

## 客土比例对土壤及油菜砷有效性的影响

王旭东, 文炯, 彭芝, 张楠, 苏世鸣, 李宇翔, 彭礼枚, 李洪斌, 曾希柏

### 引用本文:

王旭东, 文炯, 彭芝, 张楠, 苏世鸣, 李宇翔, 彭礼枚, 李洪斌, 曾希柏. 客土比例对土壤及油菜砷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 564-570.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0758>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 砷污染土壤不同比例客土对大豆生长和吸收砷的影响

武慧斌, 曾希柏, 汤月丰, 白玲玉, 苏世鸣, 王亚男, 陈鸽

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2021-2028 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0311>

#### 玉米套作蜈蚣草修复砷污染农田土壤的效应研究

邱丹, 杜芮萍, 孟德凯, 顾明华, 何冰, 韦燕燕, 王学礼

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 101-107 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0920>

#### P、Fe及水分对土壤砷有效性和小麦砷吸收的影响

李思妍, 史高玲, 娄来清, 蔡庆生

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 415-422 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1251>

#### 客土改良铜尾矿对香根草生理特征及重金属吸收的影响

方青, 丁子微, 孙庆业, 王宁

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 83-91 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0902>

#### 硫酸对土壤砷生物有效性与水稻吸收的影响研究

邹丽娜, 戴玉霞, 邱伟迪, 张舒, 赵佳伟, 唐先进, 施积炎, 徐建明

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1435-1447 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0837>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王旭东, 文炯, 彭芝, 等. 客土比例对土壤及油菜砷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 564–570.

WANG X D, WEN J, PENG Z, et al. Effects of soil dressing proportion on arsenic availability in soil and rape [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 564–570.



开放科学 OSID

## 客土比例对土壤及油菜砷有效性的影响

王旭东<sup>1,2</sup>, 文炯<sup>2,3</sup>, 彭芝<sup>2,3</sup>, 张楠<sup>1,2</sup>, 苏世鸣<sup>1,2</sup>, 李宇翔<sup>2,3</sup>, 彭礼枚<sup>4</sup>, 李洪斌<sup>4</sup>,  
曾希柏<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 农业农村部岳阳农业环境科学观测实验站, 湖南 岳阳 414000; 3. 岳阳市农业科学研究院, 湖南 岳阳 414000; 4. 广电计量检测(湖南)有限公司, 长沙 410000)

**摘要:**为探究客土修复砷污染土壤的长期效果,在农业农村部岳阳农业环境野外科学观测实验站设计了客土与污染土壤不同混合比例的微区试验,研究了混合比例对土壤砷含量及油菜生长、吸收砷等的影响。结果表明:客土降低了污染土壤的砷含量,且土壤有效砷含量的降幅与客土比例显著相关,油菜各部位对砷的吸收量随客土比例的提高而降低。客土比例为40%时,油菜茎叶和籽粒的生物量最高,分别比污染土中增加了7.8%和12.8%,且根、茎叶和籽粒的砷含量分别比污染土中降低了67.4%、68.4%和82.2%。随客土比例的提高,土壤团聚体平均质量直径呈增加趋势,土壤pH和阳离子交换量则呈降低趋势。根据本研究结果,客土比例对土壤有效砷及pH、团聚体平均质量直径和阳离子交换量等理化指标具有显著影响,合适比例的客土能促进油菜生长并大幅度降低油菜的含砷量。

**关键词:**客土比例;有效砷;油菜;土壤理化性质;吸收砷

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0564-07 doi:10.11654/jaes.2023-0758

### Effects of soil dressing proportion on arsenic availability in soil and rape

WANG Xudong<sup>1,2</sup>, WEN Jiong<sup>2,3</sup>, PENG Zhi<sup>2,3</sup>, ZHANG Nan<sup>1,2</sup>, SU Shiming<sup>1,2</sup>, LI Yuxiang<sup>2,3</sup>, PENG Limei<sup>4</sup>, LI Hongbin<sup>4</sup>, ZENG Xibai<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Scientific Observation and Experiment Station of Yueyang, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yueyang 414000, China; 3. Yueyang Agricultural Sciences Institute, Yueyang 414000, China; 4. Hunan Division of GRG Metrology and Test, Changsha 410000, China)

**Abstract:** To explore the long-term effects of soil remediation on arsenic-contaminated soil, micro-area experiments were performed in the Scientific Observation and Experiment Station of Yueyang, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. The effects of different mixing ratios of soil dressing and polluted soil on soil arsenic content, rape growth, and arsenic absorption were evaluated. The results showed that the content of available arsenic in polluted soil was reduced by soil dressing, and this decrease was positively correlated with the proportion of soil dressing; the arsenic absorption of rapeseed decreased with the increasing proportion of soil dressing. When the proportion of soil dressing was 40%, the biomass of stems, leaves, and seeds reached the maximum value, which increased by 7.8% and 12.8% compared with the polluted soil. In addition, the arsenic content of root, stem, leaf, and seed decreased by 67.4%, 68.4%, and 82.2%, respectively, compared with the polluted soil. With the increased proportion of soil dressing, the mean weight diameter of soil aggregates increased, whereas the soil pH and cation exchange capacity decreased. The proportion of soil dressing had significant effects on soil available arsenic

