



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

冬油菜替代种植技术对华北典型镉铅污染农田适用性研究

曹柳, 何孟轲, 杨俊兴, 郑国砥, 郭俊梅, 孟晓飞, 李玉峰

引用本文:

曹柳,何孟轲,杨俊兴,郑国砥,郭俊,孟晓飞,李玉峰. 冬油菜替代种植技术对华北典型镉铅污染农田适用性研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 261–270.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0222>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

郴州尾矿区不同油菜品种对重金属吸收积累特性的比较

杨洋, 黎红亮, 陈志鹏, 廖柏寒, 曾清如

农业资源与环境学报. 2015(4): 370–376 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0210>

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>

氮肥对油菜在不同土壤中吸收积累Cd的影响

张琦, 杨洋, 涂鹏飞, 谭可夫, 罗艳丽, 曾清如

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0053>

成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价

刘海涛, 陈一兵, 田静, 林超文

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 184–191 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0164>

赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响

方雅瑜, 邹慧玲, 尹晓辉, 陈楠, 杨登, 魏祥东

农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 466–476 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0080>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹柳, 何孟珂, 杨俊兴, 等. 冬油菜替代种植技术对华北典型镉铅污染农田适用性研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 261–270.

CAO L, HE M K, YANG J X, et al. Study on the applicability of winter rape alternative planting technologies on cadmium and lead polluted farmland soil in north China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 261–270.

冬油菜替代种植技术对华北典型镉铅污染农田适用性研究

曹柳¹, 何孟珂^{2,3}, 杨俊兴^{2,3*}, 郑国砥^{2,3}, 郭俊梅⁴, 孟晓飞^{2,3}, 李玉峰^{2,3}

(1. 济源市环境科学研究和宣传教育中心, 河南 济源 459000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600)

摘要:为探究冬油菜替代种植技术在我国华北地区镉(Cd)、铅(Pb)污染农田土壤中的适用性特征,本研究在河南省济源市Cd、Pb污染农田开展田间试验,选用冬油菜(*Brassica napus*)秦油1号和三月黄为供试植物,在不同大气沉降和土壤污染程度条件下研究两种供试油菜不同部位中Cd、Pb含量及富集量,油菜对土壤中Cd、Pb的去除率,以及菜籽油和饼粕中Cd、Pb含量。结果表明,秦油1号油菜生物量普遍高于三月黄。三月黄油菜对Cd富集量较高,达 $9.469\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,秦油1号对Pb富集量较高,达 $53.856\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,整体上两种油菜对土壤中Cd的去除率(0.081%~0.843%)高于对Pb的去除率(0.000 6%~0.074 3%)。在大气沉降程度较低但土壤污染严重的试验区,两种油菜吸收的Cd均集中在茎部,Pb集中在根部;而在大气沉降程度较高的试验区,不同的土壤污染程度下,油菜将吸收的Cd、Pb更多富集在茎部。在常规物理压榨和丁烷低温萃取两种不同制油工艺处理下,菜籽毛油和饼粕中Cd、Pb含量均较低,符合国家相关标准,菜籽油可安全食用,油菜饼粕可作为饲料或有机肥利用。综上,在我国华北地区典型大气沉降及重金属污染农田,单作冬油菜替代种植技术具有一定的应用和推广价值,可实现重金属污染农田安全利用。

关键词:镉;铅;污染农田土壤;油菜;替代种植;富集

中图分类号:X53;S565.4 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)02-0261-10 doi: 10.13254/j.jare.2022.0222

Study on the applicability of winter rape alternative planting technologies on cadmium and lead polluted farmland soil in north China

CAO Liu¹, HE Mengke^{2,3}, YANG Junxing^{2,3*}, ZHENG Guodi^{2,3}, GUO Junmei⁴, MENG Xiaofei^{2,3}, LI Yufeng^{2,3}

(1. Center for Publicity and Education, Environmental Science Research, Jiyuan of Henan Province, Jiyuan 459000, China; 2. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

Abstract: Field experiments were carried out in cadmium (Cd) and lead (Pb) contaminated soil in Jiyuan City, Henan Province to explore the applicability of winter rape alternative planting technologies in Cd- and Pb-contaminated farmland soils in north China. Winter rape (*Brassica napus*) Qinyou-1 (QY-1) and Sanyuehuang (SYH) were selected as the test plants. The Cd and Pb contents in different parts of the rape, the enrichment amount, the removal efficiency, and the Cd and Pb content in the rapeseed oil and meal were determined in the experiment. Results showed that the biomass of the rape in QY-1 was generally higher than that in SYH. The enrichment of Cd was higher

收稿日期:2022-04-21 录用日期:2022-06-07

作者简介:曹柳(1979—),女,河南济源人,本科,高级工程师,主要研究方向为土壤重金属污染修复与安全利用。E-mail:dwzh2008@126.com

*通信作者:杨俊兴 E-mail:yangajx@igsrr.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1802604);国家自然科学基金项目(41771509,41907125);人才培养质量建设-高水平人才交叉培养计划-实培计划项目(PXM2020_014207_000009)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFC1802604); The National Natural Science Foundation of China(41771509,41907125); Personnel Training Quality Construction-Cross Training Plan for High-level Talents-Practical Training Program of Beijing, China(PXM2020_014207_000009)

in SYH up to $9.469 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the enrichment of Pb in QY-1 was higher up to $53.856 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$. The removal efficiency of Cd ($0.081\% - 0.843\%$) of the two rapes was overall higher than that of Pb ($0.000\% - 0.074\%$). In the experimental area with low atmospheric deposition but severe soil pollution, the Cd absorbed by the two rape cultivars was concentrated in the stem, while Pb was concentrated in the root. In the experimental area with higher atmospheric deposition, the Cd and Pb absorbed were more enriched in the pod of the rape, although the degree of soil pollution was different. The experiment used conventional physical pressing technology and the low temperature extraction technology of butane. Under the two different oil-making processes, the Cd and Pb contents in the rapeseed crude oil and meal were lower, which met the relevant national standard limits. The rapeseed oil can enter the market for safe sale and consumption and the rapeseed meal can be used as feed or organic fertilizer. In conclusion, the alternative planting method of using rape for restoration, production, and efficiency enhancement in heavy metal-contaminated soils in northern China has strong applicability and a high application value.

