

甘蓝型油菜品种对农田土壤重金属镉与铜的富集差异研究

费维新¹, 荣松柏¹, 初明光¹, 段劲生², 江莹芬¹, 吴新杰¹, 李强生¹, 陈凤祥¹ (1. 安徽省农业科学院作物研究所, 国家油料作物改良中心合肥分中心, 安徽合肥 230031; 2. 安徽省农业科学院植物保护与农产品质量安全研究所, 安徽合肥 230031)

摘要 [目的]探讨甘蓝型油菜品种对农田土壤中重金属镉与铜污染修复能力的差异。[方法]选用10个在生产上应用的主要油菜品种在重金属镉、铜污染区与非污染区种植, 研究不同品种在两种不同背景土壤下生长期与植株部位对农田土壤中重金属镉与铜的吸收富集差异。[结果]甘蓝型油菜对土壤中的重金属镉与铜有较强的吸附与富集能力, 但不同的甘蓝型油菜品种间与植株的不同部位对重金属的吸附富集能力有差异。油菜植株对镉的吸收富集主要集中在茎叶部位尤其是茎秆上, 各部位富集能力依次为: 茎秆>叶片>根>种籽; 对铜吸收富集主要集中在根部和种籽上, 各部位富集能力表现为: 根>种籽>叶片>茎秆。10个甘蓝型油菜品种对重金属镉的富集能力表现较大差异, 苗期秦优10号对重金属镉的富集能力最强, 成熟期秦优11号与绵油11号表现出对镉的超富集能力; 不同油菜品种对铜的富集能力也表现出差异, 苗期秦优10号叶片的铜富集能力较强, 成熟期秦优10号与浙油51种籽的铜富集能力较强。[结论]该研究可为重金属污染土壤的修复提供技术支持。

关键词 甘蓝型油菜; 农田土壤; 重金属污染; 植物修复; 富集能力

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)10-0074-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.10.022



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Enrichment Difference of Heavy Metal Cadmium and Cuprum by *Brassica napus* L. in Contaminated Farmland Soil

FEI Wei-xin, RONG Song-bai, CHU Ming-guang et al (Crop Research Institute of Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei Branch of National Center of Oilseed Crops Improvement, Hefei, Anhui 230031)

Abstract [Objective] To explore the difference of remediation ability of *Brassica napus* varieties to heavy metal cadmium and copper pollution in farmland soil. [Method] Ten main rapeseed cultivars were planted in heavy metal cadmium, copper contaminated areas and non-polluted areas. The difference of absorption and enrichment of different cultivars to cadmium and copper in farmland soils at different growth stages and plant locations were studied under two different soil backgrounds. [Result] Rapeseed had strong ability of adsorption and enrichment for heavy metals cadmium and cuprum in contaminated soil, but the ability of adsorption and enrichment for heavy metals was different in different rapeseed cultivars and different parts of plants. The cadmium mainly enriched in stems and leaves of rapeseed plants, especially on the stems. The enrichment ability of each part was in turn: leaves>stems> roots > seeds. The cuprum mainly enriched in roots and seeds, and the enrichment ability of each part was shown as: root > seeds > leaves > stems. Ten rapeseed varieties showed significant differences in the enrichment ability for heavy metal cadmium. In the seedling stage, the enrichment ability for heavy metal cadmium of Qinyou10 was stronger than other cultivars, while in the mature stage Qinyou11 and Mianyou11 enrichment ability for cadmium was best. The enrichment ability of copper in different rapeseed varieties also showed differences. The copper enrichment ability of Qinyou 10 was stronger in seedling stage, and the copper enrichment ability of Qinyou 10 and Zheyou 51 in mature stage was relatively higher. [Conclusion] This study can provide technical support for the repair of heavy metal contaminated soil.

