

刘媛媛, 刘超, 陈卓君, 等. 不同有机物料的 Cd^{2+} 吸附特性及其对 Cd 污染土壤的修复效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 705–710.
LIU Yuan-yuan, LIU Chao, CHEN Zhuo-jun, et al. Effects of three organic materials on Cd^{2+} adsorption capacity and remediation of Cd contaminated soil[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(4): 705–710.

不同有机物料的 Cd^{2+} 吸附特性及其 对 Cd 污染土壤的修复效果研究

刘媛媛, 刘超, 陈卓君, 徐智, 汤利*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 为探究经济有效的农田土壤重金属污染修复技术, 首先通过等温吸附试验明确了废烟末、甘蔗滤泥和油菜籽油枯对 Cd^{2+} 的吸附特性, 其次通过土培试验和盆栽试验研究了 3 种有机物料添加对土壤有效态 Cd 含量、小白菜 Cd 含量和小白菜生物量的影响。结果表明, 3 种有机物料对 Cd^{2+} 的吸附量大小顺序为: 甘蔗滤泥 > 油菜籽油枯 > 废烟末, 甘蔗滤泥的最大吸附量($Q_{\max}$)可达 $2\,106.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 废烟末、甘蔗滤泥、油菜籽油枯的施用均显著降低土壤有效态 Cd 含量, 降幅分别为 39.79%、48.81%、47.77%。施用甘蔗滤泥和油菜籽油枯可显著降低小白菜对 Cd 的吸收量, 降幅分别为 35.93% 和 34.43%。施用甘蔗滤泥和油菜籽油枯也可显著增加小白菜的鲜重和干重, 鲜重分别增加了 81.42%、96.88%, 干重分别增加了 131.75%、128.91%。因此, 以甘蔗滤泥降低农田土壤有效态 Cd 含量的效果最好。

关键词: 甘蔗滤泥; 油菜籽油枯; 废烟末; 镉; 等温吸附; 小白菜

中图分类号: X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)04-0705-06 doi:10.11654/jaes.2017-1479

Effects of three organic materials on Cd^{2+} adsorption capacity and remediation of Cd contaminated soil

LIU Yuan-yuan, LIU Chao, CHEN Zhuo-jun, XU Zhi, TANG Li*

(College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: This research aimed to study economic and effective technologies for use in repairing farmland soil damaged by heavy metal contamination. Specifically, it focused on cadmium (Cd) adsorption capacity in three typical agricultural organic wastes in Yunnan Province of China: Tobacco waste (TW), bagasse sludge (BS), and rapeseed cake (RC) using an isothermal adsorption method. A soil culture and biological assay were carried out to investigate the available Cd in soil and the Cd uptake by pakchoi. The adsorption capacity of the three organic materials was ranked as $\text{BS} > \text{RC} > \text{TW}$. The maximum adsorption capacity ($Q_{\max}$) of BS was $2\,106.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Compared with the control, TW, BS, and RC significantly reduced Cd bioavailability in soils by 39.79%, 48.81%, and 47.77%, respectively. BS and RC application decreased the Cd concentration in pakchoi significantly when compared with the control, and the decrease was 35.93% and 34.43%, respectively. Compared with the control, BS and RC application increased the pakchoi fresh weight significantly by 81.42% and 96.88%, and increased dry weight by 131.75% and 128.91%, respectively. Thus, the effect of BS on reducing soil Cd contamination was the most effective among the three organic materials.

