

罗泉达. 铬在土壤-作物系统中的迁移及安全利用调控研究 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (6): 746–752.

LUO Q D. Chromium Migration and Application of Conditioners in Vegetable-growing Soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (6): 746–752.

铬在土壤-作物系统中的迁移及安全利用调控研究

罗泉达

(福建省农业生态环境与能源技术推广总站, 福建 福州 350003)

摘要: 【目的】 探讨不同作物富集铬能力差异及施用不同类型调理剂对铬在土壤-芥菜系统迁移的影响。

【方法】 选择铬轻度污染农田进行田间试验, 研究皱叶芥菜 (*Brassica juncea* L. Czern and Coss)、花生 (*Arachis hypogaea* L.)、甜玉米 (*Zea mays* L. var. *rugosa* Bonaf.)、甘薯 (*Ficus tikoua* Bur.)、和毛豆 (*Glycine max* Merrill) 5 种作物铬的富集效果; 然后根据试验结果, 选择高富集作物 (皱叶芥菜) 作为研究对象, 研究不同调理剂对铬富集土壤的修复效果。调理剂修复效果试验设置对照 (CK)、泥炭土 (P)、有机肥 (M)、沸石 (Z)、硫酸亚铁 (Fe)、有机肥+泥炭土 (MP, 1:2)、有机肥+沸石 (MZ, 1:2)、有机肥+泥炭土+硫酸亚铁 (MPFe, 3:6:1)、有机肥+沸石+硫酸亚铁 (MZFe, 3:6:1) 9 个试验处理。其中, 硫酸亚铁用量为 $540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其他调理剂用量为 $5400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

【结果】 作物富集效果试验表明, 5 种作物铬含量均未超过国家限量标准, 皱叶芥菜富集铬能力最高, 甜玉米富集铬能力最低, 皱叶芥菜和花生富集铬能力显著高于甜玉米、甘薯和毛豆。调理剂修复效果试验表明, 调理剂施用显著提升了土壤 pH, 各调理剂处理土壤 pH 提升 $0.45 \sim 0.93$ 个单位。除 Z 和 Fe 外, 其他调理剂处理均显著提升了皱叶芥菜产量, 增产率为 $5.66\% \sim 12.77\%$ 。调理剂还显著降低了土壤有效态铬含量, 降幅达 $39.8\% \sim 53.8\%$ 。与对照相比, P、M、Z、Fe、MP、MZ、MPFe 和 MZFe 分别将皱叶芥菜铬含量降低了 53%、33%、44%、32%、59%、40%、72%、82%, 均未超过国家限量标准。**【结论】** 皱叶芥菜铬富集能力显著高于花生、甜玉米、甘薯和毛豆; 选择单施或复合施用有机肥、泥炭土、沸石及硫酸亚铁均可显著降低土壤有效性铬含量和皱叶芥菜中铬含量, 其中, 施用有机肥+泥炭土 (沸石)+硫酸亚铁复合调理剂对皱叶芥菜降铬效果较好。

关键词: 有机肥; 泥炭土; 沸石; 硫酸亚铁; 铬; 皱叶芥菜

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 06-0746-07

Chromium Migration and Application of Conditioners in Vegetable-growing Soil

LUO Quanda

(Agricultural Ecology Environment and Resource Station of Fujian, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: 【Objective】 Accumulation of chromium (Cr) in vegetables migrated from soil and mitigation effect of soil conditioner applications were investigated. **【Methods】** A field experimentation was conducted on a slightly polluted lot to determine the Cr-uptakes of green mustard (*Brassica juncea* L. Czern and Coss), peanut (*Arachis hypogaea* L.), sweet corn (*Zea mays* L. var. *rugosa* Bonaf.), sweet potato (*Ficus tikoua* Bur.), and soybean (*Glycine max* Merrill) plants grown on it. Vegetable with the greatest Cr-uptake was further tested on the lot for the heavy metal accumulation under the soil treatments of blank (CK), peat (P), and addition of organic fertilizer (M), zeolite (Z), FeSO_4 (Fe), M+P at 1:2 (MP), M+Z at 1:2 (MZ), M+P+ FeSO_4 at 3:6:1 (MPFe) or M+Z+ FeSO_4 at 3:6:1 (MZFe). The application of FeSO_4 was at a rate of $540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the others at $5400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. **【Results】** None of the initial tested vegetables had a Cr content exceeded the national safety standard. Since the green mustard had the highest uptake rate, it was used in the subsequent experimentation. The various added conditioners raised the soil pH by 0.45-0.93; increased the yield of mustard by 5.66-12.77%, except Z and Fe; and decreased the available Cr in soil by 39.8-53.8%. The treatments of P, M, Z, Fe, MP, MZ, MPFe, and MZFe lowered Cr content in the mustard by 53%, 33%, 44%, 32%, 59%, 40%, 72%, and 82%, respectively. **【Conclusion】** The Cr-uptake of mustard was significantly higher than those of the other crops grown on the same field. Both available Cr in soil and in mustard were