Key words *Brassica napus*; Farmland soil; Heavy metal pollution; Phytoremediation; Enrichment capacity

随着我国工业化进程加快以及农业生产上农药化肥的不合理过量使用, 重金属污染农田水体已成为当前一大严重问题。农业部农产品污染防治重点实验室对全国24个省市土地调查显示, 重金属超标的农产品占污染物超标农产品总面积的80%以上。环境保护部对基本农田保护区土壤的重金属抽测, 重金属超标率达12.1%^[1]。农产品、鱼类产品、生活用水等重金属超标问题频现, 由于重金属难以降解与清除, 在生物圈中移动与累积, 对食品安全与人类健康造成严重的影响。顾继光等^[2]研究发现, 土壤农作物受镉污染导致产生“镉米”, 人食用后容易得风湿性关节炎、肾炎、溃疡病等疾病, 癌症平均死亡率也会增加, 人体内酶的正常活动受到镉的影响后, 会造成贫血、高血压、骨痛病。为此, 学术界提出了多种修复治理重金属污染土壤与水体的方法, 但是很多措施因成本高昂及操作过程繁琐而难以实施。

植物吸取修复技术(phytoextraction)是利用植物将土壤中的重金属吸收、转移到植物的可收获部分, 通过收获植物来减少土壤与水体中重金属含量, 具有成本低、简便易行、安全可靠、环境友好等诸多优点, 是植物修复技术^[3-4]中研究最多的一类, 已成为国内外重金属污染环境治理研究的热点和前沿领域^[5]。我国研究发现了一批重金属积累或超积累植物, 其中包括Cu积累植物海州香薷(*Elsholtzia splendens* Nakai)、鸭跖草(*Commelina communis* Linn.)等; Cd超积累植物东南景天(*Sedum alfredii* Hance)、龙葵(*Solanum nigrum* L.)、伴矿景天(*Sedum plumbizincicola* X. H. Guo et S. B. Zhou sp. nov.)、圆锥南芥(*Arabis paniculata* F.)、长柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii* var. *velutina*)、芥菜型油菜(*Brassica juncea* L.)等^[6-7]。但上述重金属富集植物在我国的适应性与种植技术方面有一定的局限性。

油菜是我国的主要农作物之一, 甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)在我国南北地区广泛种植, 常年种植面积近1000万hm², 生长生物量大, 生产的菜籽油是我国重要的食用油来源, 同时也可作为生物柴油^[8-9]; 并且油菜的生产种植技术成熟易于掌握, 因此比非农作物植物及种植较少的芥菜型油菜在应用上更具有优势。油菜对于镉、铜都具有修复潜力,

基金项目 国家重点研发计划项目(2016YFD0100202); 安徽省农业科学院学科建设项目(16A0205); 农业部农业科研杰出人才及其创新团队; 安徽省农业科学院科技创新团队(18C0204); 安徽省产业技术体系(AHCYJSTX-0410)。

作者简介 费维新(1973—), 男, 安徽长丰人, 副研究员, 博士, 从事油菜种质资源创新与利用研究。

收稿日期 2019-01-09

研究筛选出甘蓝型油菜品种沪油 20 对 Cd 污染土壤的净化率都超过 1%,达到了超累积植物对重金属吸附的要求^[10]。另有研究发现,油菜地上部分对 Cd 的吸收量显著高于地下部分^[11],其中茎的 Cd 含量最高,籽粒最低;低浓度下,油菜对 Cd 的转运系数较高,修复效率可达 6.841%~7.752%,可用于修复中等程度 Cd 污染土壤。油菜地下部分对 Cu 的吸收量显著高于地上部分,Cu 在油菜根部的积累尤其明显^[12-13]。为了进一步探索利用甘蓝型油菜开展重金属污染土壤的植物修复技术,为修复重金属污染土壤提供适合的油菜品种,该研究分析比较了甘蓝型油菜品种对受污染土壤与未受污染土壤中重金属镉、铜的吸收富集能力差异以及重金属在植物不同部位的分布差异,以期对污染土壤修复提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料 选用的 10 个甘蓝型油菜品种均为目前我国长江流域油菜生产上主要推广应用种植的甘蓝型油菜品种,其品种的适应性、丰产性良好;在生产上种植面积大,范围广,作为重金属污染植物修复应用也可以充分发挥其品种生产应用潜能,较其他种类修复应用植物品种在污染治理上更有优势。

1.2 试验设计 试验品种分别种植在重金属镉和铜污染区铜陵市义安区和非污染区肥东县撮镇,其中铜陵义安试验点土壤中镉和铜含量较风险筛选值分别超出 6.93、183 mg/kg(表 2)。

