

刘艺芸, 徐应明, 黄青青, 等. 水肥耦合对海泡石钝化修复镉污染土壤效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2086–2094.

LIU Yi-yun, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, et al. Coupling effect of water management and fertilizers in remediation of Cd-contaminated soil using sepiolite[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2086–2094.

水肥耦合对海泡石钝化修复镉污染土壤效率的影响

刘艺芸^{1,2}, 徐应明^{1,2*}, 黄青青^{1,2}, 秦旭^{1,2}, 赵立杰^{1,2}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所农田重金属污染修复创新团队, 天津 300191; 2. 农业农村部产地环境污染防治重点实验室, 天津 300191)

摘要:为探讨水肥耦合对海泡石钝化修复镉(Cd)污染土壤效率的影响,采用盆栽试验,以油菜为供试植物,研究了两种水分条件下施用质量分数为0.5%、1.0%和2.0%的蚯蚓粪肥对钝化土壤中有效态Cd含量、油菜根部和可食部分Cd含量的影响。结果表明,土壤水分含量为60%~65%时,施用海泡石能够显著降低土壤中有效态Cd的含量,进一步施用蚯蚓粪肥土壤中有效态Cd的含量为单一海泡石处理的2.24~2.72倍,但是油菜可食部分Cd含量与单一海泡石处理相比变化不显著($P<0.05$);土壤水分含量为100%时,在钝化修复下施用0.5%、1.0%和2.0%的蚯蚓粪肥,土壤中有效态Cd的含量为单一海泡石处理的1.11、1.17倍和1.26倍,施用0.5%和2.0%蚯蚓粪肥,油菜可食部分Cd含量与单一海泡石处理相比降低了55.9%和56.8%。因此土壤水分含量为60%~65%时,在海泡石钝化修复下施用蚯蚓粪肥,水肥耦合对钝化效应的影响较小;土壤水分含量为100%时,施用0.5%或2.0%蚯蚓粪肥,水肥耦合能够强化海泡石的钝化效应,进一步降低油菜对Cd的吸收和累积。

关键词:海泡石;水分管理;蚯蚓粪有机肥;油菜;镉

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)09-2086-09 doi:10.11654/jaes.2019-0026

Coupling effect of water management and fertilizers in remediation of Cd-contaminated soil using sepiolite

LIU Yi-yun^{1,2}, XU Ying-ming^{1,2*}, HUANG Qing-qing^{1,2}, QIN Xu^{1,2}, ZHAO Li-jie^{1,2}

(1. Innovation Team of Remediation for Heavy Metal Contaminated Farmland, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Key Laboratory of Original Environmental Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to investigate the coupling effect of water management and fertilizers on the effectiveness of sepiolite in the remediation of Cd-contaminated soil, a pot experiment was conducted with pak choi as the tested plant. The effects of wormcast with different application ratios on available Cd contents in soils, and Cd contents in roots and shoots of pak choi were studied under two different water conditions. The results indicated that sepiolite reduced the available Cd contents in soils significantly when the soil moisture contents were 60%~65%. Furthermore, the available Cd contents in soils with the addition of wormcast in sepiolite-amended soils were 2.24~2.72 times to single sepiolite-amended treatment, though the Cd contents in edible parts of pak choi did not change significantly ($P<0.05$). When soil moisture content was 100%, the available Cd contents in sepiolite-amended soils after the addition of 0.5%, 1.0% and 2.0% wormcast, 1.0%, and 2.0% were increased by 1.11, 1.17, and 1.26 times, respectively. The application of 0.5% and 2.0% wormcast decreased the Cd

收稿日期:2019-01-07 录用日期:2019-04-23

作者简介:刘艺芸(1990—),女,河北衡水人,博士研究生,从事农田土壤重金属修复研究。E-mail:liyiyun@126.com

*通信作者:徐应明 E-mail:yymxu1999@126.com

基金项目:中国农业科学院创新工程项目(CAASCXGC-xym-2017);国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03);天津市科技支撑计划项目(14ZCZDSF00004)

Project supported: Program of Knowledge Innovation of the Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAASCXGC-xym-2017); The modern Agricultural Industry Technology System (CARS-03); The Science and Technology Support Program of Tianjin, China (14ZCZDSF00004)

contents in edible parts of pak choi by 55.9% and 56.8%, respectively, compared with the application of sepiolite alone. As a consequence, the coupling effect of water management and fertilizer has little impact on the remediation effectiveness of sepiolite with respect to Cd accumulation in plants when soil moisture contents maintained at 60%~65%. When the soil moisture content was 100% and the application ratio of wormcast was 0.5% or 2.0%, the coupling effect of water management and fertilizer could enhance the immobilization effect of sepiolite and further reduce Cd accumulation in pak choi.

Keywords: sepiolite; water management; wormcast organic fertilizer; pak choi; cadmium

近些年来,农田土壤重金属镉(Cd)污染问题已经引起了全社会的广泛关注。重金属Cd不是植物必需元素,但极易被植物吸收和富集^[1-2]。在所有农作物中,蔬菜最易受到土壤重金属Cd污染危害^[3],并通过食物链的富集作用危害人类健康。农田土壤重金属钝化修复技术是目前农田重金属Cd污染治理最常用的方法之一^[4]。常见的钝化材料主要包括:黏土矿物、硅钙物质、生物炭、含磷材料、有机物料,金属及其氧化物等^[5-8]。海泡石是一种天然的纤维状镁硅酸盐黏土矿物,兼具较高的吸附容量和离子交换能力,能够通过特殊结构和较大的比表面积吸收土壤中的重金属。课题组前期的研究发现海泡石能够有效降低土壤中重金属Cd的生物有效性及其在农作物地上可食部位的吸收累积^[9-10],但在实际应用中其修复效果会受到土壤水分管理的明显影响^[11-12];同时,施用有机肥对海泡石钝化修复效果同样存在不同程度的影响^[13-14]。但从现有文献报道来看^[15-17],单一水分或施肥对土壤重金属Cd污染钝化修复效应影响研究较多,而有关水肥耦合共同作用对农田重金属Cd污染钝化修复效果影响报道很少,导致缺乏水肥耦合与单一水分或施肥管理间作用效果的对比。因此,研究水肥耦合对钝化修复效应的影响,对于Cd污染农田钝化修复下开展科学合理的水肥管理,降低不适当的水肥管理可能导致的对钝化修复效果的不利影响具有重要意义。

