图 3)。结果

表明两次鉴定条件下, D069、D125 和 D129 都稳定表现为耐镉材料,且 D048、D050 和 D092 都稳定表现为镉敏感材料,但是 D097、D126、D087 和 D089 等材料在两次鉴定中表型不太一致,这可能是在不同浓度的镉处理下耐镉机制不同所致^[21-22]。

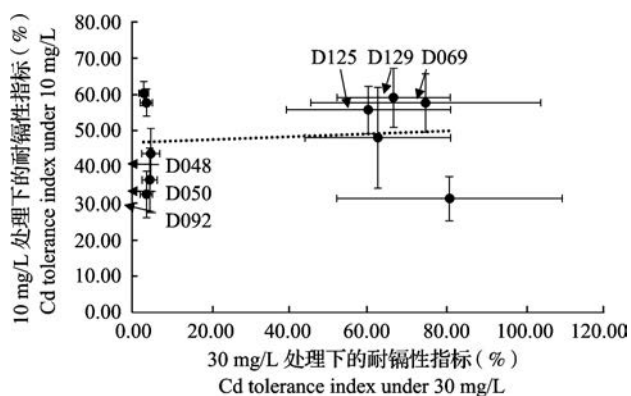


图3 两次耐镉性鉴定结果的相关性分析

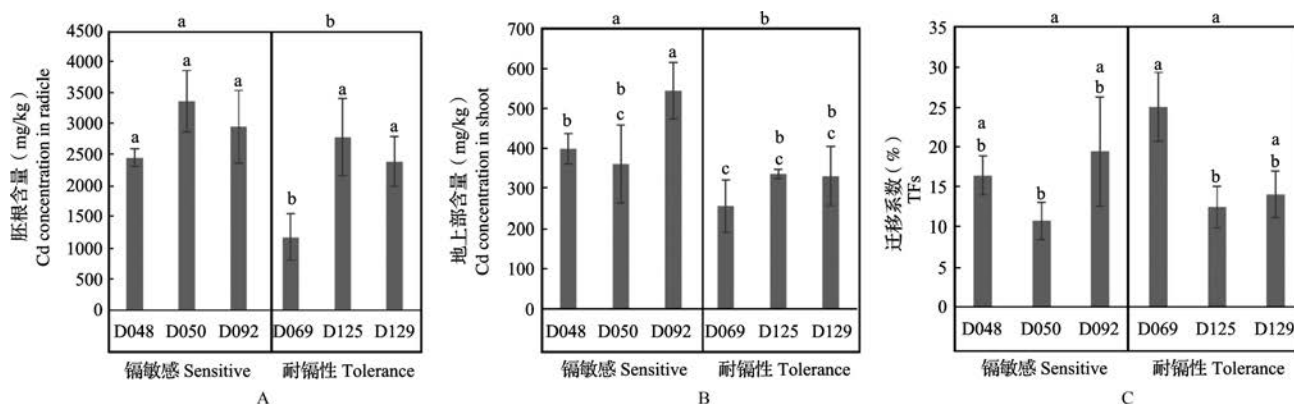
Fig. 3 The correlation analysis of Cd tolerance under two different assays

2.3 稳定耐镉和镉敏感材料的镉积累特性分析

对稳定耐镉材料 D069、D125、D129 和稳定镉

敏感材料 D048、D050、D092 进行镉积累特性分析(图4),结果显示 D069 的胚根镉浓度最低,显著低于其他品种, D069 的地上部镉浓度也是最低,显著低于镉敏感材料中的 D048 和 D092,可见 D069 在低积累镉白菜品种培育中具有较大的应用潜力。所有参试材料的迁移系数都小于 30%,且镉敏感材料 D050 和耐镉材料 D125 的迁移系数都相对更小,也具有一定的应用价值。

进一步比较稳定耐镉性和镉敏感材料两组之间镉积累特性差异发现,耐镉材料的镉含量总和无论是在胚根还是地上部都显著小于镉敏感材料的镉含量总和(图4 A, B),但两组之间的迁移系数无显著差异(图4 C),说明耐镉材料中地上部镉含量低可能是由于材料本身镉吸收量偏低引起,这与 Lin 等^[18]的报道是一致的。



