

万何平,陈伦林,钱佳丽,等.一种油菜组织高通量研磨技术及其在甘蓝型油菜镉吸收研究上的应用[J].江苏农业科学,2019,47(23):208-211.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.050

一种油菜组织高通量研磨技术及其在甘蓝型油菜镉吸收研究上的应用

万何平¹, 陈伦林², 钱佳丽³, 沈金雄³, 傅廷栋³

[1. 江汉大学生命科学学院/湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心, 湖北武汉 430070;

2. 江西省农业科学院作物研究所/江西省油料生物学重点实验室, 江西南昌 330200;

3. 华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室/国家油菜改良武汉分中心, 湖北武汉 430070]

摘要:镉(Cd)是对人类有毒害作用的重金属,同时也是对植物最具危害性的重金属元素之一。利用油菜水培技术对 300 份不同来源的甘蓝型油菜进行苗期镉胁迫处理,并对 300 份甘蓝型油菜幼苗地上、地下组织中的 Cd 含量进行测定。结果显示,在 5 mg/L Cd 浓度胁迫下,300 份材料的地上部分 Cd 浓度平均值为 244.78 $\mu\text{g/g}$,最小值为 142.44 $\mu\text{g/g}$,最大值为 430.00 $\mu\text{g/g}$;地下部分 Cd 浓度平均值为 1 816.16 $\mu\text{g/g}$,最小值为 743.07 $\mu\text{g/g}$,最大值为 3 323.30 $\mu\text{g/g}$;植株 Cd 总吸收量的平均值为 299.14 μg ,最小值为 107.27 μg ,最大值为 817.30 μg 。其中,13 个材料的 Cd 吸收总量低于 150 μg ,属于 Cd 低积累材料,43 份材料的 Cd 吸收总量高于 400 μg ,属于 Cd 高富集材料。此外,为了提升油菜组织 Cd 含量测定效率,对油菜干样研磨技术进行了改进,与传统研磨方法相比,该试验方法的研磨效率提升了 50 倍,大幅提升了样品研磨的通量和效率。

关键词:甘蓝型油菜;镉吸收;高通量研磨技术

中图分类号: S634.301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0208-04

目前,我国面临着十分严峻的土壤镉(Cd)污染问题。据不完全统计,我国每年约有 1 200 万 t 粮食被镉污染,因土壤镉污染导致的粮食减产超过 1 000 万 t,直接经济损失达 200 亿元以上^[1]。日益加剧的耕地重金属污染问题严重威胁着世界农业发展和人类食品安全。有学者提出通过特殊的超累积植物提取土壤中的重金属,从而达到修复土壤的目的。近年来,该技术已发展成为一种经济有效并具有广阔应用前景的植物修复技术^[2]。

甘蓝型油菜是用来取籽榨油的一类十字花科作物,是世界上分布最广、种植历史悠久、最重要的油料作物之一,其产量仅次于棕榈油^[3]。在我国,油菜是第一大油料作物,无论是其种植面积还是产量均位居油料作物首位,近年来,油菜的种植面积稳定在 670 万 hm^2 左右,年产油量约为 450 万 t,我国城乡居民消费的食用植物油脂中近 60% 是油菜提供的^[4-5]。根据植物体内镉的积累量,可以把植物分为低积累型(如豆科)、中等积累型(如禾本科)和高积累型(如十字花科)3 种类型^[6]。研究结果显示,十字花科芸薹属的油菜具有较强的吸收和富集 Cd 的能力,且不同油菜品种对 Cd 的吸收和富集能力存在较大差异^[7]。通过种植低吸收、低积累镉的油菜品种来达到降低植株体内 Cd 含量的目的,生产符合食

品安全标准的农产品具有实际应用价值。与此同时,通过种植高吸收、高积累 Cd 的油菜品种可以达到修复镉污染土壤的目的^[8]。目前,关于油菜 Cd 吸收和积累的相关研究仅有少量报道,如向丹等对筛选出的高吸镉能力、低吸镉能力油菜品种进行全生育期土培盆栽试验,研究 2 个油菜品种各器官吸收累积镉的特征及体内镉的分配差异,结果显示,2 个油菜品种地上部吸收的镉主要累积在茎、叶中,各器官中的镉含量在 2 个品种中均表现为叶 > 茎 > 角果壳 > 籽粒^[7]。牛雅典研究了不同油菜品种在不同生长期对镉的吸收、迁移和累积特征,结果显示,苗期芥菜型油菜品种地上部镉含量低于甘蓝型油菜品种;在薹期和成熟期,芥菜型油菜品种的地上部镉含量则逐渐高于甘蓝型油菜品种,且镉在不同油菜品种体内分布的一般特征为茎叶 > 根 > 角果壳 > 种子^[9]。然而,关于大规模鉴定油菜 Cd 吸收和积累能力的研究还未见相关报道。