收稿日期: 2023-02-23 初稿; 2023-05-15 修改稿

作者简介: 罗泉达 (1978—), 男, 硕士, 高级农艺师, 主要从事农业生态环境研究 (E-mail: nytldq@163.com)

基金项目: 福建省科技计划引导性项目 (2021N0022)

significantly reduced by the M, P, Z, and Fe treatments that applied soil conditioner singly or in combination. In combination, MPFe or MZFe performed significantly superior in reducing Cr-accumulation in mustard.

Key words: Organic fertilizer; peat soil; zeolite; ferrous sulfate; chromium; mustard

0 引言

【研究意义】环境中释放的大部分铬均来自工业，特别是来自化工、矿山、钢铁、金属电镀、皮革鞣制、纺织染色、电镀、水泥生产、冶金等工业加工和制造^[1,2]。这些工业排放的含铬废水对农田土壤生态系统构成了严重威胁。《全国土壤污染状况调查公报》（2014 年 4 月 17 日）显示，土壤铬点位超标率达 1.1%，总体状况不容乐观^[3]。土壤中过量的铬不但影响农作物的生长和产量，而且进一步通过食物链对人体健康构成威胁^[4]。因此，限制土壤铬的有效性，降低农作物中铬的含量，对农业生态系安全和人体健康有重要的意义。【前人研究进展】由于我国人口多，耕地面积有限，对于轻中度铬污染农田土壤，不宜采用周期较长的植物修复法等，应采取较适合的农艺措施限制铬在农作物中累积^[5,6]。铬在土壤中主要有三价铬和六价铬 2 种形态，它们表现出的生物毒性有较大差异。三价铬是植物非必需金属元素，毒性较低，土壤中移动性弱^[7]；六价铬是一类致癌物，毒性高，移动性较强^[8]。土壤环境 pH、氧化还原电位、有机质、铁锰氧化物等因子，对于调节土壤铬生物有效性起到主要作用^[9,10]。因此，实际铬污染土壤修复中，经常利用以上因子活化或固定铬，达到修复土壤的目的。Raptis 等^[11]研究表明施用有机质（质量比 10% 和 30% 的风化褐煤），可有效将灌溉水中六价铬还原为三价铬，显著降低莴苣根及茎叶铬含量。石灰的添加可提高土壤 pH，增加对三价铬的吸附，但降低了对六价铬的

吸附。此外，添加氧化铁可增加土壤颗粒表面正电荷，增加对六价铬的吸附，进而降低六价铬的生物有效性^[12]。土壤连续淹水使 Eh 持续降低，可将 69.2%~71.8% 的六价铬还原为三价铬，干湿交替亦可将 33.3%~38.6% 的六价铬还原^[13]。增加土壤有机质含量（10 g·kg⁻¹ 水稻秸秆生物炭），配合土壤较低的 Eh（土壤连续淹水），可将 62% 六价铬还原为三价铬，增加水稻生物量，并降低水稻籽粒铬含量^[14]。由此可见，多种农艺措施单独或复合施用均可有效抑制土壤铬有效性，降低铬在农作物中的累积。【本研究切入点】以上研究多集中在室内盆栽试验或基于其他场地铬污染试验，而对野外铬污染农田土壤的安全利用研究有限。【拟解决的关键问题】通过大田试验，比较 5 种不同作物富集铬的能力，并以高富集作物为研究对象，研究有机钝化、无机吸附、化学还原材料的调理剂单独或联合施用措施阻断铬向作物富集的效果，为铬污染农田安全利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验位于漳州市漳浦县某村农田，土壤理化性质见表 1，供试土壤 pH 为 6.63，属于中性土壤；有机质含量为 16.3 g·kg⁻¹，属于适中等级（旱地 10~20 g·kg⁻¹）；阳离子交换量为 39.93 cmol·kg⁻¹，属于保肥供肥能力丰富等级；土壤为壤质黏土。土壤全铬含量为 203 mg·kg⁻¹，超过《农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）风险筛选

表 1 土壤和调理剂基本理化性质
Table 1 Physiochemical properties of soil and conditioners

土壤和调理剂 Soil and conditioners	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 Cation exchange capacity/ (cmol·kg ⁻¹)	机械组成 Mechanical composition/ %			重金属含量 Total amount of heavy Metals/ (mg·kg ⁻¹)				
				砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	镉 Cd	铅 Pb	砷 As	汞 Hg	铬 Cr
土壤 Soil	6.63	16.30	39.93	29.5	28.5	42.0	0.15	13	1.58	0.074	203
沸石 Zeolite	6.02	—	—	—	—	—	ND	15	8.52	0.060	30
有机肥 Organic fertilizer	8.55	51.8	—	—	—	—	0.62	16.4	2.05	0.200	25
泥炭土 Peat soil	7.90	540	—	—	—	—	0.595	154	14.3	0.034	54

ND: 未检出。砂粒（2~0.02 mm），粉粒（0.02~0.002 mm），黏粒（<0.002 mm）。
Sand (2-0.02 mm); silt (0.02-0.002 mm); clay (<0.002 mm).

