

谢 霏, 余海英, 李廷轩, 等. 几种矿物材料对 Cd 污染土壤中 Cd 形态分布及植物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 61–66.

XIE Fei, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, et al. Effects of some minerals on fractions and phytoavailability of Cd in Cd-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 61–66.

几种矿物材料对 Cd 污染土壤中 Cd 形态分布及植物有效性的影响

谢 霏, 余海英*, 李廷轩, 张锡洲, 郑子成, 陈光登

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘 要:采用盆栽试验,研究了海泡石、钙基膨润土、钠基膨润土、汉白玉和石灰 5 种矿物材料不同添加量对 Cd 污染土壤 pH、有效 Cd、Cd 形态分布及小白菜生物量、Cd 含量的影响。结果表明:几种矿物材料均可显著提高土壤 pH,并显著降低土壤有效态 Cd 含量,且降低幅度随添加量的增加而增大。与对照相比,添加矿物材料后土壤 pH 提高 0.1~0.7 个单位,有效 Cd 含量降低 9.19%~18.92%。几种矿物材料对土壤 Cd 形态的影响均以酸提取态和残渣态的变化较为明显,酸提取态 Cd 比例降低 3.27%~8.68%,残渣态 Cd 比例升高 1.35%~4.75%,添加海泡石和钠基膨润土处理的变化更为突出。小白菜地上部和根部 Cd 含量随矿物材料用量的增加而降低,分别较对照降低 16.03%~42.95%和 20.69%~50.34%,海泡石、钠基膨润土和石灰的降低效果更好。值得注意的是,除海泡石和钙基膨润土外,施用钠基膨润土、汉白玉和石灰在降低小白菜 Cd 含量的同时亦可造成其地上部生物量的显著降低。

关键词:矿物材料;Cd;形态分布;植物有效性

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)01-0061-06 doi:10.11654/jaes.2016.01.008

Effects of some minerals on fractions and phytoavailability of Cd in Cd-contaminated soil

XIE Fei, YU Hai-ying*, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, ZHENG Zi-cheng, CHEN Guang-deng

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to study the effects of five minerals (sepiolite, Ca-bentonite, Na-bentonite, white marble, and lime) at three application rates on soil pH, available Cd, and Cd fractions as well as plant biomass and Cd content of *Brassica chinensis* L. in Cd-contaminated soil. Applying the five minerals significantly increased soil pH by 0.1~0.7, decreased soil available Cd by 9.19%~18.92% in a dose-effect manner, compared to the control treatment. Applications of minerals dramatically changed acid extractable Cd and residual Cd which was more prominent in sepiolite and Na-bentonite treatments. Compared with the control treatment, the proportion of acid extractable Cd decreased by 3.27%~8.68% and that of the residual Cd increased by 1.35%~4.75% in mineral treatments. The Cd content in both shoot and root of *Brassica chinensis* L. in mineral treatments decreased by 16.03%~42.95% and 20.69%~50.34%, respectively, compared with the control. Sepiolite, Na-bentonite and lime showed better performance in reducing the Cd content of *Brassica chinensis* L. However, applications of minerals remarkably decreased shoot biomass of *Brassica chinensis* L., compared to the control, except sepiolite and Ca-bentonite.

Keywords: minerals; Cd; fraction distribution; phytoavailability

目前,由土壤重金属污染带来的环境生态和食品安全问题已受到人们的广泛关注。在众多重金属污染

物中,Cd 以其移动性强、毒性高、污染面积广被列为“五毒之首”^[1]。当土壤 Cd 累积到一定程度时就会引起土壤质量的恶化,并对作物的生长和发育产生危害,甚至通过地面扬尘、地表径流和食物链等途径对人畜健康产生威胁^[2]。部分地区因农田土壤污染导致的农产品 Cd 超标事件如“镉米事件”、“尿镉超标”等已引起社会的强烈反响。因此,对 Cd 污染土壤的修