开展作物 Cd 吸收积累相关性状的研究,首先是要对大批量植物组织样品内的 Cd 含量进行系统精确的测定。目前植物中 Cd 的测定方法主要有比色法、火焰原子吸收光谱法、无火焰原子吸收光谱法和原子荧光法^[10],利用这些测定方法前需要对植物组织样品进行烘干处理并将其研磨成粉末。目前,研究人员常用的研磨植物组织干样的方法主要有研钵研磨、植物组织粉碎机研磨等,此类研磨方法十分低效,且存在样品之间相互污染的风险,因此,样品的研磨效率已成为高通量测定植物组织 Cd 含量的限速步骤。

甘蓝型油菜已经发展成为集油用、菜用、饲用、绿肥和观花于一体的多功能作物,选育低积累或超富集的油菜品种对农业生产均有重要价值。本研究开发了一种油菜组织干样的高通量研磨技术,利用该技术对 300 份甘蓝型油菜苗期的 Cd

收稿日期:2018-11-13

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0101300)。

作者简介:万何平(1988—),男,湖北武汉人,博士,讲师,主要从事油菜非生物胁迫抗性研究。E-mail:362057164@qq.com。

通信作者:陈伦林,博士,研究员,主要从事油菜遗传育种研究。E-mail:lunlinchen@163.com。

吸收和积累能力进行鉴定,探究镉胁迫下不同甘蓝型油菜品种对 Cd 的吸收和分配规律,以期为进一步选择和应用 Cd 高积累的油菜进行土壤修复提供种质材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用材料为国家油菜产业技术体系收集的 300 份来自世界主要油菜种植国家的甘蓝型油菜种质材料,其中绝大部分材料来自我国各油菜育种单位。

1.2 油菜苗的培养与胁迫

为了减小环境对试验结果的影响,本试验采用水培方法评价幼苗期镉积累的相关性状。本试验于华中农业大学国家油菜改良中心武汉分中心的油菜温室内进行 2 次表型鉴定,温室条件:温度(20 ± 2) °C,光照—黑暗周期 16 h—8 h,光照度 2 500 lx。

具体操作步骤如下:(1)苗床的准备。用尼龙线将长×宽×高为 60 cm×40 cm×12 cm 的盆分割成 96 格,并在盆的表面铺上 1 层无菌纱布作为苗床。

(2)播种。向苗床内加满纯水,以保证整片纱布浸湿,将甘蓝型油菜种子均匀撒播到相应的小格中并记下编号,每个品种播 30 粒种子。

(3)培养盆和培养板。为了防止绿藻孳生,选用蓝色的长×宽×高为 60 cm×40 cm×12 cm 的盆。将 5 mm 厚的黑色广告板制成 60 cm×40 cm 规格的培养板,用打孔器在培养板上均匀打出 77(7×11)个直径为 1 cm 的小孔。选用厚度为 1 cm 的海绵剪成 1.2 cm² 的方块,并将海绵方块沿 1 条对角线剪开 2/3 用来固定幼苗。

(4)营养液的配制。幼苗培养所用营养液的配制参照 Hoagland 营养液配方并稍作修改^[11],全营养液具体配方如下:0.5 mmol/L NH₄H₂PO₄、3 mmol/L KNO₃、2 mmol/L Ca(NO₃)₂、1 mmol/L MgSO₄、0.09 mmol/L Na₂EDTA、0.09 mmol/L FeSO₄、22.5 μmol/L H₃BO₃、10 μmol/L MnSO₄、0.10 μmol/L (NH₄)₆Mo₇O₂₄、0.35 μmol/L ZnCl₂、0.20 μmol/L CuSO₄。

