

引用格式:

白婧, 刘宏辉, 陈琳玉, 孟杰, 卢丹, 漆佳文, 张文, 罗育才, 刘显军, 向国红, 段仁燕. 不同品种(系)油菜对锑的富集转运特性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(6): 694–701.

BAI J, LIU H H, CHEN L Y, MENG J, LU D, QI J W, ZHANG W, LUO Y C, LIU X J, XIANG G H, DUAN R Y. Enrichment and transport characteristics of antimony in different varieties(lines) oilseed rape [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(6): 694–701.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同品种(系)油菜对锑的富集转运特性

白婧, 刘宏辉, 陈琳玉, 孟杰, 卢丹, 漆佳文, 张文, 罗育才, 刘显军, 向国红, 段仁燕*

(湖南人文科技学院农业与生物技术学院, 湖南 娄底 417000)

摘 要: 采用大田试验方法, 分析种植于锑污染农田中的 29 个品种(系)甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)的生长及根、茎、叶、荚、籽粒吸收和转运锑的能力。结果表明: 常香油 3 号的单株干质量(126.84 g)远高于其他供试油菜的, 具有较明显的生长优势; 油菜叶、荚、根、茎、籽粒中锑含量依次降低, 叶中锑含量远高于其他器官的, 是油菜中锑的主要富集部位, 油菜茎、叶、荚、籽粒中锑含量与根中锑含量呈极显著($P<0.01$)正相关, 籽粒锑含量与根、茎中锑含量呈极显著($P<0.01$)正相关, 说明籽粒中锑主要随着油菜根和茎向上运输而不断积累; 南油杂 1 号和米油 518 对锑的生物富集系数分别为 1.11 和 0.06, 分别为 29 个品种(系)中最高和最低的, 分别属于高积累和低积累品种, 它们籽粒中锑质量分数仅为 0.38 和 0.22 mg/kg, 两者均可作为锑污染土壤修复的优选油菜品种; 茎到叶(TF_{SL})、茎到荚(TF_{SP})、茎到籽粒(TF_{SS})、根到茎(TF_{RS})、荚到籽粒(TF_{PS})、叶到荚(TF_{LP})、叶到籽粒(TF_{LS})的转运系数依次降低; 籽粒锑含量与 TF_{RS} 呈显著($P<0.05$)正相关, 与 TF_{PS}、TF_{LS}、TF_{SS} 呈极显著($P<0.01$)正相关, 与 TF_{SP} 呈极显著($P<0.01$)负相关, 说明油菜籽粒锑含量主要决定于荚和叶中锑向籽粒的转运能力。

关 键 词: 油菜; 锑; 品种筛选; 富集; 转运

中图分类号: S565.401; X173 文献标志码: A 文章编号: 1007–1032(2023)06–0694–08

Enrichment and transport characteristics of antimony in different varieties(lines) oilseed rape

BAI Jing, LIU Honghui, CHEN Linyu, MENG Jie, LU Dan, QI Jiawen, ZHANG Wen,
LUO Yucai, LIU Xianjun, XIANG Guohong, DUAN Renyan*

(College of Agriculture and Biotechnology, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi, Hunan 417000, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the growth of 29 varieties(lines) of *Brassica napus* L. cultivated in antimony-contaminated fields and the absorbing and transporting capacity of root, stem, leaf, pod, and seed to antimony. The results indicated that Changxiangyou 3 exhibited significantly higher dry weight per plant(126.84 g) compared to other tested oilseed rape, demonstrating its excellent growth advantage. Antimony contents in rape leaves, pods, roots, stems and seeds decreased successively with the highest concentration found in leaves as the primary site for antimony accumulation in rape plants. There were positive correlation($P<0.01$) between antimony contents in stems, leaves, pods and seeds with that in roots. The positive correlation were also found between antimony contents in seeds with both root and stem concentrations($P<0.01$). These findings suggested continuous accumulation of antimony within rape seeds through upward transportation from roots to stems. Nanyouza 1 had the highest biological enrichment

收稿日期: 2022–09–01

修回日期: 2023–12–01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907037、32371589); 湖南省教育厅科学研究重点项目(22A0608); 湖南省重点研发项目(2021NK2030); 湖南省农业科技创新资金项目(2020CX84); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020NK2001)

作者简介: 白婧(1988—), 女, 黑龙江双城人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态修复研究, jingbai@outlook.com; *通信作者, 段仁燕, 博士, 教授, 主要从事农田及矿山重金属污染区监测与生态系统修复研究, duanrenyan78@163.com

coefficient for antimony at 1.11 while Miyou518 had the lowest at 0.06 among the tested varieties(lines), which indicated they belonged to high accumulation and low accumulation varieties respectively, and the antimony mass fraction of their grains were only 0.38 and 0.22 mg/kg, making them suitable choices for remediation of antimony-contaminated soil. The transport coefficients from stem to leaf(TF_{SL}), stem to pod(TF_{SP}), stem to seed(TF_{SS}), root to stem(TF_{RS}), pod to seed(TF_{PS}), leaf to pod(TF_{LP}), and leaf to seed(TF_{LS}) showed a decreasing trend. Antimony content in rape seeds demonstrated positive correlation with TF_{RS}($P<0.05$), TF_{PS}($P<0.01$), TF_{LS}($P<0.01$) and TF_{SS}($P<0.01$), while showing negative correlation with TF_{SP}($P<0.01$). These results together indicated that the content of antimony in rape seed was primarily determined by the ability of antimony in pod and leaves to be transported to the seeds.