Keywords: cadmium; lead; contaminated farmland soil; rape; alternative planting; enrichment

近年来,伴随着矿山开采冶炼、工业生产活动、农业土地高度利用、城镇化快速发展等,我国部分地区土壤环境质量明显下降,重金属污染日益加重^[1]。2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》中数据显示,我国土壤镉(Cd)的点位超标率最高,为7.0%,铅(Pb)的点位超标率达1.5%,耕地土壤重金属污染点位超标率达19.4%^[2-3]。重污染企业周边土壤超标率36.3%,受重金属污染的农田土壤约2 500万 hm^2 ^[4]。土壤中重金属被植物吸收积累,通过食物链、食物网进入动物体内,可能导致粮食安全问题和人畜健康隐患^[5]。因此,重金属污染农田的作物生产与安全利用,成为当前农田土壤重金属污染修复研究领域备受关注的问题。

有色金属冶炼厂周边环境大气沉降是我国华北地区土壤重金属的主要来源之一,河南省济源市大气沉降导致农田Cd、Pb污染严重,局部地区已超出我国现行土壤环境质量标准。与植物修复技术中的超富集植物相比,替代种植技术常采用生物量较高的粮食作物或经济作物,在修复的同时产生一定的经济效益,从而实现污染农田安全高效利用。郭利双等^[6]研究发现,在湖南重度Cd污染区通过棉花对Cd的高吸收、高积累实现土壤修复,同时有效利用Cd污染土壤创造经济价值是可行的。张道微等^[7]在典型Cd重度污染稻田种植结构调整区域开展了甘薯替代种植模式的生产研究,发现甘薯成片种植时高产稳产性较好,Cd含量未超过限量值,可实现安全生产。研究发现,向日葵(*Helianthus annuus*)^[8]、油葵(*H. annuus*)^[9]和蓖麻(*Ricinus communis*)^[10]等都可作为替代种植植物,实现污染耕地的高效安全利用。

油菜(*Brassica napus*)是十字花科、芸薹属草本植物,在我国各地广泛种植,是我国第一大油料作物,也

可经加工生产畜牧业饲料^[11]。有关研究发现,油菜对Cd、Pb、Cu等多种重金属具有较强的富集能力,并且能保持较高生物量,可作为土壤重金属污染修复材料^[12-13]。武琳霞等^[14]分析Cd在油菜各器官中的分布,发现Cd主要富集于油菜根部,其次是茎和角果皮,油菜籽中Cd含量最低。Bian等^[15]研究提出种植油菜联合壳聚糖处理可用于我国轻度和中度Cd污染农田土壤的原位植物修复。易镇邪等^[16]在湖南省湘潭县中度Cd污染稻田开展研究发现,油菜-中稻替代双季稻种植技术在种植季节、产量、经济效益和籽粒Cd含量上均表现出明显优势。

本研究以前期筛选出的冬油菜品种秦油1号和三月黄为研究对象,在我国华北地区污染企业周边典型重金属沉降区农田开展规模化种植试验,研究两种油菜在Cd、Pb污染农田中的生长状况,重金属Cd、Pb富集特征,土壤中Cd、Pb去除率以及油菜籽粒中的Cd、Pb含量,并采用两种不同制油工艺比较评估冬油菜替代种植模式的效益与安全性,以期明确冬油菜替代种植技术在中轻度Cd、Pb污染农田土壤上的适应性与可行性。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验在河南省济源市克井镇土壤重金属污染修复研究基地进行,该地属温带大陆性季风气候区,年平均气温 14.6°C ,降水量860 mm,土壤类型为褐土。该地区土壤重金属主要来源于周边有色金属冶炼厂污染产生的大气沉降。在研究基地选取塘石(距离污染企业3.2~7.2 km)、北社(距离污染企业5.8~8.9 km)和大庄(距离污染企业17.1~24.3 km)3个试验区,各试验区与重点污染企业的位置信息如图1所示。土

壤基本理化性质采用土壤农化常规分析方法测定,各试验区土壤基本理化性质调查结果如表1所示。

1.2 试验方案

试验以油菜品种秦油1号(QY-1)和三月黄(SYH)为供试植物。剥离塘石试验区0~60 cm污染土(1 334 m²)和大庄试验区0~60 cm清洁土(1 334 m²)进行交换,在剥离土壤区域下方铺垫塑料防水层,防止表层土壤中重金属的淋溶损失。试验开展前对各试验地块土壤进行采样调查,地块基本参数如表2所示。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),塘石、北社和大庄移土地块土壤中Cd含量均超过土壤污染风险筛选值

(0.6 mg·kg⁻¹,pH>7.5),塘石和北社地块土壤中Pb含量超过土壤污染风险筛选值(170 mg·kg⁻¹,pH>7.5)。试验设两个处理:秦油1号和三月黄,每个处理3个重复,设置小区面积为10 m×10 m,于2020年10月将油菜种子沟施条播于各地块试验小区中,种植密度为10 m×30 cm(株距×垄距),田间管护按照当地常规种植模式进行,次年5月油菜成熟期收集植物样品。

1.3 样品采集与分析

油菜种植前各试验地块采集0~20 cm表层土壤样品,自然风干后,研磨并分别过2 mm和0.15 mm筛。土壤Cd、Pb全量测定依据美国环保局USEPA 3050B方法,称取过0.15 mm筛后的土壤样品0.2 g到50 mL三角瓶中,采用HNO₃-H₂O₂法进行消解,测定表层土壤Cd、Pb含量。油菜安全越冬后,于成熟期按五点采样法采集各试验地块油菜根、茎、荚、籽粒。用去离子水充分洗净,放至烘箱中105℃杀青30 min,于65℃烘干至恒质量,备用。同时每个地块随机选取3个油菜长势均匀的1 m²小区测产,测定油菜地上部、根部、籽粒总生物量。将成熟期收获的不同品种油菜籽用去离子水洗净,于65℃烘干至恒质量,分别在试验区当地油坊和河南亚临界萃取技术研究院,采用常规物理压榨技术和丁烷低温萃取技术制取菜籽毛油,获得饼粕。

植物样品中Cd、Pb含量采用浓HNO₃和HClO₄(5:1,V:V)进行湿法消解,消解完全后过滤、定容至50 mL。菜籽油中Cd、Pb含量按照《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)进行

