

赵廷伟, 李洪达, 周 薇, 等. 施用凹凸棒石对Cd污染农田土壤养分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2313–2318.

ZHAO Ting-wei, LI Hong-da, ZHOU Wei, et al. Effects of attapulgite application on soil nutrients in Cd-contaminated farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2313–2318.

施用凹凸棒石对Cd污染农田土壤养分的影响

赵廷伟, 李洪达, 周 薇, 代允超, 吕家珑*

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为研究凹凸棒石黏土矿物对Cd污染农田土壤的影响,以及对植物吸收Cd的阻控作用,通过大田试验,以凹凸棒石作为化学修复剂,以Cd污染土壤为研究对象,研究了凹凸棒石修复Cd污染土壤的效果以及对作物吸收Cd的影响。结果表明:适量添加凹凸棒石对土壤速效养分无显著影响,但过量施用(1.25 kg·m⁻²),导致土壤碱解氮、有效磷含量分别降低6.76 mg·kg⁻¹和7.34 mg·kg⁻¹;添加凹凸棒石会显著提高土壤pH和CEC含量,凹凸棒石添加1.25 kg·m⁻²时,土壤pH最高可增加0.51个单位、CEC升高6.29 cmol·kg⁻¹;添加凹凸棒石会显著降低土壤有效态Cd含量,随其添加量的增加有效态Cd含量最高可降低27.66%(添加量1.25 kg·m⁻²);添加凹凸棒石能显著降低作物籽粒中Cd含量,添加量为1.25 kg·m⁻²时,油菜籽粒中Cd含量可降低35.19%,小麦籽粒中Cd含量可降低37.29%。由于凹凸棒石的过量施用会导致土壤肥力下降,因此,在耕种农田上利用凹凸棒石进行Cd污染的化学修复,一定要控制施用量和施用频次,在修复的同时尽量不要使土壤肥力水平降低。

关键词:Cd;凹凸棒石;化学钝化修复;有效态Cd;农田

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2019)10-2313-06 **doi:**10.11654/jaes.2019-0783

Effects of attapulgite application on soil nutrients in Cd-contaminated farmland

ZHAO Ting-wei, LI Hong-da, ZHOU Wei, DAI Yun-chao, LÜ Jia-long*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: To investigate the effects of attapulgite clay minerals on cadmium-contaminated farmland soils and the impedance control of Cd uptake by plants, this study treated attapulgite as a chemical repair agent and applied it to Cd-contaminated soils. The effects of attapulgite application rates on the remediation of Cd-contaminated soil and amount of Cd uptake by plants were evaluated. The results showed that only attapulgite application rates greater than 1.25 kg·m⁻² reduce nitrogen and phosphorus available in the soil by 6.76 mg·kg⁻¹ and 7.34 mg·kg⁻¹, respectively. In addition, the application of attapulgite significantly increases soil pH and CEC content. For instance, attapulgite of 1.25 kg·m⁻² reduces the effective Cd content in soil by 27.66%, while increasing soil pH by 0.51 and CEC by 6.29 cmol·kg⁻¹, respectively. The results also showed that Cd content could be reduced by 35.19% in rapeseed and 37.29% wheat grains at the same attapulgite application rate. However, excessive application of attapulgite can lead to a decline in soil fertility; as such, appropriate application rates of attapulgite and intervals between two applications should be used to repair the Cd-contaminated farmland to control pollution while maintaining soil fertility.

Keywords: Cd; attapulgite; chemical passivation repair; effective Cd; farmland

收稿日期:2019-07-14 录用日期:2019-09-10

作者简介:赵廷伟(1994—),男,甘肃金昌人,硕士研究生,主要从事土壤重金属污染及修复研究。E-mail:1373949979@qq.com

*通信作者:吕家珑 E-mail:ljll@nwsuaf.edu.cn

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-01);陕西省重点研发计划项目-重点产业创新链(2019ZDLNY01-02-01)

Project supported: The Key Science and Technology of Co-ordination and Innovation Program of Shaanxi Province, China (2016KTZDNY03-01); The Key R&D Program-Key Industry Innovation Chain of Shaanxi Province, China (2019ZDLNY01-02-01)