本文通过油菜盆栽试验研究了海泡石钝化修复下,土壤处于饱和持水量的60%~65%和100%时,施用蚯蚓粪肥对油菜生长及其吸收累积土壤重金属Cd行为的影响,并通过测定土壤pH值、可溶性有机质(DOM)及微量元素有效态含量,分析水肥耦合对钝化效应的影响机制,为菜地重金属Cd污染钝化修复

中科学的水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试油菜(*Brassica Chinensis* L.)品种为四月慢;供试土壤采自湖南省郴州市,其基本理化性质为:pH 6.21,阳离子交换量 $25.3 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 3.46% ,全氮 $42.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $9.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $182.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总Cd $2.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,商品有机肥为蚯蚓粪有机肥(WOF);供试海泡石(SP)为天然黏土矿物材料制备,含少量白云石和滑石等杂质,pH值为10.1,CEC $18.0 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,BET比表面积为 $22.3 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,孔径为1.4 nm。X射线衍射分析表明其主要成分为 $\text{Mg}_3\text{Si}_2(\text{OH})_4\text{O}_5$ 8.0%, $\text{Si}_3\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 9.0%, $\text{CaMg}-\text{Si}_2\text{O}_6$ 18.1%。蚯蚓粪有机肥的基本性质见表1。

1.2 试验设计

蚯蚓粪肥风干并过2 mm筛备用,准确称取2.0 kg土壤,以大田作物施肥量的2倍施入基肥,氮素以尿素形式加入,磷、钾以磷酸二氢钾形式加入,N、 P_2O_5 和 K_2O 用量分别为 0.15 、 $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土。具体试验设计见表2,共16个处理,每个处理重复3次。2017年4月7日,将材料与土壤混匀装盆(直径25 cm,深19 cm),用去离子水浇至75%的田间持水量平衡30 d。种子直接播种至盆中,在油菜4片真叶期间间苗至4株。试验用盆采用随机区组排列,间歇性轮换以保证生长条件一致。

水分处理包括常规持水量(NM)和饱和持水量(WS),分别为饱和田间持水量的60%~65%、100%[饱和田间持水量(Φ)测定:称取2.0 kg供试土壤,底部打孔并在大盆中静置24 h,取出后顶部加盖静置24 h至不再有水滴出,称重确定 Φ]。油菜定苗后开始水分

表1 蚯蚓粪有机肥性质分析

Table 1 Selected characteristics of wormcast

参数 Parameters	pH	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus/%	全钾 Total potassium/%	全硫 Total sulphur/%	有机质 Soil organic matters/%	总Cd Total cadmium/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
数值 Value	6.49	0.639	0.346	1.42	0.342	18.4	0.39

表2 试验设计

Table 2 Experimental setup

水分处理 Water treatments	分组 Groups	钝化材料 Amendments	海泡石用量/% Amount of sepiolite	蚯蚓粪肥用量 Amounts of the wormcast/%			
				0	0.5	1.0	2.0
常规持水量 NM	未钝化组 Non-amended	蚯蚓粪肥 Wormcast	—	CK	W1	W2	W3
	钝化组 Amended	海泡石+蚯蚓粪肥 Sepiolite+Wormcast	0.5	SP	SW1	SW2	SW3
饱和持水量 WS	未钝化组 Non-amended	蚯蚓粪肥 Wormcast	—	CK	W1	W2	W3
	钝化组 Amended	海泡石+蚯蚓粪肥 Sepiolite+Wormcast	0.5	SP	SW1	SW2	SW3

处理,用称重法补充水分,35 d后收获。

1.3 样品采集与分析

油菜收获时将植物根系上附着的少量土壤抖落,作为根际土,自然风干磨碎过1 mm筛备用。植株用自来水和去离子水洗净擦干,称量鲜质量($g \cdot \text{株}^{-1}$)。用不锈钢剪刀在根茎连接处剪断,接着用天平称取地上部及根部鲜质量,精确到0.01 g。鲜样装入牛皮纸信封,放入鼓风烘箱,90 °C杀青30 min,然后于70 °C烘干至恒质量,取出后迅速称取此时的质量,此为植株地上部及根部的干质量($g \cdot \text{株}^{-1}$),用不锈钢粉碎机粉碎备用。

油菜样品中Cd含量测定:采用 HNO_3 消解-电感耦合等离子体质谱仪(iCAP Q,美国赛默飞世尔仪器公司)测定。在整个测定过程中植物样品采用烟草标样(GBW08514)和空白样品进行全程质量控制。

土壤pH值测定:采用水土比2.5:1浸提后用pH计(PB-10, Sartorius, Germany)测定^[18]。

土壤可溶性有机物(DOM)测定:土壤溶液中DOM浓度用水溶性有机碳含量(DOC)表征,采用水土比5:1浸提8 h用TOC分析仪(Vario TOC, Elementar德国元素)直接测定。

土壤有效态Cd、Cu、Zn和Mn的提取和测定:采用DTPA浸提-火焰原子分光光度计(ZEEnit 700P,德国耶拿分析仪器有限公司)测定。

1.4 数据处理

试验结果用3次重复的平均值 \pm 标准误(Mean \pm SE)来表示,采用Microsoft Excel和SAS 9.4进行统计分析,并用Origin 8.5.1制图。油菜对Cd的转移系数和根系Cd特异性吸收系数计算公式^[19]如下:

转移系数=油菜地上部Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/油菜根部Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

根系Cd特异性吸收系数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=[根部Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) \times 根部干质量(g)+地上部Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) \times 地上部干质量(g)]/根部干质量(g)。

2 结果与分析

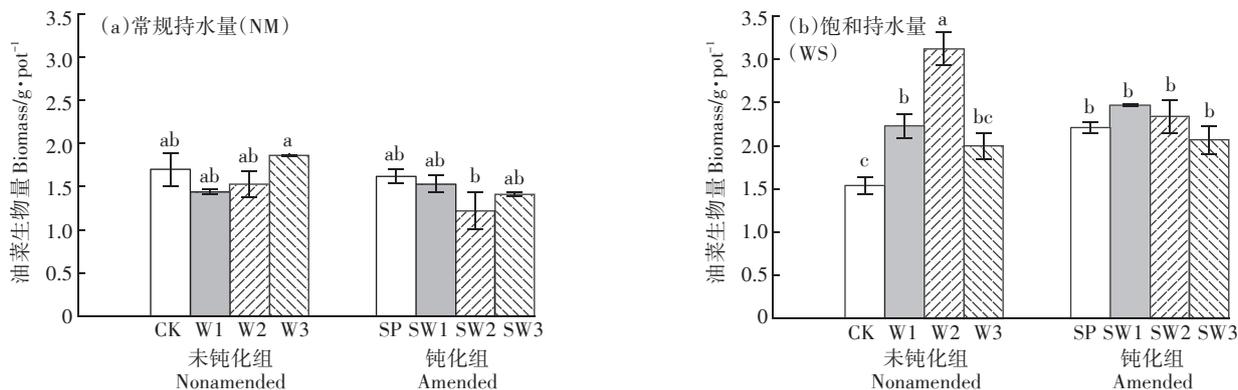
2.1 钝化修复下水肥耦合对油菜生物量的影响

图1为不同处理下油菜地上部生物量。由图1可见,当土壤处于常规持水量时,与对照比,单一蚯蚓粪处理对油菜生物量无显著影响,与单一海泡石处理相比,钝化修复下施用蚯蚓粪油菜生物量降低5.6%~24.7%,但与对照比并无显著性差异;当土壤达到饱和持水量时,与对照相比,单一蚯蚓粪处理使油菜生物量显著增加,但与单一海泡石处理比,施用蚯蚓粪对油菜生物量同样无显著性影响。与常规持水量比,提高土壤持水量可以显著增加油菜生物量($P < 0.05$)。

2.2 钝化修复下水肥耦合对油菜根部和可食部分Cd含量的影响

图2是油菜根部和可食部分Cd含量。由图2可知,当土壤处于常规持水量时,与单一海泡石处理比,施用蚯蚓粪对油菜根部Cd含量无显著影响($P > 0.05$)。土壤达到饱和持水量时,与对照比,单施蚯蚓粪浓度为0.5%会显著提高油菜根部Cd含量;施用蚯蚓粪浓度为1.0%或2.0%时对油菜根部Cd含量无显著影响;但与单一海泡石处理比,施用蚯蚓粪会降低油菜根部Cd含量,施用剂量分别为0.5%、1.0%和2.0%时,油菜根部Cd含量分别降低19.8%、37.9%和11.9%。

由图2可知,当土壤保持常规持水量时,与对照比,单一蚯蚓粪处理使油菜可食部位Cd含量降低8.3%~38.1%;而与单一海泡石处理比,施用蚯蚓粪对海泡石的钝化处理并无显著影响($P > 0.05$)。当土壤达到饱和持水量时,与对照比,单一蚯蚓粪处理使油菜可食部位Cd含量降低17.0%~37.8%;而与单一海泡石处理比,在海泡石钝化处理下施用1.0%的蚯蚓粪显著增加了油菜可食部位Cd含量;而在海泡石钝化处理下施用0.5%或2.0%蚯蚓粪,能够降低油菜可食部位Cd含量,降低幅度可达55.9%和56.8%。与常

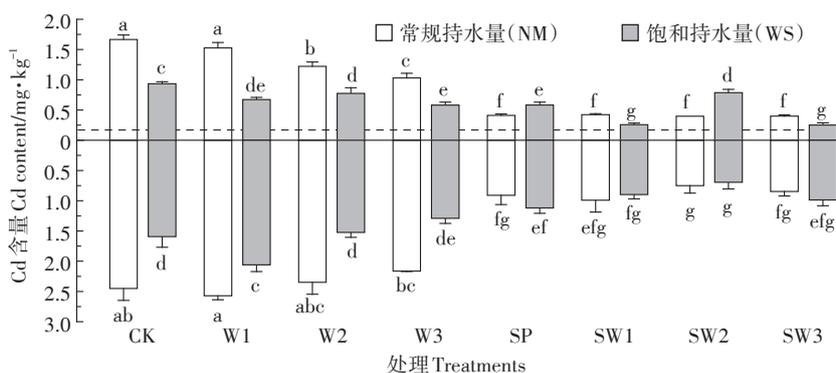


图中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

The different lowercase letters in each figure indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图1 油菜可食部分生物量

Figure 1 Biomass of edible parts of *Brassica Chinensis* L.



图中上半部分表示油菜可食部分Cd含量,下半部分表示油菜根部Cd含量;图中虚线代表蔬菜Cd含量的安全限值($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);

图中每部分不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

The upper part of the figure shows the Cd contents in edible parts, and the lower part shows the Cd contents in root; The dashed line in the figure represents the maximum Cd level permitted in foods ($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); The different lowercase letters in each part indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

图2 油菜根部和可食部分Cd含量

Figure 2 Cd contents in root and shoot of *Brassica Chinensis* L.

