

田效琴, 李 卓, 刘永红. 成都平原农田镉污染情况及油菜镉吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):496–506.

TIAN Xiao-qin, LI Zhuo, LIU Yong-hong. Characteristics of cadmium uptake by rape (*B. junica*) grown in cadmium contaminated farmland on Chengdu Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 496–506.

成都平原农田镉污染情况及油菜镉吸收特征

田效琴^{1,2}, 李 卓^{1,2*}, 刘永红^{1,2}

(1.四川省农业科学院作物研究所, 成都 611100; 2.南方丘区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 611100)

摘 要: 为了解成都平原农田镉污染现状及油菜对农田土壤镉的吸收特征, 在成都平原镉污染农田选取 45 个样点, 通过田间实地取样的方法, 研究了 32 个品种油菜的镉吸收特征及其生长农田土壤镉污染特征。结果表明: 45 个取样点中有 19 个样点土壤镉含量超过土壤环境质量标准农业用地二级污染标准, 除广汉外, 其余各市区农田土壤都存在镉污染威胁, 尤以什邡为重; 土壤有效镉含量随全镉含量增加而递增, 两者呈极显著线性正相关; 土壤镉污染生物有效性系数随土壤 pH 值升高而降低, 两者呈极显著线性负相关。试验所用油菜对土壤镉均有一定吸收累积作用, 且不同品种差异显著; 同一品种油菜镉富集能力主要受土壤镉含量的影响; 绿星油 99(德阳)、821(绵竹)、德油 5 号(彭州)和德油 4 号(什邡)分别为各市区筛选出的具有较强镉富集能力的适栽品种, 也是试验中发现的最适合各市区作为农田镉污染修复植物的油菜品种。油菜籽粒镉富集能力主要受茎秆镉含量的影响, 且在镉存赋能力的品种差异上均表现为茎秆大于籽粒。

关键词: 成都平原; 镉; 污染; 油菜; 吸收

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)03-0496-11 doi:10.11654/jaes.2016-1330

Characteristics of cadmium uptake by rape (*B. junica*) grown in cadmium contaminated farmland on Chengdu Plain

TIAN Xiao-qin^{1,2}, LI Zhuo^{1,2*}, LIU Yong-hong^{1,2}

(1. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 611100, China; 2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 611100, China)

Abstract: To understand the current situation of farmlands suffering from cadmium (Cd) contamination and that associated with Cd uptake characteristics of rape grown on Chengdu Plain, forty five soil samples were taken from the Cd contaminated farmland areas and thirty two rape cultivars were selected to study their growth and Cd uptake characteristics under soil Cd stress. The results showed that soil Cd contents in nineteen over forty five soil samples surpassed the *Soil Environmental Quality Standards For Soils* (Farmland Class II). Farmlands in all the counties/cities under investigation (except Guanghan city) existed threat of Cd contamination, particularly in Shifang City. Contents of soil available Cd increased with an increase in soil total Cd and both significantly correlated with each other. On the contrary, the Cd bioavailability decreased with an increase in soil pH, showing a highly negative correlation between the two. All the rape cultivars tested showed an accumulative feature to soil Cd but the accumulative ability varied considerably among cultivars. To a given cultivar, its Cd accumulative ability mainly depended on soil total Cd contents. Several high Cd-accumulative cultivars were identified from the screening study including Lüxingyou in Deyang, 821 in Mianzhu, Deyou 5 in Pengzhou and Deyou 4 in Shifang, which are highly suitable to grow in the selected Cd contaminated areas as potential phytoremediators. Cd accumulation ability of the rape seeds was mainly affected by Cd contents in the stalk, and thus, the differences of Cd accumulation ability among cultivars depended more on stalk than on seeds.

Keywords: Chengdu Plain; cadmium; contamination; rape; uptake

收稿日期: 2016-10-18

作者简介: 田效琴 (1989—), 女, 湖北人, 硕士研究生, 主要研究作物栽培和资源环境。E-mail: 865257025@qq.com

* 通信作者: 李 卓 E-mail: lizhuo_2000@sina.com

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2014NZ0008)

Project supported: Science and Technology Support Program of Sichuan Province (2014NZ0008)

我国近年来由重金属引起的农田土壤污染问题已有不少报道^[1-5]。有研究表明,我国重金属污染的农田面积约1.3万hm²,每年被重金属污染的粮食多达1200万t,导致粮食减产高达1000多万t,合计经济损失至少200亿元^[6]。2014年4月17日,环境保护部和国土资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》中显示耕地土壤点位超标率为19.4%,西南、中南地区土壤重金属超标范围较大,并首次确认重金属镉是土壤污染的罪魁祸首,其点位检出率高达7.0%^[7]。各大城市农田土壤和农作物已普遍受到了一定程度的重金属污染^[8-10],尤以镉和汞污染最受关注。镉污染已成为我国土壤最重要和最典型的重金属污染。镉污染除了具备重金属污染的一般特点(隐蔽性、不可逆性和长期性)外,还具有移动性强、毒性高和难降解等自身特点,因此镉易被植物吸收,进而通过食物链最终危害动物和人体健康^[11]。2013年“镉米事件”发生后,镉及镉化合物对人体的致癌性已被广泛证实,世界卫生组织(WHO)将其认定为威胁公共健康的10种化学物质之一。镉主要在人体肝、肾部积累,造成肾小管等脏器损伤,导致肾功能不全,并使人体骨骼代谢受阻,继而引发骨骼病变。1960年日本富山县出现的骨痛病就由镉污染引起^[12]。

植物修复技术因具有成本低、污染少、操作简便和不破坏土壤本身结构等优点被广泛应用于重金属污染土壤的修复。现已报道筛选出较好的镉超积累植物主要有遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)^[13]、印度芥菜(*Brassica junica*)^[14]和甘蓝型油菜(*Brassica junica*)^[15]。我国有大量的油菜种质资源,其中某些品种或基因型在吸收累积土壤镉方面相当于甚至超过印度芥菜。关于运用油菜对农田镉元素进行吸收的理论与技术,前人已作了较多的研究,并筛选出了一部分超积累镉油菜品种^[16-18]。高茜蕾等^[19]采用土培方法对比研究了10种不同的油菜品种对镉的吸收累积差异,结果表明不同品种油菜对镉的累积有明显的差异,并且同种油菜品种不同器官对镉的吸收累积也有差异,具体表现为叶>茎>角果壳>籽粒^[20]。多数研究结果一致认为:土壤pH、氧化还原电位、有机物质、营养物质浓度等都会影响镉的有效性^[21-26],且土壤有效镉含量与全镉含量间有较好的相关性^[27-28]。从现有的研究成果分析,不同油菜品种吸镉能力的差异主要取决于其自身基因型,而人为改变土壤某些环境条件可以增强油菜的吸镉能力,如施加螯合剂(EDTA)可提高油菜对镉的吸收^[29],适度降低土壤pH值更有利于镉的吸收累积^[19]。