土壤是环境的重要组成部分,也是人类获得食物和其他可再生资源的物质基础^[1]。随着工业的快速发展和各种化工产品、农药、化肥的过量使用,重金属污染物通过各种途径进入环境,导致土壤被污染。作为生产资源,农田已成为治理土壤重金属污染的重中之重,研究其适当的修复技术也成为当前的热点和难点^[2]。

目前,我国耕地重金属污染严重。据有关调查,全国 11 个省市 25 个地区存在土壤 Cd 污染问题;Cd 污染土壤面积达 1.3 万 km²,其中污染耕地面积约 8000 万 hm²^[3]。重金属污染的修复研究具有重大价值,选择优异的、不易造成二次污染的钝化修复剂是化学修复的重要支撑^[4]。但是,在使用钝化剂修复重金属污染农田的同时也可能存在一些不利影响,如钝化剂的使用会降低土壤中有效养分含量,从而降低土壤肥力。因此,农田 Cd 污染土壤的修复具有重要的现实意义。

凹凸棒石(Attapulgite),也称为坡缕石,是一种分层的链状过渡结构,主要由含水富镁硅酸盐黏土组成,具有光滑、质轻吸水性较强的特点,潮湿时具有黏性和可塑性,另外还具有比表面积大、吸附性强、附着力强等特点,已被科研人员作为钝化修复剂用于修复土壤重金属污染^[5]。对于土壤重金属 Cd 污染土壤,凹凸棒石不仅能降低其浓度,还能影响土壤的 pH 和 CEC。Yang 等^[6]采用凹凸棒石处理 Cd 污染土壤,发现凹凸棒石可显著降低土壤中 Cd 的浓度。廖启林等^[7]对 Cd 污染蔬菜地中添加凹凸棒石进行了现场调控,发现当土壤 Cd 含量为 0.3~0.45 mg·kg⁻¹时,凹凸棒石每年添加量超过 750 g·m⁻²,会降低蔬菜 Cd 含量约 30%,在 pH<6.5 的土壤中加入凹凸棒石粉可提高土壤 pH,增加土壤 CEC,抑制作物吸收 Cd、Cu 等重金属。刘琴等^[8]使用天然凹凸棒石和改性凹凸棒石修复 Zn、Cd 模拟污染土壤,结果表明凹凸棒石在一定程度上降低了交换性 Cd 的含量。谭科艳等^[9]采用凹凸棒石修复 Cu、Zn 和 Cd 污染的土壤,Cd 的修复率达 34.92%。凹凸棒石也能影响 Cd 污染土壤的其他理化性质,如过量添加凹凸棒石会降低 Cd 污染土壤的速效养分^[10]。

鉴于此,本文拟以凹凸棒石为实验材料,以矿区重金属 Cd 污染农田土壤为研究对象进行大田试验,探讨不同添加量的凹凸棒石对土壤中重金属 Cd 含量以及土壤养分、pH 及 CEC 的影响,从而探究其对土壤中重金属 Cd 的钝化效果、植物吸收重金属的阻控作

用以及其对 Cd 污染农田土壤养分的影响,为凹凸棒石在重金属污染土壤修复中的应用提供试验基础和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

田间试验在陕西南部地区两点位(点位 I 和点位 II)进行,土壤理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

指标 Indicators	点位 I Point I	点位 II Point II
全氮/g·kg ⁻¹	1.56	2.12
碱解氮/mg·kg ⁻¹	105	131
有效磷/mg·kg ⁻¹	36.9	29.9
速效钾/mg·kg ⁻¹	178	138
pH	6.73	7.18
CEC/cmole·kg ⁻¹	22.6	16.7
全 Cd/mg·kg ⁻¹	1.32	2.27
有效态 Cd/mg·kg ⁻¹	0.47	0.76
全 As/mg·kg ⁻¹	10.5	20.5
全 Cr/mg·kg ⁻¹	64.6	78.9
全 Pb/mg·kg ⁻¹	48.9	33.7