规持水量比,提高土壤持水量可以显著降低油菜可食部分Cd含量($P<0.05$)。由图2还可见,土壤处于常规持水量状态下,水肥耦合对海泡石钝化处理影响较小;在土壤处于饱和持水量且施用1.0%蚯蚓粪条件下,水肥耦合则会降低海泡石的钝化效应;而在土壤处于饱和持水量且施用0.5%或2.0%蚯蚓粪条件下,水肥耦合则会强化海泡石的钝化效应。

2.3 油菜根系对Cd的特异性吸收系数和转移系数

图3为油菜根系对重金属的特异性吸收系数和转移系数。由图3可见,土壤处于常规持水量时,与对照比,单施2.0%的蚯蚓粪,根系对Cd特异性吸收系数显著降低($P<0.05$);与单一海泡石处理比,钝化修复下施用蚯蚓粪对根系特异性吸收系数无显著影

响。土壤达到饱和持水量时,与对照比,单一蚯蚓粪处理使根系特异性吸收系数降低17.1%~39.0%;与单一海泡石处理比,钝化修复下施用0.5%和2.0%的蚯蚓粪时,油菜根系特异性吸收系数分别降低56.5%和33.0%,而施用蚯蚓粪剂量为1.0%时会显著增大根系特异性吸收系数。

由图3还可见,土壤处于常规持水量时,与对照比,单一蚯蚓粪处理使重金属Cd向地上部的转移系数降低12.6%~29.9%,与单一海泡石处理比,施用蚯蚓粪对Cd的转移系数无显著影响;土壤达到饱和持水量时,单一蚯蚓粪处理使重金属Cd向地上部的转移系数降低13.8%~44.8%;与单一海泡石处理比,施用0.5%和2.0%蚯蚓粪使Cd向地上部的转移系数分

别降低 45.0% 和 51.0%，但是在施用蚯蚓粪浓度为 1.0% 时会显著增加 Cd 向地上部的转移系数。

2.4 钝化修复下水肥耦合对土壤中微量元素 Cu、Zn 和 Mn 的影响

表 3 为不同处理下土壤有效态 Cu、Zn 和 Mn 含量。由表 3 可见，与常规持水量比，提高土壤水分含量对土壤中有效态 Cu 和 Zn 含量无显著性影响。在土壤处于常规持水量时，与单一海泡石处理比，钝化修复下施用蚯蚓粪使土壤中有效态 Cu 和 Zn 含量分别增加 10.3%~17.7% 和 26.3%~91.4%。土壤达到饱和持水量时，与单一海泡石处理比，钝化修复下施用蚯蚓粪使土壤中有效态 Cu 和 Zn 含量分别增大 3.7%~27.1% 和 6.0%~52.5%。

与常规持水量比，提高土壤水分含量显著降低土壤有效态 Mn 的含量。土壤处于常规持水量时，与对照比，单一蚯蚓粪处理使土壤有效态 Mn 的含量增加 57.0%~79.7%，与单一海泡石处理比，施用蚯蚓粪可使土壤有效态 Mn 的含量增加 9.8%~124.7%；土壤达到饱和持水量时，与对照比，单一蚯蚓粪处理使土壤有效态 Mn 的含量降低 12.1%~21.4%，与单一海泡石处理比，施用 0.5% 或 2.0% 蚯蚓粪对土壤有效态 Mn 的含量无显著性影响，但是施用 1.0% 蚯蚓粪会显著降低土壤有效态 Mn 的含量。

单一海泡石处理对土壤中有效态 Cu 和 Zn 的含量无显著影响，在不同土壤持水量条件下，施用蚯蚓粪均会增加土壤有效态 Cu 和 Zn 的含量。单一海泡

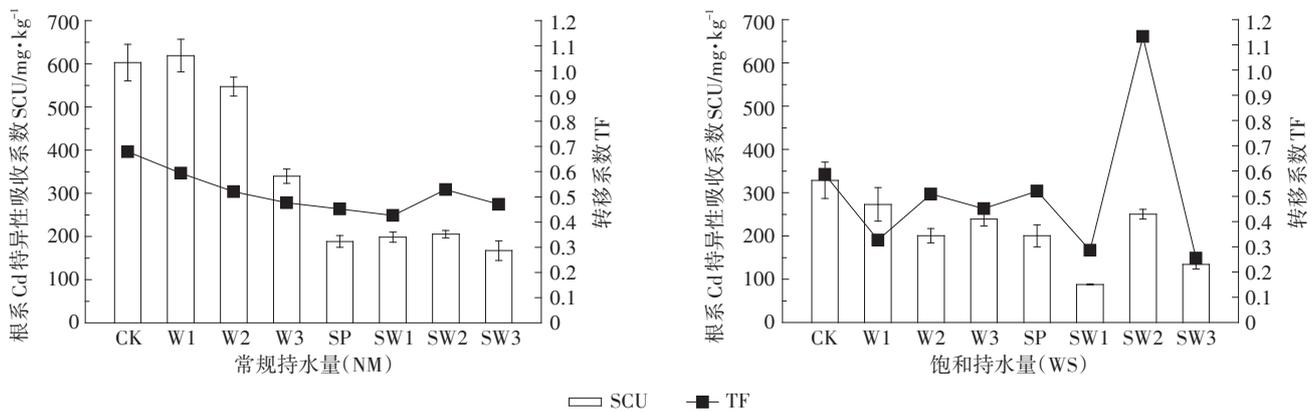


图3 油菜根系对 Cd 的特异性吸收系数以及根向地上部的转移系数
Figure 3 Specific cadmium uptake of Cd in root and translocation factor

表 3 土壤中有有效态 Cu、Zn 和 Mn 的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 3 Available content of Cu, Zn and Mn in soil ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