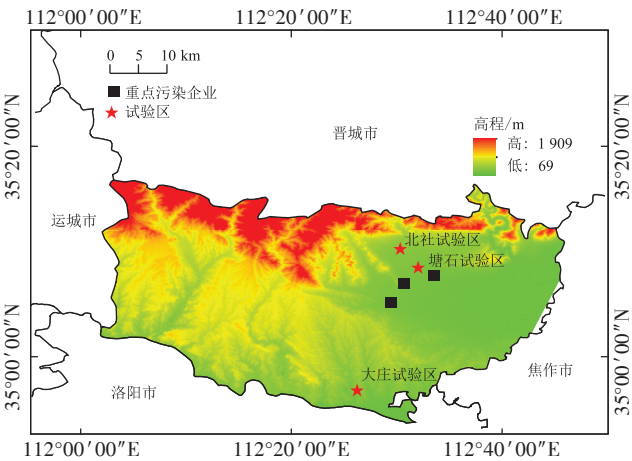


图1 不同试验区与污染源的位置和距离信息

Figure 1 Location and distance information of the plots and pollution sources

表1 试验区土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the test areas

试验区 Location	pH	阳离子交换量 Cation exchange content/(mmol·kg ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	有机质 Organic mater/ (g·kg ⁻¹)	总氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	总磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	总钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)
塘石试验区	7.70	20.1	1.34	19.4	1.18	0.86	26.6
北社试验区	7.46	19.2	1.32	22.2	1.29	0.80	21.3
大庄对照区	7.62	17.1	1.21	22.3	1.25	0.92	26.9

表2 不同污染地块信息

Table 2 Information of different contaminated plots

试验区 Location	地块 Plot	经纬度 Latitude and longitude	土壤污染程度 Soil pollution level/(mg·kg ⁻¹)		与重点污染企业距离 Distance from major polluting enterprises/km	大气沉降状况 Atmospheric deposition/(kg·km ⁻² ·a ⁻¹)	
			Cd	Pb		Cd	Pb
塘石试验区	塘石(TS)	112°31'30"E,35°08'34"N	1.94	201.51	3.2~7.2	22.0	367.0
	塘石移土(TSYT)	112°31'35"E,35°08'30"N	0.32	29.95	3.2~7.2	22.0	367.0
北社试验区	北社(BS)	112°29'48"E,35°10'20"N	1.01	180.82	5.8~8.9	7.95	141.6
大庄试验区	大庄移土(DZYT)	112°25'43"E,34°56'54"N	1.25	162	17.1~24.3	1.68	28.5

测定。饼粕中Cd、Pb含量检测方法与植物样品相同。测定仪器采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Elan DRC-e, Perkin Elmer, 美国), Cd含量仪器检出限0.001 mg·kg⁻¹, Pb含量仪器检出限0.02 mg·kg⁻¹, 设置空白标准和植物标准物质(GBW-07603)进行化学分析质量控制(95%±5%)。

1.4 去除率

通过油菜重金属提取量与试验区表层土壤(0~20 cm)重金属总量的比值来计算去除率, 评估油菜应用于中轻度Cd、Pb污染农田的修复效果。计算公式如下:

$$P = \frac{C_I}{C_{II}} = \frac{\sum B_i \times C_i}{s \times h \times v \times C_j} \quad (1)$$

式中: P 为污染土壤中油菜对重金属的去除率, %; C_I 为油菜重金属提取量, mg; C_{II} 为表层污染土壤重金属总量, mg; B_i 为油菜各部位生物量, kg; C_i 为油菜各部位重金属含量, mg·kg⁻¹; s 为污染土壤面积, cm²; h 为表层土壤深度, cm; v 为试验区土壤容重, g·cm⁻³; C_j 为污染土壤重金属含量, mg·g⁻¹。

1.5 统计分析

使用Microsoft Excel 2007软件进行数据相关计算, 试验结果采用SPSS Statistics 19软件进行数据统计分析; 图表制作采用Origin Pro 2018完成。

2 结果与分析

2.1 不同污染地块油菜各部位重金属含量

不同污染地块种植的三月黄和秦油1号油菜成熟期根、茎、荚和籽粒Cd含量如表3所示。塘石、北社、塘石移土、大庄移土4个地块油菜各部位平均Cd含量分别为0.15~1.93、0.11~0.95、0.08~1.18、0.12~1.07 mg·kg⁻¹。塘石和北社地块中两种油菜均为荚中Cd含量最高, 显著高于其他部位, 其次为根茎, 籽粒中Cd含量最低。塘石移土地块中两种油菜各部位Cd含量由高到低为荚>茎>根>籽粒。大庄移土地块则为茎中Cd含量最高, 籽粒最低。同时, 除塘石地块油菜茎和塘石移土地块油菜根外, 各地块中三月黄油油菜各部位Cd含量均高于秦油一号。

两种油菜根、茎、荚和籽粒中Pb含量如表4所示。塘石、北社、塘石移土、大庄移土4个地块油菜各部位平均Pb含量分别为0.42~7.67、0.84~3.75、0.38~9.68、0.21~2.52 mg·kg⁻¹。塘石、北社和塘石移土地块中两种油菜均为荚中Pb含量显著高于其他部位, 而大庄移土地块中两种油菜则均为根中Pb显著高于其他部位($P<0.05$)。

各试验地块两种油菜不同部位Cd含量占油菜体内Cd总量的百分比分布如图2a所示, 不同部位Pb含

表3 不同污染地块两种油菜各部位重金属Cd含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 Cadmium content in different parts of two rape cultivars in different polluted plots(mg·kg⁻¹)

地块 Plot	三月黄SYH				秦油1号QY-1			
	根Root	茎Stem	荚Pod	籽粒Seed	根Root	茎Stem	荚Pod	籽粒Seed
塘石	0.30±0.10Bb	0.22±0.03Bc	1.93±0.16Aa	0.36±0.07Ba	0.15±0.02Bc	0.24±0.05Bb	1.00±0.10Aa	0.15±0.02Ba
北社	0.45±0.07Bab	0.48±0.11Bbc	0.95±0.11Ab	0.26±0.02Bab	0.29±0.07Bbc	0.26±0.05Bb	0.63±0.03Abc	0.11±0.01Ca
大庄移土	0.67±0.02ABa	1.07±0.26Aa	1.02±0.24Ab	0.30±0.04Bab	0.54±0.09ABa	0.77±0.03Aa	0.50±0.10Bc	0.12±0.01Ca
塘石移土	0.37±0.11BCb	0.79±0.22ABab	1.18±0.14Ab	0.19±0.07Cb	0.40±0.08Bab	0.77±0.15Aa	0.78±0.07Aab	0.08±0.02Ba

注: 表中数据为平均值±标准误($n=3$)。不同大写字母表示不同部位间差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示不同污染地块间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data are Mean±SE($n=3$). Different capital letters indicate significant differences among different parts at $P<0.05$, and different lowercase letters indicate significant differences among different polluted plots at $P<0.05$. The same below.