收稿日期:2015-08-13

基金项目:四川省科技支撑计划(2014NZ0008);四川省教育厅项目(14ZB0017);四川农业大学学科双支计划资助(2014)

作者简介:谢 霏(1991—),女,四川南充人,硕士研究生,主要从事土壤污染防控与安全生产研究。E-mail:xiefei1016@163.com

*通信作者:余海英 E-mail:haiyingaa1@163.com

复治理刻不容缓。

在众多的修复方法中,原位化学钝化修复利用外源添加的钝化剂与污染土壤中的重金属发生沉淀、吸附、离子交换、络合及氧化还原等反应,从而改变重金属在土壤中的赋存形态,降低其在土壤环境中的迁移性和生物有效性,减少植物对重金属的吸收^[3]。原位钝化修复因其易于实施、见效快等优点而被认为是一种行之有效的修复技术,对抑制植物吸收 Cd、实现 Cd 污染土壤的安全利用等具有重要的现实意义^[4]。蔬菜特别是叶类蔬菜对 Cd 的吸收积累能力较强,导致其 Cd 含量超标现象尤为突出^[5-6]。已有报道表明,某些碱性物质、含磷物质、粘土矿物、铁锰氧化物以及有机物料等可钝化土壤中 Cd,降低土壤 Cd 的活性,从而减少叶类蔬菜体内的 Cd 含量^[7-10]。然而,不同材料的钝化修复效果依土壤性质、重金属污染类型及程度、材料的种类及用量等的不同而差异明显^[11-12]。因此,本研究采取 Cd 污染土壤的盆栽试验,选用取材方便、环境友好且符合重金属钝化原理的海泡石、钙基膨润土、钠基膨润土、汉白玉和石灰作为供试材料,以小白菜为指示植物,研究其对土壤 pH、有效态 Cd 含量、Cd 形态分布以及小白菜生物量与 Cd 含量的影响,以期为当地 Cd 污染土壤的原位钝化修复及蔬菜的安全生产提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤:采自四川省双流县永安镇牧马坪,土壤类型为水稻土,其基本性质:pH 7.1、有机质 22.00 g·kg⁻¹、全氮 1.44 g·kg⁻¹、碱解氮 78.00 mg·kg⁻¹、速效磷 5.90 mg·kg⁻¹、速效钾 37.00 mg·kg⁻¹。自然风干后过 2 mm 筛,按 5 mg·kg⁻¹ 土的 Cd 量加入 CdCl₂·2.5H₂O 溶液与土壤充分混匀,陈化 1 年后土壤全 Cd 含量为 5.20 mg·kg⁻¹,有效态 Cd 含量为 2.02 mg·kg⁻¹。

矿物材料:海泡石(pH 8.38, 120 目)、钙基膨润土(pH 8.56, 100 目)、钠基膨润土(pH 9.67, 100 目)、汉白玉(pH 8.66, 100 目)和石灰(pH 12.39, 100 目)。

植物:小白菜(*Brassica chinensis* L.),品种为快客35。

肥料:尿素(N 46%)、磷酸二氢钾(P₂O₅ 52%、K₂O 34%)、硫酸钾(K₂O 54%),均为分析纯。

1.2 试验设计与处理

试验中 5 种矿物材料均设 3 个添加量:石灰为土重的 0.1%、0.3% 和 0.5%,海泡石、钠基膨润土、钙基

膨润土、汉白玉均为土重的 1%、3% 和 5%。以不添加矿物材料为对照,共 16 个处理,每个处理 3 次重复,共 48 盆,随机排列。氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥用量分别为 0.30、0.18、0.24 g·kg⁻¹。

采用土培盆栽试验,在四川农业大学有防雨设施的网室中进行。按照试验设计的施用比例将矿物材料与陈化后的 Cd 污染土壤充分混匀后装入容积为 3 L 的塑料盆中,每盆装土 2.5 kg,同时以溶液形式施入底肥。平衡 14 d 后将小白菜种子以每盆 15 粒直播于盆中,待小白菜长至两片真叶时间苗,每盆定苗 6 株。生长过程中不定期浇水,使土壤含水量保持在田间持水量的 70% 左右。