综合已有研究发现,前人在分析油菜吸镉特征方面大部分局限在盆栽模拟试验,由于植物吸收土壤镉受到多种环境因子的影响,而生态条件(气候、土壤、水分、作物)的不同必然导致其吸收规律有一定差异,已有研究所得结论可能难以反映真实情况,其结果必然跟生产实际有一定差异,跟具体应用还有一定距离;另外,将农田土壤镉污染分布和种植作物镉吸收特征两个方面分开来研究,所筛选出的超积累镉油菜品种未必适宜镉污染区生长或作为该区土壤修复植物。

探寻地区性主栽油菜品种对地区性农田土壤镉污染的吸收特征是运用植物修复手段解决地区农田土壤镉污染问题的基础研究工作,也是保障粮油安全的重要内容。本试验在油菜成熟时对成都平原镉污染区主栽油菜及其生长农田土壤随机取样,调查分析取样区土壤镉污染情况、油菜吸镉规律与影响因素,以及不同品种油菜吸镉能力的差异等。本试验采用从生产实际中随机取样的方法,将取样区农田土壤镉污染情况及主栽油菜品种吸镉特征与规律综合分析,在了解取样区镉污染情况的同时筛选出了适应各地区农田土壤镉污染修复的超积累镉油菜适栽品种。由于所得出的结论完全来自生产实际,具有较强的针对性与实用性,可为该区域镉污染农田植物修复提供重要的理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

依据土壤环境质量标准(GB 15618—2008)^[30]和土壤环境监测技术规范(HJ/T 166—2004)^[31],通过查阅成都平原镉污染分布图(图1),确定重金属镉不同污染程度的分布区域^[32]。在土壤镉含量为0.20~0.66mg·kg⁻¹之间的每个县市,向农业管理部门及当地农户调研当地主要栽植的油菜品种,然后区别稻田和旱地根据油菜种植面积大小采用非均匀布点方法^[33]选取具有代表性的油菜农田作为采样区,即同时考虑地块的代表性与油菜品种的代表性(面积1000m²左右、历史栽培一致、土壤类型一致)。在每个采样区用梅花布点法取五点混合样,记录地理位置及油菜品种名称。取样在油菜成熟时进行(5月3日至5月15日),采集土壤及该块田油菜植株地上部分。取地表0~15cm剖面土壤,沿剖面均匀切块,将五点样混合,带回实验室掰成碎块摊晾,室内自然风干后磨细;在调查地块随机取5株植株,遵循五点法原则,将植株沿地平面切断,取地上部分,每一取样地块装一袋,带回实

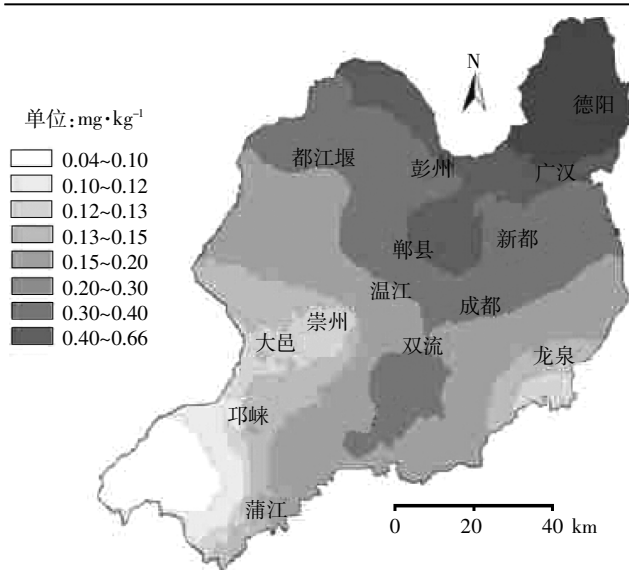


图1 成都平原重金属镉分布

Figure 1 Schetch map of soil heavy metal cadmium distribution on Chengdu Plain

验室,摊晾 2~3 d 后脱粒,将籽粒与秸秆分离,籽粒继续摊晾,秸秆用烘箱烘干。

此次试验共 45 个采样点分布于德阳(7 个)、广汉(5 个)、什邡(6 个)、彭州(19 个)、绵竹(7 个)和都江堰(1 个),如图 2 所示。

1.2 测定指标和方法

1.2.1 样品处理及镉含量测定

土壤测定指标有 pH 值、全镉含量、有效镉含量。

植株样在实验室于 70 ℃烘干,按样地分别脱粒

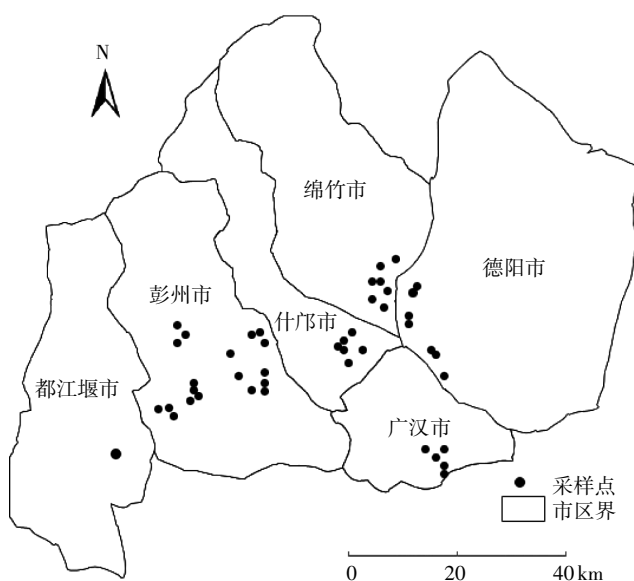


图2 各市区农田土壤采样点位置

Figure 2 Location of sampling sites in different cities

后,同一样地的茎秆粉碎后混合,同一样地的籽粒混合,分别测定茎秆和籽粒镉含量。

籽粒、茎秆镉含量用石墨炉原子吸收光谱法(GB 5009.15—2014)测定,在测定过程中加入国家标准植物样品(GBW10015 菠菜)进行分析质量控制。土壤全镉含量采用石墨炉原子吸收光谱法(GB/T 17141—1997)测定,土壤有效镉含量采用 0.1 mol·L⁻¹ HCl(酸性)和 DTPA(中碱性)浸提,石墨炉原子吸收光谱法(GB/T 23739—2009)测定。在土壤全镉含量测定过程中采用国家标准土壤样品(GSS-14)进行分析质量控制。