收稿日期:2023-09-15 录用日期:2023-12-28

作者简介:王旭东(1999—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为农田土壤重金属污染修复。E-mail:1044889650@qq.com

\*通信作者:曾希柏 E-mail:zengxibai@caas.cn

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U19A204842277292);中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-2021-IEDA)

Project supported: Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U19A204842277292); Science Innovation Project of the Chinese Academy of Agricultural Science (CAAS-ASTIP-2021-IEDA)

and physicochemical indexes such as pH, aggregate average weight diameter, cation exchange capacity, and other physical and chemical indexes, and the appropriate proportion of soil dressing promoted the growth of rape and greatly reduced its arsenic content.

**Keywords:** soil dressing proportion; available arsenic; rape; soil physicochemical property; absorption of arsenic

砷是一种具有剧毒并引发致畸、致癌的元素,土壤砷污染不仅会影响作物生长和品质,而且可以通过食物链危害人类身体健康<sup>[1-2]</sup>。据统计,我国含砷矿渣的年产生量达到近50万t<sup>[3]</sup>,且无害化处理率较低,导致砷向环境迁移扩散并引发土壤污染等问题,如仅湖南省就有超过6万公顷耕地受到砷污染的威胁<sup>[4]</sup>。因此,修复砷污染的土壤,已成为相关地区农业生态环境建设、农产品安全生产和农业高质量发展的关键举措。

客土法因其具有快速、简单等优势,被经常用于污染土壤的修复<sup>[5]</sup>。通过在污染土壤表层覆盖或在污染土壤中掺混客土,以降低土壤污染物的含量和有效性,从而达到修复的目的。我国张土灌区镉污染土壤治理中,客土法使土壤含镉量降低75.4%、稻米镉含量均低于国家标准<sup>[6]</sup>。日本对7327hm<sup>2</sup>镉污染耕地近90%采用客土修复方法<sup>[7]</sup>,且客土厚度达20~40cm,修复效果好且延续至今。李莲芳等<sup>[8]</sup>在湖南省石门县雄黄矿区周边调查发现,受砷污染的农田通过施客土30~50cm,使表层土壤中砷含量控制在10mg·kg<sup>-1</sup>以内、稻米砷含量小于0.05mg·kg<sup>-1</sup>。客土修复在有效降低污染土壤中污染物含量的同时,也显著影响了原土的物理、化学及生物学性质,且这种影响与客土的性质、比例密切相关<sup>[9]</sup>。如康营等<sup>[10]</sup>通过对铁矿废石复垦土壤添加不同比例的客土,发现添加客土后土壤有效磷、全氮和有机碳含量均随客土比例的提高而增加,但pH随客土比例的提高而下降。陈怀满等<sup>[11]</sup>研究发现,德兴铜矿区受铜、镉、锌污染的土壤经客土改良3a后,表层土壤有机质、速效磷、有效钾等含量均有不同程度的提高。

课题组前期研究发现<sup>[12]</sup>,客土能有效降低污染土壤中砷的有效性,但随着时间的推移,施客土后土壤中砷的迁移转化及相关性质的变化尚不明确。本研究利用农业农村部岳阳农业环境野外科学观测实验站客土修复长期定位试验,在已有基础上,研究客土

比例对砷污染土壤修复效果、土壤性质和油菜生长及吸收砷等影响,为客土修复砷污染土壤的长期管理与农产品安全生产提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试砷污染土壤取自湖南省石门县某雄黄矿区周边农田表层,其成土母质为板页岩;客土取自湖南平江县黄金洞乡,成土母质亦为板页岩。将采集后土壤晾干并去除石砾等杂物后粉碎、混匀过2mm筛备用。两种土壤的基本理化性质见表1。

供试油菜品种为星德油660,种子购自四川德福农种业有限公司。

### 1.2 试验设计

试验于2015年开始,地点位于农业农村部岳阳农业环境野外科学观测实验站(29°16'6.6"N、113°05'21.9"E)。设计1m×1m×1m的微区,每个微区内共加入1000kg土壤,设污染土、客土20%、客土40%、客土60%、客土80%、全客土共6个处理,并按各处理客土比例将污染土与客土均匀混合。各处理均重复3次,共18个微区。为避免降雨导致模拟池内水分溢出等导致砷向环境扩散,模拟池上方装有透明塑料棚。长期定位试验开始于2015年,期间种植制度为玉米-油菜轮作,在每年5月中旬种植玉米,于8月底收获玉米后,在9月底种植油菜,并于第二年5月初收割。客土为未耕种的原状土壤,肥力较低,试验初期施加0.1kg的商品有机肥,以提高各微区的肥力,此后每年种植作物前对各微区土壤翻耕,并施加复合肥15:15:15作为底肥(施入量为N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O各1.13g·kg<sup>-1</sup>)。