表4 不同污染地块两种油菜各部位重金属Pb含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 Lead content in different parts of two rape cultivars different polluted plots(mg·kg⁻¹)

地块 Plot	三月黄SYH				秦油1号QY-1			
	根Root	茎Stem	荚Pod	籽Seed	根Root	茎Stem	荚Pod	籽Seed
塘石	1.08±0.32Bb	0.42±0.07Bb	5.90±0.71Ab	0.47±0.11Bb	0.90±0.25Ba	0.66±0.09Bb	7.67±1.05Ab	1.94±0.14Ba
北社	3.02±0.57Aa	0.84±0.10Bb	3.75±0.30Ac	1.45±0.23Ba	2.37±0.48Ba	0.57±0.10Cb	3.56±0.17Ac	1.12±0.09Cab
大庄移土	2.11±0.42Aab	0.98±0.25Bb	0.81±0.03Bd	0.21±0.09Bb	2.52±0.94Aa	0.59±0.14Bb	1.30±0.24ABd	0.23±0.12Bc
塘石移土	2.36±0.71BCab	2.52±0.39Ba	8.79±0.81Aa	0.38±0.21Cb	2.72±0.94BCa	3.95±0.98Ba	9.68±0.57Aa	0.50±0.25Cbc

量占油菜体内 Pb 总量的百分比分布如图 2b 所示。塘石和大庄移土地块土壤污染程度相同的条件下,大气沉降污染严重的塘石地块种植的油菜 Cd、Pb 主要分布在豆荚中,三月黄和秦油 1 号油菜豆荚中 Cd 含量占比分别达 68.6%、65.0%,豆荚中 Pb 含量占比分别达 74.9%、68.7%。无大气沉降的大庄移土地块种植的油菜中 Cd 主要分布在茎部,Pb 主要分布在根部,三月黄和秦油 1 号油菜根部 Pb 含量占比分别为 51.4%、54.3%。塘石移土试验地块土壤无污染但大气沉降污染严重,三月黄和秦油 1 号油菜吸收的 Cd 主要富集在茎、荚中,占比为 31.2%~46.6%,Pb 主要富集在荚中,占比分别为 62.6% 和 57.4%。

2.2 不同污染地块油菜生物量及重金属富集量

油菜成熟期不同污染地块中两种油菜地上部、根部和籽粒生物量如表 5 所示。两种油菜地上部生物量为 3 425.38~15 619.29 kg·hm⁻²、根部生物量为 168.53~1 146.67 kg·hm⁻²、籽粒生物量为 931.70~5 701.04 kg·hm⁻²。秦油 1 号油菜在塘石地块生物量最高,塘石移土地块次之;三月黄油菜在北社地块生物量最高,塘石地块次之;两种油菜均在大庄移土地块生物量最低。整

体来看,秦油 1 号油菜生物量普遍高于三月黄油菜。不同试验地块油菜 Cd、Pb 富集量及去除率如表 6、表 7 所示。不同地块的土壤污染状况和大气沉降水平存在差异,两种油菜的重金属富集量和去除率也不同。两种油菜的地上部 Cd 富集量均高于根部 Cd 富集量,三月黄油菜在塘石地块对 Cd 的总富集量最高,达 9.469 g·hm⁻²,秦油 1 号油菜在塘石移土地块 Cd 总富集量最高,达 6.511 g·hm⁻²。各地块三月黄油菜 Cd 去除率为 0.081%~0.518%,秦油 1 号油菜 Cd 去除率为 0.094%~0.843%。两种油菜均在塘石移土地块达到最高 Cd 去除率,而在大庄移土地块 Cd 去除率最低。

两种油菜的地上部 Pb 富集量均高于根部 Pb 富集量。三月黄油菜在塘石地块对 Pb 的总富集量最高,达 27.583 g·hm⁻²,秦油 1 号油菜在塘石移土地块 Pb 总富集量最高,达 53.856 g·hm⁻²。各地块中两种油菜对 Pb 的去除率由高到低依次为塘石移土>塘石>北社>大庄移土。三月黄油菜 Pb 去除率为 0.000 6%~0.029 5%,秦油 1 号油菜 Pb 去除率为 0.001 2%~0.074 3%。

2.3 不同污染地块菜籽油中重金属含量

将各地块收获的三月黄和秦油 1 号油菜籽粒样

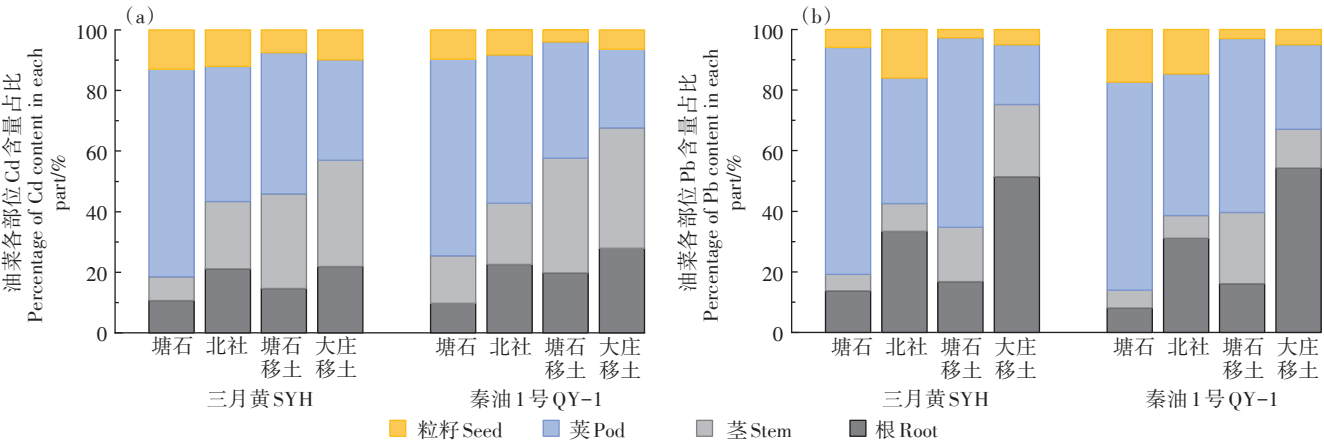


图2 试验地块两种油菜各部位重金属 Cd、Pb 含量分布

Figure 2 Distribution of Cd or Pb content in each part of two rape cultivars in different plots

表 5 不同地块油菜品种各部位生物量(kg·hm⁻²)

Table 5 Biomass in different parts of two rape cultivars in different plots(kg·hm⁻²)