元素 Elements	处理 Treatments	未钝化组 Nonamended		处理 Treatments	钝化组 Amended	
		NM	WS		NM	WS
Cu	CK	2.24±0.09cdef	2.16±0.06def	SP	2.03±0.06f	2.14±0.07ef
	W1	2.31±0.05cde	2.26±0.06cdef	SW1	2.39±0.17cde	2.22±0.05cdef
	W2	2.25±0.08cdef	2.69±0.16b	SW2	2.36±0.12cde	2.42±0.08c
	W3	2.40±0.04cd	2.98±0.05a	SW3	2.24±0.05cdef	2.72±0.07b
Zn	CK	2.01±0.08jk	2.16±0.11ij	SP	1.75±0.04k	2.17±0.09ij
	W1	2.32±0.01ghi	2.78±0.12cde	SW1	2.21±0.08hij	2.30±0.06hi
	W2	2.45±0.17fgh	2.77±0.05de	SW2	2.96±0.02cd	2.68±0.14ef
	W3	3.05±0.08bc	2.58±0.05efg	SW3	3.35±0.08a	3.31±0.17ab
Mn	CK	7.90±0.28a	5.56±0.28c	SP	2.75±0.04g	2.03±0.02hi
	W1	3.40±0.06f	4.37±0.03e	SW1	4.23±0.13e	1.70±0.07ij
	W2	1.60±0.12j	4.89±0.39d	SW2	3.02±0.04fg	1.55±0.13j
	W3	2.94±0.26g	5.59±0.21c	SW3	6.18±0.21b	2.14±0.11gh

注：表中每种元素的不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The different lowercase letters of each element indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

石处理显著降低土壤中有有效态 Mn 的含量,土壤处于常规持水量时,水肥耦合增加土壤有效态 Mn 的含量,在土壤处于饱和持水量且施用 0.5% 或 2.0% 蚯蚓粪条件下,水肥耦合对土壤中有有效态 Mn 的含量无显著性影响。

2.5 钝化修复下水肥耦合对土壤 pH、DOM 含量及有效态 Cd 含量的影响

图 4 为不同处理下土壤 DOM 含量。由图 4 可见,单一海泡石处理可显著降低土壤 DOM 含量,单一蚯蚓粪处理可显著增加土壤 DOM 含量。土壤处于常规持水量时,在钝化修复下施用 0.5%、1.0% 和 2.0% 蚯蚓粪时,土壤 DOM 含量分别比单一海泡石处理提高 1.00、1.03 倍和 2.20 倍。土壤处于饱和持水量时,在钝化修复下施用 0.5%、1.0% 和 2.0% 蚯蚓粪时,土壤 DOM 含量分别比单一海泡石处理提高 0.12、0.15 倍和 1.01 倍。由此可见,在海泡石钝化修复下,水肥耦合会提高土壤 DOM 含量。

图 5 为不同处理下土壤 pH 值。由图 5 可见,与常规持水量比,增加土壤水分含量使土壤 pH 提高了 0.06~0.30。与对照比,单一蚯蚓粪处理对土壤 pH 的影响不显著。与单一海泡石处理比,在钝化修复下施用蚯蚓粪对土壤 pH 的影响也不显著。

图 6 为不同处理下土壤中 DTPA 提取态 Cd 含量。由图 6 可见,土壤处于常规持水量时,与对照比,单一蚯蚓粪处理可显著降低土壤 DTPA-Cd 含量,与单一海泡石处理比,在钝化修复下施用 0.5%、1.0% 和 2.0% 的蚯蚓粪,土壤 DTPA-Cd 含量分别增加 171.5%、172.3% 和 124.1%。土壤达到饱和持水量时,与对照比,单一蚯蚓粪处理显著增加土壤 DTPA-Cd 含量,与单一海泡石处理比,在钝化修复下施用 0.5%、1.0% 和 2.0% 的蚯蚓粪,土壤 DTPA-Cd 含量分别增大 11.1%、17.1% 和 26.4%。与常规持水量比,提高土壤持水量可显著降低 DTPA-Cd 含量。由此可见,土壤处于常规持水量或饱和持水量时,水肥耦合