油菜种子于2022年9月28日播种,待油菜幼苗生长至3~5片真叶时,每个微区留下9株长势相对一致的幼苗,并拔除多余的幼苗。生长期间浇水、施肥、病虫害防治等措施均与普通大田一致。于2023年4

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties

土壤	pH	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
污染土	7.38	15.35	2.51	1.38	10.22	72.58	14.24	107.23
客土	6.36	12.22	2.41	1.04	11.09	87.21	5.33	86.83

月28日收割,在收割前按照根、茎叶、籽粒分别采集植株样品并测定生物量,105℃杀青30 min,80℃烘干至质量恒定,粉碎并过1 mm筛备用。油菜播种前采集表层0~20 cm土壤,每个微区采集5~6个点,约500 g用自封袋保存并带回实验室。采集的土壤样品一部分自然风干后研磨,全部过20目筛后,将部分土壤研磨并过60目筛,用于测定土壤物理、化学指标。

### 1.3 土壤和植株样品的测定

土壤理化性质按照《土壤农化分析》<sup>[13]</sup>的相关方法测定:有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定;pH值采用电极法测定;有效磷含量采用NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用醋酸铵溶液浸提-火焰光度法测定;阳离子交换量采用乙酸铵法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;团聚体平均质量直径(<0.053 mm微团聚体,0.053~0.25 mm小团聚体,>0.25 mm大团聚体)采用湿筛法测定。

土壤有效砷:0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>浸提<sup>[14]</sup>后用氢化物发生原子荧光仪(AFS-920)测定。

植物总砷:HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消解<sup>[15]</sup>后用氢化物发生原子荧光仪(AFS-920)测定(GB 5009.11—2014)。

砷测定质量保证与控制:消煮过程中,采用国家土壤标准参比物(GSS-25:GBW07456)和湖南大米(GSB-23:GBW10045)进行质量控制。标准土样和米饭消煮后的回收率分别为91.6%~98.8%和90.2%~97.8%。提取样品上机测定时,设置空白对照,消除试剂背景干扰,每测定36个样品后测定一次标准样,保证测定结果的准确性。

植株对砷的吸收系数:即植株根部砷含量与土壤总砷含量的比值;植株对砷的转移系数:即植物地上部分总砷含量与植株根部总砷含量的比值。

### 1.4 数据处理

通过Excel软件对数据进行计算,SPSS 26.0软件对数据进行相关性和显著性分析,数据图表用Origin 2022等软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 客土比例对土壤全砷和有效砷含量的影响

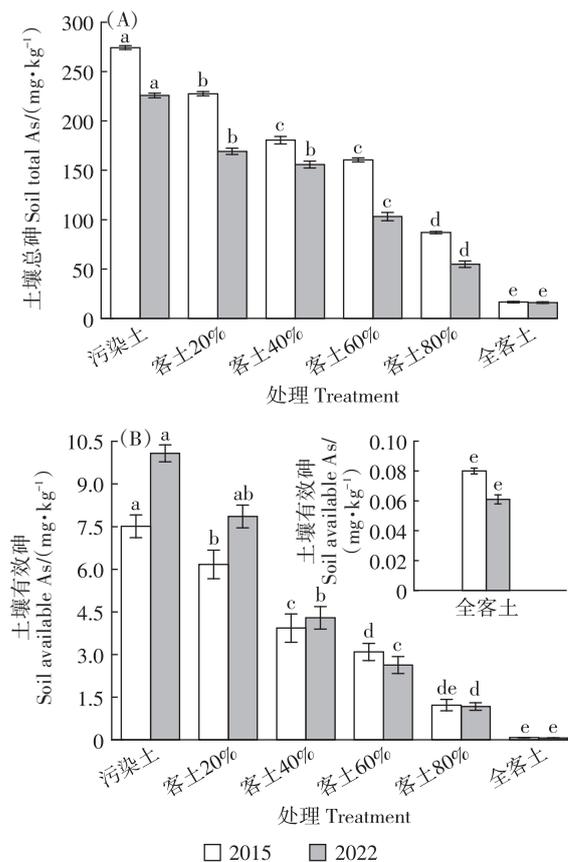
不同客土比例显著影响原污染土壤的总砷和有效砷含量。由图1A可知,添加客土后显著降低了土壤总砷含量,随着客土比例提高,土壤总砷含量相应下降。2022年时,各处理土壤总砷含量相比修复初期均有不同程度的下降,且当客土比例为20%时,土壤总砷含量即显著低于污染土。由图1B可知,与