表 2 试验点土壤重金属含量

Table 2 Heavy metal content in soil of test sites

试验地点 Test site	镉 Cd	铜 Cu	铅 Pb	镍 Ni	锌 Zn	汞 Hg	砷 As
肥东撮镇 Cuozheng, Feidong County	0.19	25	21	20	46	0.05	8
铜陵义安 Yian, Tongling City	7.23	233	134	27	297	0.05	25
风险筛选值 Risk screening values	0.30	50	70	60	200	1.30	25

注:风险筛选值参照 GB 15618—2018《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》^[16]

Note: Risk screening values refer to GB 15618—2018 *Soil Environmental Quality-Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land*

1.3 样品处理

1.3.1 植物样品前处理法。样品采集:每小区植物样品采取 5 点取样法采样,每个点采集 5 株共计 25 株混合制样,4 次重复,植物采集后装入洁净的聚乙烯封口塑料袋,带回实验室分析。植物清洗:先将植物样品根茎叶分开,用自来水和 0.1 mol 稀盐酸洗净,然后用去离子水淋洗 3 次,晾干后称鲜重,然后于 105 °C 烘箱中杀青 30 min,并在 70 °C 烘干 2 d,计干重,测定植物含水率。烘干后的样品分别用不锈钢磨碎机粉碎,过 60 目筛,保存备用。

1.3.2 植物消化处理。样品称量:称取 1 g 烘干粉碎后的均匀植物样品放入消化管底部,加入 5 ml 硝酸,盖上小漏斗,静置过夜。样品消化:将消化管放入消化炉,90 °C 消化 0.5 h,120 °C 消化 1 h,至植物消化至透亮的黄色液体,关炉冷却。样品定容:将消化液过滤,用去离子水定容至 25 mL 容量瓶。分装至样品储备瓶(10 mL 塑料离心管,每个样品装 2 管),待测。

1.3.3 测定方法。植物样品用 5:1 的 HNO₃/HClO₄ (V/V) 消化,然后用原子吸收光谱仪(品牌:德国耶拿 NovAA400P)进

土壤检测参照 DZ/T0279-2016 与 DZ/T0130.2-2006 方法^[14-15],检测仪器主要为 X 射线荧光光谱仪、原子荧光光谱仪。试验前茬种植水稻。采用随机区组试验设计,4 次重复,小区面积 20 m²,种植密度 15 万株/hm²,整地前每公顷施用底肥俄罗斯复合肥(NPK16-16-16)750 kg。试验采用直播六播方式播种。分别在苗期与成熟期取样分析地下部根系、地上部叶片、茎秆与籽粒中的重金属镉与铜的富集含量。

表 1 试验选用的甘蓝型油菜品种

Table 1 Rapeseed cultivars (*Brassica napus*) selected in the experiment

品种名称 Cultivar	供种单位 Seeds company	审定编号 Registered code
绵油 11 号 Mianyou 11	四川国豪种业股份有限公司	国审油 2002004
秦优 10 号 Qinyou 10	陕西荣华农业科技有限公司	国审油 2006003
秦优 11 号 Qinyou 11	江苏中江种业股份有限公司	国审油 2009008
天禾油 11 Tianheyu 11	天禾农业科技集团股份有限公司	国审油 2009022
中油 589 Zhongyou 589	湖北省种子集团有限公司	国审油 2010011
沔油 737 Fengyou 737	陕西荣华农业科技有限公司	国审油 2011015
沪油 21 Huyou 21	安徽国豪农业科技有限公司	国审油 2011023
中核杂 418 Zhongheza 418	江苏红旗种业股份有限公司	国审油 2011024
浙油 51 Zheyu 51	浙江勿忘农种业股份有限公司	国审油 2013017
德油 99 Deyou 99	四川蜀玉科技农业发展有限公司	皖油 2015008

行 Cd 等元素含量测定。

1.4 数据处理 试验数据分析软件采用 Microsoft Excel 统计和 SAS 9.1 进行方差分析(多重比较采用 Duncan 法,0.05 水平)。计算富集系数(BCF,地上部器官中重金属含量与土壤中重金属含量的比值)和转运系数(TF,茎叶中重金属含量与根部重金属含量的比值)。