矩形框内的 a, b, c 代表品种之间多重比较 $P=0.05$ 水平的差异显著性,矩形框外的 a,

b 代表耐镉和镉敏感两组之间 $P=0.05$ 水平的差异显著性

a, b and c in the rectangular box represent the significant difference of $P=0.05$ level between multiple comparisons between varieties,

while a and b outside the rectangular box represent the significant difference of $P=0.05$ level between two groups with

cadmium tolerance and cadmium sensitivity

图4 稳定耐镉性和镉敏感材料的镉积累指标统计

Fig. 4 The distribution of Cd accumulation index of accessions with stable tolerance and sensitive to Cd

3 讨论

芸薹属是十字花科最重要的一个分支,可用作油料、蔬菜、调味料和饲料等,在农业经济发展中占据不可或缺的地位,筛选其中低积累镉的优异种质用于品种改良,对于保障居民的营养和健康具有重要的意义^[11]。传统筛选低积累镉资源的方法多采用镉污染的土壤培养的方法,但是这种鉴定方法费时费力通量低,不适合进行批量资源的筛选工作^[12-15]。Lin 等^[18]根据植物耐镉性和镉积累表现,可以将种内基因型分为敏感型、排异型、低积累和超积累 4 组,因此利用快速筛选耐镉性种质的方法,可

以有效增加可用于污染安全新品种培育排异型和低积累型优异资源的筛选效率^[18,23]。在植物耐镉性鉴定中,常用根系的表现作为有效的观测指标用于评价植物的耐镉性,因为植物根系是最早暴露在重金属中的部位,也是重金属进入植物体内的第一步,其毒害作用表现最明显^[24-26]。

本研究采用较高的镉胁迫浓度(30 mg/L)处理 79 份日本引进的白菜资源,分析其对胚根的抑制作用以进行耐镉性鉴定评价,发现该胁迫条件下所有的白菜资源都受到较大的毒害作用(图 1A),但是参试群体内材料间相对胚根长度的变异系数很大(图 1B)。说明引进的 79 份资源中的遗传背景丰富,适合进行

特异资源的筛选工作,根据初筛的结果(图 1 B),初步筛选出 5 份耐镉材料(RRL>60%, D069、D097、D125、D126 和 D129)和 5 份镉敏感材料(RRL<5%, D048、D050、D087、D089 和 D092)(表 2)。

研究表明,植物对重金属的耐受性,取决于其对重金属的吸收运输途径,在植物体各部位的分配以及植物体内物质的结合形态等^[27-30]。考虑到不同浓度镉处理条件下,植物体镉吸收和相关防御反应机制也不尽相同^[31-33],因此,本研究利用 10 mg/L 镉胁迫条件对在 30 mg/L 镉胁迫条件下的极端材料进行耐镉性鉴定,最终筛选得到表型稳定的耐镉性材料 D069、D125、D129 和稳定镉敏感的 D048、D050、D092。最后对稳定耐镉的 3 个材料进行镉积累特性研究,发现 D069 胚根和地上部的镉含量都显著低于其他材料,且迁移系数也小于 1,是最具育种价值的资源。另外,我们还发现 D125 的迁移系数相对较低,显著低于 D069,也具有较高的利用价值。

引进筛选国外特异资源是丰富中国本底资源遗传多样性的重要渠道之一,本研究从日本引进的包括菜薹、大白菜、青菜、芜菁 79 份资源中鉴定筛选到的耐镉性和低积累镉优异资源 D069 和 D125,将为芸薹属作物污染安全新品种培育和镉积累机制提供丰富物质基础。