2015年时比较,污染土、客土比例20%和40%的土壤有效砷含量在2022年有不同程度增加,其结果可能与客土对砷的吸附固定达到了相对平衡、作物根系活动等影响有关,但土壤有效砷含量随客土比例的提高而大幅度降低,当客土比例为20%、40%、60%、80%和全客土时,相比污染土分别降低了22.1%、60.7%、69.3%、87.9%和99.2%,当客土比例为40%时土壤有效砷含量即显著低于污染土。根据相关结果,可求得土壤有效砷含量与客土比例的相关方程为 $y = -0.105x + 9.825$  ( $R^2 = 0.959, P < 0.01$ )。

### 2.2 对油菜生长及吸收砷的影响

#### 2.2.1 对油菜生长的影响

由图2可知,不同客土比例对油菜各部位生物量均具有一定影响。其中,油菜茎叶与籽粒生物量均随客土比例的提高呈先增加后降低的趋势,客土比例为40%的油菜茎叶和籽粒生物量显著高于其他处理,相



不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。  
Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

图1 不同客土比例对土壤总砷(A)及有效砷(B)含量的变化  
Figure 1 Effects of different proportions of soil dressing on the content of total arsenic (A) and available arsenic (B)

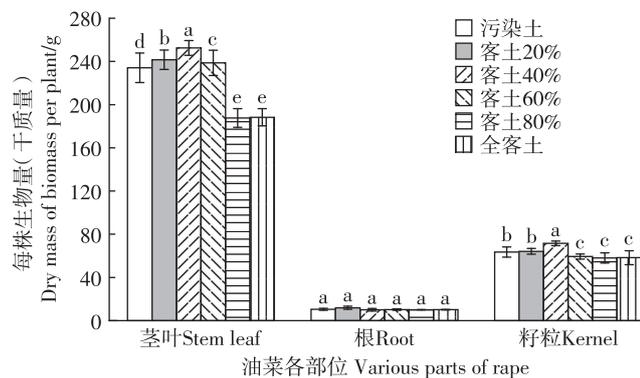


图2 不同客土比例对油菜生长的影响

Figure 2 Effects of different proportions of soil dressing on the biomass of rape

较污染土分别增加了7.8%与12.8%;但油菜根生物量差异并不显著。

### 2.2.2 对油菜吸收砷的影响

由表2可知,各处理油菜各部位砷含量表现为:根>茎叶>籽粒,且油菜各部位的砷含量随客土比例提高呈明显下降趋势。客土比例为20%的油菜根部、茎叶和籽粒砷含量较污染土分别降低44.5%、45.1%和64.4%;客土比例为40%时分别降低67.4%、68.3%和82.2%;客土比例为60%时分别降低82.1%、79.1%和86.7%;客土比例为80%时分别降低89.2%、87.4%和93.3%;全客土处理分别降低93.9%、93.5%和97.8%。统计分析结果表明,客土处理下油菜各部位砷含量均与污染土中的具有显著差异,其中客土比例为40%时,油菜各部位砷含量均下降较为明显。

在上述结果基础上,应用相关方法求得各处理油

菜对砷的吸收系数与转移系数(表2)。油菜砷吸收量与客土比例呈极显著负相关,直线方程为 $y=-0.831x+76.046$ ( $R^2=0.876, P<0.01$ )。随着客土比例的增加,油菜对砷的吸收系数呈先降低后增加趋势,至客土比例为40%时达到最低;此后随客土比例增加而呈增加趋势。油菜对砷的转移系数随客土比例的增加也呈先降低后增加的趋势,客土比例为40%时油菜对砷的转移系数值显著低于其他处理。

### 2.3 对土壤理化性质影响

由于客土和原污染土两者理化性质差异及施肥、翻耕等农田管理措施,各处理对比试验初期土壤养分表聚现象严重,同时其他理化指标如pH、团聚体平均质量直径、阳离子交换量等亦存在差异。由图3可知,与2015年相比,各处理土壤有机质、碱解氮、有效磷及速效钾含量在2022年均有一定程度的增加,相反土壤pH在2022年均有一定程度的降低。在2022年时,全客土土壤有效磷和碱解氮含量最高,分别为 $52.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $178.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;污染土的速效钾含量和pH最高,分别为 $149.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和7.19。由表3可知,土壤团聚体平均质量直径随客土比例的提高呈增加的趋势,其变化范围为0.49~1.02 mm,求得土壤团聚体平均质量直径与客土比例间的相关方程为 $y=0.006x+0.479$ ( $R^2=0.971, P<0.01$ )。客土显著降低了土壤阳离子交换量,客土比例20%、40%、60%、80%和全客土处理的阳离子交换量较污染土降幅在4.61%~19.45%之间,求得土壤阳离子交换量与客土比例间的相关方程为 $y=-0.011x+5.856$ ( $R^2=0.995, P<0.01$ )。