Keywords: oilseed rape; antimony; variety screening; accumulation; transport

重金属污染可导致土壤肥力下降、农产品产量和质量降低,并通过食物链传递进入人体,严重危害人类健康^[1-2]。锑(Sb)是一种天然存在的潜在性有毒金属元素,具有移动性、隐蔽性强的特点^[3]。中国是锑最大的生产国,约占世界份额的 84.0%,其中超大型、大中型锑矿集中在长江中下游的广西(34.4%)、湖南(21.2%)、云南(12.2%)、贵州(10.2%)等省份^[4]。锑矿区的无序开采和锑制品广泛应用等造成土壤锑污染日渐严重^[5]。前期研究^[6-7]表明,湖南省锡矿山地区土壤锑质量分数高达 8591.16 mg/kg,是主要的非致癌风险因子,存在较高程度的生态风险和健康风险。另有研究表明,该地区周边农田土壤锑质量分数为 39.56~8671.00 mg/kg,均值达 1041.00 mg/kg^[8],水稻田的总锑质量分数达 (185.00±15.20) mg/kg^[9]。

油菜是全球重要的农作物,且具有修复土壤污染的潜力,具备重要的应用推广价值^[10-11]。中国是油菜生产和消费大国,种植面积和总产均占全球的 30%以上,其中长江流域占据主导地位^[12]。相比于油菜的根、茎、叶等器官,籽粒中的重金属往往含量较少,不影响油菜食用价值^[13-14]。如何在污染的农业土壤中实现油菜的安全生产,已成为长江流域中低污染地区面临的共同问题。油菜对重金属的吸收转运能力与油菜品种、金属的类型及浓度均有着直接关系,筛选利用具有收益型的经济作物是土壤生态修复推广应用的关键点^[15]。油菜具有发达的根系,可通过质外体途径或共质体途径吸收潜在有毒元素至木质部,再经过木质部到茎、叶,接着通过韧皮部重新运输到籽粒,或者从根部木质部直接运输至籽粒^[16-19]。RODDA 等^[20]研究表明,韧皮部运输是水稻籽粒中镉的主要运输途径,大于 90%的镉来自韧皮部运输。韧皮部运输对籽粒中镉富集至关重要,但锑在油菜中的吸收、转运情况还鲜有研究。

笔者选取 29 个在湖南地区广泛使用的甘蓝型杂交品种(系)油菜种植于锑污染农田中,于成熟期测定根、茎、叶、荚、籽粒的锑含量,计算各器官的富集系数和转运系数,探究锑在油菜各器官中的转运规律,筛选籽粒低积累锑品种,以期在油菜在污染土壤生态修复中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的 29 个油菜品种(系)均为甘蓝型油菜杂交种,包括亮油 9 号、油香 98、得中油 338、得中油 341、得中油 339、欣星油 3 号、沔油 789、沔油 958、油研 50、惠杂油 3 号、陆杂油 90、德孝油 919、娄彩 19 号、娄彩 11 号、娄彩 12 号、娄彩 17 号、大地 199、晒滋园一号、晒滋园二号、湘星油 131、常油杂 83、南油杂 1 号、中油杂 19、娄文油 98、常香油 3 号、佳油赞、米油 518、浙油 51、娄彩 18 号,由娄底市农业科学研究所提供。

1.2 试验设计

田间试验在湖南省冷水江市锡矿山船山村(111°30'23.24"E, 27°45'15.19"N)进行。设 87 个田间试验小区,小区面积为 30 m²,区间间距 0.40 m。每个品种(系)3 次重复,各品种(系)随机排列。小区土壤 pH 7.85,有机质、全氮、全磷、全钾质量分数分别为 42.460、2.632、0.752、17.695 g/kg,速效氮、速效磷、速效钾、锑质量分数分别为 167.564、149.523、340.458、254.27 mg/kg。油菜于 2020 年 9 月 26 日在湖南人文科技学院九耳基地育苗,11 月 2 日移苗至锡矿山船山村的田间试验小区,2021 年 5 月 12 日籽粒成熟即收获。试验期间做好田间管理,适时浇水、施肥和除草。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 样品采集和植物生长指标测定

在油菜生长到成熟期后每个处理小区采 3 株油菜,所采油菜尽量保持长势一致,同时“点对点”原位采集根际土壤样品,油菜植株分别测定作物的生长指标(株高、根长、干质量),将植株器官(根、茎、叶、荚、籽粒)分离后带回实验室处理和分析。

1.3.2 镉含量测定及富集系数和转运系数计算

土壤样品置于室内经自然风干、除杂后过孔径 0.150 mm 尼龙网筛,装入聚乙烯密封袋中保存。油菜各器官用去离子水洗净,吸水纸吸干,装袋后于烘箱 105 ℃ 杀青 30 min,然后 65 ℃ 烘干至恒重,碾碎,装入聚乙烯密封袋中。

参照文献[6]的方法,采用 $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{O}_2\text{--HF}$ 和 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4\text{--H}_2\text{SO}_4$ 分别消解土壤、植物样品,使用原子荧光光度计(AFS-2100)测定消解液中镉含量,并计算生物富集系数和转运系数 TF_{RS} (根到茎)、 TF_{SL} (茎到叶)、 TF_{LP} (叶到荚)、 TF_{PS} (荚到籽粒)、

TF_{SP} (茎到荚)、 TF_{LS} (叶到籽粒)、 TF_{SS} (茎到籽粒)。

1.4 数据统计

数据采用 Excel 2019 整理;运用 SPSS 22.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同品种(系)油菜的生长指标