在小白菜生长 25 d 后采样。植株样品先用自来水冲洗再用去离子水润洗,洗净后用吸水纸擦干,分为地上部和根部,称鲜重。在 105 °C 杀青 0.5 h,然后 75 °C 烘干至恒重,称干重,样品粉碎备用。在小白菜收获后采集盆中土样,风干后过筛备用。

1.3 测定项目及方法

土壤基本理化性质采用常规分析方法测定^[13];植株 Cd 含量和土壤 Cd 全量分别采用 HNO₃-HClO₄ 和 HNO₃-HClO₄-HF 消化,原子吸收分光光度计测定^[1];土壤有效态 Cd 含量采用 DTPA 提取,原子吸收分光光度计测定;土壤 Cd 形态分析采用 BCR 法^[14]。

1.4 数据处理

统计分析采用 DPS 11.0,多重比较选择 LSD 法;图表制作采用 Origin 8.0 和 Excel 2010。

2 结果与分析

2.1 矿物材料对土壤 pH 和有效态 Cd 含量的影响

由表 1 可知,添加矿物材料可显著提高土壤 pH。与对照相比,海泡石、钙基膨润土、钠基膨润土、汉白玉和石灰分别使土壤 pH 升高 0.1~0.3、0.1~0.3、0.4~0.7、0.3~0.3、0.2~0.3 个单位。其中 5% 钠基膨润土处理下的增幅最大,且与其他处理间的差异均达显著水平。

与对照相比,添加不同矿物材料后土壤有效态 Cd 含量均显著降低,降幅为 9.19%~18.92%,且降幅随矿物材料用量的增加而明显增大(表 1)。不同矿物材料相同添加量水平下,土壤有效态 Cd 含量无显著差异;同一材料不同添加量下,土壤有效态 Cd 含量在高量和低量处理间的差异均达显著水平。

2.2 添加矿物材料对土壤 Cd 形态分布的影响

由表 2 可知,与对照相比,添加不同矿物材料后污染土壤中酸提取态 Cd 含量显著降低,可氧化态 Cd

表 1 不同矿物材料对土壤 pH 和有效态 Cd 含量的影响

Table 1 Effects of different minerals on soil pH and available Cd content

矿物材料	添加量	pH	有效态 Cd/mg·kg ⁻¹
对照	0	7.1	1.85±0.05a
海泡石	1%	7.2	1.68±0.04b
	3%	7.3	1.59±0.04cd
	5%	7.4	1.51±0.04e
钙基膨润土	1%	7.2	1.67±0.02b
	3%	7.4	1.59±0.04cd
	5%	7.4	1.51±0.04e
钠基膨润土	1%	7.5	1.62±0.04bc
	3%	7.5	1.57±0.08cde
	5%	7.8	1.51±0.04e
汉白玉	1%	7.4	1.63±0.06bc
	3%	7.4	1.60±0.04cd
	5%	7.4	1.55±0.04de
石灰	0.1%	7.3	1.64±0.04bc
	0.3%	7.4	1.55±0.01de
	0.5%	7.4	1.50±0.02e

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters within a column mean significant difference between different treatments at 0.05 level.

和残渣态 Cd 含量均显著增加,可还原态 Cd 含量无显著变化。从其分配比例来看,添加矿物材料后,污染土壤中酸提取态 Cd 比例降低,降幅为 3.27%~8.68%;而可氧化态 Cd、可还原态 Cd 和残渣态 Cd 比例升高,

其中残渣态 Cd 的比例升高最为明显,增幅为 1.35%~4.75%。这表明,矿物材料的添加可促使土壤中的 Cd 由活性较高的形态向活性较低的形态转化,从而在一定程度上稳定了土壤中的 Cd。几种矿物材料中,海泡石和钠基膨润土对土壤 Cd 形态的影响效果相当,不但较其他几种矿物材料的效果更佳,而且影响效果随添加量的增加而增加。