Keywords: bagasse sludge; rapeseed cake; tobacco waste; Cd ; isothermal adsorption; pakchoi

收稿日期: 2017-10-01 录用日期: 2017-12-25

作者简介: 刘媛媛(1992—), 女, 吉林临江人, 硕士研究生, 从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail: 907002069@qq.com

* 通信作者: 汤利 E-mail: ltang@ynau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2016YFD0800607); 云南农业大学大学生科技创新创业行动基金项目(2017ZKX066)

Project supported: The National Key Technology R&D Program(2016YFD0800607); The Student Science and Technology Innovation Entrepreneurship Action Foundation of Yunnan Agricultural University(2017ZKX066)

近年来,农田土壤重金属污染已成为制约我国农业可持续发展的重要因素之一^[1],探究经济有效的农田土壤重金属污染修复技术及其作用机理已成为研究热点。重金属污染土壤的修复技术主要有生物法、物理法、农艺和化学措施等^[2-3]。研究表明,施用改良剂已成为减轻土壤重金属污染经济有效的措施之一^[3-4]。

目前,施用无机改良剂对土壤重金属的钝化效果已有较多研究报道,如施用石灰^[5]、过磷酸钙^[6]、粉煤灰^[7]。但关于有机改良剂对土壤重金属钝化效果研究主要集中在生物炭、畜禽粪便等方面。施用生物炭可降低土壤有效态 Cd、Cr 和 Zn 含量^[8],畜禽粪便的施用也可大幅度降低土壤可交换态重金属含量^[9]。然而,畜禽粪便的施用也是造成农田土壤重金属污染的重要原因之一^[10-11]。因此,探究更多有机物料对土壤重金属污染的修复效果是非常必要的。

现有研究认为,有机物料可降低土壤中有效态重金属含量,与有机物料中的有机质对重金属离子具有很强的吸附性和络合性有密切关系^[12],同时有机物料的施用还可提高土壤 pH 值,从而有利于重金属由高活性态向低活性态转化^[13]。但是,由于不同有机物料所含有的有机质数量、组分等自身的性质大不相同,其对土壤中重金属的影响也存在较大差异^[12]。因此,继续加强对不同有机物料的重金属吸附性能及其减轻土壤中重金属生物有效性的研究是十分必要的。

废烟末、甘蔗滤泥和油菜籽油枯均是云南省典型的农业固体废弃物,具有产生量大,养分和有机质含量丰富等特点^[14-15]。近年来,在这 3 种有机物料高效资源化利用方面的报道较多,如:添加适量鸡粪可提高废烟末堆肥品质^[16];接种有机废弃物快腐微生物菌剂可促进甘蔗滤泥堆肥过程中木质素、纤维素和半纤维素的分解^[17];接种 VT 菌剂可促进油菜籽油枯堆肥化进程^[15]。但关于 3 种有机物料其他的利用方式研究较少。因此,本文探究了废烟末、甘蔗滤泥、油菜籽油枯对重金属镉的吸附特性及其对镉污染土壤的修复效应,以期农业固体废弃物的合理利用、修复土壤镉污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为红壤,采自云南农业大学农场,自然风干、粉碎后过 2 mm 筛。基本性质见表 1。

供试废烟末、甘蔗滤泥和油菜籽油枯由云南农业大学提供,自然风干、粉碎后过 1 mm 筛,备用。基本

性质见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 The basic physical and chemical properties of soil for the experiment

土壤类型	pH	碱解氮/ mg·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	全 Cd/ mg·kg ⁻¹
红壤	6.87	80.82	7.18	185.05	53.97	0

表 2 供试有机物料的基本理化性状

Table 2 The basic physical and chemical properties of organic materials for the experiment

物料	pH	含水率/%	全 C/%	全 N/%	C/N
废烟末	8.76	14.86	35.53	0.81	43.9
甘蔗滤泥	6.82	5.63	13.43	0.54	24.9
油菜籽油枯	8.02	7.06	33.56	2.63	12.8

1.2 研究方法

1.2.1 等温吸附试验

分别称取 1 g 有机物料,置于 250 mL 三角瓶中,加入浓度分别为 0.2、0.6、1.0、5.0、10.0、20.0 mg·L⁻¹ 的 Cd²⁺溶液 100 mL,在(25±1)℃下以 200 r·min⁻¹ 振荡 3 h 后过滤,重复 3 次。