土壤 pH 值采用电位计法测定(LY/T 1239—1999)。

1.2.2 数据处理与计算

采用 Excel、SPSS 17.0 进行数据统计分析。采用单因素 *t* 检验分析不同地区镉含量的变异性;采用 LSD 法分析不同品种间吸镉能力差异;采用 SPSS 相关和回归进行相关性分析和回归方程建立,采用 Excel 绘制回归方程图。

(1)土壤重金属生物有效性系数,亦称活化率^[34],指土壤中重金属有效态含量占全量的比例,较全量和有效态含量更能准确指示环境污染对土壤的冲击。土壤中镉的生物有效性系数是土壤有效镉含量占土壤全镉含量比例,用 *K* 表示,即:

生物有效性系数(*K*)=有效镉含量/全镉含量

(2)富集系数即植物体中某元素含量与基质中该元素含量的比值,通常用来说明某种植物对元素的吸收、累积能力^[35]。富集系数越大,说明植物对该元素的吸收能力越强。本文以茎秆中镉含量计算,即:

镉富集系数=茎秆镉含量/土壤镉含量

(3)植物籽粒从营养体吸取镉的能力常用转运系数表示,即:

转运系数=籽粒镉含量/茎秆镉含量^[36]

2 结果与分析

2.1 土壤镉污染情况及影响因素分析

2.1.1 土壤镉含量特征与生物有效性分析

从表 1 可以看出,此次试验涉及到的取样区土壤 pH 值、土壤全镉和有效镉含量的变幅、标准差和变异系数均较小,说明各取样区土壤 pH 值、土壤全镉和有效镉含量距平均值的离散程度较小,并且各取样区内差异较小,可以用平均值表示。稻田取样点土壤平均全镉含量为彭州 0.37 mg·kg⁻¹、德阳 0.40 mg·kg⁻¹,绵竹 0.63 mg·kg⁻¹、什邡 0.50 mg·kg⁻¹、广汉 0.21 mg·

表 1 取样地土壤镉生物有效性系数以及有效镉与全镉含量特征

Table 1 The bio-availability coefficient of cadmium and characteristics of available cadmium content and total cadmium content in sampling sites							
地点	土地类型	土壤镉形态	变幅	均值	标准差	变异系数/%	生物有效性系数/%
广汉	稻田	全镉/mg·kg ⁻¹	0.19~0.23	0.21	0.02	10	61.9
		有效镉/mg·kg ⁻¹	0.10~0.20	0.13	0.05	38	
		pH 值	6.02~6.66	6.35	0.29	5	
德阳	稻田	全镉/mg·kg ⁻¹	0.19~0.72	0.40	0.19	48	45.0
		有效镉/mg·kg ⁻¹	0.11~0.33	0.18	0.08	44	
		pH 值	5.63~7.85	6.62	0.79	12	
绵竹	稻田	全镉/mg·kg ⁻¹	0.35~1.34	0.63	0.32	51	42.9
		有效镉/mg·kg ⁻¹	0.15~0.40	0.27	0.08	30	
		pH 值	6.05~7.49	6.88	0.53	8	
什邡	稻田	全镉/mg·kg ⁻¹	0.30~0.91	0.50	0.24	48	60.0
		有效镉/mg·kg ⁻¹	0.14~0.38	0.30	0.10	33	
		pH 值	5.40~6.90	5.93	0.60	10	
彭州	稻田	全镉/mg·kg ⁻¹	0.28~0.57	0.37	0.10	27	46.0
		有效镉/mg·kg ⁻¹	0.12~0.27	0.17	0.05	29	
		pH 值	6.10~7.20	6.73	0.32	05	
彭州	旱地	全镉/mg·kg ⁻¹	0.19~0.88	0.36	0.21	58	41.7
		有效镉/mg·kg ⁻¹	0.05~0.37	0.15	0.09	60	
		pH 值	5.23~7.61	6.42	0.72	11	

kg⁻¹,都江堰只取了一个样点,全镉含量为 0.91 mg·kg⁻¹;旱地取样点土壤平均全镉含量为彭州 0.36 mg·kg⁻¹,什邡和广汉都只取了一个样点,分别为 0.27 mg·kg⁻¹、0.64 mg·kg⁻¹。由此可以看出,本次取样涉及到的区域稻田土壤全镉含量为绵竹、什邡最高,德阳、彭州次之,广汉最低(都江堰此次仅有一个样点,不具代表性);也可以看出,同是彭州的耕地,稻田土壤的全镉含量要略高于旱地。将 45 个取样地土壤全镉含量与《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)^[30]规定的农业用地二级标准对比可以看出,本次取样地污染程度超过该标准限值的样地有 19 个,占比 42%。具体污染情况见表 2。

此次调查区域除广汉外,其余各市区均有部分样点土壤全镉含量超过国家二级标准,说明除广汉外各市区均有镉污染威胁。与 2009 年李冰等^[32]在成都平原调查农田土壤镉的污染情况相比,德阳、绵竹、什邡、广汉等地区仍然存在镉污染,且农田土壤镉含量较李冰等的结果高,地区变化差异较大,除广汉外,彭州、绵竹、什邡和德阳均有部分样点土壤全镉含量超过国家二级标准。这可能与各地区 6 年来工业企业污染物排放、农业生产过程中施肥、灌溉和交通情况等因素有关。

表 2 二级污染样点情况

Table 2 Sampling sites with cadmium contamination(Class II)					
土地类型	二级污染标准	土壤 pH	土壤全镉/mg·kg ⁻¹	地点名称	
水田	pH≤5.5 土壤全镉≥0.25	5.4	0.47	什邡 3	
		pH>5.5~6.5 土壤全镉≥0.3	0.48	绵竹 6	
			0.33	什邡 1	
			0.91	什邡 4	
			0.35	彭州 10	
	pH>6.5~7.5 土壤全镉≥0.5	6.3	0.72	德阳 5	
		6.4	0.39	德阳 7	
		6.05	0.35	绵竹 4	
		6.91	0.53	绵竹 1	
		7.49	0.58	绵竹 2	
		7.1	0.61	绵竹 3	
		7.46	1.34	绵竹 5	
		6.72	0.53	绵竹 7	
		6.9	0.52	什邡 2	
		6.6	0.57	彭州 3	
		6.7	0.91	都江堰 1	
旱地	pH≤5.5 土壤全镉≥0.25	5.23	0.31	彭州 12	
		pH>5.5~6.5 土壤全镉≥0.3	0.88	彭州 17	
			0.48	彭州 18	

稻田土壤有效镉含量与全镉含量表现出一致性, 绵竹($0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、什邡($0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)最高, 德阳($0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、彭州($0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)次之, 广汉($0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)最低, 并且同是彭州的耕地, 稻田土壤的有效镉含量略高于旱地。