2.3 矿物材料对小白菜地上部和根部 Cd 含量的影响

由表 3 可知,添加矿物材料后,小白菜地上部 Cd 含量均显著低于对照,且随着材料添加量的增加而降低。从矿物材料种类来看,几种矿物材料对小白菜地上部 Cd 含量的降低效果表现为钠基膨润土>石灰>海泡石>汉白玉>钙基膨润土。就同一矿物材料不同用量而言,海泡石和钙基膨润土高量处理下的降低幅度显著高于低量处理,钠基膨润土、汉白玉和石灰各用量间均无显著差异。

不同矿物材料对小白菜根部 Cd 含量的影响与地上部存在明显不同,但同样较对照显著降低。从矿物材料种类来看,几种矿物材料对小白菜根部 Cd 含量的降低效果表现为海泡石>石灰>钠基膨润土>钙基膨润土>汉白玉。就矿物材料用量而言,海泡石、钙基膨润土、钠基膨润土和石灰高量处理的 Cd 降低效果均显著高于低量处理,汉白玉各用量间的差异均不显著。

表 2 不同矿物材料对土壤 Cd 形态分布的影响

Table 2 Effects of different minerals on Cd fractions in soil

矿物材料	添加量	酸提取态		可氧化态		可还原态		残渣态	
		含量/mg·kg ⁻¹	比例/%	含量/mg·kg ⁻¹	比例/%	含量/mg·kg ⁻¹	比例/%	含量/mg·kg ⁻¹	比例/%
对照	0	1.27a	24.42	1.47e	28.27	1.02b	19.62	1.44f	27.69
海泡石	1%	1.07bcde	20.42	1.54cd	29.39	1.03ab	19.66	1.60c	30.53
	3%	0.92f	17.79	1.57ab	30.37	1.04ab	20.12	1.64ab	31.72
	5%	0.86g	16.54	1.60a	30.77	1.06ab	20.38	1.68a	32.31
钙基膨润土	1%	1.10b	21.15	1.52d	29.23	1.02b	19.62	1.56cde	30.00
	3%	1.07bcde	20.58	1.54cd	29.62	1.05ab	20.19	1.54de	29.62
	5%	1.02cde	19.65	1.55bc	29.87	1.05ab	20.23	1.57cd	30.25
钠基膨润土	1%	1.02cde	19.73	1.53cd	29.59	1.06ab	20.5	1.56cde	30.17
	3%	0.93f	17.95	1.54cd	29.73	1.07ab	20.66	1.64ab	31.66
	5%	0.82g	15.74	1.61a	30.90	1.09a	20.92	1.69a	32.44
汉白玉	1%	1.10bc	21.15	1.53cd	29.42	1.04ab	20.00	1.53de	29.42
	3%	1.05bcde	20.31	1.52d	29.40	1.06ab	20.50	1.54de	29.79
	5%	1.09bcd	20.96	1.54cd	29.62	1.06ab	20.38	1.51e	29.04
石灰	0.1%	1.09bcd	21.04	1.51d	29.15	1.03ab	19.88	1.55cde	29.92
	0.3%	1.08bcde	20.69	1.52d	29.12	1.06ab	20.31	1.56cde	29.89
	0.5%	1.04e	20.04	1.53cd	29.48	1.06ab	20.42	1.56cde	30.06

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$);比例表示各形态 Cd 含量占全 Cd 含量的百分比。

Note: Different letters within a column mean significant difference between different treatments at 0.05 level.

表3 不同矿物材料对小白菜地上部和根部 Cd 含量的影响
Table 3 Effects of different minerals on Cd content in shoot and root of *Brassica chinensis* L.