表2 不同客土比例对油菜各部位砷含量、吸收系数及转移系数的影响

Table 2 Effects of different proportions of soil on different parts of rapeseed arsenic concentration, absorption coefficient and transfer capability

处理	油菜根部砷含量/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	油菜茎叶砷含量/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	油菜籽粒砷含量/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	吸收系数/%	转移系数/%	油菜吸收砷与客土比例间 相关方程
污染土	8.67±0.83a	2.15±0.11a	0.45±0.02a	4.52±0.13a	29.98±1.12b	$y=-0.831x+76.046$ ( $R^2=0.876, P<0.01$ )
客土20%	4.82±0.21b	1.18±0.06b	0.16±0.02b	2.85±0.02b	27.81±0.68cd	
客土40%	2.83±0.13c	0.68±0.05c	0.08±0.01c	1.56±0.05c	26.88±0.57d	
客土60%	1.55±0.06d	0.45±0.03d	0.06±0.0cd	1.77±0.03c	32.83±1.56a	
客土80%	1.04±0.11d	0.27±0.02e	0.03±0d	1.83±0.05c	28.74±0.88c	
全客土	0.53±0.05e	0.13±0.01f	0.01±0d	3.31±0.15b	28.21±1.54c	

表3 不同客土比例下土壤团聚体平均质量直径及阳离子交换量

Table 3 Mean weight diameter of soil aggregates and CEC in different soil proportions

指标	污染土	客土20%	客土40%	客土60%	客土80%	全客土
团聚体平均质量直径/mm	0.49±0.06c	0.53±0.01c	0.86±0.02b	0.98±0.04a	0.99±0.04a	1.02±0.03a
阳离子交换量/( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	5.86±0.18a	5.59±0.22ab	5.44±0.23b	5.22±0.30bc	4.96±0.25c	4.72±0.21d

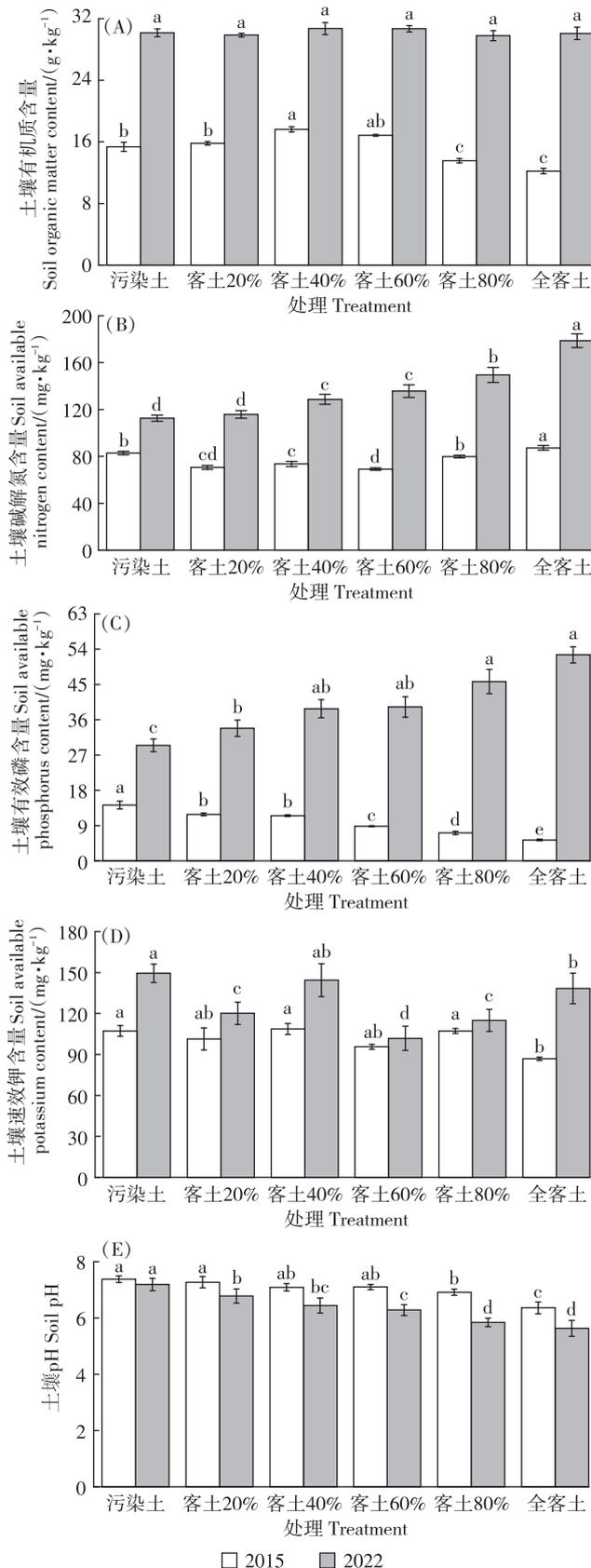


图3 不同客土比例下表层土壤理化性质变化

Figure 3 Changes of different physical and chemical properties of surface soil under different proportions of soil dressing

