



贺晓岚, 王建伟, 李文旭, 等. 镉胁迫对甘蓝型油菜苗期生长及镉积累的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2023(2):59-65.

镉胁迫对甘蓝型油菜苗期生长及镉积累的影响

贺晓岚¹, 王建伟², 李文旭³, 吴春花¹, 龙焕萍¹

(1. 凯里学院 大健康学院, 贵州 凯里 556011; 2. 凯里学院 理学院, 贵州 凯里 556011; 3. 河南省农业科学院 小麦研究所, 河南 郑州 450002)

摘要: 镉(Cd)是生物毒性强的重金属元素,易在土壤-动植物-人体间富集转移,最终危害人体健康。为了筛选富集/耐镉性强的油菜品种,以6个油菜品种为材料,通过研究镉胁迫对幼苗生长、镉积累、谷胱甘肽(GSH)含量等的影响,明确不同品种镉富集能力的差异。结果表明,镉胁迫对不同油菜品种幼苗叶干重均有抑制作用,对美油88的抑制作用最大,对南油868的抑制作用最小。镉胁迫下不同油菜品种幼苗根干重存在差异,南油868最大。镉胁迫对早熟100天、丰油9号幼苗根干重抑制作用最大,而对美油88抑制作用最小。镉胁迫对不同品种幼苗根冠比均有所提高,其中美油88提高幅度最大,而南油868提高幅度最小。不同品种幼苗生物量存在差异,在正常及镉胁迫条件下,南油868的生物量均显著高于其余品种。镉胁迫对美油88幼苗生物量抑制作用最大,对南油868抑制作用最小。不同品种,镉含量存在显著差异,南油868具有高富集特性,美油88具有低富集特性。外源镉显著增加了不同油菜品种幼苗叶片谷胱甘肽含量,美油88的增幅最大,其次为南油868。最终,筛选出镉富集量最小的油菜品种美油88,镉富集量最大的油菜品种南油868,可进一步培育低镉油菜,或进行镉污染耕地修复研究。

关键词: 镉胁迫;油菜;谷胱甘肽;生理生化特征

随着工农业和城市化进程的发展,以及农药化肥的过量使用,全球范围内生态环境遭到严重破坏,农田土壤重金属污染持续恶化。统计表明,我国东、中、西部耕地的土壤重金属污染率分别为11.29%、33.33%和17.24%,其中镉污染居于首位^[1]。我国土壤中镉的点位超标率达7.0%,镉污染耕地面积达1.33万hm²,涉及11个省25个地市^[2-3]。在所有植物非必需重金属元素中,镉(Cd)是生物毒性最强的元素之一,由于其水溶性好并且在生物圈中移动性强,更容易在土壤-动植物-人体间富集转移,最终危害人体健康^[4-5]。目前已在小麦、玉米^[6]、水稻^[7]、谷子、糜子^[8]、辣椒^[9]和黑麦草^[10]等多种作物上开展了耐镉品种筛选,根据综合效应将小麦、水稻、玉米等植物的耐镉等级划分为耐受型、中间型和敏感型3种^[6-7]。苗期生长性状是评价植物重金属耐性的重要指标。镉对植物生长的影响表现为“低促高抑”现象。研究指出镉

浓度低于5 mg·kg⁻¹对油菜株高和生物量都有一定促进作用;但大于5 mg·kg⁻¹时,阻碍油菜生长,除对油菜株高和生物量有一定抑制作用之外,还使其叶片失绿,随着镉浓度的增加抑制作用增强^[11-13]。同时,镉对植物生长毒害的临界浓度因土壤类型及植物种类不同而改变。镉对植物生长产生的不利影响可通过植物的形态特征及生理生化指标反映出来。在遭受重金属镉胁迫时,可能导致植株表型异常,如植株矮小、茎叶失绿、鲜/干重减少等^[14-15],体内会产生一系列生理生化代谢紊乱,导致植物抗逆性降低,严重时造成植株死亡;研究表明,谷胱甘肽在螯合重金属、解毒外来污染物的过程中起防御作用^[16-17]。在重金属胁迫下,谷胱甘肽(GSH)能结合重金属离子形成复合物,被运输到植物叶片的液泡中,从而保护植物细胞免受损伤^[18]。GSH生物合成物质的增加对增强植物镉耐性具有重要作用,可促进镉在植物地上部的积累,从而达到修复耕地的目的^[19]。Cobbett等^[20]以拟南芥为试材进行试验发现,GSH含量与植物耐重金属有较弱的关系,但并非GSH含量越高,对重金属的耐性越强。