值 ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, 铬 $> 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 低于风险管制值。镉、铅、砷、汞则低于风险筛选值, 试验地块属于铬单项安全利用类耕地。沸石 pH 为 6.02, 沸石中 5 项重金属含量在《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 筛选值之内。泥炭土 pH 为 7.90, 有机肥 pH 为 8.55, 泥炭土和有机肥的重金属含量均符合有机肥国家标准 (NY 525—2012)。

1.2 试验方法

1.2.1 不同作物铬富集能力比较 设 5 个处理, 分别为当地主栽作物花生、毛豆、甜玉米、甘薯和皱叶芥菜。每个处理设置 3 个重复, 小区面积为 40 m^2 ($40 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)。每个小区田块按农民正常水分管理和施肥, 均以垄作栽培方式。

1.2.2 不同调理剂铬修复能力比较 根据试验 1 结果, 选择铬富集能力最强的皱叶芥菜作为研究对象, 开展有机定向钝化、吸附钝化、化学还原和综合措施的安全利用模式筛选。试验设置 9 个处理, 分别为①泥炭土 (P) 和②植物源有机肥 (M) 进行土壤施用, 吸附钝化材料选用③沸石 (Z)。化学还原材料选用④硫酸亚铁 (Fe) 处理, 通过水肥滴灌系统, 分 5~6 次溶解于水, 滴入作物根圈周边, 用量为 $540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。综合措施有 4 种处理方式: ⑤植物源有机肥+泥炭土 (MP, 质量比 1:2, 施用总量 $5400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ⑥植物源有机肥+沸石 (MZ, 质量比 1:2, 施用总量 $5400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ⑦植物源有机肥+泥炭土+硫酸亚铁 (MPFe, 质量比 3:6:1, 施用总量 $5400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ⑧植物源有机肥+沸石+硫酸亚铁 (MZFe, 质量比 3:6:1, 施用总量 $5400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。每个处理设置 3 个重复, 每个小区面积为 40 m^2 ($40 \text{ m} \times 1 \text{ m}$), 随机区组排列, 化肥施用参照常规管理; 作物种植前, 调理剂一次性施入与土壤混合均匀, 起垄备用。

1.2.3 样品采集与分析 作物成熟时采用多点采样法收集各小区的农作物可食用部位和对应的土壤样品, 将收获的作物样品用超纯水清洗干净后, 放入烘箱以 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, 之后在 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下烘干至恒重并称量各部位干重。烘干的样品通过食品粉碎机粉碎、保存备用。土壤样品经风干、研磨过筛保存。

土壤 pH 用酸度计 (SevenCompact; Mettler-Toledo, 瑞士) 进行测定^[15]。土壤粒径、有机质含量和阳离子交换量 (CEC) 分别采用激光粒度分布仪 (BT-9300ST, 丹东百特, 中国)、重铬酸钾容量法-外加热法用元素分析仪 (Elementar Vario MAX cube, Elementar, 德国) 和乙酸铵交换法进行测定。

土壤有机质采用元素分析仪 (Elementar Vario MAX cube, Elementar, 德国) 进行测定。土壤有效态铬含量测定参照 HJ/T 166—2004, 全量铬采用 HCl-HNO₃-HClO₄ 方法进行消解 (GB/T 1739—1997)。植物铬含量采用 HNO₃-H₂O₂ 混合溶液放入微波消解仪 (MARS6, CEM, 美国) 中进行消解, 浸提液和消解液中的铬含量采用电感耦合等离子体质谱仪 (NexION 300X, PerkinElmer, 美国) 测定。

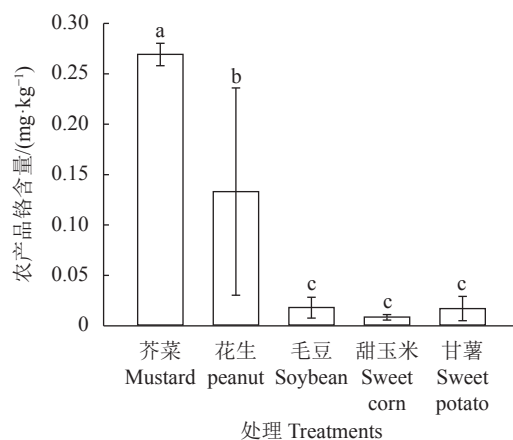
1.3 数据处理

采用 SPSS19.0 和 SigmaPlot14.0 软件进行统计分析和制图。数据以平均值±标准差表示, 并使用 5% 水平的最小显著差异 (Duncan) 进行分析, 以检测显著性 ($P < 0.05$)。采用 ANOVA 检验不同处理下的作物富集铬的能力、作物铬含量、土壤 pH 变化、土壤有效态铬含量等。