参考文献

- [1] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, Yuan Z, Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 843-853
- [2] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, Tang Z, Mcgrath S P. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759
- [3] Satarug S, Vesey D A, Gobe G C. Current health risk assessment practice for dietary cadmium: Data from different countries. *Food and Chemical Toxicology*, 2017, 106: 430-445
- [4] Clemens S, Aarts M G, Thomine S, Verbruggen N. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(2): 92-99
- [5] Zhao Q, Wang Y, Cao Y, Chen A, Ren M, Ge Y, Yu Z, Wan S, Hu A, Bo Q, Ruan L, Chen H, Qin S, Chen W, Hu C, Tao F, Xu D, Xu J, Wen L, Li L. Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhui province, Eastern China. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 340-347
- [6] Gan Y, Wang L, Yang G, Dai J, Wang R, Wang W. Multiple factors impact the contents of heavy metals in vegetables in high nature background area of China. *Chemosphere*, 2017, 184: 1388-1395
- [7] Grant C A, Clarke J M, Duguind S, Chaney R L. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2-3): 301-310
- [8] Ashrafzadeh S, Leung D W M. Development of cadmium-safe crop cultivars: A mini review. *Journal of Crop Improvement*, 2016, 30(2): 107-117
- [9] Cheng F, Sun R, Hou X, Zheng H, Zhang F, Zhang Y, Liu B, Liang J, Zhuang M, Liu Y, Liu D, Wang X, Li P, Liu Y, Lin K, Bucher J, Zhang N, Wang Y, Wang H, Deng J, Liao Y, Wei K, Zhang X, Fu L, Hu Y, Liu J, Cai C, Zhang S, Zhang S, Li F, Zhang H, Zhang J, Guo N, Liu Z, Liu J, Sun C, Ma Y, Zhang H, Cui Y, Freeling M R, Borm T, Bonnema G, Wu J, Wang X. Subgenome parallel selection is associated with morphotype diversification and convergent crop domestication in *Brassica rapa* and *Brassica oleracea*. *Nature Genetics*, 2016, 48(10): 1218-1224
- [10] Wang X, Wang H, Wang J, Sun R, Wu J, Liu S, Bai Y, Mun J H, Bancroft I, Cheng F, Huang S, Li X, Hua W, Wang J, Wang X, Freeling M, Pires J C, Paterson A H, Chalhoub B, Wang B, Hayward A, Sharpe A G, Park B S, Weisshaar B, Liu B, Li B, Liu B, Tong C, Song C, Duran C, Peng C, Geng C, Koh C, Lin C, Edwards D, Mu D, Shen D, Soumpourou E, Li F, Fraser F, Conant G, Lassalle G, King G J, Bonnema G, Tang H, Wang H, Belcram H, Zhou H, Hirakawa H, Abe H, Guo H, Wang H, Jin H, Parkin I A, Batley J, Kim J S, Just J, Li J, Xu J, Deng J, Kim J A, Li J, Yu J, Meng J, Wang J, Min J, Poulain J, Wang J, Hatakeyama K, Wu K, Wang L, Fang L, Trick M, Links M G, Zhao M, Jin M, Ramchiary N, Drou N, Berkman P J, Cai Q, Huang Q, Li R, Tabata S, Cheng S, Zhang S, Zhang S, Huang S, Sato S, Sun S, Kwon S J, Choi S R, Lee T H, Fan W, Zhao X, Tan X, Xu X, Wang Y, Qiu Y, Yin Y, Li Y, Du Y, Liao Y, Lim Y, Narusaka Y, Wang Y, Wang Z, Li Z, Wang Z, Xiong Z, Zhang Z. The genome of the mesopolyploid crop species *Brassica rapa*. *Nature Genetics*, 2011, 43(10): 1035-1039
- [11] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略. *中国油料作物学报*, 2018, 40(5): 9-13
Wang H Z. New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy. *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, 2018, 40(5): 9-13
- [12] Mi B, Liu F, Xie L, Zhou H, Wu F, Dai X. Evaluation of the uptake capacities of heavy metals in Chinese cabbage. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 2019, 171: 511-517
- [13] Liu W, Zhou Q, Sun Y, Liu R. Identification of Chinese cabbage genotypes with low cadmium accumulation for food safety. *Environmental Pollution*, 2009, 157(6): 1961-1967
- [14] Liu W, Zhou Q, An J, Sun Y, Liu R. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1-3): 737-743
- [15] Wang J, Yu N, Mu G, Shinwari K I, Shen Z, Zheng L. Screening for Cd-safe cultivars of Chinese cabbage and a preliminary study on the mechanisms of Cd accumulation. *International Journal of Environmental Research Public Health*, 2017, 14(4): 395
- [16] Uruguchi S, Fujiwara T. Rice breaks ground for cadmium-free cereals. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16(3): 328-