矿物材料	添加量	地上部		根部	
		Cd 含量/ mg·kg ⁻¹ FW	降低率/ %	Cd 含量/ mg·kg ⁻¹ FW	降低率/ %
对照	0	1.56±0.04a	—	1.45±0.04a	—
海泡石	1%	1.21±0.03bcA	22.44	0.94±0.04defA	35.17
	3%	1.07±0.11deAB	31.41	0.79±0.04ghB	45.52
	5%	0.95±0.06fgB	39.10	0.74±0.02hB	48.97
钙基膨润土	1%	1.31±0.02bA	16.03	1.15±0.01bA	20.69
	3%	1.27±0.04bcA	18.59	1.12±0.11bA	22.76
	5%	1.19±0.03cdB	23.72	0.82±0.08fghB	43.45
钠基膨润土	1%	0.98±0.06efgA	37.18	1.14±0.06bA	21.38
	3%	0.92±0.09fgA	41.03	0.94±0.04defB	35.17
	5%	0.92±0.07fgA	41.03	0.88±0.04efgB	39.31
汉白玉	1%	1.32±0.10bA	15.38	1.05±0.08bcdA	27.59
	3%	1.24±0.02bcA	20.51	1.07±0.11bcdA	26.21
	5%	1.17±0.10cdA	25.00	0.95±0.16defA	34.48
石灰	0.1%	1.02±0.05efA	34.62	1.11±0.10bcA	23.45
	0.3%	0.89±0.09gA	42.95	0.97±0.16cdA	33.10
	0.5%	0.95±0.12fgA	39.10	0.72±0.06hB	50.34

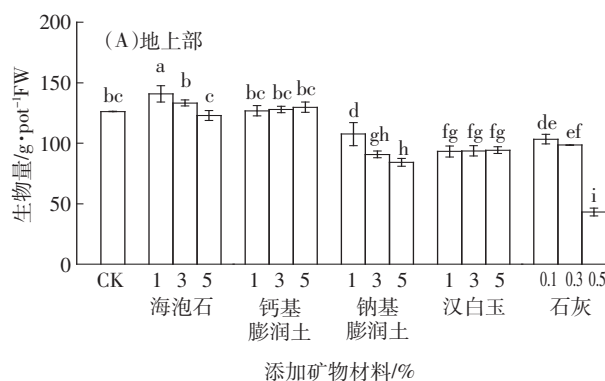
注:不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$);大写字母表示同一矿物材料不同添加量间差异显著($P<0.05$);降低率表示矿物材料处理下的 Cd 含量相对于对照降低的百分比。

Note: Different normal font letters within a column mean significant difference between different treatments at 0.05 level; different uppercase letters indicate significant difference between different rates within a mineral at 0.05 level; reduction rate mean percentage of decrease in Cd content in mineral treatment over the control.

综合来看,高量处理下的海泡石、钠基膨润土和石灰对小白菜 Cd 含量的降低效果更为突出。

2.4 不同矿物材料对小白菜生物量的影响

由图1可知,不同矿物材料对小白菜生物量的影



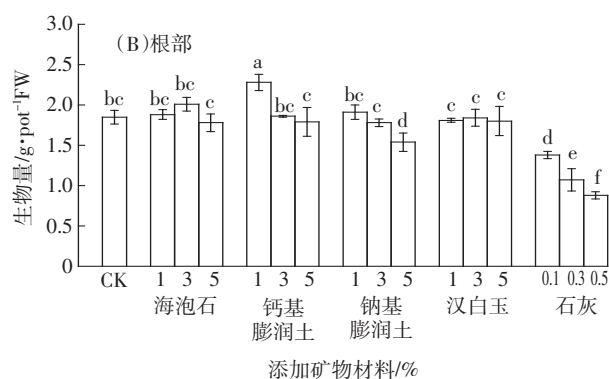
响因矿物材料类型的不同而差异显著。与对照相比,1%海泡石处理显著增加了小白菜地上部生物量,而钠基膨润土、汉白玉和石灰在各用量水平上均显著降低了地上部生物量;1%钙基膨润土显著增加了根部生物量,而5%的钠基膨润土处理和石灰的不同用量处理均显著降低了根部生物量,其余各处理相比对照差异不明显。5种矿物材料中,钠基膨润土、汉白玉和石灰对小白菜的生长有显著的抑制作用,而海泡石和钙基膨润土处理在显著降低小白菜 Cd 含量的同时,亦能保证其生物量不受影响。