十字花科植物是一种对重金属耐受性强,已被证明可用于修复重金属污染土壤的理想物种。油菜在我国南北方均有广泛种植,因具有生长速

收稿日期:2022-10-11

基金项目:贵州省教育厅科技拔尖人才支持计划项目(黔教合KY字[2017]094);贵州省基础研究计划项目(黔科合基础[2017]1167);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2522);凯里学院博士专项(BS201606)。

第一作者:贺晓岚(1980—),女,博士,副教授,从事基因克隆及转基因研究。E-mail:helingshi123@126.com。

通信作者:王建伟(1982—),男,博士,教授,从事植物营养与调控研究。E-mail:agan1982@126.com。

度快、生物量大、对重金属 Cd、Cu、Zn 等有较强耐受性及吸收积累能力等特点,被认为是修复土壤重金属污染的优良作物之一^[21]。目前相关工作主要集中在甘蓝型油菜对 Cd 响应生理特征的描述,而在甘蓝型油菜对镉的吸收、转运和积累过程研究相对较少。因此,从高产、优质、多抗、分枝力强,综合性状优良的油菜品种中筛选低积累镉的油菜品种应用于生产实践或超积累品种用于镉污染土壤修复或培育高耐受性都具有重要意义。本研究以国内广泛种植的 6 份高产、优质、多抗、分枝力强,综合性状优良的油菜品种为试验材料,研究镉胁迫对油菜幼苗生长和镉积累及耐受性的影响,通过评价参试材料的镉胁迫耐受性,筛选出富集/耐镉性强的油菜种质,以期对镉污染农田土壤修复提供材料;筛选出镉低积累的油菜品种为生态环境保护及食品安全生产提供有效措施及理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料如表 1 所列,均由河北省农林科学院粮油作物研究所提供。试验试剂氯化镉(CdCl₂·5/2H₂O)为分析纯试剂。

表 1 参试品种

油菜名称	编号	选育单位
早熟 100 天	ZS100	山东省济南市日出种业有限公司
新都油 800	XDY800	四川福乐种业有限责任公司
南油 868	NY868	南充市农业科学院和成都市农林科学院
美国油王 88	MY88	福建省永安市燕丰种业有限责任公司
广源 58	GY58	华中农业大学
丰油 9 号	FY9	河南省农业科学院棉花油料作物研究所

1.2 方法

1.2.1 试验设计 种子经消毒处理后,置于铺有润湿滤纸的培养皿中,黑暗催芽,种子露白后见光,待胚根长到 2 cm 左右,选择生长一致的幼苗移栽于无重金属污染的基质土塑料盆。待幼苗长至三叶一心时,挑选生长一致的植株移栽至装有无重金属污染的基质土塑料盆中,每桶 10 株,缓苗 7 d 后进行镉胁迫处理。试验组用 100 μmol·L⁻¹ 氯化镉溶液 500 mL^[22],对照组用等体积去离子水,每隔 2 d 浇灌 1 次,每处理重复 4 次。在胁迫后第 7 天,选择生长一致的幼苗测定还原型谷胱甘肽的含量;在胁迫后第 20 天,选择生长一致的

幼苗测定镉含量。

1.2.2 测定项目及方法 本研究对油菜幼苗生物量、镉含量与还原性谷胱甘肽(GSH)含量进行测定。镉胁迫处理 7 d 后,取新鲜叶片 1 g,利用 GSH 试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)测定还原型谷胱甘肽含量;胁迫 20 d 后,测定油菜株高,每个处理 10 株;胁迫 20 d 后,收获油菜整株,将地上和地下部分开,用自来水冲洗干净,再用去离子水清洗,90 ℃烘干称重计算生物量,然后粉碎。称取 0.5 g 粉碎样品经浓硝酸-H₂O₂消解后,用石墨炉原子吸收光谱仪(北京普析通用仪器有限责任公司,TAS-990AFG)测定镉含量。

1.2.3 数据分析 用 Excel 2017 和 SPSS 16.0 对测定数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对油菜幼苗生长的影响

2.1.1 单株叶干重 在正常及胁迫条件下,南油 868 的幼苗单株叶干重均显著高于其他 5 个品种,但其他 5 个品种之间差异不显著(图 1A)。镉胁迫对美油 88 幼苗单株叶干重抑制作用最大,抑制率为 28%,其次为早熟 100 天(抑制率为 25%),对新都油 800、广源 58、丰油 9 号、幼苗单株叶干重抑制作用相差不大,19%左右;而对南油 868 幼苗单株叶干重抑制作用最小,抑制率为 12%(表 2)。