### 3 讨论

客土法作为一种切实有效的降低表层土壤重金属含量的方法,根据土壤污染程度、作物生长以及成本效益等诸多因素,主要包括覆盖和混合两种方式<sup>[5]</sup>。汪雅各等<sup>[16]</sup>研究发现,表层覆盖不同厚度客土能够有效治理污染土壤,客土厚度达到20~30 cm时,使作物吸收重金属量减少80%左右。随着客土厚度的增加,植物根系与污染土壤接触面积减小,植物内砷含量也呈现逐渐降低的趋势;但客土厚度越大,取土量及花费也相应增加,同时会导致田块增高,对灌溉和排水设施提出更严格的要求<sup>[6-7]</sup>。侯李云等<sup>[5]</sup>研究发现,不同比例客土与污染土混合时,客土比例为60%即可将土壤有效砷含量降低至3 mg·kg<sup>-1</sup>。本研究中,考虑到客土覆盖后耕作的影响以及客土为未耕种的土壤,土壤肥力较低等诸多因素,选择将客土与污染土壤直接混合的方式,使混合后土壤污染物含量降低并达到安全值以下。从实验结果看,按照一定比例将客土与污染土混合后,可以降低原污染土壤的全砷和有效砷含量,但在一定年限后土壤有效砷含量可能会有上升,可能的原因是土壤对砷有强烈的固定作用,当客土比例较低时,土壤对砷的吸附固定达到饱和状态<sup>[12]</sup>。土壤胶体对砷的吸附-解吸,主要是以阴离子的形式<sup>[14]</sup>与其中带正电荷的质子相互作用而固定<sup>[17]</sup>,土壤类型、土壤性质对土壤中砷的迁移、转移具有重要的影响<sup>[5]</sup>,由于土壤pH低,黏粒含量高等原因<sup>[18]</sup>,因此红壤对砷的吸附量高于其他土壤。本研究中,土壤pH随客土比例提高呈一定幅度下降,并通过影响砷的形态<sup>[19]</sup>和土壤胶体表面电荷,进而影响对砷的吸附量<sup>[20]</sup>,pH降低后,土壤对砷的吸附能力增强,易形成稳定的结合态砷与残渣态砷<sup>[21]</sup>,从而降低砷的生物有效性。土壤中砷和磷具有相似的化学性质<sup>[22]</sup>,在土壤溶液中主要以阴离子形式存在,二者分子结构及构型相似且在土壤中形成的化合物相似<sup>[23]</sup>,因此,磷酸根和砷酸根会竞争土壤表面相同的吸附位点,添加较高的外源磷能够显著降低土壤对砷的吸附量<sup>[24]</sup>。本研究中,随着客土比例增加,土壤有效砷含量降低的同时有效磷含量增加,这与Hu等<sup>[25]</sup>研究结果相似,可能是因为pH影响了土壤对磷的吸附作用,在酸性土壤中,较低的pH值减缓了有效磷的退化速度,促进土壤对磷的吸收。

本研究中,油菜各部位砷含量均随客土比例的提高而降低,与武慧斌等<sup>[12]</sup>研究结果相似,当客土比例

高于40%时,油菜籽粒砷含量低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,符合国家食品安全标准。本研究中,客土比例80%与全客土处理油菜地上部和籽粒生物量显著低于污染土、客土比例20%和40%的处理,此时土壤氮、磷、钾等肥力指标显著高于其他处理,土壤pH介于5.63~5.84,当红壤pH低于6.0时,层状铝硅酸盐黏土矿物和铝氢氧化物矿物开始溶解,加速土壤中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等流失<sup>[26]</sup>,进而影响作物的生长,这与徐仁扣等<sup>[27]</sup>发现酸性土壤pH值由6.2下降至5.4时,油菜籽粒减产达40%的规律是一致的。但污染土油菜地上部和籽粒生物量显著低于客土比例20%和40%的处理,此时高浓度砷含量严重抑制油菜生长,这与Shri等<sup>[28]</sup>发现砷浓度超过植物所能忍受的临界值时,严重抑制植物生长的规律相似。