地块 Plot	品种 Cultivar	地上部 Aboveground	根部 Root	籽粒 Seed
塘石	三月黄	13 597.93±1 600.67ab	766.67±110.60ab	3 698.64±435.38bc
	秦油 1 号	15 619.29±3 704.15a	1 030±115.33a	5 701.04±1 352.01a
北社	三月黄	14 504.15±893.92ab	610±26.46bc	3 945.13±243.15b
	秦油 1 号	9 166.71±1 722.41bc	1 146.67±176.16a	3 401.27±576.85bc
大庄移土	三月黄	3 425.38±44.44d	168.53±2.19d	931.70±12.09d
	秦油 1 号	6 743.82±1 850.50cd	644.04±176.72bc	2 461.50±675.43cd
塘石移土	三月黄	5 737.07±1 435.55cd	282.26±70.63cd	1 702.48±263.86cd
	秦油 1 号	11 295.06±2 665.81abc	1 078.68±254.58a	4 122.70±973.02ab

表6 不同地块两种油菜Cd去除率

Table 6 Cadmium removal efficiency of two rape cultivars in different plots

地块 Plot	品种 Cultivar	地上部Cd富集量 Aboveground Cd enrichment/(g·hm ⁻²)	根部Cd富集量 Root Cd enrichment/(g·hm ⁻²)	总Cd富集量 Total Cd enrichment/(g·hm ⁻²)	Cd去除率 Removal efficiency/%
塘石	三月黄	9.241	0.228	9.469	0.182
	秦油1号	5.604	0.154	5.758	0.111
北社	三月黄	7.116	0.274	7.390	0.278
	秦油1号	2.410	0.331	2.741	0.103
大庄移土	三月黄	2.611	0.112	2.723	0.081
	秦油1号	2.797	0.348	3.145	0.094
塘石移土	三月黄	3.871	0.129	4.000	0.518
	秦油1号	6.125	0.386	6.511	0.843

表7 不同地块两种油菜Pb去除率

Table 7 Lead removal efficiency of two rape cultivars in different plots

地块 Plot	品种 Cultivar	地上部Pb富集量 Aboveground Pb enrichment/(g·hm ⁻²)	根部Pb富集量 Root Pb enrichment/(g·hm ⁻²)	总Pb富集量 Total Pb enrichment/(g·hm ⁻²)	Pb去除率 Removal efficiency/%
塘石	三月黄	26.753	0.830	27.583	0.005 1
	秦油1号	36.495	0.922	37.417	0.006 9
北社	三月黄	21.638	1.839	23.477	0.004 9
	秦油1号	10.702	2.716	13.418	0.002 8
大庄移土	三月黄	2.272	0.356	2.628	0.000 6
	秦油1号	3.845	1.623	5.468	0.001 2
塘石移土	三月黄	20.578	0.830	21.408	0.029 5
	秦油1号	50.246	3.610	53.856	0.074 3

品分别采用常规物理压榨技术和丁烷低温萃取技术制取菜籽油,籽粒及所得菜籽油中重金属Cd、Pb含量如表8所示。两种制油工艺所得菜籽油中Cd、Pb含量均明显低于油菜籽中Cd、Pb含量。常规物理压榨技术所得三月黄菜籽油中Cd含量为0.001~0.004 mg·kg⁻¹, Pb含量均低于检出限0.02 mg·kg⁻¹;秦油1号菜籽油中Cd含量均为0.002 mg·kg⁻¹, Pb含量均低于检出限0.02 mg·kg⁻¹。丁烷低温萃取技术所得菜籽油中Cd含量均小于0.001 mg·kg⁻¹, Pb含量为0.02~0.039 mg·kg⁻¹。根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中油脂含Pb限量标准(0.1 mg·kg⁻¹),以市场上两种成品油Cd含量作为对照,两种制油技术所得的菜籽油中Pb含量均符合国家标准要求,常规物理压榨技术所得菜籽油中Cd含量略高于市场油,丁烷低温萃取技术所得菜籽油中Cd含量均低于市场油。

2.4 不同污染地块菜籽饼粕中重金属含量

油菜籽饼粕为油菜籽榨油过程副产物,不同污染地块两种油菜饼粕中Cd、Pb含量如表9所示。总体上,三月黄油菜饼粕中Cd、Pb含量高于秦油1号。

两种制油工艺所得三月黄油菜饼粕中Cd、Pb含量分别为0.276~0.791、3.280~7.370 mg·kg⁻¹;秦油1号油菜饼粕中Cd、Pb含量分别为0.244~0.778、2.625~9.560 mg·kg⁻¹。常规物理压榨和丁烷低温萃取两种工艺处理所得油菜饼粕中Cd、Pb含量均低于《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)中的限值(Cd: 1 mg·kg⁻¹, Pb: 10 mg·kg⁻¹),也均符合《有机肥料标准》(NY 525—2012)中限值要求(Cd: 3 mg·kg⁻¹, Pb: 50 mg·kg⁻¹)。

3 讨论

本研究中塘石、北社和大庄移土地块的土壤Cd、Pb含量超出我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值(pH>7.5),属轻中度Cd、Pb污染农田土壤。前期研究表明,三月黄和秦油1号两种油菜在此地块中均能安全越冬、正常生长,表明三月黄和秦油1号两种油菜均有较好的耐重金属胁迫能力。土壤理化特征不同和油菜品种特性对油菜的生物量和产量影响较大,不同地块种植的三月黄或秦油1号油菜生物量存在

一定差异,整体上秦油1号油菜生物量普遍高于三月黄油菜,这与Cao等^[17]的相关性分析结果一致。在同时受土壤重金属胁迫和大气沉降影响的塘石、北社试验地块,两种油菜的生物量明显高于只有大气沉降影响的塘石移土地块。这可能是因为三月黄和秦油1号油菜对Cd、Pb胁迫存在一定的调节机制^[18],较低浓度的Cd、Pb复合胁迫能促进油菜生长。孙刚等^[19]研究发现两种油菜品种在多金属胁迫下可以产生对应补偿机制来抑制重金属的毒害作用。宗良纲等^[20]发现较低浓度Cd、Pb对青菜、白菜和菠菜等蔬菜生长具有一定促进作用,低质量分数的Cd、Pb可以刺激向日葵幼苗茎叶脯氨酸的生成,并促进其生长^[21],这与本研究结果一致。此外,本研究中大庄移土和塘石移土地块换土、铺设防水层过程中扰动土层,可能影响油菜对水