2.1.2 单株根干重 不同油菜品种幼苗根干重存在差异,在正常条件下,南油 868 幼苗根干重显著高于丰油 9 号和美油 88(图 1B)。在胁迫条件下,南油 868 幼苗根干重显著高于丰油 9 号。镉胁迫对早熟 100 天和丰油 9 号幼苗根干重抑制作用最大,抑制率为 14%;对广源 58 幼苗根干重抑制作用较小,抑制率为 6%;而对美油 88 幼苗根干重抑制作用最小,抑制率为 4%(表 2)。

2.1.3 根冠比 在正常条件下,新都油 800、早熟 100 天、丰油 9 号根冠比相差不大,在 0.45 左右;而广源 58、美油 88、南油 868 幼苗根冠比较低,在 0.33 左右;不同油菜品种幼苗根冠比差异不显著(图 1C)。在胁迫条件下,新都油 800、早熟 100 天、丰油 9 号幼苗根冠比显著高于南油 868。与正常条件相比,镉胁迫提高了幼苗根冠比,其中美油 88 幼苗根冠比较对照提高幅度最大,提高了 34%,而南油 868 幼苗根冠比几乎未提高(表 2)。

2.1.4 生物量 不同油菜品种幼苗生物量存在

差异,在正常及镉胁迫条件下,南油 868 的幼苗生物量显著高于其他 5 个品种(图 1D)。镉胁迫对美油 88 幼苗生物量抑制作用最大,抑制率为 22%;对

新都油 800、广源 58 幼苗生物量抑制作用相差不大,抑制率为 15%;而对南油 868 幼苗生物量抑制作用最小,抑制率为 12%(表 2)。

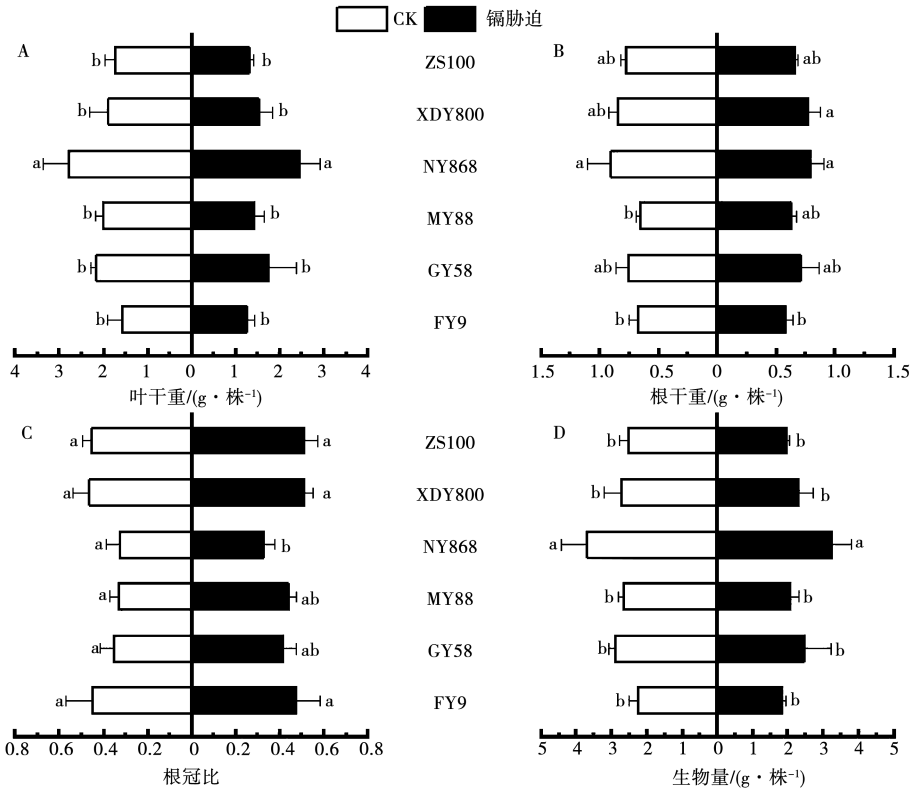


图 1 镉胁迫下不同油菜品种单株生物量比较

注:不同小写字母表示不同品种间在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

器官	抑制率/%					
	FY9	GY58	MY88	NY868	XDY800	ZS100
叶	20	18	28	12	19	25
根	14	6	4	12	8	14
根冠比	-6	-18	-34	0	-11	-13
生物量	18	15	22	12	15	21