2 结果与分析

2.1 供试甘蓝型油菜品种的生长情况 试验发现,在肥东重金属非污染区与铜陵重金属污染区 2 个试验点,参试的 10 个甘蓝型油菜品种田间生长表现均正常,油菜品种在植株生长发育、叶色、叶型、开花及结籽等方面均无明显差异,因此试验选用的这些油菜品种适合在该污染区域种植。

2.2 油菜苗期植株根系与叶片对镉的吸附能力比较 表 3~4 表明,油菜苗期植株根系与叶片对污染土壤中的重金属镉均有富集作用,叶片中的镉平均含量为 5.39 mg/kg,根中的镉平均含量为 1.57 mg/kg,10 个油菜品种镉在根部的富集系数均值为 0.216 8,富集系数均小于 1;在叶片部分的富集系数均值为 0.746,其中秦优 10 号富集系数大于 1,所有参试品

种的转运系数均值为 3.528, 德油 99 转运系数最高 (4.395), 叶片对重金属镉的富集能力较根强。

方差分析结果表明, 品种间对重金属镉的富集能力表现差异达显著水平, 秦优 10 号与中油 589 的苗期对重金属镉的富集能力较强, 其中秦优 10 号的根与叶片中镉含量分别为 2.35、8.13 mg/kg, 中油 589 的根与叶片中镉含量分别为 1.89、6.41 mg/kg; 相对来说沔油 737 与德油 99 的富集镉能力较弱。

2.3 油菜苗期植株根系与叶片对铜的吸附能力比较 油菜苗期植株根部对重金属铜具有较强的富集吸附能力, 分析结果表明根的重金属铜平均含量为 5.88 mg/kg, 在污染土壤区与非污染区不同品种间根部对铜富集的差异均未达显著水平; 根部的富集系数均值为 0.025 2, 所有参试油菜品种富集系数均小于 1; 秦优 10 号与沪油 21 根系的铜富集能力较强, 其中秦优 10 号根部的铜含量分别为 7.46、6.98 mg/kg (表 5)。

表 3 油菜苗期植株根系中镉的含量

Table 3 Cadmium content in roots of rapeseed plants at seedling stage

品种名称 Cultivar	污染土壤中镉含量 Cadmium content of roots in contaminated soil//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient	非污染对照 Cadmium content in CK
绵油 11 号 Mianyou11	1.20±0.54 cd	0.165 4	—
秦优 10 号 Qinyou10	2.35±0.47 a	0.325 2	<0.001
秦优 11 号 Qinyou11	1.56±0.67 bcd	0.215 2	<0.001
天禾油 11 Tianheyou11	1.83±1.27 abc	0.252 4	<0.001
中油 589 Zhongyou 589	1.89±1.05 ab	0.261 0	—
沔油 737 Fengyou 737	1.33±0.59 bcd	0.184 2	<0.001
沪油 21 Huyou 21	1.75±1.02 abc	0.242 5	<0.001
中核杂 418 Zhongheza 418	1.19±0.72 cd	0.164 0	<0.001
浙油 51 Zheyou 51	1.64±0.77 bc	0.227 1	<0.001
德油 99 Deyou 99	0.95±0.51 d	0.130 8	<0.001
平均值 Mean	1.57±0.84	0.216 8	

注: 富集系数中的土壤重金属镉含量见表 2

Note: The content of heavy metal cadmium in soil in the enrichment coefficient is shown in table 2

表 4 油菜苗期植株叶片中镉的含量

Table 4 Cadmium content in leaves of rapeseed plants at seedling stage

品种名称 Cultivar	污染土壤叶片镉含量 Cadmium content of roots in contaminated soil//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient	转运系数 Transport coefficient	非污染对照 Cadmium content in CK
绵油 11 号 Mianyou11	5.04±1.00 cd	0.697	4.212	—
秦优 10 号 Qinyou10	8.13±1.42 a	1.125	3.459	<0.001
秦优 11 号 Qinyou11	5.77±1.37 bc	0.798	3.709	<0.001
天禾油 11 Tianheyou 11	5.05±1.22 cd	0.698	2.767	<0.001
中油 589 Zhongyou 589	6.41±1.51 b	0.886	3.397	—
沔油 737 Fengyou 737	4.50±0.59 cd	0.623	3.381	<0.001
沪油 21 Huyou 21	4.65±0.55 cd	0.643	2.651	<0.001
中核杂 418 Zhongheza 418	4.67±0.62 cd	0.647	3.943	<0.001
浙油 51 Zheyou 51	5.53±0.58 bcd	0.765	3.370	<0.001
德油 99 Deyou 99	4.16±0.65 d	0.575	4.395	<0.001
平均值 Mean	5.39±1.46	0.746	3.528	