1.1.2 供试修复剂与供试作物

供试的凹凸棒石购买于山东优索有限公司,产地为江苏省盱眙县,属于土状坡缕石,为白色粉末,粒径为 200 目。其 pH 8.56,全氮含量 1 140.3 mg·kg⁻¹、有效磷 28.9 mg·kg⁻¹、速效钾 1 079.7 mg·kg⁻¹、CEC 32.8 cmole·kg⁻¹、Cd 含量 0.04 mg·kg⁻¹。小麦品种为绵阳 31 号,油菜品种为秦油 10 号。

1.2 试验处理及样品采集

试验设置 5 个凹凸棒石施水平(0、0.50、0.75、1.00、1.25 kg·m⁻²),并以不施凹凸棒石为对照处理,每个处理重复 3 次,按凹凸棒石施用量,油菜各处理标记为 CK I、A1、A2、A3、A4,小麦各处理标记为 CK II、B1、B2、B3、B4,共 10 个处理。小区长 4 m,宽 3 m,随机区组排列。小区间留有 0.5 m 的间隔(地埂),小区周边留有 1 m 的保护行。试验前先整地,划小区,将小区大块土块打碎,均匀撒上凹凸棒石,通过翻地与 0~20 cm 耕层土壤充分混匀后,平整土地。油菜(点位 I)和小麦(点位 II)分别于 2018 年 10 月和 11 月播种,并按照当地习惯施用基肥,施用量约为氮肥 11.3 g·m⁻²(以 N 计),磷肥 7.50 g·m⁻²(以 P 计),氮肥用尿

素,磷肥用磷酸二铵,未施加钾肥。试验期间按照当地的习惯进行田间管理。收获时间为2019年5月,土壤样品与农作物同步采集。农产品随机收取籽粒500 g,自然晾干,待检测。土样用不锈钢制品采用五点法取表层0~20 cm厚的混合样品约1.0 kg,风干检测。

1.3 测定项目及分析方法

土壤的全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、pH值、阳离子交换量(CEC)的测定方法均参照《土壤农化分析》^[11]。采用王水-高氯酸消解法测定土壤中全量Cd;DTPA浸提-原子吸收火焰光度法测定有效态Cd含量。植物中Cd采用酸消解-原子吸收火焰光度法测定。

1.4 数据统计分析

采用Microsoft Excel 2007软件进行数据录入和整理,利用SPSS 17.0和Origin 2015软件进行统计分析和作图。处理间方差分析采用Duncan法在0.05水平下进行。

2 结果与讨论

2.1 凹凸棒石对土壤理化性质的影响

凹凸棒石的添加显著降低了点位I的土壤碱解氮和有效磷含量,而速效钾含量、pH以及CEC含量随着凹凸棒石的添加都有不同程度的增加(表2)。与CK I处理相比,A1、A2、A3处理中碱解氮含量有所降低但无显著差异,当凹凸棒石添加量为 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (A4)时,碱解氮含量较CK I显著降低 $6.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤中有效磷含量同样随着凹凸棒石的添加呈现降低趋势,A1、A2处理中有效磷含量与CK I处理相比

无显著差异,当凹凸棒石添加量达 $1.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,A3、A4处理分别较CK I显著降低 $4.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $7.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。然而,土壤中速效钾含量随着凹凸棒石的施加却有所增加,A1处理速效钾含量与CK I处理相比无显著差异,当凹凸棒石添加量达 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,与CK II处理相比达显著差异水平,A2、A3、A4处理速效钾含量分别升高 7.70 、 11.31 、 $16.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

点位II土壤碱解氮含量随着凹凸棒石的添加呈现降低趋势,B1、B2、B3处理碱解氮含量与CK II处理相比无显著差异,当凹凸棒石添加量为 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,与CK II处理相比达显著差异水平,B4处理土壤碱解氮含量降低 $4.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。点位II土壤有效磷含量同样随着凹凸棒石的添加呈现降低趋势,B1、B2、B3处理中有效磷含量与CK II处理无显著差异,当凹凸棒石添加量为 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (B4)时,较CK II显著降低 $7.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与点位I结果类似,点位II土壤速效钾含量随着凹凸棒石的施加也呈现升高趋势,B1、B2处理速效钾含量与CK II处理相比无显著差异,当凹凸棒石添加量达 $1.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,与CK II处理相比达显著差异水平,B3、B4处理分别升高 $10.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