2 结果与分析

2.1 不同作物铬富集能力

5 种作物的铬含量 (图 1) 分别为: 皱叶芥菜 ($0.269 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 花生 ($0.184 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 毛豆 ($0.013 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 甘薯 ($0.015 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 甜玉米 ($0.009 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。5 种作物铬含量均低于食品安全国家标准铬限量值。皱叶芥菜和花生铬含量显著高于毛豆、甘薯和甜玉米 ($P < 0.05$), 皱叶芥菜铬含量也显著高于花生 ($P < 0.05$), 而毛豆、甘薯和甜玉米铬含量无显著差异 ($P > 0.05$)。5 种作物中甜玉米铬富集能力最低, 而皱叶芥菜铬富集能力总体较高, 皱叶芥菜、花生、毛豆和甘薯铬含量分别为甜玉米的 26.9、18.5、1.4 和 1.2 倍。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Data with different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$. Same for below.

图 1 不同农作物铬含量

Fig. 1 Changes in Cr content in vegetables

2.2 不同调理剂对土壤 pH 的影响

与对照处理相比（图 2），施用调理剂后土壤 pH 值增加了 0.45~0.93 个单位，增幅为 7.75%~16.07%，且各调理剂土壤 pH 值均显著高于对照（ $P<0.05$ ）。各处理土壤的 pH 值大小为：MZ（6.700）> Z（6.603）> M（6.600）> MPFe（6.470）> MZFe（6.323）> P（6.270）> Fe（6.265）> PM（6.220）> CK（5.773）。

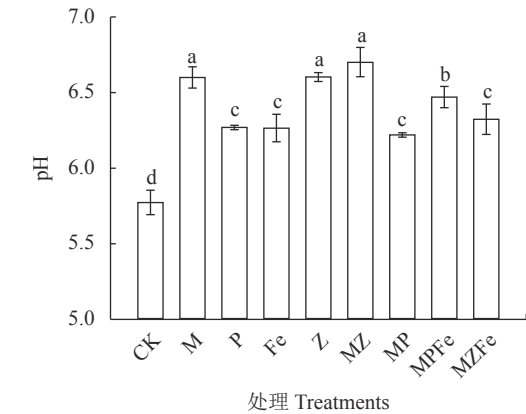


图 2 调理剂对土壤 pH 值的影响
Fig. 2 Effect of conditioners on soil pH

2.3 不同调理剂处理对芥菜产量的影响

由图 3 可知，与对照相比，硫酸亚铁（Fe）和沸石（Z）处理未显著影响皱叶芥菜产量，其他调理剂处理均显著提高了皱叶芥菜产量（ $P<0.05$ ）。各处理皱叶芥菜产量从大到小依次为：M（24600 kg·hm⁻²）> MP（24250 kg·hm⁻²）> MPFe（24000 kg·hm⁻²）> MZ（23400 kg·hm⁻²）> P（23200 kg·hm⁻²）> MZFe（23050 kg·hm⁻²）> CK（21815 kg·hm⁻²）> Z（21550 kg·hm⁻²）> Fe（21300 kg·hm⁻²），调理剂处理对皱叶芥菜产量的增幅分别为：12.77%（M）、11.16%（MP）、10.01%（MPZ）、7.27%（MZ）、6.35%（P）和 5.66%（MZFe）。