注: 富集系数中的土壤重金属镉含量见表 2

Note: The content of heavy metal cadmium in soil in the enrichment coefficient is shown in table 2

表 5 油菜苗期植株根系中铜的含量

Table 5 Cuprum content in roots of rapeseed plants at seedling stage

品种名称 Cultivar	污染土壤根系铜含量 Cuprum content of roots in contaminated soil//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient	非污染对照 Cadmium content in CK
绵油 11 号 Mianyou11	6.29±4.68	0.027 0	—
秦优 10 号 Qinyou10	7.46±4.45	0.032 0	0.20
秦优 11 号 Qinyou11	6.63±5.75	0.028 4	0.23
天禾油 11 Tianheyou 11	4.39±2.14	0.018 9	0.32
中油 589 Zhongyou 589	5.72±3.12	0.024 6	—
沔油 737 Fengyou 737	5.51±2.58	0.023 6	0.00
沪油 21 Huyou 21	6.98±1.66	0.030 0	0.14
中核杂 418 Zhongheza 418	4.84±1.49	0.020 8	0.45
浙油 51 Zheyou 51	6.67±1.76	0.028 6	0.48
德油 99 Deyou 99	4.26±1.15	0.018 3	0.00
平均值 Mean	5.88±3.17	0.025 2	0.23

注: 富集系数中的土壤重金属铜含量见表 2

Note: The content of heavy metal cuprum in soil in the enrichment coefficient is shown in table 2

油菜叶片的铜平均含量为 2.38 mg/kg, 根部的铜含量是叶片的 2.47 倍, 在污染土壤区试验品种间叶片对铜的富集能

力表现出显著差异, 叶片铜富集系数均值为 0.010 2, 所有品种的富集系数均小于 1; 其中秦优 10 号与浙油 51 叶片的铜富集能力较强, 其叶片中铜含量分别为 4.65、3.43 mg/kg。天禾油 11 等 4 个品种对土壤中重金属铜的富集吸附能力较弱 (表 6)。

2.4 油菜成熟期植株茎秆与种籽中重金属镉的含量比较

由表 7 可知, 油菜品种间茎秆中镉的富集系数均值为 3.032, 其中秦优 11 号的富集系数最高 (5.539), 所有参试品种成熟期植株茎秆对镉的富集系数均大于 1; 品种成熟期茎秆中重金属镉的平均含量为 21.92 mg/kg, 不同油菜品种间茎秆中镉的含量表现出差异, 方差分析结果达显著水平。秦优 11 号与绵油 11 号表现出对镉的超富集能力, 其中茎秆中镉含量分别为 40.04、39.47 mg/kg, 秦优 10 号等 5 个品种对土壤中的重金属镉表现出较弱的富集能力。而种籽中镉的平均含量仅为 0.51 mg/kg, 富集系数均值为 0.070 4, 所有品种种籽的富集系数均小于 1, 方差分析结果表明, 参试油菜品种间种籽富集重金属镉含量的差异不显著。可见成熟期重金属镉主要富集在油菜茎秆中。