1.2.2 土壤培养试验

本试验在云南农业大学植物营养学科温室大棚内进行。将废烟末、甘蔗滤泥、油菜籽油枯分别施入外源 Cd 污染(添加 CdCl₂ 溶液)浓度为 1.0 mg·kg⁻¹ 的土壤中,每盆装土壤 2.5 kg,每种物料添加量为 20 g·kg⁻¹,以相同 Cd 浓度、不添加有机物料的土壤为对照,(25±1)℃下培养 35 d。计 4 个处理,每个处理 3 次重复。

1.2.3 盆栽试验

采用盆栽试验,每个处理种植小白菜,每日浇以 15% 土壤重量的去离子水,使得土壤湿度保持田间持水量的 60%,以相同 Cd 浓度、不添加有机物料的土壤为对照,其他条件均与试验 1.2.2 一致,在自然光照下培养 35 d。计 4 个处理,每个处理 3 次重复。

1.3 样品采集与测定

在培养 35 d 时,分别采集土壤培养试验和盆栽试验的土壤样品,将其风干、粉碎、过 0.149 mm 筛后保存。植株样品用去离子水洗净,105℃杀青后 75℃下烘干、粉碎、过 0.5 mm 筛后保存。

采用 DTPA 浸提,火焰原子吸收分光光度计法测定土壤有效态 Cd 含量^[18];小白菜 Cd 含量采用 HNO₃·HClO₄(3:2)混酸消解,石墨炉原子吸收分光光度计法测定小白菜 Cd 含量^[19];小白菜鲜重和干重采用称量

法测定。

为了保证消煮和测定过程的准确性,加入土壤标准物质 GBW07404(GSS-4)和圆白菜标准物质 GBW10014(GSB-5)进行质量控制。加入标准的回收率在 93.78%~98.58%之间。

1.4 数据统计与分析

所得数据采用 Excel 2010 和 SPSS 10.0 软件进行计算、统计与处理。

1.4.1 平衡状态时的吸附量^[20]

$$Q=(C_0-C_e)V/W$$

式中: C_0 、 V 分别为初始加入 Cd^{2+} 的质量浓度($mg \cdot L^{-1}$)和体积(L); C_e 为平衡时溶液中 Cd^{2+} 的质量浓度, $mg \cdot L^{-1}$; Q 为平衡时有机物料的 Cd^{2+} 吸附量, $mg \cdot kg^{-1}$; W 为有机物料用量,kg。

1.4.2 等温吸附模型拟合^[21-22]

基于应用广泛的 Langmuir 和 Freundlich 模型分别对 3 种有机物料的等温吸附过程进行拟合分析,其公式如下:

$$\text{Langmuir 模型: } \frac{C_e}{Q} = \frac{1}{Q_{\max} \times K_L} + \frac{C_e}{Q_{\max}}$$

$$\text{Freundlich 模型: } Q = K_f \times C_e^{1/n}$$

式中: $Q_{\max}$ 为单位质量有机物料的最大 Cd^{2+} 吸附量, $mg \cdot kg^{-1}$; K_L 为表征吸附能力的 Langmuir 吸附系数, $L \cdot kg^{-1}$; K_f 为表征吸附能力的 Freundlich 吸附系数, $L \cdot kg^{-1}$; $1/n$ 为 Freundlich 模型中表征对重金属离子吸附作用的亲和力指标。

2 结果与分析

2.1 不同有机物料对 Cd^{2+} 的吸附特性

2.1.1 等温吸附曲线

由图 1 可知,不同有机物料对 Cd^{2+} 的吸附性能不同。在低浓度下, Cd^{2+} 的吸附量随平衡液 Cd^{2+} 浓度的增加而快速增加,但随着平衡液中 Cd^{2+} 浓度的逐渐增加,甘蔗滤泥及油菜籽油枯对 Cd^{2+} 的吸附率逐渐减小,废烟末对 Cd^{2+} 的吸附率则保持不变。在本试验研究条件下,3 种有机物料对 Cd^{2+} 的最大吸附量从大到小依次为甘蔗滤泥>油菜籽油枯>废烟末。