(5)移苗和营养管理。播种 7 d 后,待子叶完全展开且下胚轴伸长时,从苗床上选取均匀一致的幼苗,用海绵方块夹住下胚轴基部,然后移植至培养板上的小孔中并注上标签,每个材料移植 5 株幼苗,每株幼苗种植在不同的盆中,每株代表 1 个生物学重复。最后将固定有幼苗的培养板放置在装有 10 L 1/4 全营养液的培养盆中进行水培。3 d 后换成 1/2 浓度的营养液,4 d 后更换为全浓度营养液,此后每周都使用全营养液进行培养。注意保证每株幼苗的地下部分浸入水中。

(6)镉胁迫处理。前人研究结果显示,在 5 mg/L 镉处理下,大部分材料的侧根数和主根长度出现严重的受害现象^[12]。因此,本研究以 5 mg/L Cd 浓度的营养液对油菜苗进行重金属镉胁迫处理。在全浓度培养液中生长 1 周后进行 Cd 胁迫,其间每周更换 1 次营养液。油菜幼苗经镉胁迫处理 3 周后收获幼苗植株。

1.3 油菜干样的研磨

油菜幼苗经镉胁迫后,以子叶节为分界点,分别收获地上部、地下部材料。依次用超纯水清洗 2 次,每次 10 min;地下

部需用 20 mmol/L CaCl₂ (pH 值=5.0)洗脱液溶液清洗 2 遍,每次 15 min,用超纯水冲洗干净,其后于 100 °C 杀青 2 h,于 80 °C 烘干 72 h 至恒质量。

为了比较几种方法的研磨效率,笔者分别使用 4 种方法[研钵、植物组织粉碎机、豆浆机和高速振荡器(F & FM Australia 的型号 SK450)]研磨油菜地上部分、根系组织干样。其中高速振荡仪的操作如下:将油菜组织干样装入 50 mL 离心管内,装入 2~3 个直径为 8 mm 的钢珠后,使用高速振荡器振荡 5 min,然后用 100 目筛进行筛滤。

1.4 油菜干样粉末的消化

精确称取 20 mg 左右的样品,置于 14 mL 离心管中,加入 2 mL 70% 硝酸(分析纯),轻轻晃动,使所有材料被浸泡,振荡过夜,在沸水中煮 1 h,视消化状况重复 1~2 次,冷却至室温,补充超纯水至总体积为 12 mL,混匀后密封待测。利用火焰原子吸收分光光度计(北京瑞利 120A),使用标准曲线法测量样品中的 Cd 含量。油菜样品 Cd 的分析过程采用国家标准参比物质 GBW07603(灌木枝叶成分分析标准物质)进行质量控制。

Cd 浓度的计算:通过标准曲线计算各样品的 Cd 浓度 C ,然后根据下列公式计算地上部分和地下部分的 Cd 浓度:

Cd 浓度(干质量)(μg/g) = $(C \times V)/m$ 。式中: C 是根据标准曲线得到的浓度,μg/mL; V 是定容体积,L; m 是消化样品质量,g。整株 Cd 吸收总量(TC) = 地上部分 Cd 吸收量 + 地下部分 Cd 吸收量。其计算公式如下:

$$TC = SCC \times SDW + RCC \times RDW。$$

式中: SCC 为地上部分 Cd 浓度; RCC 为地下部分 Cd 浓度; SDW 为地上部分干质量; RDW 为地下部分干质量。

1.5 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件(IBM Corp, Armonk, NY, USA)对测定性状的表型值进行基本统计分析。统计内容包括计算表型性状的最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数等。

2 结果与分析

2.1 4 种研磨油菜组织干样方法的效率

比较了高速振荡仪与 3 种常规研磨方法的效率,由表 1 可以看出,研钵研磨样品的速率为 5 个/(h·人);植物粉碎机、豆浆机研磨样品的速率分别为 10、15 个/(h·人),较研钵方法而言效率提升了 1~2 倍,而使用高速振荡仪方法时,研磨速率为 500 个/(h·人),研磨效率提升了近 100 倍,从而实现了油菜组织干样的高通量研磨。此外,将用 4 种方法研磨后的粉末用 100 目筛进行筛滤,表 1 结果显示,经 3 种常规方法研磨后的样品粉末均需要筛滤,而用高速振荡仪粉碎后的粉末不需要筛滤。