3 讨论

3.1 几种矿物材料对土壤 Cd 活性的影响

不同材料施入土壤后,主要是通过调节土壤理化性质,使重金属发生沉淀、吸附、络合等反应,从而降低重金属的活性,进而降低重金属对植物和人体的毒害,达到修复重金属污染土壤的目的^[14]。本研究结果表明,几种矿物材料显著提高了土壤 pH,有效态 Cd 含量显著降低(表1)。土壤重金属的吸附-解吸、沉淀-溶解等均受 pH 的强烈影响,因而其固定与土壤 pH 密切相关^[15]。郭利敏等^[16]和王林等^[17]研究表明,施用石灰和海泡石等材料使土壤中 pH 升高,土壤有效态 Cd 含量下降;周歆等^[18]研究结果表明,石灰石和海泡石配施显著提高了土壤 pH,从而显著降低土壤有效性较高的可交换态 Cd 含量。

土壤中重金属总量是评价重金属污染程度、对生物毒害及环境影响程度的重要指标,但不能较好地反映重金属的生物有效性,因为重金属的生物有效性不仅与其总量有关,更大程度上取决于其存在的形态^[19]。本研究中,几种材料均能降低土壤酸提取态 Cd 比



不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)

Different letters mean significant difference between different treatments at 0.05 level

图1 不同矿物材料对小白菜地上部(A)和根部(B)生物量的影响

Figure 1 Effects of different minerals on biomass in shoot(A) and root(B) of *Brassica chinensis* L.

例,提高可氧化态、可还原态和残渣态Cd比例,使土壤中Cd从有效性较高的形态向有效性较低的形态转化,从而降低土壤Cd活性(表2)。王林等^[20]施用黏土矿物和鸡粪促进土壤Cd由活性高的可交换态向活性低的残渣态或有机结合态转化,从而显著降低了Cd的生物有效性。

3.2 几种矿物材料对小白菜吸收Cd的影响

本研究结果显示,在Cd污染土壤中添加不同矿物材料均显著降低小白菜植株内Cd含量(表2),抑制了小白菜对Cd的吸收,与谢运河等^[21]研究赤泥和石灰对玉米吸收Cd的影响结果一致。不同材料降低小白菜对Cd的吸收主要是由于降低了土壤Cd的活性,但不同材料可能存在不同的作用机制。首先,几种矿物材料均使土壤pH显著升高,而土壤pH的升高,一方面可增加土壤表面的可变负电荷,促进土壤胶体对Cd²⁺的吸附,并促使土壤中的Cd²⁺生成Cd(OH)₂或CdCO₃沉淀;另一方面,由于溶液中的氢离子浓度降低,氢离子的竞争作用减弱,使碳酸盐、有机质和铁锰氧化物等与重金属的结合更为牢固,从而增强Cd的稳定性^[22-23]。此外,海泡石为纤维状层链结构的富镁硅酸盐矿物,它本身较大的比表面积和丰富的孔隙、层状结构间含有大量水分和可交换的阳离子等特性,使其具有较强的吸附和离子交换能力;膨润土是以蒙脱石为主的层状铝硅酸盐矿物,层间域对重金属离子具有较好的吸附和离子交换能力,因此可以吸附固定土壤中的Cd²⁺,降低被植物吸收的可能性^[17];石灰和汉白玉的主要成分分别为Ca(OH)₂和CaCO₃,二者含有的Ca²⁺对重金属离子具有拮抗作用,可与Cd²⁺竞争植物根表的吸收位点,从而减少植物对Cd的吸收^[24]。