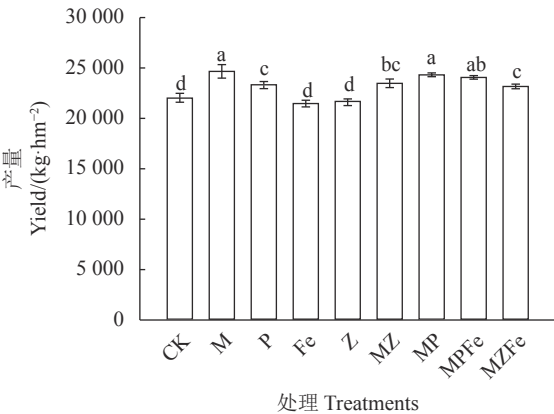


图 3 调理剂对皱叶芥菜产量的影响
Fig. 3 Effect of conditioners on mustard yield

2.4 不同调理剂对土壤有效态铬含量的影响

由图 4 可知，与对照相比，各调理剂处理均显著降低了土壤有效铬含量（ $P<0.05$ ），降幅为 39.79~53.86%。施用调理剂后，土壤有效铬含量依次为：CK（0.066 mg·kg⁻¹）> P（0.040 mg·kg⁻¹）> Fe（0.038 mg·kg⁻¹）> MPFe（0.037 mg·kg⁻¹）> MZFe（0.036 mg·kg⁻¹）> MP（0.035 mg·kg⁻¹）> MZ（0.0348 mg·kg⁻¹）> Z（0.034 mg·kg⁻¹）> M（0.031 mg·kg⁻¹）。与对照相比，调理剂处理土壤有效态铬降幅达 39.8%~53.8%，均低于农产品产地土壤重金属污染分级指标（DB35/T 859—2016）安全值（有效铬 0.5 mg·kg⁻¹）。

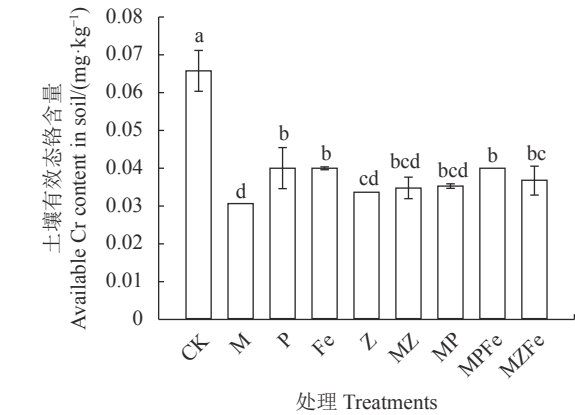


图 4 调理剂对土壤有效态铬含量的影响
Fig. 4 Effect of conditioners on available Cr content in soil

2.5 不同调理剂对皱叶芥菜重金属铬含量的影响

由图 5 可知，对照处理的皱叶芥菜铬含量为 0.269 mg·kg⁻¹，未超过国家食品安全限值（0.50 mg·kg⁻¹）。与对照相比，调理剂处理均显著降低了皱叶芥菜铬含量（0.086~0.221 mg·kg⁻¹）（ $P<0.05$ ），均低于国家铬安全限值。有机肥（M）、泥炭（P）、硫酸亚铁（Fe）、沸石（Z）、有机肥+沸石（MZ）、有机质+泥炭（MP）、有机肥+泥炭+硫酸亚铁（MPFe）、有机肥+沸石+硫酸亚铁（MZFe）处理后，皱叶芥菜

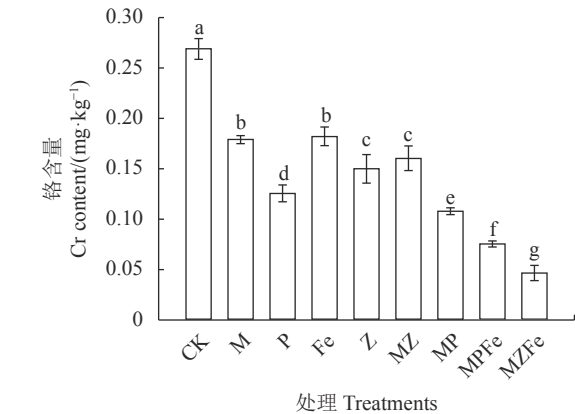


图 5 调理剂对皱叶芥菜铬含量的影响
Fig. 5 Effect of conditioners on Cr content in mustard

铬降幅分别为 33%、53%、32%、44%、40%、59%、72% 和 82%。其中, 泥炭(P)、有机肥+泥炭(MP)、有机肥+泥炭+硫酸亚铁(MPFe)、有机肥+沸石+硫酸亚铁(MZFe)处理降铬效果较好。

3 讨论

本研究中调理剂单施及联合施用均显著降低了土壤有效态铬, 一方面是由于调理剂的还原作用, 另一方面是由于调理剂的吸附作用。硫酸亚铁的施用可使土壤中的六价铬还原为三价铬, 降低了土壤中铬的毒性和有效性^[16]。有机肥可以提高土壤 pH^[17], 改善微生物群落结构, 促进有机碳和胡敏酸的生成与积累^[18, 19], 胡敏酸可将六价铬还原为三价铬, 并与三价铬形成络合物^[20]。泥炭土对六价铬具有较高的吸附能力和截持作用^[21], 有机质上的官能团在这一过程中起主要作用^[22]。沸石拥有较大比表面积和较高孔隙率, 对重金属铬表现出较好的吸附能力^[23-25]。