表 1 4 种方法研磨样品速率的对比

研磨仪器	研磨样品速率 [个/(h·人)]	是否需要过筛
研钵	5	是
植物粉碎机	10	是
豆浆机	15	是
高速振荡仪	500	否

2.2 镉积累性状的遗传变异

本试验在温室条件下对 300 份甘蓝型油菜株系进行了幼苗期 Cd 积累相关性状的鉴定,在 Cd²⁺ 浓度为 5 mg/L 的水培体系中胁迫 3 周后,测定地上部分 Cd 浓度、地下部分 Cd 浓度以及 Cd 吸收总量。表 2、图 1 结果显示,3 个性状在 300 份甘蓝型油菜材料中存在广泛的遗传变异。其中,SCC 在 300 份材料中的平均值为 244.78 μg/g,最小值为 142.44 μg/g,最大值为 430.00 μg/g,变异系数为 19%;RCC 在 300 份材料中的平均值为 1 816.16 μg/g,最小值为 743.07 μg/g,最大值为 3 323.30 μg/g,变异系数达到 25.68%;TC 在 300 份材料中的平均值为 299.14 μg,最小值为 107.27 μg,最大值为 817.30 μg,变异系数为 18.06%。此外,SCC 和 RCC 的相关系数仅有 0.064,没有达到显著水平,说明油菜地上部分和地下部分在 Cd 吸收上无相关性。

表 2 Cd 浓度和转运系数的表型变异

数据类别	地上部分 Cd 浓度 (μg/g)	地下部分 Cd 浓度 (μg/g)	单株总 Cd 吸收量(μg)
最小值	142.44	743.07	107.27
最大值	430.00	3 323.30	817.30
平均值	244.78	1 816.16	299.14
标准差 SD	46.51	466.47	112.02
变异系数 CV(%)	19.00	25.68	18.06

从图 2 可以看出,3 个性状的分布均呈现出连续的正态

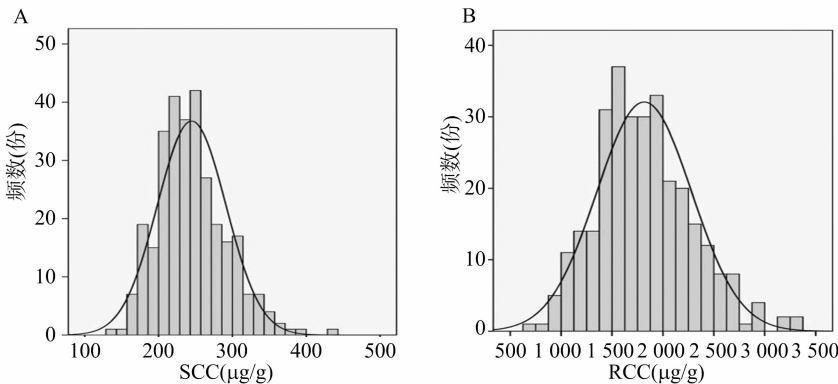


图 2 3 个 Cd 性状的分布

表 3 300 份油菜镉吸收性状的分级

性状	浓度/吸收量	等级	材料数量 (个)
地上部分 Cd 浓度(μg/g)	<200	低浓度	45
	200~300	中间型	215
	>300	高浓度	40
地下部分 Cd 浓度(μg/g)	<1 300	低浓度	36
	1 300~2 400	中间型	229
	>2 400	高浓度	35
单株 Cd 吸收量(μg)	<150	低富集	13
	150~400	中间型	244
	>400	高富集	43