田间试验中,不同品种(系)油菜的株高、根长、干质量存在较大差异,部分品种(系)间的差异有统计学意义(表 1)。常香油 3 号的株高最高,达 164.20 cm,亮油 9 号、南油杂 1 号、浙油 51 的植株较高,但与常香油 3 号的差异均无统计学意义。常香油 3 号的地下部干质量和地上部干质量均最大,平均值分别达 15.55 g 和 111.29 g,单株干质量为 126.84 g,远高于其他供试油菜的,说明在镉污染土壤中,常香油 3 号较其他品种(系)生长优势明显,对镉具有较高的耐性。

表 1 成熟期不同品种(系)油菜的生长指标

Table 1 Growth indexes of different varieties(lines) oilseed rape at maturity stage				
品种(系)	株高/cm	根长/cm	地下部干质量/g	地上部干质量/g
亮油 9 号	(152.84±13.64)abcd	(20.50±2.55)efghi	(5.70±1.56)b	(82.97±5.95)b
油香 98	(147.54±9.36)cde	(22.38±4.48)defghi	(12.96±1.52)bcd	(79.43±5.62)bcd
得中油 338	(142.12±4.83)cdefg	(30.08±3.69)ab	(10.91±0.74)bcde	(77.49±11.78)bcde
得中油 341	(132.74±10.18)fg	(26.04±4.28)abcd	(4.27±0.47)hijk	(59.15±6.32)hijk
得中油 339	(138.88±6.20)defg	(30.88±6.83)a	(3.49±0.98)fghij	(62.77±7.18)fghij
欣星油 3 号	(140.76±8.18)cdefg	(23.98±3.72)cdef	(5.92±0.98)hijk	(59.53±5.62)hijk
沔油 789	(144.66±4.50)cdef	(23.16±2.05)defg	(5.25±1.87)fghij	(63.16±10.96)fghij
沔油 958	(150.56±4.63)bcde	(18.12±3.43ghij	(5.97±1.07)bcde	(78.51±6.28)bcde
油研 50	(141.00±2.64)cdefg	(29.96±5.66)ab	(13.00±1.56)kl	(50.55±5.93)kl
惠杂油 3 号	(140.56±7.75)cdefg	(28.30±4.23)abcd	(7.52±1.31)ghijk	(60.18±7.18)ghijk
陆杂油 90	(132.60±10.75)fg	(22.50±2.20)defgh	(8.31±0.99)kl	(50.68±3.56)kl
德孝油 919	(139.38±15.96)defg	(18.94±3.00)fghij	(3.17±0.74)m	(36.30±5.57)m
娄彩 19 号	(145.74±3.91)cdef	(21.44±3.24)defghi	(4.67±1.27)defg	(70.73±7.49)defg
娄彩 11 号	(138.36±5.40)efg	(20.48±2.93)efghi	(7.56±1.36)bcde	(74.65±5.50)bcde
娄彩 12 号	(129.26±8.58)g	(14.76±2.26)j	(5.11±0.77)lm	(42.45±8.68)lm
娄彩 17 号	(140.74±4.34)cdefg	(14.76±2.35)j	(5.66±1.03)fghijk	(61.88±9.35)fghijk
大地 199	(145.66±4.06)cdef	(21.66±3.38)defghi	(6.58±1.06)hijk	(59.52±10.36)hijk
晒滋园一号	(140.64±4.97)cdefg	(21.28±2.31)defghi	(7.05±1.51)efghi	(67.90±7.59)efghi
晒滋园二号	(131.82±11.87)fg	(17.72±1.17)hij	(4.77±0.93)hijk	(58.74±2.84)hijk
湘星油 131	(143.40±7.82)cdef	(22.22±3.34)defghi	(6.54±1.10)jkl	(52.03±7.73)jkl
常油杂 83	(138.45±12.71)efg	(14.30±3.38)j	(3.61±0.33)m	(38.88±3.33)m
南油杂 1 号	(161.35±2.13)ab	(29.58±3.87)ab	(5.40±0.84)ijk	(57.54±10.82)ijk
中油杂 19	(137.06±8.22)efg	(24.34±2.70)cde	(8.21±0.90)bc	(82.53±8.09)bc
娄文油 98	(148.70±11.56)bcde	(17.16±3.31)ij	(8.09±1.51)defgh	(69.00±4.50)defgh

表 1(续)

品种(系)	株高/cm	根长/cm	地下部干质量/g	地上部干质量/g
常香油 3 号	(164.20±0.05)a	(23.70±2.46)cdef	(15.55±5.37)a	(111.29±8.84)a
佳油赞	(132.90±1.08)fg	(17.18±2.89)ij	(4.05±1.24)lm	(43.61±5.94)lm
米油 518	(145.70±1.10)cdef	(17.64±2.71)hij	(5.06±0.51)kl	(50.82±9.91)kl
浙油 51	(154.08±8.28)abc	(20.10±3.53)efghi	(7.03±0.82)cdef	(72.01±10.53)cdef
娄彩 18 号	(137.22±10.21)efg	(25.80±3.76)bcd	(8.55±1.67)d	(107.19±6.64)a
平均值	142.72	22.03	6.89	64.88
标准差	8.31	4.75	2.99	17.71

同列不同字母示品种(系)间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 不同品种(系)油菜各器官中镉的分布

质量分数依次降低, 分别为 26.97、7.10、5.96、3.72、3.07 mg/kg, 差异较大, 叶中镉含量远远超过其他

由表 2 可知: 油菜的叶、莢、根、茎、籽粒镉

表 2 成熟期不同品种(系)油菜镉的质量分数及生物富集系数

Table 2 Antimony contents and bioaccumulation factors of different varieties(lines) oilseed rape at maturity stage