表 6 油菜苗期植株中叶片中铜的含量

Table 6 Cuprum content in leaves of rapeseed plants at seedling stage

品种名称 Cultivar	污染土壤叶片铜含量 Cuprum content of roots in contaminated soil//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient	转运系数 Transport coefficient	非污染对照 Cuprum content in CK
绵油 11 号 Mianyou11	1.85±0.79 c	0.007 9	0.293 6	—
秦优 10 号 Qinyou10	4.65±2.66 a	0.020 0	0.623 8	<0.001
秦优 11 号 Qinyou11	2.73±1.27 bc	0.011 7	0.412 4	<0.001
天禾油 11 Tianheyu11	1.58±0.91 c	0.006 8	0.359 2	<0.001
中油 589 Zhongyou 589	2.21±1.07 bc	0.009 5	0.386 0	—
沔油 737 Fengyou 737	1.53±0.43 c	0.006 6	0.278 6	<0.001
沪油 21 Huyou 21	2.49±0.65 bc	0.010 7	0.356 7	<0.001
中核杂 418 Zhongheza 418	1.70±0.71 c	0.007 3	0.351 7	<0.001
浙油 51 Zheyou 51	3.43±0.51 ab	0.014 7	0.514 5	<0.001
德油 99 Deyou 99	1.63±0.63 c	0.007 0	0.381 2	<0.001
平均值 Mean	2.38±1.43	0.010 2	0.395 8	

注:富集系数中的土壤重金属铜含量见表 2

Note:The content of heavy metal cuprum in soil in the enrichment coefficient is shown in table 2

表 7 油菜成熟期植株茎秆与种籽中镉的含量

Table 7 Cadmium content in stalks and seeds of rapeseed in mature period

品种名称 Cultivar	茎秆中镉的含量 Cadmium content in stems//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient	籽粒中镉的含量 Cadmium content in seeds//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient
绵油 11 号 Mianyou11	39.47±22.62 a	5.460	0.60±0.19	0.082 4
秦优 10 号 Qinyou10	12.37±2.06 b	1.710	0.48±0.16	0.066 4
秦优 11 号 Qinyou11	40.04±30.89 a	5.539	0.78±0.49	0.108 5
天禾油 11 Tianheyu11	17.81±2.83 b	2.463	0.48±0.09	0.066 4
中油 589 Zhongyou 589	26.44±14.80 ab	3.657	0.40±0.22	0.055 9
沔油 737 Fengyou737	11.26±2.60 b	1.557	0.66±0.35	0.091 0
沪油 21 Huyou 21	12.87±3.89 b	1.780	0.43±0.15	0.059 1
中核杂 418 Zhongheza 418	12.80±5.67 b	1.771	0.37±0.23	0.051 1
浙油 51 Zheyou 51	25.98±9.65 ab	3.593	0.41±0.20	0.056 3
德油 99 Deyou 99	20.15±11.47 ab	2.787	0.48±0.24	0.067 0
平均值 Mean	21.92±16.16	3.032	0.51±0.26	0.070 4

注:富集系数中的土壤重金属铜含量见表 2

Note:The content of heavy metal cadmium in soil in the enrichment coefficient is shown in table 2

2.5 油菜成熟期植株茎秆与种籽中重金属铜的含量比较

表 8 表明,成熟期油菜茎秆中铜的含量品种间差异显著,富集系数均值为 0.0045,所有品种茎秆对铜的富集系数均小于 1,其中茎秆中铜含量最高的油菜品种绵油 11 号达 1.62 mg/kg,含量最低的秦优 10 号仅 0.26 mg/kg。油菜品种间种籽中富集的铜含量差异达显著水平,种籽对铜的富集系

数均值为 0.021 7,种籽中重金属铜的含量平均值为 5.05 mg/kg,略高于茎秆中的含量,其中浙油 51 秦优与秦优 10 号的种籽中铜含量较高,其种籽中的铜平均含量分别为 7.54、7.01 mg/kg,绵油 11 号、天禾油 11 与德油 99 的种籽中铜含量较低,其中绵油 11 号种籽中铜含量仅为 2.58 mg/kg。