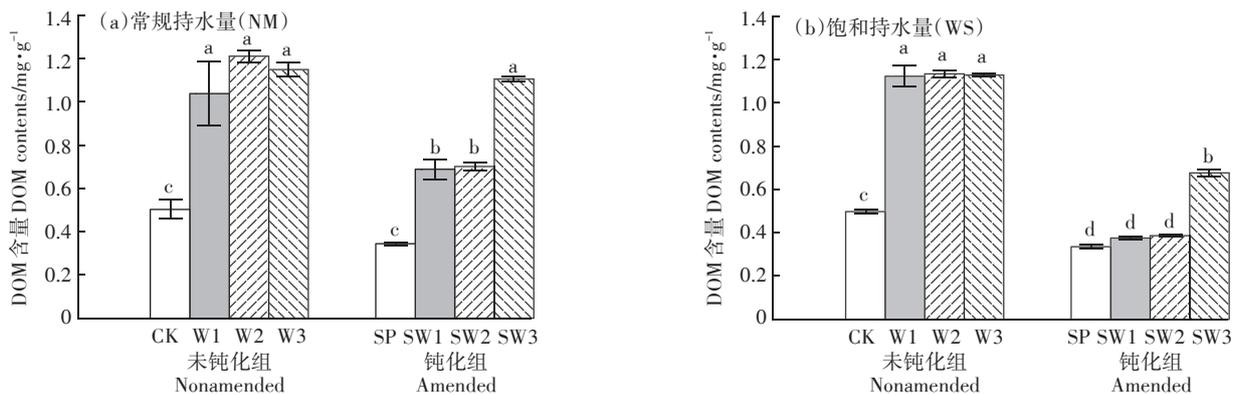


图 4 不同处理对土壤 DOM 含量的影响

Figure 4 Effect of different treatments on DOM contents of soil

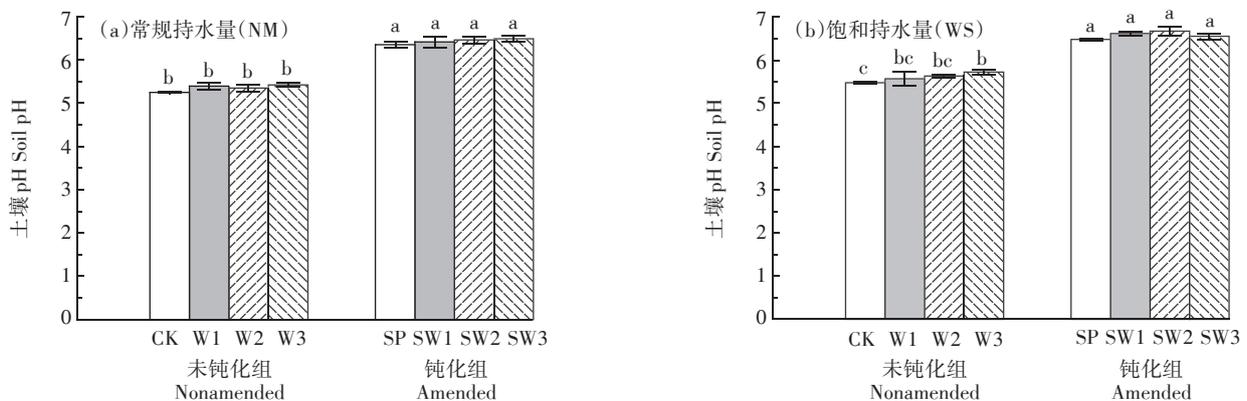


图 5 不同处理对土壤 pH 的影响

Figure 5 Effect of different treatments on soil pH

均显著提高土壤DTPA-Cd含量。

3 讨论

土壤Cd污染对油菜生长的影响存在如下规律,当Cd浓度小于 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,能够促进油菜生长,增大油菜生物量,当Cd浓度大于 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,阻碍油菜生长,油菜生物量显著降低^[20-22]。史新杰等^[23]研究了土壤水分含量对油菜生长的影响,土壤水分含量由50%增加至80%,油菜产量逐渐增大。并且发现油菜对Cd具有极强的耐受能力, $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Cd浓度下生物量及光合作用几乎不受影响。本文供试土壤Cd浓度远低于Cd毒害作用的临界值,两种水分含量条件下,土壤水分含量为100%时油菜生物量更高。

土壤水分通过调控土壤Eh、pH等土壤性质影响Cd的溶解性和有效性。提高土壤持水量会增加各处理土壤pH。狄广娟^[24]研究水分管理对水芹吸收累积Cd的影响,发现淹水处理的土壤pH高于间歇淹水和湿润处理。土壤pH升高增强土壤有机/无机胶体及土壤黏粒对Cd的吸附能力。唐琳^[25]研究发现淹水引起土壤pH升高,降低了根际土壤中Cd的生物有效性,进而降低了空心菜Cd含量。本文中未施用海泡石或者蚯蚓粪的对照处理中,提高土壤水分含量会降低土壤中DTPA-Cd的含量,降低油菜根部及可食部分Cd含量。唐明灯等^[26]发现生菜根地上部分Cd含量与土壤持水量呈负相关。此外,水稻籽粒、空心菜、小麦、伴矿景天的Cd浓度在淹水条件下均降低^[27-30]。原因是土壤水分变化影响土壤的氧化还原电位和胶体性质、铁锰氧化物的沉淀溶解、金属硫化物的沉淀作用。Kashem等^[31]通过土壤淹水培养试验研究发现,铁锰氧化物的新生表面对Cd的吸持可能是导致

Cd活性下降的主要原因。单一蚯蚓粪处理中,提高土壤水分含量会增大DTPA提取态Cd含量,油菜根部和地上部Cd含量均降低,但是海泡石钝化修复下施用蚯蚓粪,土壤水分与不同浓度蚯蚓粪耦合对油菜Cd浓度的影响差异较大。常规持水量与蚯蚓粪耦合对油菜吸收Cd的影响较小,饱和持水量与1.0%蚯蚓粪耦合会显著增大油菜可食部分Cd含量。

海泡石通过增大土壤pH和吸附Cd来降低土壤中Cd的生物有效性,减少重金属Cd在油菜中的累积^[32]。土壤处于常规持水量时,虽然单一海泡石以及单一蚯蚓粪处理均能显著降低土壤中有有效态Cd的含量,但是在钝化修复下施用蚯蚓粪会增大土壤中有有效态Cd的含量,原理如图7,即蚯蚓粪分解释放大量的DOM,这些DOM会占据海泡石内表面及颗粒表面的活性位点,形成“屏障效应”,另一方面DOM会将已经固化在黏土颗粒表面的Cd解吸下来,形成络合物增大其移动性^[33]。土壤处于饱和持水量时,蚯蚓粪处理对海泡石钝化效应的影响与施用浓度有关。海泡石

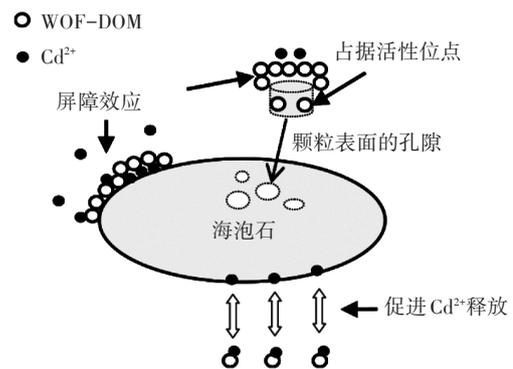


图7 WOF-DOM促进海泡石吸附的 Cd^{2+} 再活化示意图
Figure 7 Schematic diagram of reduction of cadmium adsorption on clay minerals by the presence of WOF-DOM