品种(系)	镉质量分数/(mg kg ⁻¹)						生物富集系数
	根	茎	叶	莢	籽粒	整株	
亮油 9 号	(1.94±0.23)igk	(1.37±0.09)ijklm	(11.51±2.00)klm	(4.40±0.32)gh	(1.40±0.33)cdefg	(17.42±2.26)ijklm	(0.09±0.01)no
油香 98	(1.98±0.53)igk	(0.54±0.13)m	(13.81±2.47)hijkl	(4.37±0.20)gh	(1.46±1.02)cdefg	(17.76±2.81)jkl	(0.11±0.02)lmno
得中油 338	(1.34±0.03)k	(0.98±0.15)klm	(6.86±1.41)m	(3.55±0.84)gh	(0.85±0.51)fg	(10.95±2.47)lm	(0.09±0.02)mno
得中油 341	(4.12±1.11)fghig	(2.18±0.68)ghijklm	(18.53±1.43)ghij	(3.95±0.54)gh	(3.54±1.78)cdefg	(26.58±2.44)hi	(0.18±0.02)ijk
得中油 339	(7.94±1.90)d	(4.77±0.58)d	(42.77±4.45)cd	(5.21±0.37)efgh	(1.93±0.96)cdefg	(52.31±4.43)def	(0.43±0.04)cd
欣星油 3 号	(2.63±1.41)igk	(0.86±0.16)klm	(11.37±2.98)klm	(3.02±1.68)gh	(0.22±0.10)g	(14.19±3.51)ijklm	(0.10±0.02)mno
沔油 789	(1.93±0.25)igk	(1.18±0.33)ijklm	(10.19±2.50)klm	(2.82±0.40)h	(1.05±0.41)efg	(14.39±3.03)ijklm	(0.09±0.02)mno
沔油 958	(3.11±0.22)higk	(2.37±0.57)fghijklm	(37.67±3.30)de	(7.82±1.41)ef	(1.26±0.33)cdefg	(45.69±4.92)ef	(0.32±0.03)gh
油研 50	(12.59±0.28)c	(4.50±0.89)def	(34.03±2.14)e	(11.43±0.63)c	(2.93±1.70)cdefg	(43.92±3.29)f	(0.31±0.02)h
惠杂油 3 号	(2.84±0.70)igk	(1.71±0.25)hijklm	(12.12±2.53)ijklm	(2.36±0.46)h	(1.11±0.80)defg	(15.90±2.34)ijklm	(0.11±0.02)lmno
陆杂油 90	(6.52±1.90)de	(14.49±3.90)b	(19.89±1.15)gh	(39.47±5.01)a	(4.41±4.01)cdef	(68.95±9.39)c	(0.49±0.07)c
德孝油 919	(1.20±0.40)k	(1.47±0.39)ijklm	(7.79±1.16)lm	(3.33±0.54)gh	(0.73±0.42)fg	(12.27±1.05)klm	(0.10±0.01)mno
娄彩 19 号	(4.19±1.24)fghi	(4.48±0.17)def	(15.59±3.54)ghijk	(4.53±1.99)gh	(3.49±1.82)cdefg	(26.56±3.28)hi	(0.16±0.02)jkl
娄彩 11 号	(5.16±1.37)efgh	(2.99±0.81)efghijkl	(13.34±1.96)ijkl	(3.91±0.4)gh	(2.87±2.82)cdefg	(21.63±5.40)ij	(0.16±0.04)ijklm
娄彩 12 号	(6.01±1.99)def	(3.77±0.99)defgh	(16.37±1.21)ghijk	(8.03±1.78)de	(4.94±1.94)bcd	(30.18±4.19)gh	(0.22±0.03)i
娄彩 17 号	(3.52±1.69)ghigk	(3.28±0.28)defghij	(27.06±4.75)f	(4.87±1.06)fgh	(2.44±0.38)cdefg	(35.08±5.46)g	(0.19±0.03)ij
大地 199	(1.80±0.58)gk	(2.20±1.17)ghijklm	(18.77±6.27)ghi	(3.86±0.63)gh	(4.98±4.04)bc	(26.93±2.67)hi	(0.20±0.02)ij
晒滋园一号	(6.97±0.58)de	(5.45±0.60)de	(52.99±3.72)b	(4.70±1.25)fgh	(1.93±0.80)cdefg	(59.74±2.47)d	(0.38±0.02)defg
晒滋园二号	(15.53±0.64)b	(16.87±3.02)a	(43.79±3.07)cd	(4.96±1.15)efgh	(19.11±5.02)a	(79.68±8.98)b	(0.69±0.08)b
湘星油 131	(6.17±0.25)def	(3.55±0.59)defghi	(45.26±2.36)c	(6.19±1.73)efg	(3.03±1.68)cdefg	(51.85±4.21)def	(0.40±0.03)de
常油杂 83	(2.51±0.48)igk	(1.49±0.42)ijklm	(15.39±1.83)ghijk	(3.83±0.48)gh	(0.72±0.22)fg	(19.87±1.77)ijk	(0.12±0.01)klmno
南油杂 1 号	(1.94±0.83)igk	(0.79±0.17)lm	(107.27±0.72)a	(2.68±0.45)h	(0.38±0.03)g	(101.04±1.40)a	(1.11±0.02)a
中油杂 19	(15.36±0.92)b	(3.38±0.98)defghij	(34.78±5.44)e	(11.31±2.79)c	(1.89±0.70)cdefg	(48.31±6.98)ef	(0.34±0.05)efgh
娄文油 98	(5.95±0.58)def	(3.28±1.27)defghij	(41.66±3.12)cd	(15.16±2.15)b	(4.58±2.14)bcdef	(57.98±6.24)d	(0.49±0.05)c
常香油 3 号	(18.76±3.55)a	(4.18±1.18)defg	(41.53±6.83)cd	(12.98±2.14)bc	(4.86±3.51)bcde	(58.18±5.68)d	(0.33±0.03)fgh
佳油赞	(11.66±1.56)c	(9.72±1.95)c	(20.34±5.83)g	(10.79±2.24)cd	(8.04±1.58)b	(46.24±6.35)ef	(0.37±0.05)defg
米油 518	(1.65±0.11)k	(0.53±0.14)m	(6.57±0.69)m	(2.50±0.91)h	(0.22±0.17)g	(9.11±1.20)m	(0.06±0.01)o
浙油 51	(12.27±1.07)c	(3.09±0.75)efghijk	(39.46±5.33)cde	(11.13±3.60)c	(3.58±1.27)cdefg	(53.38±5.60) de	(0.39±0.04)def
娄彩 18 号	(5.34±0.80)efg	(2.37±0.51)fghijklm	(15.54±0.81)ghijk	(2.74±0.59)h	(1.21±0.78)cdefg	(20.57±2.44)ijk	(0.13±0.02)klmn
平均值	5.96	3.72	26.97	7.10	3.07	37.47	0.28
标准差	4.91	3.90	20.71	7.23	3.89	23.08	0.22