3 讨论与结论

超积累植物这一概念最早是由 Brooks 等在 1977 年最早

或者近似正态分布,说明这 3 个性状均符合多基因型控制的数量性状特征。

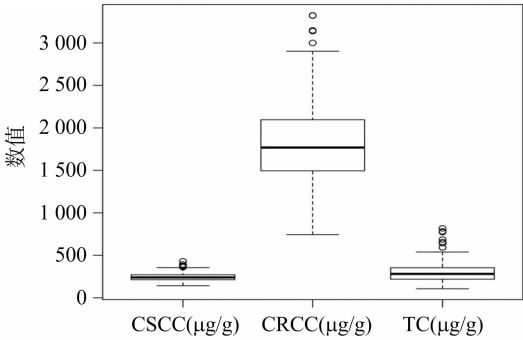


图 1 3 个 Cd 性状的箱型

2.3 Cd 低/高富集油菜的筛选

根据地上部分 Cd 浓度、地下部分 Cd 浓度以及植株幼苗 Cd 总吸收量,对 300 份甘蓝型油菜进行筛选。如表 3 所示,在 300 份材料中,有 45 份材料的地上部分 Cd 浓度低于 200 μg/g,40 份材料的 SCC 超过了 300 μg/g;对于地下部分 Cd 浓度而言,有 36 份材料低于 1 300 μg/g,35 份材料高于 2 400 μg/g;13 份材料的 Cd 吸收总量低于 150 μg,属于低富集材料,例如浙油 18、皖油 15 号和中油 821 等,有 43 份材料的 Cd 总吸收量高于 400 μg,属于 Cd 高富集材料,其中包含中双 11、中双 10 号和淮油 12 等。

提出来的^[13]。目前,关于植物对某种或某些化学元素的富集或超富集能力尚无统一的标准^[12]。植物中的镉含量通常低于 3 mg/kg,但生长在富镉土壤上的植物体内含镉量会大于 20 mg/kg^[14]。一般认为,植物地上部分镉含量低于 3 μg/g 的为镉富集能力弱的植物,镉含量在 3~10 μg/g 之间的为镉富集能力中等的植物,镉含量在 10~20 μg/g 之间的为镉富集能力较强的植物,镉含量大于 20 μg/g 的为镉富集植物,当植物叶片或地上部(干质量)中的 Cd 含量达到 100 μg/g 时,被认为是超积累植物。自 Baker 等发现能富集 Cd 含量高达 2 130 μg/g(干质量)的十字花科植物天蓝遏蓝菜(Thlaspi caerulescens)以来,越来越多的镉超积累植物被国内外科学家先后发现,且大部分属于草本植物^[15]。然而,由于草本植物植株生物量小、生长周期长且有较强的地域性,并不适合大面积农田污染的修复。因此,研究人员将研究重心转移到了生物量大,且更具有应用前景的农作物修复上。研究表明,甘蓝

型油菜的生物量大,且具有较强的吸收和富集 Cd 的能力^[7]。因此,Cd 超富集的油菜品种可作为一种修复镉污染土壤的理想材料。综合来看,作为食用如菜用、油用和饲用的油菜,应该尽量降低植株中的镉含量;作为生物柴油用或观花油菜用,可筛选超富集镉的油菜品种,应用于镉污染耕地的修复。

在影响作物吸收 Cd 的诸多因素中,除了外在的环境因素外,品种间的差异是最主要的因素。研究表明,不同水稻品种由于基因型的不同,而造成植物生理特性、形态结构的差异,使植株对重金属元素的吸收和分配不同^[16-17]。吴启堂等对 20 多个品种水稻吸收积累 Cd 的研究发现,品种间积累 Cd 的差异可达 1 倍以上^[18]。在本研究中,不同油菜品种 Cd 吸收量最大差距达到 8 倍,显示出更大的遗传变异,说明甘蓝型油菜在镉吸收性状上存在非常大的遗传变异,这种巨大变异也为后期筛选 Cd 超富集油菜提供了遗传基础。此外,同一植物的不同部位在 Cd 积累量方面也存在很大差异。一般情况下,大多数植物吸收的 Cd 主要积累在根系,而地上部各组织中的 Cd 含量一般较低^[19]。本研究结果显示,在甘蓝型油菜植株体内,根系中的 Cd 含量平均为 1 816.16 $\mu\text{g/g}$,而地上部分 Cd 含量仅为 244.78 $\mu\text{g/g}$,说明油菜根系组织能忍受更高浓度的 Cd。近来的研究结果显示,Cd 在根系中主要分布在质外体或形成磷酸盐、碳酸盐沉淀,或与细胞壁结合,且植物积累 Cd 的机制主要通过细胞壁的结合、与有机化合物形成金属螯合物及区域化分布等途径,从而进行解毒^[19-20]。

前人研究结果显示,在 10 mg/L 镉胁迫甘蓝型油菜水培处理中,地上部分镉含量高值为 246.45 $\mu\text{g/g}$,低值为 112.2 $\mu\text{g/g}$,地下部分最高、最低含量分别为 1 388.55、655.90 $\mu\text{g/g}$ ^[9]。本研究结果显示,地上部分 Cd 含量在 300 份材料中的平均值为 244.78 $\mu\text{g/g}$,最小值为 142.44 $\mu\text{g/g}$,最大值为 430.00 $\mu\text{g/g}$;地下部分 Cd 含量在 300 份材料中的平均值为 1 816.16 $\mu\text{g/g}$,最小值为 743.07 $\mu\text{g/g}$,最大值为 3 323.30 $\mu\text{g/g}$ 。与前人研究结果相比,本研究测定的含量高于前人结果,且含量范围更广。推测其可能原因,主要是由于本研究测定的油菜材料数量更多,来源更广,且镉胁迫处理的时间更长。