本研究结果表明, 施用的各种调理剂降低土壤有效性铬含量, 对降低皱叶芥菜中铬含量起到了决定性作用。除了六价铬到三价铬的还原作用, 施入土壤的硫酸亚铁产生水解氧化反应生成的 H⁺降低了土壤 pH 值, 土壤 pH 值随着反应时间的增加又呈现上升的趋势^[26]。pH 值的降低进一步促进了六价铬向三价铬的还原^[27], 而随后 pH 值升高促进了氢氧化铁的生成和含量, 进而促进了其对铬的吸附^[28, 29]。因此, 施用硫酸亚铁显著降低了植物对铬的吸收。Xu 等^[30]研究也表明, 六价铬可以限制水稻对铁元素的吸收, 而外源硫酸亚铁的添加缓解了铬造成的毒害作用并降低了水稻植物中的铬含量。

土壤铬污染会影响微生物群落多样性, 降低植物对一些营养元素的吸收, 而有机肥或泥炭土中含有的丰富营养物质, 缓解了铬胁迫对植物造成一些营养元素缺失的负面作用^[31, 32], 提高了土壤有机质含量, 改善土壤微生物群落结构, 促进微生物繁殖^[33]。Wyszkowska 等^[34]研究表明, 铬降低细菌的遗传多样性和丰富度以及真菌的生态生理多样性, 玉米植物根系与腐植酸的联合作用缓和了六价铬对细菌和真菌多样性的负面影响。微生物通过调节相关基因的表达来避免铬中毒或通过自主酶介导六价铬还原^[35]。因此, 有机肥或泥炭土的施用可以显著降低铬在牛至、莴苣和水稻等植物中的累积^[11, 36, 37]。

沸石是一种含水铝硅酸盐矿物, 由 SiO₄ 和 AlO₄ 的四面体形成的骨架组成, 四面体中 Al³⁺对 Si⁴⁺的同晶取代导致沸石骨架上的负电荷, 该负电荷可由可

交换阳离子平衡。因此, 天然沸石可以交换阳离子, 但不能交换阴离子^[38]。Radziemska 等^[39]研究表明, 三价铬胁迫时, 沸石的施用可以降低大豆中铬含量; 六价铬胁迫时, 沸石促进了大豆对铬的吸收。但他们发现在玉米中铬含量分布趋势刚好与大豆相反。他们还发现, 在 25、50 mg·kg⁻¹ 六价铬胁迫下, 沸石可以降低春油菜中铬含量, 但在 100、150 mg·kg⁻¹ 六价铬供给下, 沸石促进了春油菜含铬量^[40]。由此可见, 沸石对铬在土壤-植物系统的迁移富集作用受到不同植物种类、土壤中铬存在价态以及铬含量的影响。本试验结果表明沸石的施用降低了土壤有效态铬, 并显著降低皱叶芥菜铬含量, 土壤铬可能主要是经沸石的吸附用作被限制固定在土壤中。

本研究中, 各调理剂处理均显著降低了土壤有效态铬, 有机肥、沸石、有机肥+沸石 3 种处理分别降低土壤有效态铬 53.8%、48.9% 和 47.4%。调理剂的复合处理在降低皱叶芥菜铬含量方面的效果更加明显, 有机肥+沸石+硫酸亚铁、有机肥+泥炭土+硫酸亚铁两种复合处理分别将皱叶芥菜中铬含量降低了 82.3% 和 71.8%。因此, 针对有价态变化的铬污染农田土壤安全利用更为复杂, 除了评估土壤有效态铬含量, 还要考察农作物中铬的含量变化, 在制定土壤安全利用措施时考虑的因素应更加全面。同时, 不同类型调理剂混施效果在修复农田土壤铬污染方面仍需考虑土壤 pH 与类型、作物类型、铬浓度与价态等因素进行进一步的深入研究。

4 结论

(1) 供试作物中, 皱叶芥菜富集铬能力最高, 甜玉米富集铬能力最低, 皱叶芥菜和花生富集铬能力显著高于毛豆、甘薯和甜玉米。

(2) 沸石和硫酸亚铁处理对皱叶芥菜产量的影响不显著 ($P>0.05$), 其他处理均显著提高皱叶芥菜产量 ($P<0.05$), 增幅为 5.66%~12.77%。有机肥、泥炭土、沸石、硫酸亚铁单施或混施均显著提升了土壤 pH 值, 增幅为 0.45~0.93 个单位, 以沸石+有机肥、沸石和有机肥处理 pH 值增幅最高。各处理均显著降低土壤有效态铬含量 ($P<0.05$), 降幅为 39.8%~53.8%, 以沸石和有机肥的降低效果最好。

(3) 调理剂单施或混施均能显著降低皱叶芥菜中铬含量, 降幅介于 32%~82%, 泥炭+有机肥+硫酸亚铁、沸石+有机肥+硫酸亚铁处理可将皱叶芥菜铬含量降低 50% 以上。针对铬轻度污染农田土壤的安全利用, 可选择单施或复合施用有机肥、泥炭土、沸石及硫酸亚铁; 施用有机肥+泥炭土(沸石)+