由表1分析可知, 此次试验涉及到的区域土壤镉 K 值普遍较高, 且不同区域存在较大差异。同为稻田的土壤, K 值较高的区域是广汉和什邡, 分别为61.9%和60.0%, 其余区域较低且差异较小, 彭州为46.0%, 德阳为45.0%, 绵竹为42.9%。同一区域不同土地类型 K 值也存在差异, 如彭州稻田生物有效性系数为45.95%, 而旱地为41.67%。

有文献^[37]指出土壤中重金属有效态含量较总量能更好地评估其生物有效性及环境风险度。对 K 值较高的广汉和什邡进一步分析可知, 广汉虽然 K 值较高, 但土壤全镉含量并未超过《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)规定的农业用地二级标准^[30], 不存在环境威胁, 而什邡土壤不仅全镉含量超过该标准, 而且镉活性也较高, 其生态风险较大。

2.1.2 全镉含量与有效镉含量和土壤pH值与 K 值之间相关性分析

由图3可以看出, 土壤有效镉含量与全镉含量的相关回归方程的相关系数 $R=0.841$ ($P<0.01$), 土壤有效镉含量与全镉含量呈极显著线性正相关, 与已有研究结果相同^[27-28]。这种关系可以说明总量是影响土壤有效镉含量的主要因子, 土壤全镉含量越高, 其有效镉含量就越高。

由图4同样可以看出, K 值与土壤pH值的相关回归方程的相关系数 $R=-0.351$ ($P<0.01$), K 值与土壤pH值呈极显著线性负相关。也有研究表明土壤pH

值是影响镉生物有效性的重要因素, 一般来说, pH值降低, 生物有效性系数增大, 植物镉含量升高, 两者存在明显的线性关系^[38]。这种关系说明土壤pH值是决定土壤全镉转化成有效镉含量大小的主要因素, pH值低的土壤, 其全镉就能更多地转化成有效镉, 其原因主要是土壤pH值的降低不仅使水溶态的镉含量增加, 而且还能促进土壤胶体所交换吸附的镉解吸出来^[39]。同时由表1分析可知, 不同区域土壤pH值的差异规律大致与 K 值相反, 同为稻田土壤, pH值较高的区域是绵竹和彭州, 分别为6.88和6.73, 其余区域较低, 彭州为6.73, 广汉为6.35, 什邡为5.93。这进一步证实了 K 值与土壤pH值之间的负相关关系。

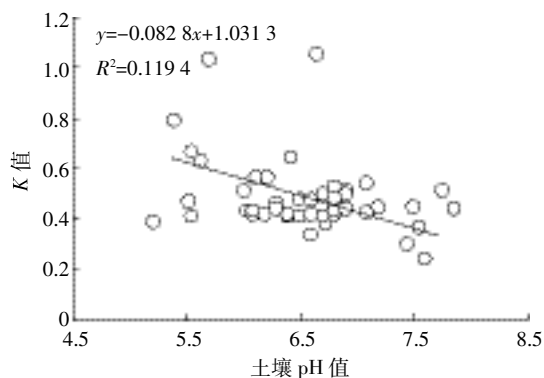


图4 K 值与土壤pH值的关系

Figure 4 Relationships between soil pH and K value

2.2 油菜茎秆镉吸收特征分析

2.2.1 不同品种油菜镉富集系数

通过各市区不同品种油菜土壤全镉富集系数和有效镉富集系数统计分析结果可以看出(图5), 无论是同一市区还是不同市区, 也无论水田或旱地, 不同品种油菜全镉和有效镉富集系数差异显著, 即其镉吸收能力也表现出显著差异。高茜茜等^[19]在试验中对比了10种不同品种油菜吸镉能力差异, 结果表明不同品种油菜对镉的累积有明显差异, 在酸性土壤中, 高累积镉品种吸镉能力是低累积镉品种的1.88倍, 碱性土壤中为2.13倍。这种品种间的显著性差异在其他作物上也有所体现, 如龙葵^[40]、水稻^[41]、燕麦^[42]。本试验广汉、绵竹和彭州(包括旱地和稻田)全镉和有效镉富集系数最高的均为同一品种, 分别为蓉油7号(1.35和2.38)、821(1.09和2.53)、德油5号(旱地: 1.48和3.83)和油研4号(稻田: 1.79和4.33); 德阳和什邡全镉和有效镉富集系数最高的均为不同品种, 分别为德油5号(2.05和3.25)与绿星油99(1.41和3.45)以及德油4号(1.34和1.70)与花菜籽(1.13和