2.1.2 最大吸附量

采用 Langmuir 模型和 Freundlich 模型对 Cd^{2+} 吸附平衡浓度与 3 种有机物料的吸附容量拟合结果表明(表 3),Freundlich 模型均能较好地拟合甘蔗滤泥、油菜籽油枯、废烟末对 Cd^{2+} 吸附特性, R^2 均达到 0.93

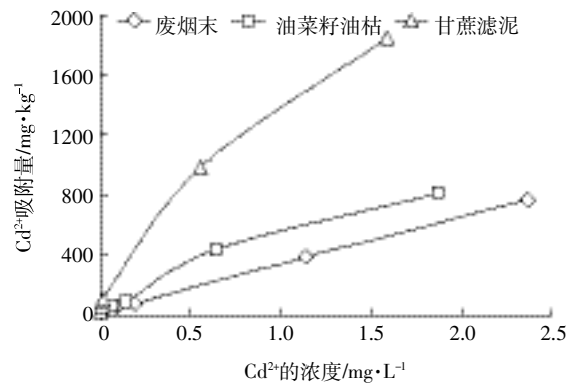


图 1 不同有机物料对 Cd^{2+} 的等温吸附曲线(25 °C)

Figure 1 Isotherm adsorption of Cd^{2+} by different organic materials(25 °C)

以上;Langmuir 模型可较好地拟合甘蔗滤泥对 Cd^{2+} 的吸附特性, R^2 达到 0.99 以上,但对油菜籽油枯和废烟末的拟合效果不佳, R^2 分别为 0.638 1 和 0.553 3。这说明 Freundlich 模型可更好地描述废烟末和油菜籽油枯对 Cd^{2+} 的等温吸附。

由 Langmuir 方程计算出甘蔗滤泥、油菜籽油枯和废烟末对 Cd^{2+} 的最大吸附量分别为 2 106.20、885.24、648.33 $mg \cdot kg^{-1}$,表明 3 种有机物料中甘蔗滤泥对 Cd^{2+} 的吸附容量最大,而废烟末对 Cd^{2+} 的吸附容量最低。这与等温吸附曲线结果一致。

2.1.3 模型参数

甘蔗滤泥、油菜籽油枯、废烟末对 Cd^{2+} 的 K_L 分别为 4.06、1.44、1.73 $L \cdot kg^{-1}$,以甘蔗滤泥为最高,这说明 3 种有机物料中甘蔗滤泥与 Cd^{2+} 的结合能力最强,其次为废烟末、油菜籽油枯。3 种有机物料 MBC($Q_{\max}$ 和 K_L 的乘积)大小顺序为甘蔗滤泥、油菜籽油枯、废烟末,与 $Q_{\max}$ 和等温吸附曲线趋势一致,这表明甘蔗滤泥对 Cd^{2+} 的缓冲量最大。

由表 3 可知,3 种有机物料的 n 值相似,甘蔗滤泥的 K_f 值为 1 658.40 $L \cdot kg^{-1}$,远高于废烟末和油菜籽油枯,说明甘蔗滤泥对 Cd 的吸附能力和吸附容量远高于废烟末和油菜籽油枯,与等温吸附曲线趋势一致。

表 3 等温吸附模型拟合参数

Table 3 Fitness of isotherm models and corresponding parameters

有机物料	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$Q_{\max}/mg \cdot kg^{-1}$	$K_L/L \cdot kg^{-1}$	R^2	n	$K_f/L \cdot kg^{-1}$	R^2
废烟末	648.33	1.73	0.553 3	1.67	327.52	0.939 3
甘蔗滤泥	2 106.20	4.06	0.991 2	1.50	1 658.40	0.982 2
油菜籽油枯	885.24	1.44	0.638 1	1.43	471.99	0.965 9