分和营养物质的吸收,其原因还需进一步验证。

油菜生长期短、生物量高且可以承受较强的重金属胁迫,具有巨大的重金属富集潜力^[22]。本研究结果显示,三月黄和秦油1号油菜均具有一定的Cd、Pb富集能力。品种差异和不同污染条件导致两种油菜的Cd、Pb富集能力不同,在土壤污染程度较高且存在大气污染沉降的塘石和北社地块,三月黄油菜对Cd富集量较高,而各试验地块中秦油1号对Pb的富集量高于三月黄。塘石地块和大庄移土地块种植的油菜Cd、Pb富集量存在差异,反映重金属大气沉降输入对油菜富集量存在影响。总体来看,两种油菜对土壤中Cd的去除率高于Pb的去除率,可能因为Pb占据土壤中Cd的吸附位点,通过化学反应生成沉淀固定在土壤中,进而不易被油菜根系吸收^[23]。

表8 油菜籽及不同制油工艺所得菜籽油中Cd、Pb含量(mg·kg⁻¹)

Table 8 Contents of Cd and Pb in rapeseed and rapeseed oil obtained by different oil making processes(mg·kg⁻¹)

地块 Plot	品种 Cultivar	油菜籽 Rapeseed		常规物理压榨技术 Conventional physical pressing		丁烷低温萃取技术 Butane low temperature extraction	
		Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb
塘石	三月黄	0.363	0.468	0.001	<0.02	<0.001	0.023
	秦油1号	0.148	1.940	0.002	<0.02	<0.001	0.022
北社	三月黄	0.337	0.910	0.002	<0.02	<0.001	0.026
	秦油1号	0.105	0.980	0.002	<0.02	<0.001	0.039
大庄移土	三月黄	0.301	0.207	0.004	<0.02	<0.001	<0.02
	秦油1号	0.122	0.230	0.002	<0.02	<0.001	<0.02
塘石移土	三月黄	0.186	0.378	0.004	<0.02	<0.001	<0.02
	秦油1号	0.084	0.498	0.002	<0.02	<0.001	<0.02
	市场油-1			0.002	<0.02	0.002	<0.02
	市场油-2			0.002	<0.02	0.002	<0.02

表9 油菜籽饼粕中重金属Cd、Pb含量(mg·kg⁻¹)

Table 9 Contents of Cd and Pb in rapeseed meal(mg·kg⁻¹)

地块 Plot	品种 Cultivar	常规物理压榨技术 Conventional physical pressing		丁烷低温萃取技术 Butane low temperature extraction	
		Cd	Pb	Cd	Pb
塘石	三月黄	0.298	3.280	0.791	3.893
	秦油1号	0.778	9.560	0.377	3.632
北社	三月黄	0.374	5.060	0.515	4.922
	秦油1号	0.247	2.750	0.244	2.625
大庄移土	三月黄	0.512	7.370	0.276	3.905
	秦油1号	0.244	3.550	0.417	3.820
塘石移土	三月黄	0.469	5.390	0.791	3.893
	秦油1号	0.245	2.830	0.377	3.632
《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)		1	10	1	10
《有机肥料标准》(NY 525—2012)		3	50	3	50

注:《饲料卫生标准》中未规定油菜籽饼粕Cd、Pb含量标准,因此Cd含量标准参照植物性饲料原料,Pb含量标准参照其他饲料原料。

Note: As the feed hygiene standard has no reference standard for the Cd and Pb content of rapeseed meal, the Cd content refers to plant feed raw materials, and the Pb content refers to other feed raw materials.

重金属被油菜根系吸收后,会向茎、荚、籽粒中转运,且受相应重金属转运蛋白的种类及数量影响^[24]。在重金属胁迫下,油菜可以通过基因扩增产生大量的转运蛋白,将根系吸收的重金属转运到地上部并在地上部累积^[25-26]。不同试验地块中,Cd、Pb在油菜各部位的积累分布存在差异。无大气沉降污染输入的大庄移土地块,两种油菜吸收的Cd均集中在茎部,Pb集中在油菜根部,这与方慧等^[27]和周旭丹等^[28]的研究结果一致。而同时存在土壤污染和大气沉降污染的塘石、北社地块中,油菜荚中Cd、Pb含量最高,根茎次之,籽粒中含量较少。对不同品种油菜各部位Cd、Pb含量与大气沉降输入量和土壤重金属含量进行皮尔逊相关性分析,结果如表10所示。油菜根、茎中Cd含量与大气沉降输入量、土壤Cd含量呈负相关关系,荚中Cd含量与大气沉降输入量呈极显著正相关;油菜茎中Pb含量与土壤中Pb含量呈极显著负相关,籽粒中Pb含量与土壤Pb含量呈显著正相关,与大气沉降Pb输入量呈极显著正相关。这说明油菜Cd、Pb积累受土壤污染和大气沉降的双重影响,且受大气沉降影响更大。大气沉降输入是当地土壤重金属污染的主要来源。油菜除通过根系吸收土壤中重金属外,地上部分也会吸收大气沉降中重金属,影响重金属在油菜各部位的分布情况。Ma等^[29]研究发现,小麦地上部也可通过气孔吸收大气沉降中的Pb,并将其转移到谷物中。Guo等^[30]采用主成分分析方法研究发现,油菜籽粒中Pb主要来自大气沉降。代天飞等^[31]分析存在大气飘尘污染的成都平原油菜各器官对重金属的累积特征,结果表明Cd、Pb在油菜各部位的累积规律为荚>茎部>根部>籽粒,这与本研究结果一致。

表10 油菜各部位Cd、Pb含量与试验区大气沉降量、土壤重金属含量的皮尔逊相关性分析

Table 10 Pearson correlation analysis of Cd and Pb content in different parts of rape with atmospheric deposition and soil heavy metal content in the test areas

重金属 Heavy metal	影响因素 Factor	根 Root	茎 Stem	荚 Pod	籽 Seed
Cd	土壤重金属含量	-0.408*	-0.427*	0.410*	0.256
	大气沉降输入量	-0.471*	-0.332	0.578**	0.158
	品种	-0.116	0.029	-0.055	0.032
Pb	土壤重金属含量	-0.307	-0.877**	-0.219	0.465*
	大气沉降输入量	-0.074	0.141	0.340	0.618**
	品种	-0.601**	0.191	0.824**	0.031

注:*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$,***表示 $P<0.001$ 。

Note:* means $P<0.05$, ** means $P<0.01$, and *** means $P<0.001$.