2.2 镉胁迫对油菜镉含量和累积量的影响

2.2.1 镉含量 不同油菜品种幼苗叶片镉含量均较低并存在差异,在正常条件下,早熟 100 天、新都油 800、丰油 9 号幼苗叶片镉含量为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,显著高于其他 3 个品种(图 2A)。在镉胁迫条件下,南油 868、早熟 100 天的幼苗叶片镉含量分别为 9.73 和 $9.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其他品种,美油 88、广源 58 幼苗叶片镉含量比较低,分别为 2.50 和 $2.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与正常条件相比,外源镉明显增加了油菜幼苗叶片镉含量。

不同油菜品种幼苗根镉含量均较低并存在差

异,在正常条件下,新都油 800 和丰油 9 号幼苗根镉含量只有 $0.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,显著低于其他品种(图 2B)。在镉胁迫条件下,南油 868 和广源 58 幼苗根镉含量分别为 25.06 和 $22.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其他品种,美油 88 和早熟 100 天幼苗根镉含量比较低,分别为 5.60 和 $5.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与正常条件相比,外源镉明显增加了油菜幼苗根镉含量。

不同油菜品种幼苗镉转移系数存在差异。在正常条件下,丰油 9 号镉转移系数最高(1.70),其次为新都油 800(1.36),显著高于其他品种(图 2C)。在镉胁迫条件下,早熟 100 天幼苗镉转移系数最高(1.69),显著高于其他 5 个品种,新都油 800、美油 88、丰油 9 号幼苗镉转移系数显著高于广源 58。镉胁迫增加了早熟 100 天幼苗镉转移系数,增加率为 159% ,降低了广源 58、新都油 800、丰油 9 号、南油 868、美油 88 的镉转移系数,广源 58、新都油 800、丰油 9 号幼苗镉转移系数降低幅度高达 62% 以上。

在正常条件下,早熟 100 天幼苗镉含量最高($0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),显著高于美油 88(图 2D)。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗的镉含量最高($13.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),显著高于其他 5 个品种;其次

为广源 58,显著高于新都油 800、丰油 9 号、美油 88;早熟 100 天幼苗镉含量显著高于丰油 9 号、美油 88,新都油 800 幼苗镉含量显著高于美油 88,美油 88 幼苗镉含量最低($3.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

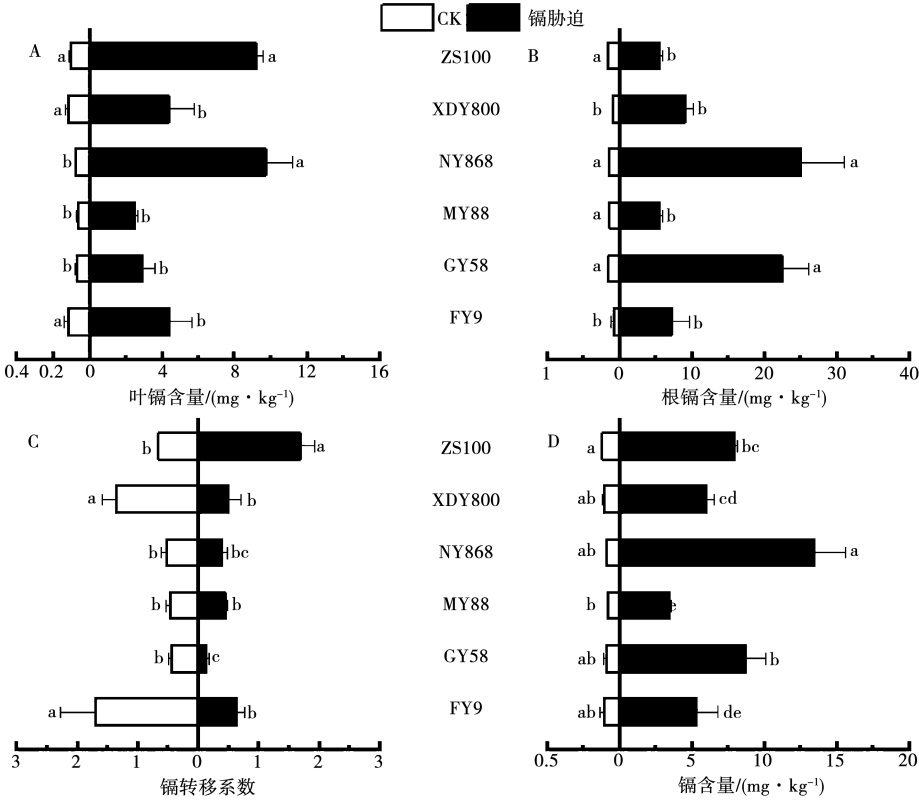


图 2 镉胁迫下不同油菜品种镉含量比较

2.2.2 镉累积量 在正常条件下,油菜幼苗叶片镉累积量只有 $0.12\sim0.22\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,不同油菜品种幼苗叶片镉累积量无显著差异(图 3A)。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗叶片镉累积量最高($24.18\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$),显著高于其他 5 个品种;其次为早熟 100 天,显著高于广源 58 和美油 88,其中美油 88 的幼苗叶片镉累积量最低,仅有 $3.61\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。与正常条件相比,外源镉明显增加了油菜幼苗叶片镉累积量。