凹凸棒石的添加使土壤碱解氮和有效磷含量降低是因为凹凸棒石具有很强的吸附性,过量施用会导致土壤速效养分被吸附,从而使土壤碱解氮和速效磷等有效养分含量降低^[10]。土壤速效钾含量的增加可能是因为凹凸棒石本身速效钾含量较高,且钾素易释放,从而导致土壤速效钾含量增加。

土壤pH对土壤理化性质、微生物活性、作物生长以及养分的存在形态和有效性有较大的影响,同时其

表2 不同处理下凹凸棒石对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of attapulgite on soil physical and chemical properties under different treatments

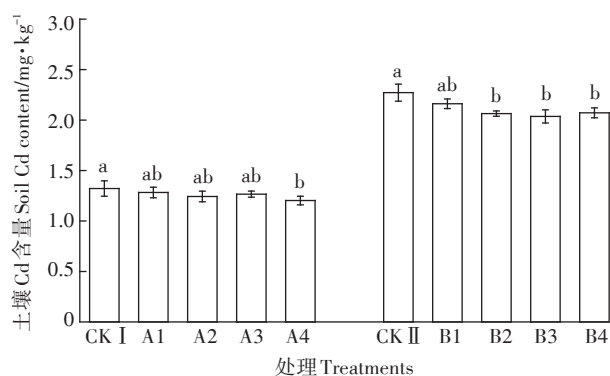
点位 Points	处理 Treatments	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
I	CK I	$1.56 \pm 0.18\text{a}$	$105.10 \pm 2.01\text{a}$	$36.87 \pm 1.82\text{a}$	$178.30 \pm 0.63\text{c}$	$6.73 \pm 0.02\text{c}$	$22.58 \pm 0.68\text{c}$
	A1	$1.54 \pm 0.05\text{a}$	$104.70 \pm 2.33\text{a}$	$35.36 \pm 1.68\text{ab}$	$180.53 \pm 0.95\text{c}$	$6.82 \pm 0.07\text{bc}$	$23.21 \pm 1.02\text{c}$
	A2	$1.55 \pm 0.08\text{a}$	$102.42 \pm 1.54\text{ab}$	$33.37 \pm 1.88\text{ab}$	$186.00 \pm 0.36\text{b}$	$6.92 \pm 0.04\text{b}$	$26.64 \pm 0.23\text{b}$
	A3	$1.53 \pm 0.20\text{a}$	$100.08 \pm 3.48\text{ab}$	$32.12 \pm 0.04\text{bc}$	$189.61 \pm 4.68\text{ab}$	$7.10 \pm 0.09\text{a}$	$30.35 \pm 1.10\text{a}$
	A4	$1.61 \pm 0.07\text{a}$	$98.34 \pm 1.50\text{b}$	$29.53 \pm 1.91\text{c}$	$194.95 \pm 2.51\text{a}$	$7.24 \pm 0.09\text{a}$	$28.87 \pm 0.64\text{a}$
II	CK II	$2.11 \pm 0.18\text{a}$	$131.40 \pm 2.08\text{a}$	$29.85 \pm 2.45\text{a}$	$137.78 \pm 0.92\text{c}$	$7.16 \pm 0.05\text{d}$	$15.66 \pm 1.35\text{c}$
	B1	$2.14 \pm 0.09\text{a}$	$130.50 \pm 1.70\text{ab}$	$28.04 \pm 0.6\text{a}$	$139.27 \pm 0.70\text{c}$	$7.21 \pm 0.02\text{d}$	$18.47 \pm 0.91\text{bc}$
	B2	$2.15 \pm 0.25\text{a}$	$132.60 \pm 2.02\text{a}$	$27.00 \pm 0.41\text{ab}$	$142.59 \pm 4.21\text{bc}$	$7.31 \pm 0.01\text{c}$	$20.11 \pm 1.36\text{b}$
	B3	$2.13 \pm 0.03\text{a}$	$129.30 \pm 0.85\text{ab}$	$25.78 \pm 3.59\text{ab}$	$148.29 \pm 3.67\text{b}$	$7.38 \pm 0.01\text{b}$	$23.74 \pm 1.10\text{a}$
	B4	$2.16 \pm 0.30\text{a}$	$126.80 \pm 1.07\text{b}$	$22.54 \pm 1.89\text{b}$	$154.12 \pm 1.11\text{a}$	$7.47 \pm 0.02\text{a}$	$25.48 \pm 1.87\text{a}$