冬油菜是我国主要的油料作物之一,菜籽油是我国第一大自产食用植物油,约占我国自产食用植物油的50%^[32-33]。此外,菜籽饼粕氨基酸组成平衡,是仅次于大豆饼粕的重要饲料蛋白源^[34],也可作为有机肥,提高土壤保墒保肥能力并给作物提供营养物质^[35]。饼粕中的氨基酸和蛋白质能与重金属形成络合物,从而降低菜籽油中的重金属含量^[36]。根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)对油脂中Pb的限量规定($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),常规物理压榨技术和丁烷低温萃取技术得出的菜籽油中Pb含量均符合国家标准。菜籽油中Cd含量保持在 $0.001 \sim 0.004 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,与市场油中Cd含量基本持平,对人体潜在健康风险较小。两种工艺处理所得油菜饼粕中Cd、Pb含量均低于《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)中的限值,也均符合《有机肥料标准》(NY 525—2012)中限量要求。

近年来,国内外围绕农田土壤污染末端修复与安全利用技术开展了较多研究,利用植物吸收积累重金属的种间差异,优选低积累作物品种,调整种植结构^[37]。现有研究已筛选出大麦、玉米、大豆、甘薯、马铃薯、油菜等重金属低积累粮油作物品种^[38-39],以及油麦菜、芹菜、甘蓝、白菜、空心菜等低积累蔬菜品种^[40],适用于中轻度污染耕地修复与安全利用。重金属污染较为严重的地区可以采用种植非食用性经济作物(如纤维类植物苧麻、棉花、桑树等)、花卉苗木(狼尾草、鸭脚木、鸡爪槭、金边岑叶槭等)以及能源植物(甘蔗、蓖麻等)来治理修复污染土壤^[41-42]。由于各作物品种具有地区特异性,且各地区土地利用方式多样、土壤重金属污染类型不同,替代种植技术的应用推广受到一定限制,需充分考虑气候条件、土壤环境以及水肥管理措施对植物吸收转运重金属的影响。华北地区作为我国重要的商品粮生产基地,是我国传统的小麦、玉米、大豆、油菜和棉花主产区^[43]。相比蔬菜、花卉苗木和能源植物,油菜对华北地区地理气候环境有较好的生态适应性,耐低温,生育期短,适产性更高,易于大面积推广种植。因此,在我国华北地区污染企业周边典型重金属沉降农田开展油菜替代种植,具有实际可操作性和高应用价值,是一种边修复、边生产、边收益的污染农田安全利用模式。

4 结论

(1)秦油1号油菜生物量普遍高于三月黄油菜。两种油菜对土壤中Cd的去除率高于对Pb的去除率。

油菜对Cd、Pb的吸收积累受土壤Cd、Pb含量和大气沉降量影响,且受大气沉降影响更大。只受土壤污染影响的大庄试验区两种油菜吸收的Cd均集中在茎部,Pb集中在根部,而存在大气沉降的塘石和北社试验区,油菜则将吸收的Cd、Pb更多地转移到豆荚中。

(2)常规物理压榨和丁烷低温萃取两种制油工艺处理后,菜籽油和饼粕中Cd、Pb含量均符合国家相关标准。菜籽油可进入市场安全食用,油菜饼粕可作为饲料或有机肥利用。

(3)在我国华北地区大气重金属沉降Cd、Pb复合污染农田采取单作冬油菜一年一熟制的替代种植技术,能够实现边修复、边生产、边增效的重金属污染农田安全利用。

参考文献:

- [1] 刘鹏,胡文友,黄标,等.大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J].土壤学报,2019,56(5):1048-1059. LIU P, HU W Y, HUANG B, et al. Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in soils and crops [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5):1048-1059.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].北京:环境保护部,国土资源部,2014. Ministry of Environmental Protection of China, Ministry of Land and Resources of China. National soil pollution survey bulletin[M]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of China, Ministry of Land and Resources of China, 2014.
- [3] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692. CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1689-1692.
- [4] 陈世宝,王萌,李杉杉,等.中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J].地学前缘,2019,26(6):35-41. CHEN S B, WANG M, LI S S, et al. Current status of and discussion on farm land heavy metal pollution prevention in China[J]. *Earth Science Frontier*, 2019, 26(6):35-41.
- [5] 徐建明,孟俊,刘杏梅,等.我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J].中国科学院院刊,2018,33(2):7. XU J M, MENG J, LIU X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):7.
- [6] 郭利双,何叔军,李景龙.镉污染区棉花替代种植技术研究[J].中国棉花,2016,43(11):5-8. GUO L S, HE S J, LI J L. Research progress on planting technology of cotton as a substitute crop in polluted area by Cd[J]. *China Cotton*, 2016, 43(11):5-8.
- [7] 张道微,赵修忠,张亚,等.镉污染稻田甘薯替代种植模式的应用[J].湖南农业科学,2021(11):51-54. ZHANG D W, ZHAO X Z, ZHANG Y, et al. Application of alternative planting pattern of sweet potato in paddy field polluted by cadmium[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(11):51-54.
- [8] 聂惠,安玉麟,李素萍.向日葵对重金属胁迫反应及其植物修复的研究进展[J].黑龙江农业科学,2010(9):88-91. NIE H, AN Y L, LI S P. Review on sunflower response and phytoremediation to heavy metal stress[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010(9):88-91.
- [9] 匡政成,陈浩东,李玉军,等.湖南棉田种植结构调整探讨——以油菜为例[J].湖南农业科学,2016(11):91-93. KUANG Z C, CHEN H D, LI Y J, et al. The exploration of planting structural adjustment in cotton fields: Take *Helianthus annuus* Linn. as a case[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(11):91-93.
- [10] 马灏.蓖麻、向日葵对Cd和Zn污染场地的原位修复试验研究[D].上海:上海大学,2015. MA H. Field scale phytoremediation experiments on a Cd and Zn contaminated site by *Ricinus communis* L. and *Helianthus annuus* L.[D]. Shanghai: Shanghai University, 2015.
- [11] 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. SHEN J X, FU T D. Rapeseed production, improvement and edible oil supply in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(1):1-8.
- [12] NAKAMURA S I, WONGKAEW A, NAKAI Y, et al. Foliar-applied glutathione activates zinc transport from roots to shoots in oilseed rape [J]. *Plant Science*, 2019, 283:424-434.
- [13] REN X M, GUO S J, TIAN W, et al. Effects of plant growth-promoting bacteria (PGPB) inoculation on the growth, antioxidant activity, Cu uptake, and bacterial community structure of rape (*Brassica napus* L.) grown in Cu-contaminated agricultural soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10:01455.
- [14] 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 L X, DING X X, LI P W, et al. Cadmium pollution of rapeseed and assessment of quality and safety of rapeseed oil in China[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2016(1):41-46.
- [15] BIAN J L, CAO W, GUO J M, et al. Water-soluble chitosan and phytoremediation efficiency of two *Brassica napus* L. cultivars in cadmium-contaminated farmland soils[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2022, 24(14):1557-1566.
- [16] 易镇邪,王元元,谷子寒,等.镉污染稻田油菜-中稻替代双季稻种植的可行性研究[J].作物杂志,2021(3):65-69. YI Z X, WANG Y Y, GU Z H, et al. Study on the feasibility of alternative planting of rapeseed-middle rice to double cropping rice in cadmium polluted rice area[J]. *Crops*, 2021(3):65-69.
- [17] CAO X, WANG X, TONG W, et al. Distribution, availability and translocation of heavy metals in soil-oilseed rape (*Brassica napus* L.) system related to soil properties[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252:733-741.
- [18] 卞建林,郭俊梅,王学东,等.两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制[J].环境科学,2020,41(2):970-978. BIAN J L, GUO J M, WANG X D, et al. Tolerance mechanism and cadmium enrichment abilities in two *Brassica napus* L. cultivars[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2):970-978.
- [19] 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) [2022-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220324.1643.016.html>. SUN G, LIU Z Y, WANG Q, et al. Effects of different rape cultivars on the absorption and accumulation of heavy metals in soils of non-ferrous metal smelting area[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*: 1-11. (2022-03-25) [2022-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220324.1643.016.html>.
- [20] 宗良纲,孙静克,沈倩宇,等. Cd、Pb污染对几种叶类蔬菜生长的