不同油菜品种幼苗根部镉累积量存在差异,在正常条件下,南油 868 幼苗根部镉累积量最高($0.13\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$),显著高于美油 88、新都油 800、丰油 9 号(图 3B)。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗根部镉累积量最高($20.19\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$),其次为广源 58 的($15.50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$),二者显著高于其他品种,丰油 9 号、早熟 100 天、美油 88 幼苗根部镉累积量比较低,分别为 $4.18, 3.67$ 和 $3.51\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。与正常

条件相比,外源镉明显增加了油菜幼苗根部镉累积量。

由图 3C 可知,在正常条件下,新都油 800、丰油 9 号根、叶镉累积量比显著低于其他 4 个品种。在镉胁迫条件下,广源 58 幼苗根、叶镉累积量比最高(3.41),显著高于其他品种,早熟 100 天的幼苗根、叶镉累积量比最低,为 0.31 。镉胁迫提高了除早熟 100 天外的其余 5 个品种的幼苗根、叶镉累积量比,广源 58 增加幅度最大,为 325% ,镉胁迫降低了早熟 100 天幼苗根、叶镉累积量比,降低了 55% 。

在正常条件下,南油 868 幼苗镉累积量最高($0.33\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$),显著高于美油 88(图 3D)。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗镉累积量最高($44.37\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$),显著高于其他品种;其次为广源 58,显著高于美油 88,美油 88 的幼苗镉累积量最低,为 $7.13\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。