3.3 几种矿物材料对小白菜生长的影响

本研究中,几种矿物材料对小白菜的生长均无明显的促进作用,除海泡石、钙基膨润土外,在钠基膨润土、汉白玉和石灰各处理下小白菜的生物量还有显著的降低(图1)。一方面,本研究中的矿物材料基本不含氮磷钾等营养元素,施用后对土壤肥力影响不大;另一方面,试验中土壤Cd污染水平下的小白菜仍能正常生长,并未表现出受抑制的症状。因此,几种矿物的施用虽然显著降低了Cd的生物有效性,但并未通过抑制Cd的活性达到减轻重金属毒害,提高生物产量的目的。相反,随着这些碱性物质的添加,Na⁺、Ca²⁺等含量升高,土壤原有的酸碱平衡、养分环境以及某些微量元素的有效性等均会发生改变,从而对小白菜的生长产生不利影响^[25-26]。同时,本研究中海泡石处理

虽然对小白菜的生长影响不显著,但随着施用量的增加,其生物量亦表现出下降的趋势。范美蓉等^[27]研究结果也表明,当赤泥施用量超过0.75%(W/W)时,水稻生长有减缓的趋势,产量有所下降。由此可见,如何兼顾Cd污染土壤钝化材料在降低土壤Cd活性、减少植物Cd吸收以及增产稳产中的综合效应,除了要确定适宜的种类和用量,还应考虑一些配套的土壤管理措施才能得以实现。

4 结论

几种矿物材料均能显著降低土壤有效态Cd含量,其降低程度随添加量的增加而增大;矿物材料对土壤Cd形态的影响主要是使土壤中的Cd由活性较高的酸提取态向活性较低的残渣态转化。矿物材料的施用能显著降低小白菜地上部和根部Cd含量,其中海泡石、钠基膨润土和石灰的降低效果较好,而几种矿物材料中仅海泡石和钙基膨润土能保证小白菜的生长不受抑制。综上,几种矿物材料中海泡石的钝化修复效果最佳,但其田间效应还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Zhang H J, Zhang X Z, Li T X, et al. Variation of cadmium uptake, translocation among rice materials and detecting for potential cadmium-safe cultivars[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 277-286.
- [2] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 692-703.
ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 692-703.
- [3] 王立群, 罗 磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(50): 1214-1222.
WANG Li-qun, LUO Lei, MA Yi-bing, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals-contaminated soils: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(50): 1214-1222.
- [4] Ghosh U, Luthy RG, Cornelissen G, et al. In-situ sorbent amendments: A new direction in contaminated sediment management[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45: 1163-1168.
- [5] 杨胜香, 易浪波, 刘 佳, 等. 湘西花垣矿区蔬菜重金属污染现状及健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 17-23.
YANG Sheng-xiang, YI Lang-bo, LIU Jia, et al. Heavy metals concentrations and health risk in vegetables grown on Mn and Pb/Zn mineland in Huayuan County, West Hunan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 17-23.
- [6] 赵小蓉, 杨 谢, 陈光辉, 等. 成都平原区不同蔬菜品种对重金属富集能力研究[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(4): 1142-1146.
ZHAO Xiao-rong, YANG Xie, CHEN Guang-hui, et al. Assessment of heavy metal enrichment in vegetables of Chengdu Plain[J]. *Southwest*