同列不同字母示品种(系)间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

器官,是油菜镉的主要富集部位,叶、莢、根 3 个器官的镉积累量约占全株的 85.50%;供试油菜中有 6 个品种(系)籽粒镉质量分数低于 1.00 mg/kg,按镉质量分数由低到高排序,依次为米油 518、欣星油 3 号、南油杂 1 号、常油杂 83、德孝油 919、得中油 338,表明种植在镉中度污染土壤中的部分甘蓝型油菜品种(系)仍可用作食用油原料,不影响其食用价值;硒滋园二号的镉质量分数为 79.68 mg/kg,显著高于除南油杂 1 号以外的其他品种(系)的,但其籽粒中的镉质量分数高达 19.11 mg/kg,显著高于其他品种(系)的,存在健康风险,不适宜作为修复作物;南油杂 1 号的镉质量分数达 112.90 mg/kg,对镉的生物富集系数达 1.11,均显著($P<0.05$)高于其他品种(系)的,表明南油杂 1 号对镉具有较高的富集性,且其籽粒中镉质量分数仅为 0.38 mg/kg,籽粒富集能力较低,可见,南油杂 1 号可作为镉污染修复的优选油菜品种;米油 518 的生物富集系数仅为 0.06,低于其他品种(系),籽粒中镉的含量仅为 0.22 mg/kg,该品种在镉污染土壤中表现出低富集的特点。

2.3 不同品种(系)油菜各器官中镉含量间的关系

对油菜各器官镉含量之间的相关性分析(表 3)发现,油菜茎、叶、莢、籽粒中的镉含量与根中的镉含量呈极显著($P<0.01$)正相关,说明油菜根中的

镉增加后转运到油菜的茎、叶、莢、籽粒中;籽粒中的镉含量与根、茎中镉含量呈极显著($P<0.01$)正相关,与叶和莢中的镉含量无显著相关关系,说明籽粒中的镉主要随着油菜根和茎向上运输而不断积累。

2.4 不同品种(系)油菜各器官对镉的转运分析

由表 4 可知:油菜品种(系)各器官之间的转运能力存在较大差异,总体呈 $TF_{SL} > TF_{SP} > TF_{SS} > TF_{RS} > TF_{PS} > TF_{LP} > TF_{LS}$; 镉从根向茎转运系数 TF_{RS} 大于 1 的品种(系)有 6 个,占整体的 20.69%,按 TF_{RS} 由大到小排列,依次有陆杂油 90、德孝油 919、大地 199、娄彩 19、硒滋园二号、娄彩 17 号;镉从茎转向叶的转运系数 TF_{SL} 远大于其他器官的转运系数,所有品种的 TF_{SL} 都大于 1,南油杂 1 号的 TF_{SL} 达 140.02,显著($P<0.05$)高于其他品种(系)的;镉由叶转向莢的转运系数 TF_{LP} 中大于 1 的只有陆杂油 90;镉由莢转向籽粒的转运系数 TF_{PS} 大于 1 的品种(系)仅有硒滋园二号和大地 199,有 93.10%的品种(系)的 TF_{PS} 小于 1,其中,欣星油 3 号、米油 518、陆杂油 90、南油杂 1 号、泮油 958、中油杂 19 的 TF_{PS} 依次增大,但均不大于 0.18;镉由茎转向莢的转运系数 TF_{SP} 小于 1 的品种(系)仅有硒滋园一号和硒滋园二号,有 93.10%的油菜品种(系)的 TF_{SP} 大于 1,其中,油香 98、娄文油 98、米油 518、欣星油 3 号、浙油 51、中油杂 19 的 TF_{SP} 依次降低,但均大于 3.60;镉由叶向籽粒的转运系数 TF_{LS} 均小于 1;镉由茎向籽粒的转运系数 TF_{SS} 大于 1 的品种(系)有 9 个,占整体的 31.03%,大地 199 的 TF_{SS} 达 2.91,显著高于除油香 98 外的其他品种(系)的。总体而言,镉被油菜吸收后易从根部向地上部分转运,在油菜植株内由茎到叶的转运能力最强,由于螯合作用,油菜莢和叶可固定一部分镉,从而减少镉向籽粒的转运,特别是叶对镉表现出较强的固定能力,这有利于油菜在镉污染农田中的安全生产。

表 3 油菜各器官中镉含量的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of antimony contents in various organs of oilseed rape				
器官	相关系数			
	根	茎	叶	莢
茎	0.542**			
叶	0.309**	0.144		
莢	0.359**	0.566**	0.071	
籽粒	0.533**	0.768**	0.127	0.182