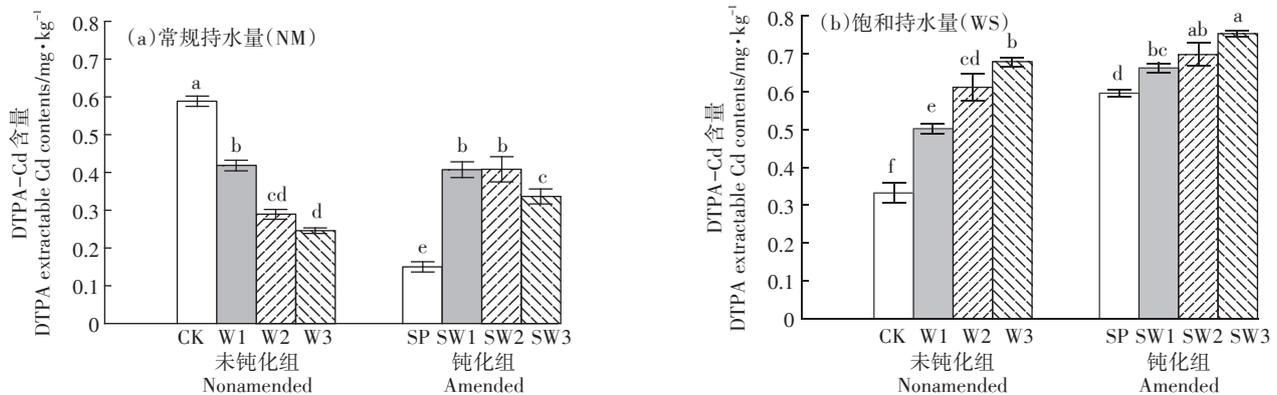


图6 DTPA提取态Cd含量
Figure 6 DTPA extractable Cd contents

钝化修复下施用1.0%蚯蚓粪,增大了油菜可食部分Cd浓度。但是也有报道称有机肥能够通过络合、吸收、沉淀等固定和结合土壤中的重金属离子^[34]。施用0.5%或2.0%蚯蚓粪时,油菜可食部位Cd含量显著降低,其主要原因是有机肥对Cd的吸附和络合是主效应。当施用1.0%蚯蚓粪时,油菜根系对Cd的特异性吸收系数和转移系数显著增大,促进了Cd在油菜地上可食部位的累积^[35]。此外,海泡石钝化修复下施用蚯蚓粪会显著提高土壤可溶性有机质含量(DOM),同时降低重金属Cd向地上部的转移系数,这与丁琮^[36]的试验结果一致,即土壤有机质含量越高,Cd向地上部的转移系数越低。

4 结论

(1)单一海泡石处理、单一蚯蚓粪处理以及在钝化修复下增施蚯蚓粪条件下,提高土壤水分含量均能够显著促进油菜生长。两种水分条件下,海泡石钝化土壤中增施蚯蚓粪有机肥对油菜生物量的影响未达到显著水平($P>0.05$)。

(2)海泡石钝化土壤中,常规持水量与蚯蚓粪有机肥耦合对油菜可食部分及根部Cd含量无显著影响($P>0.05$)。饱和持水量与蚯蚓粪有机肥耦合效应取决于蚯蚓粪有机肥的施用浓度。当蚯蚓粪有机肥浓度为0.5%或2.0%时,水肥耦合对油菜可食部分及根部Cd含量无显著影响;当蚯蚓粪有机肥浓度为0.5%或2.0%时,水肥耦合显著增大油菜可食部分Cd含量,降低根部Cd含量($P<0.05$)。

(3)海泡石钝化土壤中,土壤处于饱和持水状态时,增施蚯蚓粪有机肥一方面促进油菜生长,降低Cd由根部向地上部分的转移系数,另一方面提高土壤DOM含量,促进海泡石吸附的Cd²⁺再活化;当施用浓度为0.5%或2.0%时,前者为主效应,后者为次效应,水肥耦合降低了油菜可食部分的Cd含量。

参考文献:

[1] Linero O, Ciudad M, Carrero J A, et al. Partitioning of nutrients and non-essential elements in Swiss chards cultivated in open-air plots[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017(59): 179-187.

[2] Tai Y, Li Z, McBride M B. Natural attenuation of toxic metal phytoavailability in 35-year-old sewage sludge-amended soil[J]. *Environ Monit Assess*, 2016(188): 241.

[3] Peralta-Videa J R, Lopez M L, Narayan M, et al. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain[J]. *The International Journal of Biochemistry and Cell Biology*, 2009, 41(8/9): 1665-1677.

[4] Huang S W, Chiang P N, Liu J C, et al. Chromate reduction on humic acid derived from a peat soil—exploration of the activated sites on HAs for chromate removal[J]. *Chemosphere*, 2012, 87(6): 589-594.

[5] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 721-728.

LI Jian-rui, XU Ying-ming, LIN Da-song, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 721-728.

[6] Komarek M, Vanek A, Ettl V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxidized sea review[J]. *Environ Pollut*, 2013(172): 9-22.

[7] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments: A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1): 215-225.

[8] Shi W S, Liu C G, Ding D H, et al. Immobilization of heavy metals in sewage sludge by using subcritical water technology[J]. *Bioresour Technol*, 2013(137): 18-24.

[9] 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.

[10] 孙约兵, 徐应明, 史新, 等. 海泡石对镉污染红壤的钝化修复效应研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(6): 1465-1472.

SUN Yue-bing, XU Ying-ming, SHI Xin, et al. The effects of sepiolite on immobilization remediation of Cd contaminated red soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(6): 1465-1472.

[11] 黄荣, 徐应明, 黄青青, 等. 不同水分管理下施用尿素对土壤镉污染钝化修复效应及微生物结构与分布影响[J]. *环境化学*, 2018, 37(3): 523-533.

HUANG Rong, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, et al. Effects of urea on in-situ remediation of Cd polluted paddy soil and the structure and distribution of soil microbes under different water management[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(3): 523-533.