注:同列同点位不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column and at the same position indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

也是影响重金属各种提取态含量、形态分布以及迁移转化的因素之一^[12]。点位Ⅰ、点位Ⅱ土壤pH测定结果如表2所示,与CK相比较,两个点位的土壤pH均有所升高。点位Ⅰ土壤pH测定结果表明,与CKⅠ处理相比,A3、A4处理达显著差异,A1、A2、A3、A4处理土壤pH分别增加0.09、0.19、0.37、0.51;点位Ⅱ土壤pH测定结果表明,与CKⅡ处理相比,B2、B3、B4处理土壤pH分别显著增加0.15、0.22、0.31。以上结果表明向土壤中施用凹凸棒石可显著提高土壤的pH,对调节耕层土壤的pH有明显效果。pH呈增加趋势,可能与凹凸棒石本身性质有关,凹凸棒石呈碱性,其pH值为8.56,施入土壤后能调节土壤酸碱环境,从而使土壤pH增加;也可能是由于凹凸棒石施入污染土壤后与Cd离子存在交换吸附作用,随着时间的推移,Cd离子取代了凹凸棒石中原有的Ca、K、Na等离子,增加了土壤中Ca、Na等碱性离子的浓度,使得pH升高^[13]。

土壤阳离子交换量(CEC)也是用来衡量土壤吸附固定重金属能力的指标之一。CEC值越大,吸附的重金属离子越多,土壤重金属污染危害农产品的风险就越小^[14]。田间试验土壤CEC测定结果如表2所示。随着凹凸棒石的施加,两点位土壤与各自对照处理相比,CEC都有不同程度的增加,随着凹凸棒石施加量的增加呈先升高后降低的趋势。点位Ⅰ土壤CEC测定结果表明,A2、A3、A4处理与CKⅠ处理相比达显著差异水平,分别增加4.06、7.77、6.29 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$;点位Ⅱ土壤CEC测定结果表明,B3、B4处理土壤CEC分别较CKⅡ显著增加8.08、9.82 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此可知,凹凸



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below

图1 不同处理下凹凸棒石对土壤全Cd含量的影响

Figure 1 impacts of attapulgite on soil Cd content under different treatments

棒石施用能提高土壤CEC含量。其原因在于凹凸棒石本身具有很高的CEC含量($32.76 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)。高于一般土壤,它的添加必然会提升土壤的CEC含量,另外,凹凸棒石具有很强的吸附性能和黏性,能够吸收更多的矿物元素,同时,其存在的自由颗粒也易与土壤胶体中颗粒反应形成有机-无机复合体以及土壤团聚体,从而使土壤CEC含量升高^[7]。

2.2 凹凸棒石对土壤全Cd、有效态Cd的影响

从图1可以看出,CKⅠ、CKⅡ的Cd含量分别为1.32、2.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),两处试验区域Cd含量均已超出标准限量。然而,凹凸棒石的添加并没有使Cd全量发生显著变化,而且随着凹凸棒石添加量的增加,点位Ⅰ、点位Ⅱ各个处理(除对照外)均无显著差异。其中,A4处理Cd全量与CKⅠ处理相比达显著差异,但降低幅度较小。随着凹凸棒石的添加,Cd全量的增减幅度也有所不同,B2、B3、B4各处理与CKⅡ处理相比达显著差异水平。凹凸棒石的添加使污染土壤中全Cd含量降低的主要原因可能与其种植作物有关,由于实验设置严格阻断了外来重金属污染源对实验地的再次污染,加之种植实验作物对土壤中重金属Cd的吸附作用,将土壤中的有效态Cd积累在作物根、秸秆、叶片、籽粒中,收获时带出试验地。