***示相关性极显著($P<0.01$)。

表 4 成熟期不同品种(系)油菜中各器官间镉的转运系数

Table 4 Transfer coefficient of antimony in various organs of different varieties(lines) oilseed rape at maturity stage							
品种(系)	TF_{RS}	TF_{SL}	TF_{LP}	TF_{PS}	TF_{SP}	TF_{LS}	TF_{SS}
亮油 9 号	(0.71±0.08)cdefghij	(8.50±1.93)cde	(0.39±0.07)bcdef	(0.32±0.08)cdef	(3.22±0.20)bcdefg	(0.12±0.01)def	(1.04±0.31)cd
油香 98	(0.28±0.06)hij	(26.05±2.80)b	(0.32±0.07)defghi	(0.34±0.24)cdef	(8.54±2.53)a	(0.10±0.07)def	(2.50±1.58)ab
得中油 338	(0.73±0.12)cdefghij	(6.98±0.91)cde	(0.52±0.09)bc	(0.23±0.08)def	(3.59±0.31)bcd	(0.12±0.06)def	(0.83±0.37)cd
得中油 341	(0.53±0.05)ghij	(9.22±3.60)cde	(0.21±0.04)fghijk	(0.87±0.34)bcd	(1.90±0.45)cdefghi	(0.19±0.11)cdef	(1.57±0.48)bc
得中油 339	(0.63±0.18)efghij	(9.13±1.95)cde	(0.12±0.02)jkl	(0.38±0.22)cdef	(1.10±0.12)fghi	(0.04±0.02)ef	(0.41±0.21)cd

表 4(续)

品种(系)	TF _{RS}	TF _{SL}	TF _{LP}	TF _{PS}	TF _{SP}	TF _{LS}	TF _{SS}
欣星油 3 号	(0.47±0.41)ghij	(13.97±6.25)cd	(0.26±0.11)efghijk	(0.09±0.05)f	(3.87±2.96)bc	(0.02±0.02)f	(0.26±0.08)d
沔油 789	(0.61±0.15)efghij	(9.20±3.96)cde	(0.28±0.04)efghij	(0.36±0.10)cdef	(2.49±0.64)cdefghi	(0.10±0.03)def	(0.91±0.36)cd
沔油 958	(0.76±0.19)cdefghi	(16.35±2.77)c	(0.21±0.03)fghijk	(0.16±0.03)ef	(3.37±0.56)bcdef	(0.03±0.01)ef	(0.56±0.21)cd
油研 50	(0.36±0.07)ghij	(7.71±1.20)cde	(0.34±0.03)defgh	(0.26±0.14)def	(2.62±0.62)cdefghi	(0.08±0.05)ef	(0.62±0.29)cd
惠杂油 3 号	(0.65±0.26)defghij	(7.13±1.48)cde	(0.20±0.06)fghijkl	(0.45±0.24)cdef	(1.38±0.18)defghi	(0.09±0.07)def	(0.61±0.37)cd
陆杂油 90	(2.26±0.38)a	(1.42±0.29)e	(1.99±0.32)a	(0.11±0.10)ef	(2.82±0.65)cdefgh	(0.21±0.19)cdef	(0.28±0.22)d
德孝油 919	(1.39±0.73)b	(5.57±1.68)cde	(0.44±0.12)bcde	(0.24±0.16)def	(2.34±0.51)cdefghi	(0.10±0.06)def	(0.59±0.52)cd
娄彩 19 号	(1.15±0.43)bcd	(3.50±0.91)de	(0.30±0.13)efghij	(0.97±0.70)bc	(1.01±0.43)ghi	(0.24±0.15)bcde	(0.78±0.41)cd
娄彩 11 号	(0.63±0.34)efghij	(4.60±0.88)cde	(0.30±0.04)efghij	(0.72±0.69)bcdef	(1.38±0.47)defghi	(0.20±0.17)cdef	(0.87±0.65)cd
娄彩 12 号	(0.71±0.38)cdefghij	(4.52±1.03)cde	(0.49±0.08)bcd	(0.60±0.13)bcdef	(2.18±0.41)cdefghi	(0.30±0.10)abcd	(1.29±0.24)cd
娄彩 17 号	(1.06±0.40)bcdef	(8.20±0.82)cde	(0.18±0.03)ghijkl	(0.52±0.13)cdef	(1.47±0.24)defghi	(0.09±0.01)def	(0.74±0.09)cd
大地 199	(1.17±0.35)bc	(10.49±6.92)cde	(0.23±0.12)fghijk	(1.20±0.85)b	(2.28±1.47)cdefghi	(0.34±0.37)abc	(2.91±2.16)a
晒滋园一号	(0.79±0.15)cdefgh	(9.84±1.67)cde	(0.09±0.03)kl	(0.43±0.17)cdef	(0.86±0.18)hi	(0.04±0.01)ef	(0.36±0.18)cd
晒滋园二号	(1.09±0.24)bcde	(2.66±0.53)de	(0.11±0.03)jkl	(3.94±0.99)a	(0.29±0.02)i	(0.43±0.08)a	(1.15±0.29)cd
湘星油 131	(0.58±0.10)efghij	(13.05±2.63)cde	(0.14±0.04)ijkl	(0.52±0.27)cdef	(1.72±0.23)cdefghi	(0.07±0.03)ef	(0.88±0.49)cd
常油杂 83	(0.60±0.18)efghij	(10.66±1.75)cde	(0.25±0.06)efghijk	(0.19±0.05)def	(2.71±0.85)cdefgh	(0.05±0.02)ef	(0.53±0.28)cd
南油杂 1 号	(0.47±0.21)ghij	(140.02±27.89)a	(0.02±0.00)l	(0.14±0.02)ef	(3.51±1.02)bcde	(0.00±0.00)f	(0.49±0.12)cd
中油杂 19	(0.22±0.05)j	(10.71±2.63)cde	(0.33±0.08)defgh	(0.18±0.10)def	(3.62±1.51)bcd	(0.05±0.02)ef	(0.55±0.12)cd
娄文油 98	(0.54±0.16)fghij	(13.84±4.35)cd	(0.37±0.06)cdefg	(0.30±0.13)cdef	(5.23±2.33)b	(0.11±0.04)def	(1.45±0.70)cd
常香油 3 号	(0.22±0.03)j	(10.59±3.67)cde	(0.32±0.09)defghi	(0.37±0.22)cdef	(3.17±0.38)bcdefgh	(0.13±0.11)def	(1.12±0.57)cd
佳油赞	(0.84±0.20)cdefg	(2.18±0.83)de	(0.55±0.13)b	(0.79±0.31)bcde	(1.17±0.43)efghi	(0.42±0.15)ab	(0.83±0.10)cd
米油 518	(0.32±0.08)ghij	(12.80±2.94)cde	(0.38±0.13)bcdef	(0.10±0.10)ef	(5.10±2.93)b	(0.04±0.03)ef	(0.47±0.37)cd
浙油 51	(0.26±0.08)ij	(13.63±5.25)cd	(0.28±0.08)efghij	(0.34±0.16)cdef	(3.72±1.23)bcd	(0.09±0.04)def	(1.14±0.16)cd
娄彩 18 号	(0.45±0.09)ghij	(6.73±1.30)cde	(0.18±0.03)hijkl	(0.41±0.19)cdef	(1.16±0.14)efghi	(0.08±0.05)ef	(0.48±0.24)cd
平均值	0.71	13.77	0.34	0.53	2.68	0.13	0.90
标准差	0.47	24.98	0.35	0.76	1.92	0.14	0.78