硫酸亚铁复合调理剂对皱叶芥菜降铬效果较好。

参考文献：

- [1] NAKKEERAN E, PATRA C, SHAHNAZ T, et al. Continuous biosorption assessment for the removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using *Strychnos nux vomica* fruit shell [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2018, 3: 256–260.
- [2] LIAN G Q, WANG B, LEE X Q, et al. Enhanced removal of hexavalent chromium by engineered biochar composite fabricated from phosphogypsum and distillers grains [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134119.
- [3] 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.
- [4] 赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 1–11.
ZHAO F J, XIE W Y, WANG P. Soil and human health [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (1): 1–11. (in Chinese)
- [5] 张桃林. 守护耕地土壤健康 支撑农业高质量发展 [J]. 土壤, 2021, 53 (1): 1–4.
ZHANG T L. Protecting soil health of cultivated land to promote high-quality development of agriculture in China [J]. *Soils*, 2021, 53 (1): 1–4. (in Chinese)
- [6] 孙志佳, 李保飞, 陈玉海, 等. 湛江东北部农用地土壤重金属污染及生态风险评价 [J]. 河北农业大学学报, 2022, 45 (1): 61–68.
SUN Z J, LI B F, CHEN Y H, et al. Assessment of agricultural land on soil heavy metals pollution and ecological risk in the northeast of Zhanjiang City [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2022, 45 (1): 61–68. (in Chinese)
- [7] ROMERO-ESTÉVEZ D, YÁÑEZ-JÁCOME G S, NAVARRETE H. Non-essential metal contamination in Ecuadorian agricultural production: A critical review [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 115: 104932.
- [8] DESMARIAS T L, COSTA M. Mechanisms of chromium-induced toxicity [J]. *Current Opinion in Toxicology*, 2019, 14: 1–7.
- [9] ERTANI A, MIETTO A, BORIN M, et al. Chromium in agricultural soils and crops: A review [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228 (5): 190.
- [10] 王成文, 许模, 张俊杰, 等. 土壤pH和Eh对重金属铬(VI)纵向迁移及转化的影响 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (10): 6035–6041.
WANG C W, XU M, ZHANG J J, et al. Influence of soils pH and Eh on vertical migration and transformation of Cr(VI) [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10 (10): 6035–6041. (in Chinese)
- [11] RAPTIS S, GASPARATOS D, ECONOMOU-ELIOPOULOS M, et al. Chromium uptake by lettuce as affected by the application of organic matter and Cr(VI)-irrigation water: Implications to the land use and water management [J]. *Chemosphere*, 2018, 210: 597–606.
- [12] CHOPPALA G, KUNHIKRISHNAN A, SESHADRI B, et al. Comparative sorption of chromium species as influenced by pH, surface charge and organic matter content in contaminated soils [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 184: 255–260.
- [13] XIAO W D, YE X Z, ZHU Z Q, et al. Continuous flooding stimulates root iron plaque formation and reduces chromium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147786.
- [14] XIAO W D, YE X Z, ZHU Z Q, et al. Combined effects of rice straw-derived biochar and water management on transformation of chromium and its uptake by rice in contaminated soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111506.
- [15] 罗泉达. 三种肥料对巨菌草修复镉污染土壤的效果研究 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (3): 398–404.
LUO Q D. Fertilizer-enhanced phytoextraction of *Pennisetum sinense* roxb on cadmium in soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (3): 398–404. (in Chinese)
- [16] 徐榕, 王华伟, 孙英杰, 等. 沼渣协同硫酸亚铁修复Cr(VI)污染土壤 [J]. 环境科学学报, 2021, 41 (10): 4161–4169.
XU R, WANG H W, SUN Y J, et al. Remediation of Cr(VI) from contaminated soil with the combination of biogas residue and ferrous sulfate [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41 (10): 4161–4169. (in Chinese)
- [17] 李顺江, 李鹏, 李新荣, 等. 不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32 (3): 235–241.
LI S J, LI P, LI X R, et al. The influence of concentration of chromium, cadmium in soil-crop system under different fertilizers and fertilization amount [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32 (3): 235–241. (in Chinese)
- [18] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展 [J]. 生态环境学报, 2016, 25 (1): 175–181.
NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25 (1): 175–181. (in Chinese)
- [19] 孙莹, 侯玮, 迟美静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响 [J]. 土壤学报, 2019, 56 (4): 940–952.
SUN Y, HOU W, CHI M J, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and organic manure on soil humus composition in greenhouse [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (4): 940–952. (in Chinese)
- [20] JIANG W J, CAI Q A, XU W, et al. Cr(VI) adsorption and reduction by humic acid coated on magnetite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (14): 8078–8085.
- [21] CHWASTOWSKI J, STAROŃ P, KOŁOCZEK H, et al. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions using Canadian peat and coconut fiber [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 248: 981–989.
- [22] YANG S, CHENG Y, ZOU H, et al. Synergistic roles of montmorillonite and organic matter in reducing bioavailable state of chromium in tannery sludge [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29 (58): 87298–87309.
- [23] SHI W Y, SHAO H B, LI H, et al. Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite [J]. *Journal of*