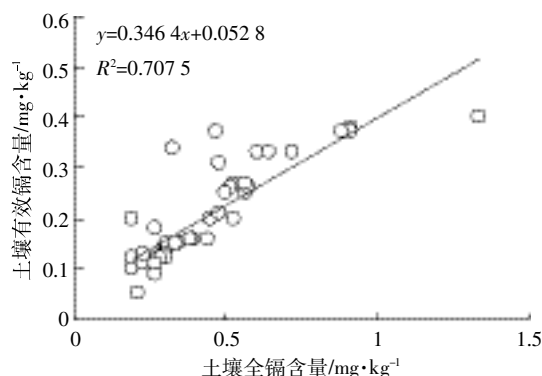
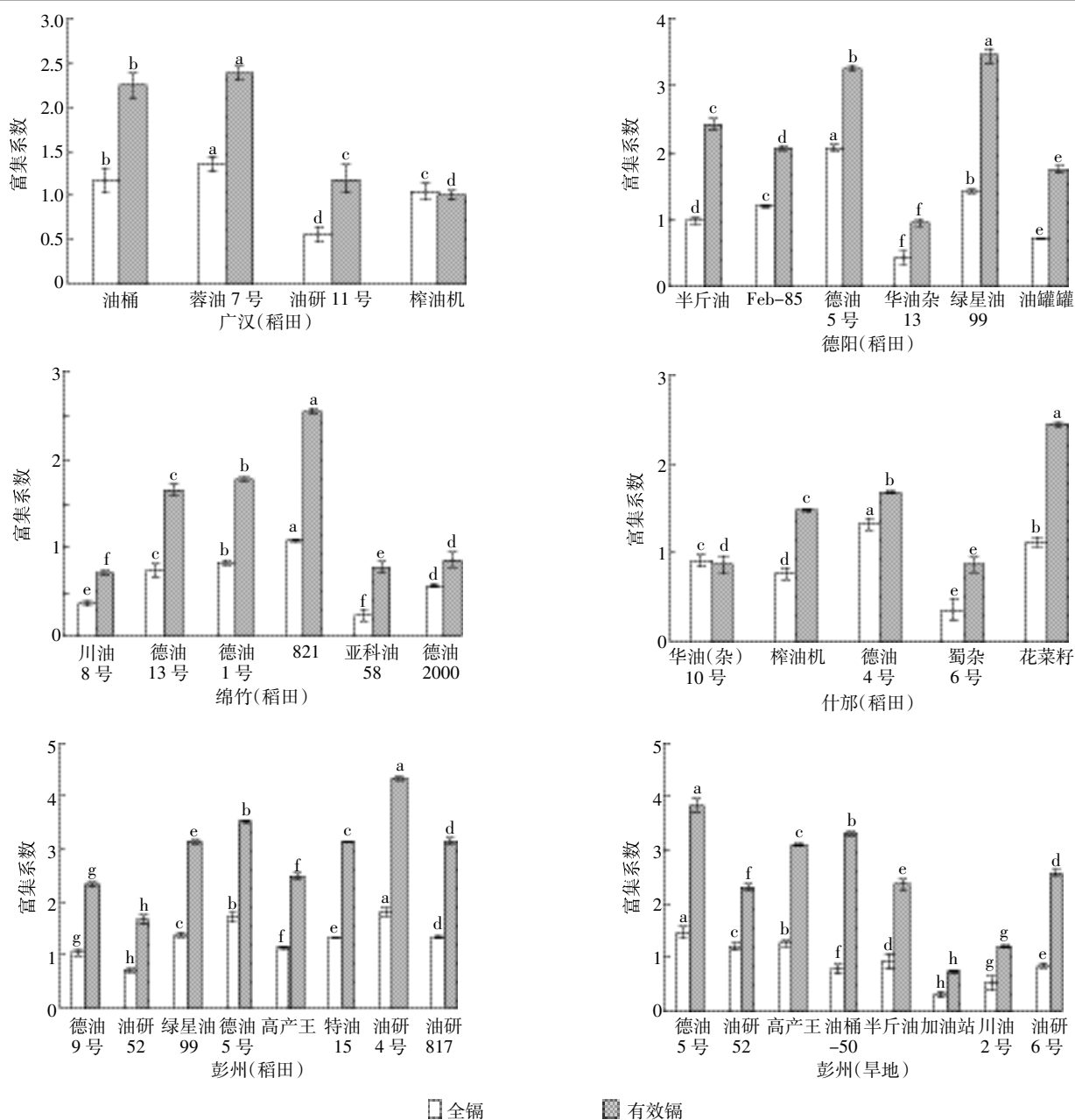


图3 土壤有效镉含量与全镉含量的关系

Figure 3 Relationships between soil available cadmium content and total cadmium content



除彭州外,其余市区旱地样点均较少,未列出;各市区不同品种间全镉富集系数和有效镉富集系数平均值后标注不同小写字母表示差异达到 5% 显著水平。

Except Pengzhou, a few samples were taken from uplands in the other areas and thus, not listed here; Different capital letters indicate significant differences at 0.05 for total Cd enrichment coefficients and available Cd enrichment coefficients among rape cultivars in different areas

图 5 各市区不同品种间全镉富集系数和有效镉富集系数统计分析

Figure 5 Statistical analysis on total cadmium enrichment coefficient and available cadmium enrichment coefficient among rape cultivars in different areas

2.43)。以上品种全镉富集系数均超过此次试验全镉富集系数最小品种亚华油(0.23)的 4.9 倍以上,有效镉富集系数均超过川油 8 号(0.70)的 2.4 倍以上。综合分析可知,对于此次调查中存在镉污染威胁的德阳、绵竹、彭州和什邡市区,可以根据本地适栽油菜品种分别选用德油 5 号或绿星油 99、821、德油 5 号或

油研 4 号和德油 4 号或花菜籽对各地区进行农田土壤镉污染修复。

2.2.2 土壤镉含量与油菜镉富集系数相关性分析

土壤镉含量对油菜镉富集系数有较大影响,若不计品种差异,将全镉富集系数与土壤全镉含量作相关分析,相关系数 $R=-0.615$ ($P<0.01$),二者呈极显著负

相关,将二者进行回归分析,得到回归方程如图6所示;有效镉富集系数与土壤有效镉含量之间相关系数 $R=-0.678$ ($P<0.01$),二者呈极显著负相关,回归方程如图7所示。油菜镉富集系数与土壤镉含量呈极显著指数函数负相关,随着土壤镉含量增加,同一品种油菜其茎秆镉含量增加,但镉富集系数减小,说明油菜茎秆镉吸收增加幅度随土壤全镉增加而减小。原因可能是随着土壤镉含量的增加,其毒性也不断增强,抑制了油菜根系对镉的吸收和向地上部的转运,从而使其富集系数也一直呈下降趋势^[43]。张儒德等^[44]在研究5种不同基因型水稻对镉的吸收差异时也发现,随着土壤镉浓度的增加,籽粒富集系数逐渐降低。

2.3 油菜籽粒镉转运分析

高富集镉油菜品种的另一必备要素是较低的油菜籽粒镉转运能力。若不考虑品种差异,对油菜籽粒转运系数与茎秆镉含量和有效富集系数作相关分析发现,籽粒转运系数与两者均存在显著负相关,与有效富集系数相关性达到极显著水平,相关系数为

$R=-0.421$ ($P=0.002<0.01$)。油菜籽粒转运系数与茎秆镉含量的回归方程如图8所示,呈显著对数函数负相关,油菜籽粒转运系数与茎秆镉含量间具有一定相关性但未达到极显著水平,说明茎秆镉含量是影响油菜籽粒转运系数的因素之一,但不是唯一因素,转运系数大小还受其他因素,如品种、土壤pH和污染物活性^[44]等的影响。油菜籽粒转运系数与有效镉富集系数的回归方程如图9所示,呈极显著线性负相关,说明在镉存赋能力的品种差异上茎秆大于籽粒。

由以上转运系数与有效镉富集系数的线性显著负相关可知,此次各地区筛选出的具有高富集镉的油菜品种(德阳:德油5号或绿星油99;绵竹:821;彭州:德油5号或油研4号;什邡:德油4号或花菜籽)应具有较低的镉转运能力。由表3可看出,德阳地区除油罐罐和Feb-85外,绿星油99的转运能力最低;绵竹地区除德油1号外,821最低;彭州地区无论旱地和稻田,德油5号均最低;什邡地区德油4号最低。综合分析可以得出:绿星油99(德阳)、821(绵竹)、德