有效态Cd含量的测定结果如图2所示。由图可见,随着凹凸棒石的添加,各处理中有效态Cd含量有明显降低趋势,且随着凹凸棒石添加量的增加,各处理差异显著。由于试验地本身性质的差异以及全Cd含量的不同,两试验地初始有效态Cd含量也不相同。A1、A2、A3、A4处理有效态Cd含量随凹凸棒石的添

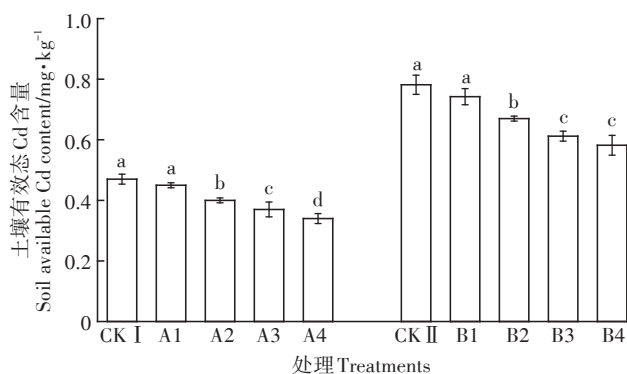


图2 不同处理下凹凸棒石对土壤有效态Cd含量的影响

Figure 2 Effects of attapulgite on soil effective Cd content under different treatments

加而降低,当凹凸棒石用量为 $0.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,有效态Cd含量与CK I处理相比无显著差异,A2、A3、A4处理较CK I处理($0.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别显著降低14.89%、21.28%、27.66%,A1、A2、A3、A4各处理之间差异显著。B1、B2、B3、B4处理有效态Cd含量同样随凹凸棒石的添加显著降低,B2、B3、B4处理有效态Cd分别降低13.92%、21.52%、25.32%,B3、B4处理之间无显著差异。以上结果表明,凹凸棒石的添加对土壤有效态Cd含量影响显著,点位I Cd污染土壤中有有效态Cd含量最高可降低27.66%,点位II Cd污染土壤中有有效态Cd含量最高可降低25.32%。有效态Cd含量降低程度的不同可能与两地土壤本身的理化性质及Cd浓度的不同有关。

凹凸棒石的添加使污染土壤中有有效态Cd含量降低可能与其本身的性质有关,吸附作用是黏土矿物的重要特性之一,凹凸棒石具有较大的比表面积和吸附性能,将土壤中的可溶性重金属元素牢牢地吸附于其表面或进入层间结构^[7]。同时凹凸棒黏土含有一定量的Mg、Fe等金属离子,具有阳离子交换性,可以与土壤中的Cd发生离子交换作用,降低土壤溶液中Cd浓度。而且,凹凸棒石黏土矿物有足够多的通道可吸附土壤中的Cd,从而达到固定Cd的目的^[15]。此外,土壤pH值的升高,也是影响土壤有效态Cd含量变化的重要原因,pH值的升高使得土壤表面的可变负电荷增多,提高了土壤有机-无机胶体及土壤黏粒对Cd的吸附能力,有利于生成 CdCO_3 和 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 沉淀,使土壤交换态和土壤溶液中Cd离子数量减少,从而降低了Cd的生物有效性^[16]。

2.3 凹凸棒石对作物籽粒中重金属含量的影响

如图3所示,参考《食品安全国家标准 食品中污

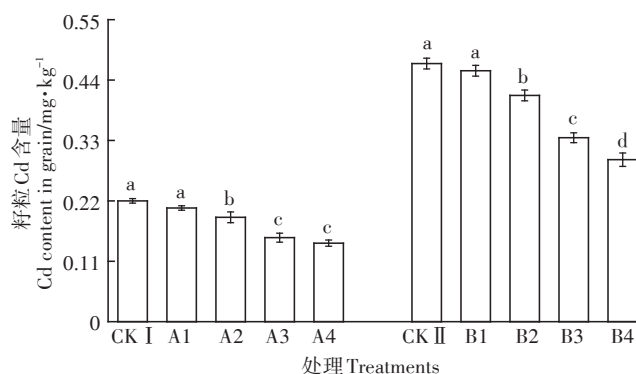


图3 不同处理下凹凸棒石对作物籽粒中Cd含量的影响

Figure 3 Effects of attapulgite on Cd contents in crop grains under different treatments