客土在降低土壤中重金属砷含量和有效性的同时,也会因其与污染土壤性质的差异、施肥、翻耕深度不足导致养分分布不均匀、微区设计水泥罐防止养分淋溶流失等原因,而造成表层土壤养分聚集,土壤理化性质发生一定程度的变化。本研究中,土壤团聚体平均质量直径与客土比例呈显著正相关,这可能是由于客土比污染土黏粒含量更高,使土壤中形成了更多的胶结物质,促进土壤颗粒团聚<sup>[29]</sup>;除此之外,土壤团聚体形成过程受土壤有机质以及pH的影响<sup>[30]</sup>,铝氧化物可以通过配体交换络合和吸附作用与土壤有机质相结合形成更大的团聚体,且随着pH的降低结合作用增强<sup>[31]</sup>,进而提高土壤团聚体平均质量直径。本研究中,土壤阳离子交换量随客土比例增加而逐渐降低。土壤pH显著影响阳离子交换量<sup>[32]</sup>,随着pH升高,土壤中活性官能团羧基( $-\text{COOH}$ )、羟基( $-\text{OH}$ )等阴离子能够与外源酸中 $\text{H}^+$ 发生反应从而起到缓冲作用。因此,客土修复过程中需要加强土壤酸化防治,如施用有机肥等增加土壤有机质、阳离子交换量,改善土壤酸度,促进土壤养分的有效转化利用。土壤理化性质对土壤砷有效性具有十分重要的影响,如砷的吸附解吸、形态转化等过程,本研究发现土壤pH、有效磷、阳离子交换量与土壤有效砷含量密切相关,但具体影响机理需进一步研究。

#### 4 结论

(1)客土能显著降低污染土壤的砷含量,当客土比例为40%时,其下降幅度达到60%以上,土壤有效砷含量与客土比例呈显著负相关( $P < 0.01$ )。

(2)随着客土比例提高,油菜根、茎叶、籽粒的砷

含量逐渐降低,所有处理的油菜各部位含砷量均表现为根>茎叶>籽粒,油菜砷吸收量与客土比例呈显著负相关( $P < 0.01$ )。当客土比例为40%时,油菜籽粒生物量最大,且砷的转移系数和吸收系数均达到最低。

(3)根据本研究结果综合比较,当客土比例为40%时降低油菜吸收砷,同时提高籽粒产量的效果最好。

#### 参考文献:

- [1] KUMAR R, KUMAR R, MITTAL S, et al. Role of soil physicochemical characteristics on the present state of arsenic and its adsorption in alluvial soils of two agri-intensive region of Bathinda, Punjab, India[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2):605-620.
- [2] 杨文致,王英杰,周航,等.水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律[J].环境科学,2015,36(2):694-699. YANG W T, WANG Y J, ZHOU H, et al. Transformation and mobility of arsenic in the rhizosphere and non-rhizosphere soils at different growth stages of rice[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):694-699.
- [3] SU C. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: situation, impact and remediation techniques[J]. *Environmental Skeptics and Critics*, 2014, 3(2):24-38.
- [4] YANG B, ZHANG G L, DENG W, et al. Review of arsenic pollution and treatment progress in nonferrous metallurgy industry[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 634:3239-3243.
- [5] 侯李云,曾希柏,张杨珠.客土改良技术及其在砷污染土壤修复中的应用展望[J].中国生态农业学报,2015,23(1):20-26. HOU L Y, ZENG X B, ZHANG Y Z. Application and outlook of alien earth soil-improving technology in arsenic-contaminated soil remediation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1):20-26.
- [6] 吴燕玉,陈涛,孔庆新,等.张士灌区镉污染及其改良途[J].环境科学学报,1984,4(3):275-283. WU Y Y, CHEN T, KONG Q X, et al. Cadmium contamination of Zhangshi Irrigation Area and ways of improving[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1984, 4(3):275-283.
- [7] ARAO T, ISHIKAWA S, MURAKAMI M, et al. Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan[J]. *Paddy and Water Environment*, 2010, 8(3):247-257.
- [8] 李莲芳,曾希柏,白玲玉,等.石门雄黄矿周边地区土壤砷分布及农产品健康风险评估[J].应用生态学报,2010(11):2946-2951. LI L F, ZENG X B, BAI L Y, et al. Soil arsenic content and its health risk assessment for agricultural products in the region surrounding Shimen arsenic, sulphide mine[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11):2946-2951.
- [9] 陈志国,王秀梅,张荣,等.不同客土比例对原土壤理化性质影响的研究[J].环境影响评价,2019,41(1):79-83. CHEN Z G, WANG X M, ZHANG R, et al. Effects of different new soil proportions on the physical and chemical properties of original soil[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2019, 41(1):79-83.
- [10] 康营,赵文廷,张俊梅,等.添加不同配比客土对改良铁矿废石复垦土壤碳排放的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):346-353.