- 影响及其毒害症状[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1): 63-68. ZONG L G, SUN J K, SHEN Q Y, et al. Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1): 63-68.
- [21] 郭平, 刘畅, 张海博, 等. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 92-95, 113. GUO P, LIU C, ZHANG H B, et al. Studies on enrichment and tolerance ability to Pb, Cu of sunflower seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 92-95, 113.
- [22] ASHRAF S, ALI Q, ZAHIR Z A, et al. Phytoremediation; Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 174(6): 714-727.
- [23] 王学锋, 师东阳, 刘淑萍, 等. Cd-Pb 复合污染在土壤-烟草系统中生态效应的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 737-740. WANG X F, SHI D Y, LIU S P, et al. Ecological effect of combined Cd-Pb pollution on soil-tobacco system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 737-740.
- [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] DENG Z, ZHANG R, YANG S, et al. Enhancement of phytoremediation of Cd- and Pb-contaminated soils by self-fusion of protoplasts from endophytic fungus *Mucor* sp. CBRF59[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(1): 41-47.
- [26] ZHANG S, SONG J. Geochemical cadmium anomaly and bioaccumulation of cadmium and lead by rapeseed (*Brassica napus* L.) from non-calcareous soils in the Guizhou Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 624-634.
- [27] 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. FANG H, LIU X L, YAN Q X, et al. Enrichment of heavy metals in soil of rape organs in different growth stage in Guizhou Province[J]. *Northern Horticulture*, 2018(5): 111-117.
- [28] 周旭丹, 赵春莉, 孙晓刚, 等. 芥菜和油菜对镉污染土壤的修复效应研究[J]. 北方园艺, 2015(6): 167-172. ZHOU X D, ZHAO C L, SUN X G, et al. Research on phytoremediation of cadmium polluted soil by *Capsella bursa-pastoris* and oilseed rape[J]. *Northern Horticulture*, 2015(6): 167-172.
- [29] MA C, LIU F, XIE P, et al. Mechanism of Pb absorption in wheat grains[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415: 125618.
- [30] GUO J M, ZHENG G D, YANG J X, et al. Safe utilization of cadmium- and lead-contaminated farmland by cultivating a winter rapeseed/maize rotation compared with two phytoextraction approaches[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114306.
- [31] 代天飞, 王昌全, 李冰. 油菜各部位对土壤中活性态重金属的累积特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S2): 471-475. DAI T F, WANG C Q, LI B. Accumulation characters of heavy metals at different parts of rape growing at various soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(S2): 471-475.
- [32] 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. WANG H Z. Review and future development of rapeseed industry in China[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2010, 32(2): 300-302.
- [33] PITTET A. Natural occurrence of mycotoxins in foods and feeds: An updated review[J]. *Revue de Médecine Vétérinaire*, 1998, 149(6): 479-492.
- [34] 李培武, 杨渭, 张文, 等. 我国油菜产品质量安全现状及对策[J]. 中国油料作物学报, 2004(1): 85-89. LI P W, YANG M, ZHANG W, et al. Studies on quality of oilseed rape products and its improvement strategy in China[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2004(1): 85-89.
- [35] 邢旭光, 柳焱, 马孝义. 土壤添加物对土-水曲线和土体收缩的影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 40-48. XING X G, LIU Y, MA X Y. Effects of soil additive on soil-water characteristic curve and soil shrinkage[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(1): 40-48.
- [36] YANG Y, LI H, PENG L, et al. Assessment of Pb and Cd in seed oils and meals and methodology of their extraction[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 482-488.
- [37] 邓美华, 朱有为, 段丽丽, 等. 农田土壤重金属污染“边生产边修复”综合防治技术模式解析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(2): 135-150. DENG M H, ZHU Y W, DUAN L L, et al. Analysis on integrated remediation model of “phytoremediation coupled with agro-production” for heavy metal pollution in farmland soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2020, 46(2): 135-150.
- [38] 蔡保松, 张国平. 大、小麦对镉的吸收、运输及在籽粒中的积累[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(3): 82-86. CAI B S, ZHANG G P. Cadmium absorption and mobilization in barley and wheat plants and its accumulation in grains[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2002, 22(3): 82-86.
- [39] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1030-1043. HUANG D Y, ZHU Q H, ZHU H H, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 1030-1043.
- [40] 冯英, 马璐瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2359-2370. FENG Y, MA L Y, WANG Q, et al. Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2359-2370.
- [41] 周霞, 林庆昶, 李拥军, 等. 花卉植物对重金属污染土壤修复能力的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(14): 8133-8135. ZHOU X, LIN Q C, LI Y J, et al. Study on remedial capability of heavy metal-contaminated soil by ornamental plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(14): 8133-8135.
- [42] 刘大林, 孙启鑫, 邵将, 等. 镉胁迫对两种狼尾草不同生育时期生长性能、光合作用特征及镉吸收转运差异的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 84-93. LIU D L, SUN Q X, SHAO J, et al. Effects of Cd concentrations on growth, photosynthetic indices and bioconcentration of two *Pennisetum* during different growth stages[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(1): 84-93.
- [43] 邹军, 朱颖璇, 杨雨豪, 等. 1981—2015 年华北地区种植结构演变及其驱动机制分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(12): 23-32. ZOU J, ZHU Y X, YANG Y H, et al. Analysis of planting structure evolution and its driving mechanism in north China from 1981 to 2015[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(12): 23-32.