染物限量》(GB 2762—2017),点位I和点位II各处理的油菜、小麦籽粒中Cd含量均超过标准限量($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),两地作物已存在Cd污染风险。

点位I油菜籽粒中Cd含量分析结果显示,随着凹凸棒石的添加,油菜籽粒中Cd含量有降低趋势。当凹凸棒石在低用量 $0.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,油菜籽粒中Cd含量与CK I相比虽有降低趋势,但无显著差异;当凹凸棒石用量达到 $0.75\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,油菜籽粒中Cd含量与CK I处理相比达显著差异水平,处理A2、A3、A4籽粒中Cd含量与CK I处理($0.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比分别降低13.43%、30.56%、35.19%,A3、A4处理间无显著差异。综上所述,凹凸棒石的添加可不同程度地降低油菜籽粒中重金属Cd含量。

点位II小麦籽粒中Cd含量分析结果如图3所示,随着凹凸棒石的添加,小麦籽粒中Cd含量呈显著降低趋势。当凹凸棒石用量为 $0.50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,小麦籽粒中Cd含量与CK II处理($0.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比无显著差异;当凹凸棒石用量达 $0.75\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,与CK II相比达显著差异,B2、B3、B4处理小麦籽粒中Cd的含量相比CK II处理分别下降12.29%、28.81%、37.29%,参考GB 2762—2017,小麦籽粒中重金属Cd含量超出标准近5倍,凹凸棒石的添加最多可降低37.29%,但没能使其降低至标准以下。

综上所述,该研究中凹凸棒石的施用能有效降低作物油菜、小麦中重金属Cd的含量,最大降幅分别为35.19%、37.29%。主要原因是农作物对Cd的吸收主要取决于土壤中有有效态Cd含量,凹凸棒石加强了土壤对有效态Cd的吸持固定,改变了土壤Cd的活动能力,有效降低了土壤有效态Cd含量,阻断或滞缓土壤Cd向植物的迁移。范迪富等^[17]研究指出,施用凹凸棒石可有效降低芦蒿中Cd含量,最大降幅为46%。廖启林等^[7]研究指出连续施用凹凸棒石可使稻米Cd含量从 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上降低至 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下;杨剑超等^[12]研究表明凹凸棒石能有效降低空心菜中Cd含量,对于重金属污染土壤修复有良好的应用前景。李婧等^[10]研究指出,施用凹凸棒石可有效降低小白菜对Cd的吸收,降幅达12.10%~47.69%,效果显著。因此,凹凸棒石对土壤重金属Cd污染具有一定防控作用。

3 结论

(1)凹凸棒石显著提高供试土壤pH、CEC和速效钾含量,当凹凸棒石过量施用($>1.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$),可显著降低土壤碱解氮和有效磷含量。

(2)凹凸棒石降低土壤有效态Cd的活性,且使作物籽粒中的Cd含量显著降低。

参考文献:

- [1] 张 胜, 胡炳义, 陈 龙. 重金属及有机污染土壤的植物修复机制[J]. 河南农业科学, 2006, 35(7): 10-14.
ZHANG Sheng, HU Bing-yi, CHEN Long. The mechanism of phytoremediation of soil contaminated by heavy metals and organic pollutants [J]. *Henan Agricultural Science*, 2006, 35(7): 10-14.
- [2] 杨剑超, 孙 晓, 徐维华, 等. 凹凸棒对镉铬污染环境盆栽空心菜生长的影响[J]. 现代农业科技, 2017(7): 75-76.
YANG Jian-chao, SUN Xiao, XU Wei-hua, et al. Effects of attapulgite on growth of potted ipomoea aquatica in Cd-Cr contaminated soil[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(7): 75-76.
- [3] 庞荣丽, 王瑞萍, 谢汉忠, 等. 农业土壤中镉污染现状及污染途径分析[J]. 天津农业科学, 2016, 22(12): 87-91.
PANG Rong-li, WANG Rui-ping, XIE Han-zhong, et al. Analysis of cadmium pollution in agricultural soils and analysis of its Aay of pollution[J]. *Tianjin Agricultural Science*, 2016, 22(12): 87-91.
- [4] Wahsha M, Bini C, Argeese E. Heavy metals accumulation in willows growing on Spolic Technosols from the abandoned Imperina Valley mine in Italy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 123(12): 19-24.
- [5] 徐 奕, 李剑睿, 黄青青, 等. 坡缕石钝化与喷施叶面硅肥联合对水稻吸收累积镉效应影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1633-1641.
XU Yi, LI Jian-rui, HUANG Qing-qing, et al. Effect of palygorskite immobilization combined with foliar silicon fertilizer application on Cd accumulation in rice[J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2016, 35(9): 1633-1641.
- [6] Yang R, Li H B, Zhou Y L, et al. Stabilization of cadmium contaminated soils by ferric ion modified attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and stabilization mechanism[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 3032-3037.
- [7] 廖启林, 刘 聪, 朱伯万, 等. 凹凸棒石调控Cd污染土壤的作用及其效果[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1693-1704.
LIAO Qi-lin, LIU Cong, ZHU Bo-wan, et al. The role and effect of applying attapulgite to controlling Cd-contaminated soil[J]. *Geology of China*, 2014, 41(5): 1693-1704.
- [8] 刘 琴, 乔显亮, 王宜成, 等. Zn/Cd污染土壤的化学钝化修复[J]. 土壤, 2008, 40(1): 78-82.
LIU Qin, QIAO Xian-liang, WANG Yi-cheng, et al. Remediation of chemical passivation of soils contaminated with Zinc/Cadmium[J]. *Soil*, 2008, 40(1): 78-82.
- [9] 谭科艳, 刘晓端, 刘久臣, 等. 凹凸棒石用于修复铜锌镉重金属污染土壤的研究[J]. 岩矿测试, 2011, 30(4): 451-456.
TAN Ke-yan, LIU Xiao-duan, LIU Jiu-chen, et al. Remediation experiments of attapulgite clay to heavy metal contaminated soil[J]. *Rock and Mineral Testing*, 2011, 30(4): 451-456.
- [10] 李 婧, 陈 森, 周艳文, 等. 凹凸棒石施用对镉污染土壤理化性质及小白菜生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(29): 101-103, 173.
LI Jing, CHEN Sen, ZHOU Yan-wen, et al. Effects of attapulgite application on Cd contaminated soil's physical and chemical properties and Chinese cabbage's Growth[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2017, 45(29): 101-103, 173.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
BAO Shi-dan. Soil agricultural analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [12] 刘 冲. 生物炭基肥对水稻土中Cd、Cu、Pb和Zn的钝化效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
LIU Chong. Effect of biochar based fertilizer on remediation of Cd, Cu, Pb and Zn in paddy soils[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [13] 赵雅琼. 有机质和凹凸棒对Cd污染土壤理化性质的影响[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
ZHAO Ya-qiong. Effects of organic matter and attapulgite application on the physicochemical properties of Cd-contaminated soil[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [14] Brooks, Scott C. Geochemical and hydrological reactivity of heavy metals in soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 3(2): 733.
- [15] 任静华, 廖启林, 范 健, 等. 凹凸棒粘土对镉污染农田的原位钝化修复效果研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2161-2168.
REN Jing-hua, LIAO Qi-lin, FAN Jian, et al. Effect of in-situ stabilizing remediation of Cd-polluted soil by attapulgite[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2017, 26(12): 2161-2168.
- [16] 傅正强. 靖远凹凸棒石吸附水溶液中Cd(II)性能的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
FU Zheng-qiang. Studies on adsorption of Cd(II) from aqueous solution by Jingyuan attapulgite[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [17] 范迪富, 黄顺生, 廖启林, 等. 不同量剂凹凸棒石粘土对镉污染菜地的修复实验[J]. 地质学刊, 2007, 31(4): 323-328.
FAN Di-fu, HUANG Shun-sheng, LIAO Qi-lin, et al. Restoring experiment on cadmium polluted vegetable lands with attapulgite of varied dose[J]. *Journal of Geology*, 2007, 31(4): 323-328.