- KANG Y, ZHAO W T, ZHANG J M, et al. Effect of foreign soils with different addition proportions on carbon emission in a reclaimed soil of iron ore waste[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5):346-353.
- [11] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 德兴铜矿尾矿库植被重建后的土壤肥力状况和重金属污染初探[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1):29-36. CHEN H M, ZHENG C R, ZHOU D M, et al. Changes in soil fertility and extractable heavy metals in De Xing copper mine tailing pool after revegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):29-36.
- [12] 武慧斌, 曾希柏, 汤月丰, 等. 砷污染土壤不同比例客土对大豆生长和吸收砷的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10):2021-2028. WU H B, ZENG X B, TANG Y F, et al. Effects of different soil dressing ratios on soybean growth and absorption of arsenic in arsenic contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10):2021-2028.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 106-193. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis Edition [M]. 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2000:106-193.
- [14] WOOLSON E A, AXLEY J H, KEARNEY P C. Correlation between available soil arsenic, estimated by six methods, and response of corn (*Zea mays* L.)[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, 35(1):101-105.
- [15] 周昶, 霍捷, 李鼎豪, 等. 生物炭对复合污染土壤-作物中镉砷累积和转运的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5):394-398. ZHOU C, HUO J, LI D H, et al. Effects of biochar application on accumulation and transport of cadmium and arsenic in system of contaminated soil-crops[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):394-398.
- [16] 汪雅各, 王炜, 卢善玲, 等. 客土改良菜区重金属污染土壤[J]. *上海农业学报*, 1990(3):50-55. WANG Y G, WANG W, LU S L, et al. A study on heavy metal-polluted soil improvement by agricultural engineering soil exchange in vegetable growing area[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1990(3):50-55.
- [17] SINGH S B, SRIVASTAVA P K. Bioavailability of arsenic in agricultural soils under the influence of different soil properties[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(153):2020-2035.
- [18] YANG J, BARNETT M, ZHUANG J, et al. Adsorption, oxidation, and bioaccessibility of As(III) in soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(18):7102-7110.
- [19] TANG X Y, ZHU Y G, HAN X Q, et al. The ageing effect on the bioaccessibility and fractionation of arsenic in soils from China[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(7):1183-1190.
- [20] 高雪, 王亚男, 曾希柏, 等. 外源As(III)在不同母质发育土壤中的老化过程[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5):1453-1460. GAO X, WANG Y N, ZENG X B, et al. Aging process of arsenite[As(III)] in soils originated from different parent materials[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5):1453-1460.
- [21] 吴萍萍. 不同类型矿物和土壤对砷的吸附-解吸研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011:1-80. WU P P. Study on arsenate adsorption-desorption by different minerals and soils[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011:1-80.
- [22] WANG Y N, ZENG X B, LU Y H, et al. Effect of aging on the bioavailability and fractionation of arsenic in soils derived from five parent materials in a red soil region of Southern China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 207:79-87.
- [23] 王进进. 外源磷对土壤中砷活性与植物有效性的影响及机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014:1-90. WANG J J. Effect of mechanism of exogenous phosphate on the ability and phyto-availability of arsenic in soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014:1-90.
- [24] PERYEA F J. Phosphate-induced release of arsenic from soils contaminated with lead arsenate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5):1301-1306.
- [25] HU Y, LI J H, ZHU Y G, et al. Sequestration of As by iron plaque on the roots of three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in a low-P soil with or without P fertilizer[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2005, 27(2):169-176.
- [26] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major [J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [27] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2):160-167. XU R K, LI J Y, ZHOU S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):160-167.
- [28] SHRI M, KUMAR S, CHAKRABARTY D, et al. Effect of arsenic on growth, oxidative stress, and antioxidant system in rice seedlings[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2009, 72(4):1102-1110.
- [29] PILAR A, ENRIQUE D, ALEX S, et al. Physical, chemical, and biological indicators of soil quality in mediterranean vineyards under contrasting farming schemes[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11):2643-2661.
- [30] LOPEZ V, GOMEZ J, GUZMAN G, et al. The role of cover crops in the loss of protected and non-protected soil organic carbon fractions due to water erosion in a Mediterranean olive grove[J]. *Soil Tillage Res*, 2021, 213:105119-10132.
- [31] VON L, KOGEL K, EKSCHMITT K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 57(4):426-445.
- [32] 胡煜杰, 唐瑞杰, 杨安富, 等. 不同土壤类型和利用方式下土壤酸缓冲性能分异及其机理探讨:以海南省为例[J]. *西南农业学报*, 2023, 36(10):2231-2244. HU Y J, TANG R J, YANG A F, et al. Differentiation and mechanism of soil acid buffering capacity under different soil and utilization types: a case study in Hainan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(10):2231-2244.

(责任编辑:叶飞)