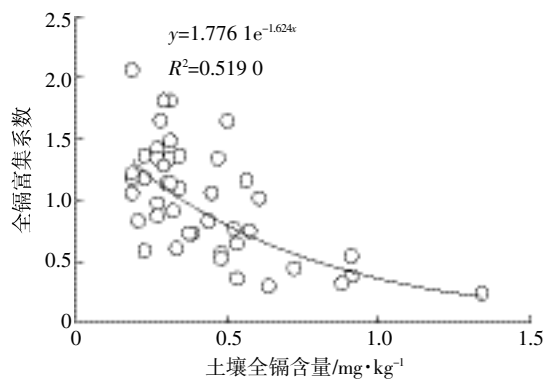


图6 全镉富集系数与全镉含量的关系

Figure 6 Relationships between soil total cadmium contents and total cadmium enrichment coefficients

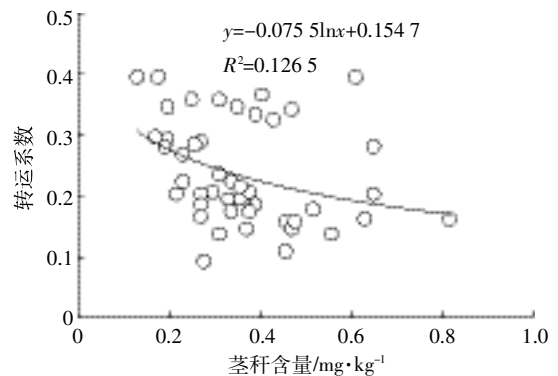


图8 转运系数与茎秆镉含量的关系

Figure 8 Relationships between cadmium transfer coefficients and stalk cadmium contents

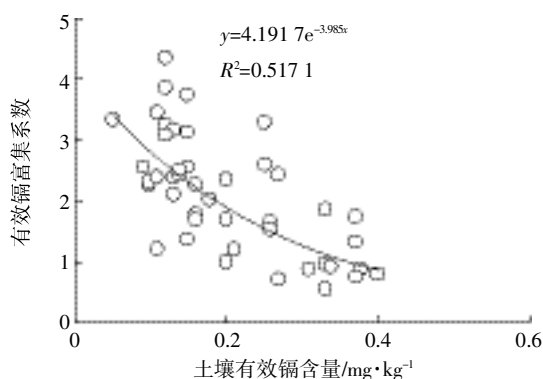


图7 有效镉富集系数与有效镉含量的关系

Figure 7 Relationships between soil available cadmium contents and available cadmium enrichment coefficients

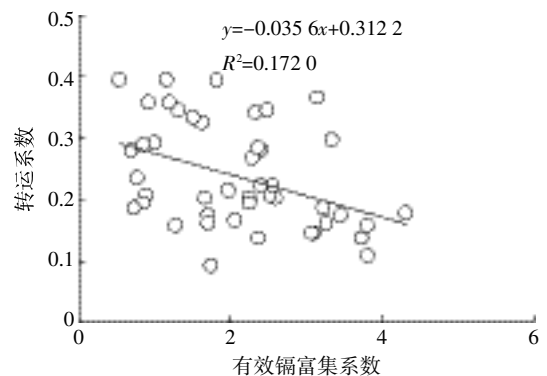


图9 转运系数与有效镉富集系数的关系

Figure 9 Relationships between cadmium transfer coefficient and available cadmium enrichment coefficient

表 3 各地区不同油菜品种转运系数对比

Table 3 The analysis of transfer coefficient among different varieties rapese in different areas

地点	品种	转运系数
德阳	半斤油	0.19
	Feb-85	0.16
	德油 5 号	0.18
	华油杂 13	0.35
	绿星油 99	0.17
	油罐罐	0.09
绵竹	川油 8 号	0.28
	德油 13 号	0.33
	德油 1 号	0.27
	821	0.21
	亚科油 58	0.24
	德油 2000	0.29
什邡	华油(杂)10 号	0.21
	榨油机	0.33
	德油 4 号	0.16
	蜀杂 6 号	0.19
	花菜籽	0.22
	德油 9 号	0.34
彭州(旱)	油研 52	0.20
	绿星油 99	0.22
	德油 5 号	0.14
	高产王	0.34
	特油 15	0.37
	油研 4 号	0.18
彭州(稻)	油研 817	0.14
	德油 5 号	0.11
	油研 52	0.27
	高产王	0.14
	油桶-50	0.29
	半斤油	0.28
	加油站	0.19
	川油 2 号	0.36
	油研 6 号	0.22

油 5 号(彭州)和德油 4 号(什邡)最适合用作农田土壤镉污染修复,这四种油菜的籽粒镉含量(绿星油 99:0.066 mg·kg⁻¹;821:0.078 mg·kg⁻¹;德油 5 号:0.062 mg·kg⁻¹;德油 4 号:0.1 mg·kg⁻¹)均远低于此次试验籽粒镉含量最高品种德油 1 号(0.24 mg·kg⁻¹)。2010 年 JECFA 第 73 次会议建议镉的每月耐受摄入量(PTMI)暂定为 25 μg·kg⁻¹^[45],而油菜籽中的镉转移到菜籽油中的比例为 2%~10%^[46],以上品种籽粒中最大镉含量以最大比例 10%的量转移到菜籽油中,其含

量也仅为 10 μg·kg⁻¹。根据《中国居民膳食指南》^[47]的建议,一个人一天的食用油摄入量不宜超过 0.025 kg,即一个月不宜超过 0.75 kg。若食用含镉 10 μg·kg⁻¹的食用油一个月,其镉摄入量为 7.5 μg·kg⁻¹,远低于每月耐受摄入量,不存在消费风险,可放心食用,且以上品种均为各地区常年主栽油菜品种,可大面积种植。

3 讨论

本研究在实地取样过程中,由于种种原因(不同地区主栽油菜品种各异,同一地区种植相同主栽油菜品种的农田面积不同、类型不一)限制,同一品种取样量(取样量最多的德油 5 号仅有 5 个样点)有限,但从已有的数据可以看出,同一品种在各地和各类型农田中的吸镉能力相近,不同品种间差异明显。例如德油 5 号全镉和有效镉富集系数(德阳稻田为 2.05 和 3.25,彭州稻田样点 1 为 1.64 和 3.28,样点 2 为 1.81 和 3.73,彭州旱地样点 1 为 1.46 和 3.82,样点 2 为 1.50 和 3.84)在各地和各类型农田中均较高;而半斤油全镉和有效镉富集系数(德阳稻田样点 1 为 1.14 和 2.6,样点 2 为 0.82 和 2.25,彭州旱地为 0.96 和 2.36)均中等。大量研究表明,作物的不同品种之间吸镉能力差异显著^[19,40-42],说明其吸镉能力主要由自身性质决定,外部环境条件影响较小。故本文 45 个样点涉及到的 32 个油菜品种吸镉能力具有代表性,且差异显著。