- Hazardous Materials*, 2009, 170 (1) : 1–6.
- [24] 李喜林, 仝重凯, 刘玲, 等. 粉煤灰合成沸石对铬污染土壤中 Cr(III) 的吸附稳定化效果及机制研究 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (3) : 1240–1248.
- LI X L, TONG Z K, LIU L, et al. Study on the stabilization effect and mechanism of the synthesized zeolite from fly ash on Cr (III) in chromium contaminated soil [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21 (3) : 1240–1248. (in Chinese)
- [25] 文叶轩, 郝硕硕, 朱家亮, 等. 天然和改性沸石对铬吸附特征研究 [J]. 中国陶瓷, 2015, 51 (7) : 16–20.
- WEN Y X, HAO S S, ZHU J L, et al. Research on adsorption characteristics of chromium on natural and modified zeolite [J]. *China Ceramics*, 2015, 51 (7) : 16–20. (in Chinese)
- [26] 孙星星, 朱靖, 陶润萍, 等. 外源铁对水稻累积土壤镉的影响 [J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2022, 25 (1) : 74–78.
- SUN X X, ZHU J, TAO R P, et al. Effect of exogenous iron on soil Cd accumulation of rice [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2022, 25 (1) : 74–78. (in Chinese)
- [27] GRAHAM A M, BOUWER E J. Rates of hexavalent chromium reduction in anoxic estuarine sediments: PH effects and the role of acid volatile sulfides [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44 (1) : 136–142.
- [28] OLAZABAL M A, NIKOLAIDIS N P, SUIB S A, et al. Precipitation equilibria of the chromium(VI)/iron(III) system and spectroscopic characterization of the precipitates [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31 (10) : 2898–2902.
- [29] ZHAO X L, SU Y C, LI S B, et al. A green method to synthesize flowerlike Fe(OH)₃ microspheres for enhanced adsorption performance toward organic and heavy metal pollutants [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 73 : 47–57.
- [30] XU B, WANG F, ZHANG Q H, et al. Influence of iron plaque on the uptake and accumulation of chromium by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings: Insights from hydroponic and soil cultivation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 162 : 51–58.
- [31] LIU D H, ZOU J H, WANG M, et al. Hexavalent chromium uptake and its effects on mineral uptake, antioxidant defence system and photosynthesis in *Amaranthus viridis* L. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (7) : 2628–2636.
- [32] RIZWAN M, ALI S, QAYYUM M F, et al. Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: A critical review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (3) : 2230–2248.
- [33] WU J Q, SHA C Y, WANG M, et al. Effect of organic fertilizer on soil bacteria in maize fields [J]. *Land*, 2021, 10 (3) : 328.
- [34] WYSZKOWSKA J, BOROWIK A, ZABOROWSKA M, et al. Sensitivity of *Zea mays* and soil microorganisms to the toxic effect of chromium (VI) [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 24 (1) : 178.
- [35] TANG X, HUANG Y, LI Y, et al. Study on detoxification and removal mechanisms of hexavalent chromium by microorganisms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208 : 111699.
- [36] ANTONIADIS V, ZANNI A A, LEVIZOU E, et al. Modulation of hexavalent chromium toxicity on *Origanum vulgare* in an acidic soil amended with peat, lime, and zeolite [J]. *Chemosphere*, 2018, 195 : 291–300.
- [37] ZHOU J M, CHEN H L, TAO Y L, et al. Biochar amendment of chromium-polluted paddy soil suppresses greenhouse gas emissions and decreases chromium uptake by rice grain [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19 (4) : 1756–1766.
- [38] LEYVA-RAMOS R, JACOBO-AZUARA A, DIAZ-FLORES P E, et al. Adsorption of chromium(VI) from an aqueous solution on a surfactant-modified zeolite [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, 330 (1) : 35–41.
- [39] RADZIEMSKA M, WYSZKOWSKI M, BEŚ A, et al. The applicability of compost, zeolite and calcium oxide in assisted remediation of acidic soil contaminated with Cr(III) and Cr(VI) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26 (21) : 21351–21362.
- [40] RADZIEMSKA M, WYSZKOWSKI M. Using compost, zeolite and calcium oxide to limit the effect of chromium (III) and (VI) on the content of trace elements in plants [J]. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2017, 65 (2) : 709–719.

(责任编辑: 于洪杰)