[12] Li J R, Xu Y M. Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment[J]. *Chemosphere*, 2015, 122: 131-136.

[13] Hu J Z, Zheng A Z, Pei D L, et al. Bioaccumulation and chemical forms of cadmium, copper and lead in aquatic plants[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2010, 53(1): 235-240.

[14] 王永昕, 孙约兵, 徐应明, 等. 施用鸡粪对海泡石钝化修复镉污染菜地土壤的强化效应及土壤酶活性影响[J]. *环境化学*, 2016, 35(1): 159-169.

WANG Yong-xin, SUN Yue-bing, XU Ying-ming, et al. Enhancement of chicken manure on the immobilization remediation of cadmium contaminated vegetable soil and enzyme activity using sepiolite[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(1): 159-169.

[15] Fulda B, Voegelin A, Ehlert K, et al. Redox transformation, solid phase speciation and solution dynamics of copper during soil reduction and reoxidation as affected by sulfate availability[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013(123): 385-402.

[16] 王林, 周启星. 农艺措施强化重金属污染土壤的植物修复[J]. 中

- 国生态农业学报, 2008(3):772-777.
- WANG Lin, ZHOU Qi-xing. Strengthening phytoremediation of heavy metal contaminated soils by agronomic management practices[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008(3):772-777.
- [17] Khan M A, Khan S, Khan A, et al. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017(601/602):1591-1605.
- [18] Zhou T, Wu L H, Luo Y M, et al. Effects of organic matter fraction and compositional changes on distribution of cadmium and zinc in long-term polluted paddy soils[J]. *Environ Pollut*, 2018(232):514-522.
- [19] Li R Y, Zhou Z G, Xie X J, et al. Effects of dissolved organic matter on uptake and translocation of lead in *Brassica chinensis* and potential health risk of Pb[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2016, 13(7):687.
- [20] 徐素琴, 程旺大. 油菜、芥菜萌芽与幼苗生长的耐镉性差异[J]. 浙江农业科学, 2005, 1(6):436-438.
- XU Su-qin, CHENG Wang-da. Differences in response to Cd stress between rape seed and mustard during periods of germination and seedling growth[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2005, 1(6):436-438.
- [21] 金美芳, 林明凤, 施翔. 镉胁迫对油菜种子萌发和根系生长的影响[J]. 种子, 2011, 30(10):70-73.
- JIN Mei-fang, LIN Ming-feng, SHI Xiang. Effects of Cd stress on seed germination and root growth of *Brassica Napus*[J]. *Seed*, 2011, 30(10):70-73.
- [22] 江海东, 周琴, 李娜, 等. Cd对油菜幼苗生长发育及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(1):39-43.
- JIANG Hai-dong, ZHOU Qin, LI Na, et al. Effect of Cd on the growth and physiological characteristics of rape seedlings[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28(1):39-43.
- [23] 史新杰, 李卓, 庄文化, 等. 土壤中水分和镉浓度对油菜生长发育的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1):71-78.
- SHI Xin-jie, LI Zhuo, ZHUANG Wen-hua, et al. Effects of soil moisture and cadmium concentration on the growth of rape[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1):71-78.
- [24] 狄广娟. 水分管理对四个水芹品种吸收积累镉的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- DI Guang-juan. The influence of water management on growth and cadmium uptaking of water dropwort[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [25] 唐琳. 设施农业土壤镉-硝酸盐复合污染边生产边修复过程研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- TANG Lin. Processes of phytoremediation coupled with agro-production of cadmium and nitrate co-contaminated soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [26] 唐明灯, 艾绍英, 王艳红, 等. 土壤持水量对生菜生长和镉浓度的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6):1158-1163.
- TANG Ming-deng, AI Shao-ying, WANG Yan-hong, et al. Preliminary study for effects of soil moisture on the growth and Cd uptake of lettuce[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 49(6):1158-1163.
- [27] Arao T, Ae N, Sugiyama M, et al. Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans[J]. *Plant Soil*, 2003(251):247-253.
- [28] 崔立强, 吴龙华, 李娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. 土壤, 2009, 41(4):572-576.
- CUI Li-qiang, WU Long-hua, LI Na, et al. Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soil*, 2009, 41(4):572-576.
- [29] 张大庚. 水分和有机物料对土壤重金属镉、锌行为的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.
- ZHANG Da-geng. Effects of soil moisture and organic materials on the behavior of cadmium and zinc in soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2006.
- [30] Xiao Q, Wong M, Lu H, et al. Effects of cultivars and water management on cadmium accumulation in water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.)[J]. *Plant Soil*, 2015(391):33-49.
- [31] Kashem M A, Singh B R, Huq S M I, et al. Fractionation and mobility of cadmium, lead and zinc in some contaminated and non-contaminated soils of Japan[J]. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2011, 2(9):241-249.
- [32] Liang X F, Xu Y, Xu Y M, et al. Two-year stability of immobilization effect of sepiolite on Cd contaminants in paddy soil[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016(23):12922-12931.
- [33] Zhou W J, Ren L W, Zhu L Z, et al. Reducement of cadmium adsorption on clay minerals by the presence of dissolved organic matter from animal manure[J]. *Environmental Pollution*, 2017(223):247-254.
- [34] Mohamed I, Ahamadou B, Li M, et al. Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials[J]. *J Soils Sediments*, 2010(10):973.
- [35] Huang X C, Ho S H, Zhu S S, et al. Adaptive response of arbuscular mycorrhizal symbiosis to accumulation of elements and translocation in *Phragmites australis* affected by cadmium stress[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017(197):448-455.
- [36] 丁琼. 土壤性质及钝化剂对镉在土壤-植物系统转移的影响[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- DING Qiong. The effects of soil properties and soil amendments on the transfer of cadmium in soil-plant system[D]. Beijing: Capital Normal University, 2012.