表 8 油菜成熟期植株茎秆与种籽中铜的含量

Table 8 Cuprum content in stalks and seeds of rapeseed in mature period

品种名称 Cultivar	茎秆中铜的含量 Cuprum content in stems//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient	籽粒中铜的含量 Cuprum content in seeds//mg/kg	富集系数 Enrichment coefficient
绵油 11 号 Mianyou11	1.62±0.48 a	0.006 9	2.58±0.48 b	0.011 1
秦优 10 号 Qinyou10	0.26±0.31 c	0.001 1	7.01±4.59 a	0.030 1
秦优 11 号 Qinyou11	1.20±0.27 ab	0.005 1	5.58±0.72 ab	0.024 0
天禾油 11 Tianheyu11	0.76±0.31 abc	0.003 3	3.24±0.76 ab	0.013 9
中油 589 Zhongyou 589	1.41±0.55 a	0.006 1	4.84±1.92 ab	0.020 8
沔油 737 Fengyou737	0.98±0.51 abc	0.004 2	5.15±2.20 ab	0.022 1
沪油 21 Huyou 21	1.42±0.73 a	0.006 1	7.06±2.97 a	0.030 3
中核杂 418 Zhongheza 418	0.52±0.48 bc	0.002 2	4.28±1.03 ab	0.018 4
浙油 51 Zheyou 51	1.36±0.41 ab	0.005 8	7.54±4.20 a	0.032 4
德油 99 Deyou 99	0.96±0.46 abc	0.004 1	3.22±1.23 ab	0.013 8
平均值 Mean	1.07±0.61	0.004 5	5.05±2.96	0.021 7

注:富集系数中的土壤重金属铜含量见表 2

Note:The content of heavy metal cuprum soil in the enrichment coefficient is shown in table 2

3 讨论与结论

甘蓝型油菜对土壤中的重金属镉与铜具有较强的吸附与富集能力,但是植株的不同部位对重金属的吸附富集能力有差异。研究表明,油菜植株对镉的吸收富集主要集中在茎叶部位尤其是茎秆上,其中各个部分富集能力表现为:茎秆>叶片>根>种籽,对铜的吸收富集主要集中在根部和种籽上,其中各个部分富集能力比较表现为:根>种籽>叶片>茎秆。王宁等^[17-19]对重金属镉在油菜中的富集研究表明,油菜体内 Cd 分布为地上部>地下部,随着 Cd 浓度的升高,油菜植株对 Cd 的吸收显著增加,而且油菜地上部分的吸收量显著高于地下部分,其中茎的 Cd 浓度最高,籽粒最低,与该研究结果基本一致。但也有研究认为油菜体内 Cd 积累规律为根部大于地上部^[20-21],这可能与各学者研究采取的研究方法与样品采集时间不同导致的分析数据差异,具体原因有待进一步试验验证。杨红飞等^[12]对重金属 Cu 在油菜中的富集研究表明,重金属 Cu 主要积累在油菜根部,向茎叶迁移累积的量很少;成熟期单一 Cu 污染和复合污染时油菜根茎叶中 Cu 含量及富集系数均为根>叶>茎,与该研究结果一致。

甘蓝型油菜对土壤中重金属镉与铜的富集能力在品种间有差异,同时在油菜的不同生长时期与不同植株器官部位也存在差异。参试的 10 个甘蓝型油菜品种对重金属镉的富集能力表现较大差异,苗期秦优 10 号与中油 589 对重金属镉的富集能力较强,成熟期秦优 11 号与绵油 11 号表现出对镉的超富集能力;对铜的富集能力品种间也表现出差异,苗期秦优 10 号等 3 个品种根系的铜富集能力较强,成熟期浙油 51 与秦优 10 号的种籽中铜含量较高。同时一些甘蓝型油菜品种表现出较低的重金属吸附富集能力,如中核杂 418 对镉的富集能力较弱,天禾油 11 与德油 99 等品种对铜的吸收富集能力较弱。因此在重金属污染土壤的修复过程中,可根据实际情况选择对重金属吸附富集能力强的甘蓝型油菜品种连续种植,结合秸秆与根的处理方法清除污染土壤中的重金属,从而保障农业的安全健康生产。

该研究中把种籽中的重金属含量也作为一项重要检测指标,结果表明 Cd 在植物中的迁移能力较强,茎叶中富集较多,但在籽粒中的含量较茎秆中低很多;Cu 则主要富集于植株根部与种籽中,但其含量在不同品种间差异显著,其机理有待进一步研究。因此通过品种的选择,有望得到在茎叶中重金属含量高而在籽粒中含量低的油菜品种,在修复污染土