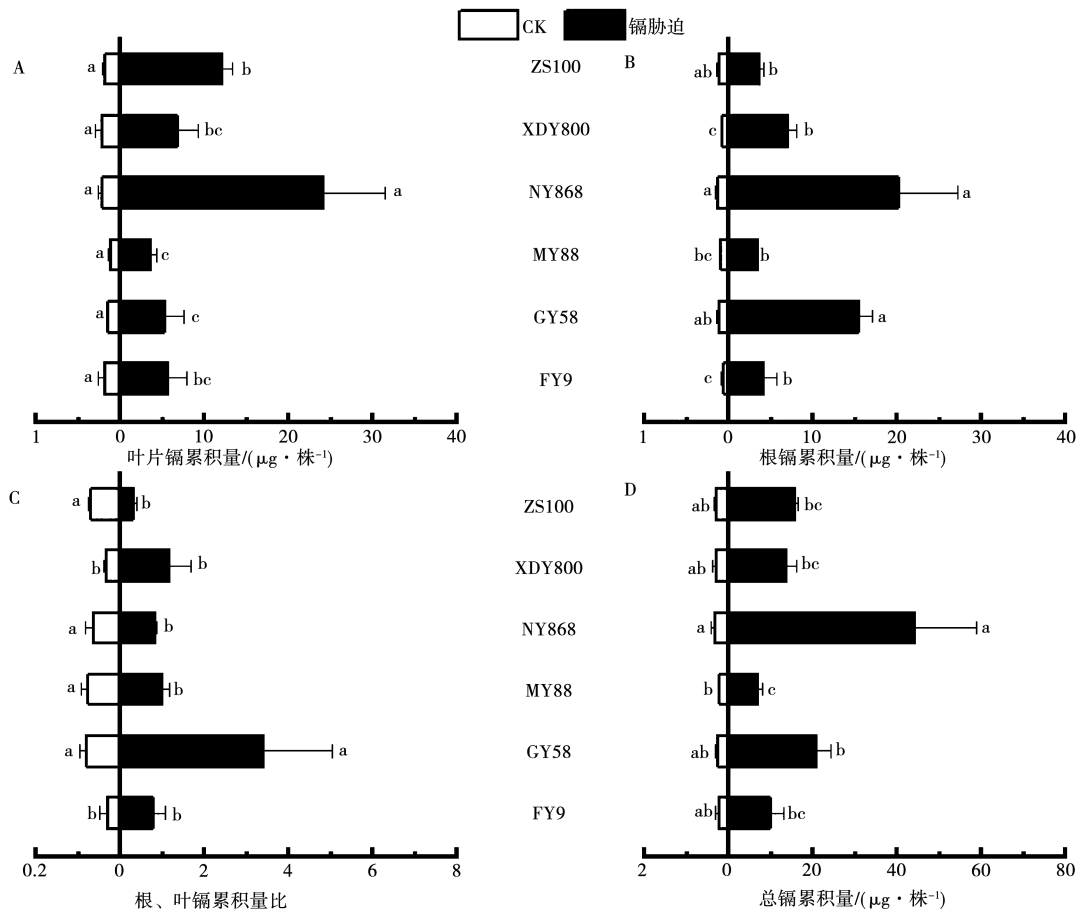


图 3 镉胁迫下不同油菜品种镉累积量比较

2.3 镉胁迫对不同油菜品种谷胱甘肽含量的影响

由图 4 可知,在正常条件下,丰油 9 号幼苗叶片谷胱甘肽含量最高($2.82 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),其次为广源 58 ($2.55 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),二者显著高于其他品种。

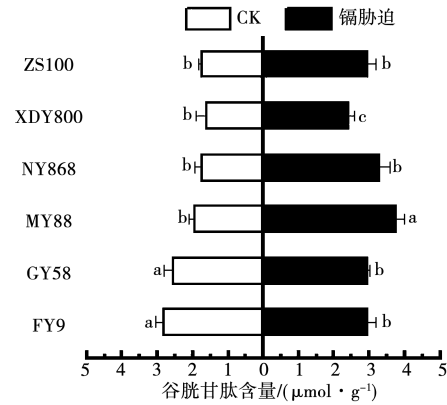


图 4 镉胁迫下不同油菜品种叶片谷胱甘肽含量比较

在镉胁迫条件下,美油 88 幼苗叶片谷胱甘肽含量最高($3.76 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),显著高于其他品种,其次为南油 868 的($3.29 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$);新都油 800

的最低($2.45 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),显著低于其他品种。与正常条件相比,外源镉明显增加了油菜幼苗叶片谷胱甘肽含量,美油 88 的增加幅度最大(92%),其次为南油 868(87%),丰油 9 号增加幅度最小,仅增加了 5%(图 4)。

3 讨论

镉污染问题日趋严峻,污染治理亟待解决。开展镉胁迫对油菜幼苗生物量、镉积累量及耐受性影响的研究,有助于筛选出镉吸收潜力大并且耐受性较强的品种进行镉污染农田土壤修复;利用镉低积累油菜品种作为种质资源是有效控制镉向食物链迁移、保护生态环境及保障食品安全生产的有效途径。

植物受到重金属胁迫时通常会出现植株生长缓慢、矮小、生物量降低、根系受到抑制,甚至出现“无根苗”等外在表现^[23]。本研究结果表明不同油菜品种幼苗叶干重存在差异,在正常及镉胁迫条件下,南油 868 的幼苗叶干重均显著高于其他品种。镉胁迫对美油 88 幼苗叶干重抑制作用最大,而对南油 868 幼苗叶干重抑制作用最小。不

同油菜品种幼苗根干重存在差异,在正常条件下,南油 868 幼苗根干重显著高于丰油 9 号和美油 88。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗根干重高于其他品种。镉胁迫对早熟 100 天、丰油 9 号幼苗根干重抑制作用最大,而对美油 88 幼苗根干重抑制作用最小。这与已报道的不同甘蓝型油菜品种镉胁迫生物量受抑制程度存在较大差异,但与受抑制程度轻的品种耐镉性更强的研究结果相一致^[22]。在正常条件下,新都油 800、早熟 100 天、丰油 9 号根冠比相差不大;而广源 58、美油 88、南油 868 幼苗根冠比较低;在镉胁迫条件下,新都油 800、早熟 100 天、丰油 9 号幼苗根冠比显著高于南油 868。与正常条件相比,镉胁迫提高了幼苗根冠比。其中美油 88 幼苗根冠比提高幅度最大,而南油 868 幼苗根冠比几乎未提高。不同油菜品种幼苗生物量存在差异,在正常及胁迫条件下,南油 868 的幼苗生物量显著高于其他品种。镉胁迫对美油 88 幼苗生物量抑制作用最大;对丰油 9 号、早熟 100 天抑制作用相差不大;而对南油 868 抑制作用最小。已有研究表明同一物种不同品种对镉的耐受程度不同,本研究结果表明南油 868 品种对镉的耐受性最强。