- 334
- [17] Ikeda M, Ezaki T, Tsukahara T, Moriguchi J. Dietary cadmium intake in polluted and non-polluted areas in Japan in the past and in the present. *International Archives Occupational and Environmental Health*, 2004, 77 (4): 227-234
- [18] Lin Y F, Aarts M G M . The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2012, 69 (19): 3187-3206
- [19] Zhang F, Xiao X, Yan G, Hu J, Cheng X, Li L, Li H, Wu X. Association mapping of cadmium-tolerant QTLs in *Brassica napus* L. and insight into their contributions to phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 155: 420-428
- [20] 张付贵,肖欣,闫贵欣,冯婷婷,刘娟,伍晓明. 甘蓝型油菜幼苗期耐镉性评价方法的研究. *中国油料作物学报*, 2017, 39 (1): 47-54
Zhang F G, Xiao X, Yan G X, Feng T T, Liu J, Wu X M. Development of evaluation method for cadmium tolerance in *Brassica napus* seedlings. *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, 2017, 39 (1): 47-54
- [21] 殷恒霞,李霞,米琴,王文颖,张文胜,徐进. 镉、锌、铜胁迫对向日葵早期幼苗生长的影响. *植物遗传资源学报*, 2009, 10 (2): 290-294, 299
Yin H X, Li X, Mi Q, Wang W Y, Zhang W S, Xu J. Effects of Cadmium, Zinc and Copper-induced stresses on the early seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Plant Genetic Resources*, 2009, 10 (2): 290-294, 299
- [22] 朱守晶,史文娟. 苧麻谷胱甘肽-S-转移酶基因 BnGSTU1 的克隆和表达分析. *植物遗传资源学报*, 2018, 19 (6): 1197-1204
Zhu S J, Shi W J. Cloning and expression analysis of a Glutathione-S-Transferase gene BnGSTU1 from Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaudich.). *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19 (6): 1197-1204
- [23] Zorrig W, Rouached A, Shahzad Z, Abdelly C, Davidian J C, Berthomieu P. Identification of three relationships linking cadmium accumulation to cadmium tolerance and zinc and citrate accumulation in lettuce. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167 (15): 1239-1247
- [24] Ramin B, Kim D G, Kim J A, Seongbin H. The density and length of root hairs are enhanced in response to cadmium and arsenic by modulating gene expressions involved in fate determination and morphogenesis of root hairs in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1763
- [25] Wang P, Deng X, Huang Y, Fang X, Zhang J, Wan H, Yang C. Root morphological responses of five soybean [*Glycine max* (L.) Merr] cultivars to cadmium stress at young seedlings. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (2): 1860-1872
- [26] Huang H, Yu N, Wang L, Gupta D K, He Z, Wang K, Zhu Z, Yan X, Li T, Yang X E. The phytoremediation potential of bioenergy crop *Ricinus communis* for DDTs and cadmium co-contaminated soil. *Bioresour Technology*, 2011, 102 (23): 11034-11038
- [27] Belykh E S, Maystrenko T A, Velegzhaninov I O . Recent trends in enhancing the resistance of cultivated plants to heavy metal stress by transgenesis and transcriptional programming. *Molecular Biotechnology*, 2019, 61 (10): 725-741
- [28] Colangelo E P, Guerinot M L . Put the metal to the petal; metal uptake and transport throughout plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9 (3): 322-330
- [29] Rizwan M, Ali S, Adrees M, Ibrahim M, Tsang D C W, Zia-Ur-Rehman M, Zahir Z A, Rinklebe J, Tack F M G, Ok Y S. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere*, 2017, 182: 90-105
- [30] Song Y, Jin L, Wang X. Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International Journal of Phytoremediation*, 2017, 19 (2): 133-141
- [31] 余玮,揭雨成,邢虎成,鲁雁伟,黄明,康万利,王栋. 苧麻耐镉品种差异及其筛选指标分析. *作物学报*, 2011, 37 (2): 348-354
She W, Jie Y C, Xing H C, Lu Y W, Huang M, Kang W L, Wang D. Comparison and screening indicators for Ramie (*Boehmeria nivea*) genotypes tolerant to Cadmium. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37 (2): 348-354
- [32] Chi K, Zou R, Wang L, Huo W, Fan H. Cellular distribution of cadmium in two amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) cultivars differing in cadmium accumulation. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26 (22): 22147
- [33] Mohamed A A, Castagna A, Ranieri A, Sanità di Toppi L. Cadmium tolerance in *Brassica juncea* roots and shoots is affected by antioxidant status and phytochelatin biosynthesis. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2012, 57: 15-22