同列不同字母示品种(系)间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.5 油菜各器官的转运系数间及籽粒镉含量与转运系数的相关性

从表 5 可知:籽粒镉含量与 TF_{RS} 呈显著($P<0.05$)正相关,与 TF_{PS}、TF_{LS}、TF_{SS} 呈极显著($P<0.01$)正相关,与 TF_{SP} 呈极显著($P<0.01$)负相关,说明油菜

根吸收和富集镉之后,极显著影响镉在地上部茎、叶及籽粒中的分配。TF_{PS}、TF_{LS} 和 TF_{SS} 两两间呈极显著($P<0.01$)正相关,表明油菜籽粒镉含量主要决定于荚和叶中的镉向籽粒中的转运能力。

表 5 油菜各器官的转运系数间及籽粒镉含量与转运系数的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between transport factor of various organs and antimony content in oilseed seed and transport factor of various organs

转运系数	相关系数						
	籽粒镉含量	TF _{RS}	TF _{SL}	TF _{LP}	TF _{PS}	TF _{SP}	TF _{LS}
TF _{RS}	0.224*						
TF _{SL}	-0.206	-0.209					
TF _{LP}	0.041	0.591**	-0.230*				
TF _{PS}	0.884**	0.186	-0.163	-0.179			
TF _{SP}	-0.311**	-0.339**	0.254*	0.151	-0.371**		
TF _{LS}	0.782**	0.325**	-0.270*	0.193	0.694**	-0.297**	
TF _{SS}	0.341**	-0.111	-0.035	-0.093	0.359**	0.223*	0.528**

“*”“**”分别示相关性显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)。

3 结论与讨论

油菜对重金属有一定的吸附、转运和富集能力,不同器官对重金属的吸收富集能力不同^[21]。重金属主要积累在油菜的根和叶 2 个器官,如铅主要富集在油菜根部,铜、锌和镉在不同品种(系)油菜的根、叶中有不同的积累表现^[22]。本研究中,29 个品种(系)油菜的营养器官叶、根、茎的镉平均含量依次降低;在生殖器官中,荚的镉平均含量大于籽粒的。叶、荚、根是镉积累量最大的 3 个器官,约占全株的 85.80%,镉主要富集于植物的叶片,说明大部分的镉被油菜根系吸收后经木质部转运至叶,这可能是植物应对污染物胁迫的对策,通过落叶将潜在有毒元素排出体外,减少毒害效应^[23]。可见,利用高富集品种(系)油菜进行农田镉污染修复时,在油菜收获前应注意收集油菜落叶,避免农田翻耕及秸秆还田。

油菜不同器官对镉的转运能力不同,其中,从茎向叶的转运能力最强。有毒元素被油菜吸收后向地上部转运越多,越有利于收获时对富集的有毒元素进行集中处理。油菜根部吸收重金属镉后,向茎、荚壳及籽粒中的转运能力受重金属转运蛋白种类及数量影响^[24]。

不同品种油菜对镉吸收和运输的能力不同,会引起油菜器官中镉含量存在差异。镉从根向茎、茎向叶、茎向荚、茎向籽粒的转移由木质部运输,从叶向籽粒、叶向荚和荚向籽粒转移由韧皮部运输,地上部器官中镉的含量可能是由于木质部运输和韧皮部运输的差异造成的^[25]。镉由荚和叶向籽粒的运输是影响油菜籽粒镉含量的重要因素。本研究中,油菜籽粒中镉含量与韧皮部中的转运系数呈极显著正相关,与 TF_{PS} 的相关系数大于 TF_{LS} 的;韧皮部转运对油菜籽粒镉含量的影响大于木质部转运,这与 LUO 等^[19]的研究结论相似。叶是重要的营养器官,是木质部运输的目的地^[26]。叶中的光合产物通过韧皮部输送到籽粒,镉在这个过程中可能与这些产物一起运输。调节韧皮部运输可能比调节根系吸收镉能更有效地降低籽粒镉含量,可帮助育种人员选择镉积累量低的作物品种。不能忽视的是转运的差异与转运基因的类型和表达、维管束的数量和面积、螯合物质的含量、蒸腾强度等生理因素有关^[27],对不同油菜品种间镉富集差异的原因需要