植物对镉胁迫的响应是一个复杂的生理生化代谢过程。不同油菜品种对土壤中镉的吸收和积累能力不同。本研究结果表明,与正常条件相比,外源镉明显增加了油菜幼苗叶片和根镉含量。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗叶片镉含量最高,显著高于除早熟 100 天外的其余 4 个品种,而美油 88 幼苗叶片镉含量最低;南油 868 和广源 58 幼苗根镉含量显著高于其他品种,美油 88 和早熟 100 天幼苗根镉含量比较低。不同油菜品种幼苗镉转移系数存在差异,在胁迫条件下,早熟 100 天幼苗镉转移系数最高,显著高于其他品种的,新都油 800 和美油 88、丰油 9 号幼苗镉转移系数显著高于广源 58。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗镉含量最高,显著高于其他品种;美油 88 幼苗镉含量较低,显著低于除丰油 9 号外的其余 4 个品种。与正常条件相比,外源镉显著增加了油菜幼苗叶、根和幼苗镉积累量,这与已报道的研究结果相一致^[24]。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗叶片镉积累量最高,显著高于其他品种,而美油 88 的幼苗叶片镉积累量最低。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗根镉积累量最高,其次为广源 58,二者显著高于其他 4 个品种,美油 88 幼苗根镉积累量最低。在镉胁迫条件下,南油 868 幼苗镉积累量最高,显著高于其他品种;美油 88 幼苗镉积累量最

低,这与已报道的不同油菜品种镉积累量存在显著差异的研究结果相一致^[24]。综合上述研究结果,本研究筛选出了镉高累积品种南油 868 和低累积品种美油 88。谷胱甘肽(GSH)是细胞内最主要的抗氧化巯基化合物,谷胱甘肽及其代谢产物在植物抵御镉胁迫中发挥着重要的作用^[25]。本试验的研究结果表明,与正常条件相比,外源镉显著增加了不同油菜品种幼苗叶片谷胱甘肽含量,其中美油 88 的增加幅度最大,其次为南油 868,丰油 9 号增加幅度最小,这表明美油 88 和南油 868 两个品种均对环境中镉污染具有较强的抵御作用。本研究筛选出镉富集量最大的品种南油 868 和镉积累量最低的品种美油 88,可作为后续试验的供试材料。

4 结论

本研究表明,在一定浓度镉胁迫下,6 个油菜品种的镉积累量及耐受能力存在差异。南油 868 苗期根、叶镉含量,镉积累量均显著高于其余 5 个品种,抗镉性较强,属于高镉含量、积累量品种;而美油 88 苗期根、叶镉含量,镉积累量较低,属于低镉含量、积累量品种。以上研究为植物修复土壤镉污染及进一步培育高品质油菜育种研究提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李凤果,陈明,师艳丽,等.我国农用地土壤污染修复研究现状分析[J].现代化工,2018,38(12):4-9.
- [2] LIAO Q L,LIU C,WU H Y,et al. Association of soil cadmium contamination with ceramic industry:a case study in a Chinese town[J]. Science of the Total Environment,2015,514:26-32.
- [3] XU J L,CAI Q Y,WANG H X,et al. Study of the potential of barnyard grass for the remediation of Cd and Pb-contaminated soil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189:224.
- [4] DALCORO G. Regulatory networks of cadmium stress in plants[J]. Plant Signaling & Behavior, 2010, 5 (6): 663-667.
- [5] JANSSEN C R,HEIJERICK D G,De SCHAMPHELAERE K A C,et al. Environmental risk assessment of metals:tools for incorporating bioavailability [J]. Environment International, 2003,28(8):793-800.
- [6] 孟桂元,唐婷,周静,等.不同玉米品种种子萌发期耐镉性分析[J].分子植物育种,2016,14(11):3166-3171.
- [7] 孙亚莉,刘红梅,徐庆国.镉胁迫对不同水稻品种种子萌发特性的影响[J].中国水稻科学,2017,31(4):425-431.
- [8] 张盼盼,王小林,郭亚宁,等.40 个不同糜子品种种子萌发期耐镉性评价[J].西北农业学报,2020,29(12):1803-1813.
- [9] 龙春丽,宋拉拉,胡明文,等.镉胁迫对不同品种辣椒种子萌发及苗期抗性生理的影响[J].种子,2021,40(5):105-109.
- [10] 李美芳,张平,李倩,等.镉胁迫下两株产铁载体/解磷菌株对黑麦草种子萌发及幼苗积累镉的影响[J].中南林业科