2.2 不同有机物料对土壤有效态 Cd 含量的影响

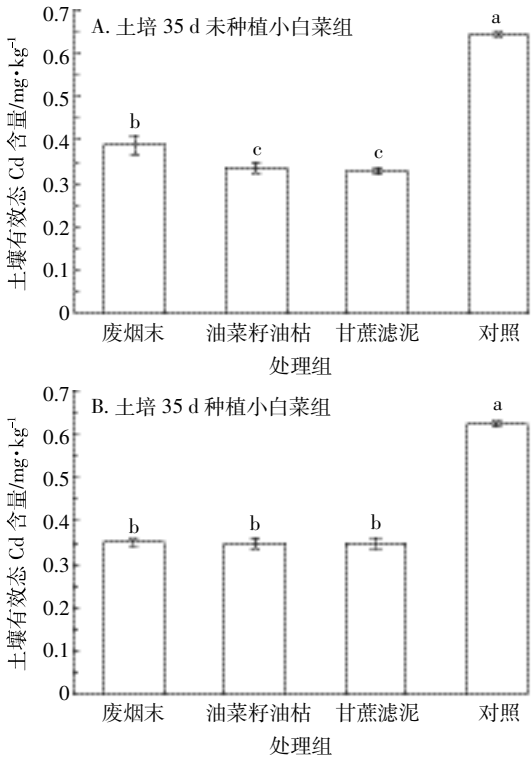
与对照(不添加有机物料)相比,3 种有机物料添加均显著降低了土壤有效态 Cd 含量(图 2)。未种植小白菜组甘蔗滤泥、油菜籽油枯处理的土壤有效态 Cd 含量,显著低于添加废烟末处理 14.97%和13.25%,添加油菜籽油枯和甘蔗滤泥处理之间无显著差异(图 2A)。在种植小白菜(35 d)组下,3 种有机物料处理的土壤有效态 Cd 含量无显著差异(图 2B)。未种植小白菜和种植小白菜时,甘蔗滤泥、油菜籽油枯、废烟末处理的土壤有效态 Cd 含量分别比对照降低了 48.81%、47.77%、39.79%和 44.02%、44.02%、43.80%。

2.3 不同有机物料对小白菜 Cd 含量的影响

甘蔗滤泥、油菜籽油枯、废烟末处理的小白菜 Cd 含量均显著低于对照处理,降幅分别可达 35.93%、34.43%、28.39%,3 种有机物料之间并无显著差异(图 3)。

2.4 不同有机物料对小白菜生长的影响

与对照相比,外源添加甘蔗滤泥和油菜籽油枯均显著提高了小白菜生物量,鲜重分别增加了 81.42%、96.88%,干重分别增加了 131.75%、128.91%,废烟末处理显著降低了小白菜鲜重和干重,降幅为 39.54%、19.91%,



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 among treatments($P<0.05$). The same below

图 2 不同有机物料对土壤有效态 Cd 含量的影响

Figure 2 Effect of different organic materials on soil Cd availability

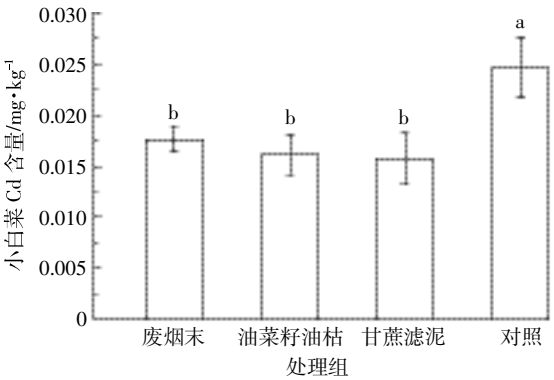


图 3 不同有机物料对小白菜 Cd 含量的影响(35 d)

Figure 3 Effect of different materials on Cd content in pakchoi(35 days)