进一步系统研究。

土壤污染的修复技术应用需要考虑修复成本和修复效率 2 个关键因素^[28]。筛选和推广生物量较大、籽粒富集量低的油菜品种(系),对于镉污染农田的安全利用及生产极其重要。南油杂 1 号对镉具有较强的富集能力,但向籽粒的转运较少,适合作为镉污染农田的植物修复品种。油菜对污染物的富集能力受到油菜品种、生育期、生长器官、金属元素种类、生物有效性等多方面影响,下一步对该品种油菜镉修复潜力进行研究时,还应考虑其累积量占土壤总量的比例,从而确定其对土壤镉的可移除量,明确其修复时间等。

参考文献:

- [1] BOREIKO C J, ROSSMAN T G. Antimony and its compounds: health impacts related to pulmonary toxicity, cancer, and genotoxicity[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2020, 403: 115156.
- [2] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2219–2238.
- [3] TSCHAN M, ROBINSON B H, SCHULIN R. Antimony in the soil-plant system: a review[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 6(2): 106.
- [4] HE M C, WANG X Q, WU F C, et al. Antimony pollution in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2012, 421/422: 41–50.
- [5] 任杰, 刘晓文, 李杰, 等. 我国镉的暴露现状及其环境化学行为分析[J]. *环境化学*, 2020, 39(12): 3436–3449.
- [6] 白婧, 张文, 张思思, 等. 锡矿山土壤重金属生态健康风险评价及重金属在优势植物的分布[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(3): 411–421.
- [7] BAI J, ZHANG W, LIU W Y, et al. Implications of soil potentially toxic elements contamination, distribution and health risk at Hunan's Xikuangshan mine[J]. *Processes*, 2021, 9(9): 1532.
- [8] 张龙, 宋波, 黄凤艳, 等. 湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1558–1566.
- [9] ZHANG X F, YU H Y, LI F B, et al. Behaviors of heavy metal(loid)s in a cocontaminated alkaline paddy soil throughout the growth period of rice[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 716: 136204.
- [10] GRISPEN V M J, NELISSEN H J M, VERKLEIJ J A C. Phytoextraction with *Brassica napus* L.: a tool for sustainable management of heavy metal contaminated

- soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 77–83.
- [11] 杜云燕, 张大为, 陈红松, 等. 镉胁迫对 2 种油菜土壤真菌群落的影响[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(11): 4030–4045.
- [12] 张尧锋, 余华胜, 曾孝元, 等. 早熟甘蓝型油菜研究进展及其应用[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(2): 258–266.
- [13] 孙刚, 刘针延, 王琪, 等. 不同油菜品种对有色金属冶炼区土壤重金属吸收累积研究[J/OL]. *分子植物育种*, 1–11 (2022–03–25).<http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220324.1643.016.html>.
- [14] 史新杰, 李卓, 庄文化, 等. 土壤中水分和镉供应量对油菜器官中镉分布特征的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(2): 389–397.
- [15] ZENG X Y, ZOU D S, WANG A D, et al. Remediation of cadmium-contaminated soils using *Brassica napus*: effect of nitrogen fertilizers[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109885.
- [16] URAGUCHI S, MORI S, KURAMATA M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9): 2677–2688.
- [17] ZHANG M D, RAN R L, NAO W S, et al. Physiological effects of short-term copper stress on rape(*Brassica napus* L.) seedlings and the alleviation of copper stress by attapulgitic clay in growth medium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safe*, 2019, 171: 878–886.
- [18] URAGUCHI S, FUJIWARA T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. *Rice*, 2012, 5(1): 5.
- [19] LUO Q H, BAI B, XIE Y H, et al. Effects of Cd uptake, translocation and redistribution in different hybrid rice varieties on grain Cd concentration[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 240: 113683.
- [20] RODDA M S, LI G, REID R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1): 105–114.
- [21] 甘晴琴, 范占煌, 张振乾. 油菜在植物修复重金属污染土壤中的应用进展[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(14): 4794–4801.
- [22] 杨洋, 黎红亮, 陈志鹏, 等. 郴州尾矿区不同油菜品种对重金属吸收积累特性的比较[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(4): 370–376.
- [23] 方慧, 柳小兰, 颜秋晓, 等. 贵州油菜各器官在不同生育时期对土壤重金属的富集[J]. *北方园艺*, 2018(5): 111–117.
- [24] ZHANG X D, MENG J G, ZHAO K X, et al. Annotation and characterization of Cd-responsive metal transporter genes in rapeseed(*Brassica napus*)[J]. *BioMetals*, 2018, 31(1): 107–121.
- [25] 王璐瑶, 陈睿, 赵守清, 等. 水稻镉积累特性的生理和分子机制研究概述[J]. *植物学报*, 2022, 57(2): 236–249.
- [26] FUJIMAKI S, SUZUI N, ISHIOKA N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. *Plant Physiology*, 2010, 152(4): 1796–1806.
- [27] 周鹏飞, 张世文, 罗明, 等. 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 985–994.
- [28] WANG F, TAN H, ZHANG Y T, et al. Salicylic acid application alleviates cadmium accumulation in brown rice by modulating its shoot to grain translocation in rice[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128034.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正