壤中获得的油菜油脂可以研究开发作为生物柴油,这样既可提高农业生产经济效益,又可实现边生产边修复,比较符合我国目前农业土地资源有限、土壤重金属污染突出的实际国情。

参考文献

- [1] 傅国伟.中国水土重金属污染的防治对策[J].中国环境科学,2012,32(2):373-376.
- [2] 顾继光,林秋奇,胡韧,等.土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及研究展望[J].土壤通报,2005,36(1):128-133.
- [3] 王小玻.重金属复合污染农田土壤植物修复的研究[D].昆明:昆明理工大学,2010.
- [4] SAIER M H, JR, TREVORS J T. Phytoremediation[J]. Water, air and soil pollution, 2010, 205 (S1): 61-63.
- [5] SHAHEEN S M, RINKLEBE J. Phytoextraction of potentially toxic elements by Indian mustard, rapeseed, and sunflower from a contaminated riparian soil[J]. Environmental geochemistry and health, 2015, 37(6): 953-967.
- [6] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等.我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J].植物生理学报,2014,50(5):577-584.
- [7] 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.
- [8] 王宁.我国油菜产业发展的现状及对策研究[J].现代经济信息,2015(12):356.
- [9] NG S H, SHI Y, HESHKA N E, et al. Laboratory production of biofuels and biochemicals from a rapeseed oil through catalytic cracking conversion[J/O]. J Vis Exp, 2016(115). doi:10.3791/54390.
- [10] 高永东.木霉菌-油菜联合吸附重金属技术构建与作用机理初步研究[D].上海:上海交通大学,2008.
- [11] 冯刚,王鑫,白九元,等.油菜对 Cd 污染土壤的修复潜力分析[J].四川大学学报(自然科学版),2018,55(1):172-178.
- [12] 杨红飞,王友保,李建龙.铜、锌污染对水稻土中油菜(*Brassica chinensis* L.)生长的影响及累积效应研究[J].生态环境学报,2011,20(10):1470-1477.
- [13] 邹佳佳,孟梅,张云,等.农田土壤铜污染评价和油菜铜积累特征研究[J].土壤通报,2015,46(3):621-627.
- [14] 湖北省地质实验研究所.区域地球化学样品分析方法: DZ/T 0279—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [15] 中华人民共和国国土资源部.地质矿产实验室测试质量管理规范 第二部分:岩石矿物分析试样制备: DZ/T 0130.2—2006[S].北京:地质出版社,2006.
- [16] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [17] 王宁,南忠仁,王胜利,等. Cd/Pb 胁迫下油菜中重金属的分布、富集及迁移特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2012,48(3):18-22.
- [18] 刘春艳. Cu、Cd 单一及复合污染对油菜生长发育的影响[D].芜湖:安徽师范大学,2012.
- [19] 王一兴. 镉对甘蓝型油菜苗期生长的影响[D].南京:南京农业大学,2011.
- [20] 武琳霞,丁小霞,李培武,等.我国油菜镉污染及菜籽油质量安全性评估[J].农产品质量与安全,2016(1):41-46.
- [21] 张守文,呼世斌,肖璇,等.油菜对 Cd 污染土壤的植物修复[J].西北农业学报,2009,18(4):197-201.
- [11] 万勤,孟优,谢新辉,等.新疆生产建设兵团生态系统服务价值时空分异特征[J].生态学报,2014,34(23):7057-7066.
- [12] 任志远,张艳芳.土地利用变化与生态安全评价[M].北京:科学出版社,2013:27-29.
- [13] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [14] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [15] 段瑞娟,郝晋珉,王静.土地利用结构与生态系统服务功能价值变化研究:以山西省大同市为例[J].生态经济,2005(3):60-62,64.

(上接第 73 页)

- [7] 封建民,文琦,郭玲霞.风沙过渡区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以榆林市为例[J].水土保持研究,2018,25(4):304-308.
- [8] 杨丽文,何秉宇,黄培佑,等.和田河流域天然柽柳灌木林生态价值评估[J].中国沙漠,2005,25(2):268-273.
- [9] 陈超群,吴煜,王健,等.生态输水前后塔里木河干流生态系统服务价值的变化过程[J].中国农村水利水电,2017(9):100-103,108.
- [10] 王燕,高吉喜,王金生,等.新疆国家级自然保护区土地利用变化的生态系统服务价值响应[J].应用生态学报,2014,25(5):1439-1446.