- 技大学学报,2021,41(9):179-187.
- [11] 金美芳,林明凤,施翔. 镉胁迫对油菜种子萌发和根系生长的影响[J]. 种子,2011,30(10):70-73.
- [12] 江海东,周琴,李娜,等. Cd对油菜幼苗生长发育及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报,2006,28(1):39-43.
- [13] 王兴明,涂俊芳,李晶,等. 镉处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(1):102-106.
- [14] CLEMENTE R, WALKER D J, BERNAL M P. Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): the effect of soil amendments[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(1): 46-58.
- [15] ZHANG G, FUKAMI M, SEKIMOTO H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage[J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(2): 93-98.
- [16] RAUSCH T, GROMES R, LIEDSCHULTE V, et al. Novel insight into the regulation of GSH biosynthesis in higher plants [J]. *Plant Biology*, 2007, 5(9): 565-572.
- [17] HASAN M K, LIU C, WANG F, et al. Glutathione-mediated regulation of nitric oxide, S-nitrosothiol and redox homeostasis confers cadmium tolerance by inducing transcription factors and stress response genes in tomato[J]. *Chemosphere*, 2016, 161: 536-545.
- [18] YAZAKI K. ABC transporters involved in the transport of plant secondary metabolites[J]. *Febs Letters*, 2006, 4(580): 1183-1191.
- [19] FREEMAN J L, PERSANS M W, NIEMAN K, et al. Increased glutathione biosynthesis plays a role in nickel tolerance in *Thlaspi nickel hyperaccumulators* [J]. *The Plant Cell*, 2004, 8(16): 2176-2191.
- [20] COBBETT C S, MAY M J, HOWDEN R, et al. The glutathione-deficient, cadmium-sensitive mutant, *cad2-1*, of *Arabidopsis thaliana* is deficient in γ -glutamylcysteine synthetase[J]. *The Plant Journal*, 1998, 1(16): 73-78.
- [21] COJOCARU P, GUSIATIN Z M, CRETESCU I. Phytoextraction of Cd and Zn as single or mixed pollutants from soil by rape (*Brassica napus*) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(11): 10693-10701.
- [22] 张付贵,肖欣,同贵欣,等. 甘蓝型油菜幼苗耐镉性评价方法的研究[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(1): 47-54.
- [23] 鲜靖苹,柴澍杰,王勇,等. 镉胁迫对草地早熟禾生长与生理代谢的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(1): 176-186.
- [24] 张洋,罗晓玲,魏廷龙,等. 镉高(低)积累油菜品种的筛选[J]. 湖南农业科学, 2017(8): 1-3.
- [25] 范旭杪,秦丽,王吉秀,等. 植物谷胱甘肽代谢与镉耐性研究进展[J]. 西部林业科学, 2019, 48(4): 50-56.

Effects of Cadmium Stress on Growth and Cadmium Accumulation Characteristics of *Brassica napus* L. Seedlings

HE Xiaolan¹, WANG Jianwei², LI Wenxu³, WU Chunhua¹, LONG Huanping¹

(1. School of Life and Health Science, Kaili University, Kaili 556011, China; 2. School of Science, Kaili University, Kaili 556011, China; 3. Institute for Wheat Research, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Cadmium (Cd) is a heavy metal element with strong biotoxin, which is easy to be enriched and transferred between soil, animals and plants, and human body, and ultimately endangers human health. In order to screen *Brassica napus* L. varieties with high concentration / cadmium (Cd) tolerance, six *B. napus* varieties were selected for studying the effects of cadmium stress on seedling growth, Cd accumulation, glutathione (GSH) content etc. The results showed that Cd stress inhibited leaf dry weight of different varieties seedlings, with the largest inhibition on Meiyou 88 and the smallest on Nanyou 868. There was certain difference in the seedling root dry weight of different rape varieties. Under stress conditions, Nanyou 868 had the largest root dry weight. Cadmium stress had the largest inhibition on root weight of Zaoshu 100 Days and Fengyou 9 seedlings, and the smallest inhibition on Meiyou 88. The Root-shoot ratio of the six tested varieties increased under Cd stress, with the highest increase of Meiyou 88 and the smallest increase of Nanyou 868. There was certain difference in the biomass of different varieties. Under normal and stress conditions, Nanyou 868 was significantly higher than the others. Cd stress had the greatest inhibitory effect on the biomass of Meiyou 88 seedlings and the least on Nanyou 868 seedlings. There were significant differences in heavy metal contents among different varieties. Meiyou 88 had low Cd concentration, Nanyou 868 had high Cd concentration. But the results showed that glutathione content of different varieties significantly increased under the Cd stress, with the highest increase rate of Meiyou 88, followed by Nanyou 868. This study provides guidance for food safety or repairing Cd contaminated soil in *B. napus* L.

Keywords: cadmium stress; *Brassica napus* L.; glutathione; physiological and biochemical characteristic