- China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(4):1142–1146.
- [7] Sato A, Takeda H, Oyanagi W, et al. Reduction of cadmium uptake in spinach (*Spinaciaoleracea* L.) by soil amendment with animal waste compost[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1):298–304.
- [8] Lee S H, Park H, Koo N, et al. Evaluation of the effectiveness of various amendments on trace metals stabilization by chemical and biological methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 188(1):44–51.
- [9] 许学慧, 姜冠杰, 付庆灵, 等. 活化磷矿粉对重金属污染土上莴苣生长与品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2):361–369.
- XU Xue-hui, JIANG Guan-jie, FU Qing-ling, et al. Effect of activated phosphate rocks on growth and quality of lettuce in heavy metal contaminated soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2):361–369.
- [10] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, et al. Assessment of sepiolite for immobilization of cadmium-contaminated soils[J]. *Geoderma*, 2013, 193:149–155.
- [11] 孙晓铎, 黄益宗, 钟敏, 等. 沸石、磷矿粉和石灰对土壤铅锌化学形态和生物可给性的影响[J]. 环境化学, 2013, 32(9):1693–1699.
- SUN Xiao-hua, HUANG Yi-zong, ZHONG Min, et al. Effects of zeolite, phosphate rock and limestone on fractionation and bio-accessibility of Pb and Zn in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(9):1693–1699.
- [12] Silvetti M, Castaldi P, Holm P E, et al. Leachability, bioaccessibility and plant availability of trace elements in contaminated soils treated with industrial by-products and subjected to oxidative/reductive conditions[J]. *Geoderma*, 2014, 214:204–212.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:146–315.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000:146–315.
- [14] Liang Y, Cao X, Zhao L, et al. Biochar-and phosphate-induced immobilization of heavy metals in contaminated soil and water: Implication on simultaneous remediation of contaminated soil and groundwater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(6):4665–4674.
- [15] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7):1441–1453.
- CAO Xin-de, WEI Xiao-xin, DAI Ge-lian, et al. Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: A review[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(7):1441–1453.
- [16] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3):654–658.
- GUO Li-min, AI Shao-ying, TANG Ming-deng, et al. Effect of amendment on Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):654–658.
- [17] 王林, 徐应明, 孙扬, 等. 天然黏土矿物原位钝化修复镉污染土壤的研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(3):35–38.
- WANG Lin, XU Ying-ming, SUN Yang, et al. Immobilization of cadmium contaminated soils using natural clay minerals[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(3):35–38.
- [18] 周歆, 周航, 曾敏, 等. 石灰石和海泡石组配对水稻糙米重金属积累的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3):119–127.
- ZHOU Xin, ZHOU Hang, ZENG Min, et al. Effects of combined amendment (limestone+sepiolite) on heavy metal accumulation in brown rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3):119–127.
- [19] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):438–448.
- YIN Fei, WANG Hai-juan, LI Yan-yan, et al. Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):438–448.
- [20] 王林, 秦旭, 徐应明, 等. 污灌区镉污染菜地的植物阻隔和钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2111–2117.
- WANG Lin, QIN Xu, XU Ying-ming, et al. Phytoexclusion and in-situ immobilization of cadmium in vegetable field in sewage irrigation region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2111–2117.
- [21] 谢运河, 纪雄辉, 黄涓, 等. 赤泥、石灰对Cd污染稻田改制玉米吸收积累Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2104–2110.
- XIE Yun-he, JI Xiong-hui, HUANG Juan, et al. Effects of red-mud and lime on cadmium uptake of corn in dryland converted from cadmium polluted paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2104–2110.
- [22] Ok Y S, Oh S E, Ahmad M, et al. Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(6):1301–1308.
- [23] Zhou H, Zhou X, Zeng M, et al. Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 101:226–232.
- [24] 郭晓方, 卫泽斌, 周建利, 等. 废料碳酸钙对低累积作物玉米吸收重金属的影响: 田间实例研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):888–895.
- GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, ZHOU Jian-li, et al. Effect of waste-CaCO₃ on heavy metals uptake of low-accumulating maize: Field study[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):888–895.
- [25] Tan W N, Li Z A, Qiu J, et al. Lime and phosphate could reduce cadmium uptake by five vegetables commonly grown in South China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2):223–229.
- [26] Garau G, Castaldi P, Deian S, et al. Assessment of the use potential of edible sea urchins (*Paracentrotus lividus*) processing waste within the agricultural system: Influence on soil chemical and biological properties and bean (*Phaseolus vulgaris*) and wheat (*Triticum vulgare*) growth in an amended acidic soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 109:12–18.
- [27] 范美蓉, 罗琳, 廖育林, 等. 赤泥施用量对镉污染稻田水稻生长和镉形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):390–396.
- FAN Mei-rong, LUO Lin, LIAO Yu-lin, et al. Effect of red mud application on rice growth and transformation of cadmium forms in Cd-contaminated paddy soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2):390–396.