本文在分析富集系数与土壤全镉和有效镉之间的关系时,由于取样量最多的德油 5 号仅有 5 个样点,故无法在同一品种下分析富集系数与土壤全镉和有效镉之间的关系,但是从已有的数据可以发现,同一品种下富集系数与土壤全镉和有效镉之间呈负相关关系。例如德油 5 号所在地区土壤全镉依次为 0.19、0.5、0.31、0.34、0.31 mg·kg⁻¹,对应的全镉富集系数依次为 2.05、1.64、1.81、1.46、1.50;土壤有效镉依次为 0.12、0.25、0.15、0.15、0.12 mg·kg⁻¹,对应的有效镉富集系数依次为 3.25、3.28、3.73、3.82、3.84。其中负相关关系在已有研究中也有所体现^[41]。

4 结论

(1)取样区 45 个取样点中有 19 个样点土壤镉含量超过土壤环境质量标准农业用地二级污染标准,除广汉外,其余各市区农田土壤都存在镉污染威胁,尤以什邡为重,存在较大的环境风险。

(2)土壤全镉含量是影响有效镉含量的主要因素,土壤 pH 值是影响土壤镉生物有效性系数的主要因素。

(3)油菜镉富集系数与土壤镉含量呈显著指数函数关系;油菜籽粒镉转运系数与茎秆镉含量之间存在显著对数函数关系,同时与茎秆有效镉富集系数呈极显著线性负相关,说明油菜籽粒镉转运能力主要受茎秆镉含量影响。不同品种油菜镉吸收累积及籽粒转运能力有较大差异,各区县全镉富集系数最高的品种均达到本次试验全镉富集系数最小品种的 4.9 倍以上,有效镉富集系数则达到最小品种的 2.4 倍以上;而转运能力最低的品种其转运系数不到最高品种的 41%,且在镉存赋能力的品种差异上茎秆大于籽粒。

(4)针对镉污染风险较高的德阳、绵竹、彭州和什邡,筛选出镉高富集且低转运的油菜品种,分别为绿星油 99、821、德油 5 号和德油 4 号,可以作为这些地区镉污染农田修复油菜品种推广。

参考文献:

- [1] 梁 啸, 刘晓文, 吴文成, 等. 电子废物拆解废渣周边农田重金属的污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(10): 1718-1724.
LIANG Xiao, LIU Xiao-wen, WU Wen-cheng, et al. The distribution characteristic of heavy metals in farmland around electronic waste slag [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(10): 1718-1724.
- [2] 虞敏达, 张 慧, 何小松, 等. 典型农业活动区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1500-1507.
YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in typical agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(3): 1500-1507.
- [3] 樊 霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1727-1736.
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1727-1736.
- [4] 李良忠, 杨 彦, 蔡慧敏, 等. 太湖流域某农业活动区农田土壤重金属污染的风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 60-65.
LI Liang-zhong, YANG Yan, CAI Hui-min, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils in Taihu Lake basin agricultural area[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(S1): 60-65.
- [5] 韦绪好, 孙庆业, 程建华, 等. 焦岗湖流域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2304-2311.
WEI Xu-hao, SUN Qing-ye, CHEN Jian-hua, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils in Jiaogang Lake Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12): 2304-2311.
- [6] Wu G, Kang H B, Zhang X Y, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, e-co-environmental concerns and opportunities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3): 1-8.
- [7] 中华人民共和国国家环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国国家环境保护部, 中华人民共和国国土资源部, 2014: 10-11.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Survey communique of soil pollution in China[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2014: 10-11.
- [8] 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 长沙城郊农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1564-1570.
LIU Qiong-feng, LI Ming-de, DUAN Jian-nan, et al. Ecological risk assessment of heavy metals of Pb and Cd in the suburban cropland soils in Changsha[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1564-1570.
- [9] 王 婷, 王 静, 孙红文, 等. 天津农田土壤镉和汞污染及有效态提取剂筛选[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 119-124.
WANG Ting, WANG Jing, SUN Hong-wen, et al. Contamination of cadmium and mercury in farmland of Tianjin and extraction methods for predicting their bioavailability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 119-124.
- [10] 李瑞平, 郝英华, 李光德, 等. 泰安市农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2012-2017.
LI Rui-ping, HAO Ying-hua, LI Guang-de, et al. Characteristics and sources analysis of soil heavy metal pollution in Tai'an City, Shandong, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2012-2017.
- [11] Nakadaira H, Nishi S. Effects of low-dose cadmium exposure on biological examinations[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 308(1/2/3): 49-62.
- [12] Hart J J, Welch R M, Norvell W A. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration[J]. *New Phytol*, 2005, 167(2): 391-401.
- [13] 沈振国, 刘友良, 陈怀满. 螯合剂对重金属超量积累植物 *Thlas Pi-caerulescens* 的锌、铜、锰和铁吸收的影响[J]. 植物生理学报, 1998, 24(4): 340-346.
SHEN Zhen-guo, LIU You-liang, CHEN Huai-man. Effect of chelating agents on hyperaccumulators of heavy metal in plants *Thlas Pi-caerulescens* excess of zinc, copper, manganese and iron[J]. *Acta Phytobiologica Sinica*, 1998, 24(4): 340-346.
- [14] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard[J]. *Plant Physiol*, 1995, 109(4): 1427-1433.
- [15] 王激情, 茹淑华, 苏德纯. 用于修复土壤超积累镉的油菜品种筛选[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(1): 67-70.
WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Selection of a hyperaccumulators for phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(1): 67-70.
- [16] 常青山, 马祥庆. 重金属超富集植物筛选研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 330-335.