植物组织干样研磨处理是进行各种金属离子含量测定的前期准备过程。目前,研究人员常用的研磨方法主要有钵钵研磨、植物组织粉碎机研磨等。但此类方法十分低效,且存在样品之间相互污染的风险。为了提升油菜组织干样的研磨效率,本研究利用高速振荡仪对油菜根系、地上部分组织干样进行研磨。结果显示,利用该方法研磨样品的速率可达 500 个/(h·人),研磨效率较传统方法提升了近 50 倍,极大提升了研磨效率。此外,本方法将每个样品单独放在 1 个 50 mL 离心管内,彻底杜绝了不同样品磨样过程中可能存在的串样风险,极大地提升了检测结果的精确性。本方法不仅限于对油菜组织 Cd 含量的检测,同样适用于大批量检测水稻、玉米等农作物 Cd 含量。

本研究开发了 1 套油菜组织干样高通量研磨技术,与其他常用研磨技术相比,本技术的研磨效率提升了近 50 倍。本研究利用水培技术、高通量干样研磨技术对 300 份甘蓝型油菜种质镉吸收和富集能力进行鉴定与分级,最终获得 13 份 Cd 低富集材料和 43 份 Cd 高富集材料,为进一步利用油菜来

修复、开发和利用镉污染土地提供了重要的种质资源材料。

参考文献:

- [1] 应兴华,金连登,徐霞,等. 我国稻米质量安全现状及发展对策研究[J]. 农产品质量与安全,2010(6):40-43.
- [2] Baker A J M, McGrath S P M, Sidoli C M D, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1994, 11(1/2/3/4):41-49.
- [3] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报,2010,32(2):300-302.
- [4] 沈金雄,傅廷栋. 我国油菜生产、改良与食用油供给安全[J]. 中国农业科技导报,2011,13(1):1-8.
- [5] 沈金雄,傅廷栋,涂金星,等. 中国油菜生产及遗传改良潜力与油菜生物柴油发展前景[J]. 华中农业大学学报,2007,26(6):894-899.
- [6] Arthur E, Crews, C Morgan. Optimizing plant genetic strategies for minimizing environmental contamination in the food chain[J]. International Journal of Phytoremediation, 2000, 2(1):1-21.
- [7] 向丹,焦卫平,苏德纯. 不同吸镉能力油菜各器官累积镉的差异[J]. 中国油料作物学报,2009,31(1):29-33.
- [8] 苏德纯,黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学,2002,22(1):48-51.
- [9] 牛雅典. 不同油菜品种对 Cd 耐性差异及其初步机理研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [10] 巨积红. 石墨炉原子吸收光谱法测植物中镉[J]. 甘肃农业,2006(11):400.
- [11] 万何平,李群,高云雷,等. 一种基于水培技术的高效低成本油菜小孢子继代培养方法[J]. 中国油料作物学报,2016,38(5):588-591.
- [12] 张付贵,肖欣,闫贵欣,等. 甘蓝型油菜幼苗期耐镉性评价方法的研究[J]. 中国油料作物学报,2017,39(1):47-54.
- [13] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7:49-57.
- [14] 毕君,郭伟珍,高红真. 9 种植物对镉的忍耐和富集能力研究[J]. 中国农学通报,2013,29(34):12-16.
- [15] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. Biorecovery, 1989, 1:81-86.
- [16] Yu H, Wang J L, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. Science of the Total Environment, 2006, 370(2/3):302-309.
- [17] Liu J G, Zhu Q S, Zhang Z J, et al. Variations in cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2005, 85(1):147-153.
- [18] 吴启堂,陈卢,王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报,1999,19(1):104-107.
- [19] 陈爱葵,王茂意,刘晓海,等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. 生态科学,2013,32(4):514-522.
- [20] 胡铁柱,冯素伟,丁位华,等. 镉对不同镉积累类型小麦幼苗的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):46-49.