- CHANG Qing-shan, MA Xiang-qing. Advances in the research of selecting hyperaccumulator[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):330-335.
- [17] Dinesh M, Bechan S, Chitrnanjan K. Phytoaccumulation interaction toxicity and remediation of cadmium from *Helianthus annuus* L. (sunflower)[J]. *Environ Contam Toxicol*, 2007, 79(1):71-79.
- [18] Zhuang P, Yang Q W, Wang H B, et al. Phytoextraction of heavy metal by eight plant species in the field[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 184(1):235-242.
- [19] 高茜蕾, 许军锋. 不同品种油菜取样对镉的吸收累积差异分析[J]. 西安工业大学学报, 2015, 35(6):479-482.
- GAO Qian-lei, XU Jun-feng. Investigations of the difference of cadmium accumulated in various kinds of rapeseeds[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2015, 35(6):479-482.
- [20] 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.
- XIANG Dan, JIAO Wei-ping, SU De-chun. Cd accumulation characteristics in organs of rapeseed varieties with different Cd uptake ability[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(1):29-33.
- [21] 李 丹, 李俊华, 何 婷, 等. 不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9):1679-1685.
- LI Dan, LI Jun-hua, HE Ting, et al. Effects of different amendments on soil Cd forms and Cd uptake by Chinese cabbage in Cd-contaminated calcareous soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1679-1685.
- [22] 易 秀, 刘意竹, 姜 凌, 等. 不同改良剂对重金属污染土壤中小麦镉吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):292-300.
- YI Xiu, LIU Yi-zhu, JIANG Ling, et al. Effect of different amendments on Cd absorption of wheat in heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6):292-300.
- [23] 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及小白菜镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10):4030-4043.
- QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, et al. Effect of nano zeolite on chemical fractions of Cd in soils and uptake by Chinese cabbage at different soil pH and cadmium levels[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10):4030-4043.
- [24] 代允超, 吕家珑, 刁 展, 等. 改良剂对不同性质镉污染土壤中有效镉和小白菜镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):80-86.
- DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, DIAO Zhan, et al. Effects of soils amendments on Cd bioavailability to and uptake by *Brassia chinensis* in different Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):80-86.
- [25] 王祖伟, 弋良朋, 高文燕, 等. 碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23):7512-7518.
- WANG Zu-wei, YI Liang-peng, GAO Wen-yan, et al. Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23):7512-7518.
- [26] 张 晶, 苏德纯. 秸秆炭化后还田对不同镉污染农田土壤中镉生物有效性和赋存形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10):1927-1932.
- ZHANG Jin, SU De-chun. Phytoavailability and chemical speciation of Cd in different Cd-contaminated soils influenced by bio-char incorporation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10):1927-1932.
- [27] 王 凌, 张国印, 张小龙, 等. 蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态与全量相关性研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(增刊):85-88.
- WANG Ling, ZHANG Guo-yin, ZHANG Xiao-long, et al. Study on the bioavailability of heavy metal and correlation between the available concentration and the total in vegetable soil[J]. *Acta Agric Boreali Sin*, 2011, 26(Suppl):85-88.
- [28] 李 念, 李荣华, 冯 静, 等. 粉煤灰改良重金属污染农田的修复效果甄别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):213-219.
- LI Nian, LI Rong-hua, FENG Jing, et al. Remediation effects of heavy metals contaminated farmland using fly ash based on bioavailability test[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16):213-219.
- [29] 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.
- ZHANG Shou-wen, HU Shi-bin, XIAO Xuan, et al. Phytoremediation of cadmium pollution in soil by oil seed rape[J]. *Acta Agric Boreali-occidentalis Sin*, 2009, 18(4):197-201.
- [30] 中华人民共和国环境保护部. GB 15618—2008 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2015.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 15618—2008 Environmental quality standard for soils[S]. Beijing:China Environmental Science Press, 2015.
- [31] 中华人民共和国环境保护部. HJ/T166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2005.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ/T 166—2004 The Technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing:China Environmental Science Press, 2005.
- [32] 李 冰, 王昌全, 谭 婷, 等. 成都平原土壤重金属区域分布特征及其污染评价[J]. 核农学报, 2009, 23(2):308-315.
- LI Bing, WANG Chang-quan, TAN Ting, et al. Regional distribution and pollution evaluation of heavy metal pollution in topsoils of the Chengdu plain[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2):308-315.
- [33] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1):117-122.
- CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.
- [34] 潘根兴, 高建芹, 刘世梁, 等. 活化率指示苏南土壤环境中重金属污染冲击初探[J]. 南京农业大学学报, 1992, 22(2):46-49.
- PAN Gen-xing, GAO Jian-qin, LIU Shi-liang, et al. Activity index as an indicator of environmental stress of heavy metal elements on soils in Southern Jiangsu, China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*,

- 1992, 22(2):46-49.
- [35] Chen H M, Zhang C R, Wang S Q, et al. Combined pollution and pollution index of heavy metals in red soil[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(2): 117-124.
- [36] 张媛媛. 重金属镉对黄瓜幼苗生理特性的影响及嫁接缓解镉毒害的生理机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
- ZHANG Yuan-yuan. Effect of cadmium on physiological characteristics of cucumber seedlings and physiological mechanisms of grafting to alleviate to cadmium toxicity[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [37] Meyer J S, The utility of the terms 'bioavailability' and 'bioavailability fraction' for metals[J]. *Marine Environmental Research*, 2002, 53(4):417-423.
- [38] Tudoreanu L, Phillips C J C. Modeling cadmium uptake and accumulation in plants[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 84:121-157.
- [39] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2006:304-306.
- LI Fa-hu. Soil physical chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:304-306.
- [40] 曾秀存, 许耀照, 张芬琴. 两种基因型龙葵对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):885-890.
- ZENG Xiu-cun, XU Yao-zhao, ZHANG Fen-qin. Difference of cadmium absorption and physiological responses to cadmium stress in two different *Solanum nigrum*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):885-890.
- [41] 张儒德, 李 军, 秦 利, 等. 辽宁省 5 种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):842-849.
- ZHANG Ru-de, LI Jun, QIN Li, et al. Study on the difference of cadmium absorption in five rice genotypes of Liaoning Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):842-849.
- [42] 王丽香, 范仲学, 张 欣, 等. 不同品种燕麦对镉胁迫响应的差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):14-20.
- WANG Li-xiang, FAN Zhong-xue, ZHANG Xin, et al. Responses of oat cultivars to cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):14-20.
- [43] 曹会聪, 栾兆擎, 王金达, 等. 黑土中镉、铅的化学形态分布及其植物效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2):312-317.
- CAO Hui-cong, LUAN Zhao-qing, WANG Jin-da, et al. Distribution of different forms of Cd and Pb and their collective effect on plants in the black soils of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2008, 16(2):312-317.
- [44] 欧阳喜辉, 赵玉杰, 刘凤枝, 等. 不同种类蔬菜对土壤镉吸收能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):67-70.
- OUYANG Xi-hui, ZHAO Yu-jie, LIU Feng-zhi, et al. Absorption ability of different types of vegetables for soil Cd in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):67-70.
- [45] JECFA. Evaluation of certain food additives and the contaminants[C]// Seventy-third report of the joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives Geneva: FAO/WHO, 2010.
- [46] 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.
- WU Lin-xia, DING Xiao-xia, LI Pei-wu, et al. Assessment on contamination of rape seeds and safety of rapeseed oil in China[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2016(1):41-46.
- [47] 中华人民共和国卫生部. 中国膳食指南(2007)[M]. 拉萨:西藏人民出版社, 2008:9-12.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. The Chinese dietary guidelines[M]. Lasa: the Tibet People's Publishing House, 2008: 9-12.