甘蔗滤泥和油菜籽油枯处理之间无显著差异(表 4)。

3 讨论

3 种有机物料对 Cd^{2+} 吸附特性表明,油菜籽油枯和废烟末等温吸附描述以 Freundlich 模型为优,甘蔗滤泥则 Langmuir 模型略优。这可能与 3 种有机物料的材料不同有关。在 Langmuir 模型中, K_L 可表示物料与 Cd^{2+} 的结合能力, K_L 值越大,物料颗粒与 Cd^{2+} 的结合能力越强^[23]。 Q_{max} 和 K_L 的乘积(MBC)可反映物料对 Cd^{2+} 的最大缓冲量^[24]。 Freundlich 模型中, K_f 可表示吸附能力的强弱, K_f 越大,吸附能力越强。且当 n 值接近时, K_f 值与吸附容量正相关^[25]。本研究结果表明,3 种有机物料对 Cd^{2+} 的吸附性能以甘蔗滤泥为最佳($Q_{max}=2\ 106.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次为油菜籽油枯、废烟末。这可能与甘蔗滤泥具有较强的 Cd^{2+} 结合能力(K_L)、较大缓冲量(MBC)和较大的吸附容量(K_f)有关。在 Freundlich 模型中, $1/n$ 为土壤对重金属离子吸附作用的亲和力指标, $1/n$ 越小,表示土壤对重金属离子的吸附作用力越大^[25]。本研究表明,甘蔗滤泥的 K_f 最大,其次为油菜籽油枯、废烟末,但 $1/n$ 值以废烟末为最小,其

表 4 不同有机物料对小白菜生物量的影响($\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$)

Table 4 Effect of different organic materials on the biomass of pakchoi($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

处理	鲜重	干重
废烟末	15.29±2.85c	1.69±0.40c
油菜籽油枯	49.79±6.53a	4.83±0.90a
甘蔗滤泥	45.88±0.88a	4.89±0.53a
对照	25.29±0.27b	2.11±0.09b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

次为甘蔗滤泥、油菜籽油枯。这表明甘蔗滤泥对Cd²⁺的吸附能力最强,废烟末最差,但对Cd²⁺的亲合力则以废烟末为最强,油菜籽油枯最差。这说明有机物料对Cd²⁺的吸附能力大,并不意味着对重金属的亲合力也大,有机物料对Cd²⁺的亲合力大并不意味着其对重金属的吸附量大。

施用废烟末、甘蔗滤泥、油菜籽油枯显著降低了土壤有效态Cd含量以及小白菜Cd含量。这可能是因为这些有机物料本身含有或分解产生的胡敏酸、胡敏素通过络合反应与Cd²⁺产生不易溶的络合物,降低了土壤Cd的生物有效性^[26],进而降低了小白菜对Cd的吸收。除此之外,有机物料的施用会提高土壤的pH值,增大土壤溶液中多价阳离子和氢氧离子的离子积,促进Cd从高活性态向低活性态转化^[27]。

生物量的变化是污染土壤上作物受毒害作用最直观的表现^[28]。本试验表明,施用甘蔗滤泥、油菜籽油枯提高了小白菜的生物量,这与甘蔗滤泥和油菜籽油枯可减少土壤有效态Cd含量、降低小白菜Cd含量有关。原因可能是甘蔗滤泥和油菜籽油枯的添加降低了土壤重金属的毒害作用,甘蔗滤泥中含有大量的有机质、氮、磷、钾及微量元素,能改善土壤结构,增强土壤保水保肥能力;油菜籽油枯的施用可增加土壤酶活性,加快土壤有机质的分解,增加作物生长需要的营养物质^[29],从而促进作物生长^[30]。废烟末添加则降低了小白菜的生物量,抑制了小白菜的生长,原因可能是废烟末具有一定的生物毒性,直接施用于土壤会影响土壤和作物生长^[31]。

总体而言,废烟末、油菜籽油枯、甘蔗滤泥对农田土壤Cd污染均有一定修复效果,以甘蔗滤泥为最佳。但是,用量和不同腐熟程度条件下,有机物料对农田土壤Cd污染的修复效应及修复机理有待进一步研究。

4 结论

(1)废烟末、油菜籽油枯和甘蔗滤泥对Cd²⁺均有较好的吸附性能,其中甘蔗滤泥对Cd²⁺的吸附性能显著高于油菜籽油枯和废烟末。

(2)添加废烟末、油菜籽油枯和甘蔗滤泥均可降低土壤有效态Cd含量和小白菜体内Cd含量。施用甘蔗滤泥、油菜籽油枯也可促进小白菜生长。

参考文献:

[1] 任凌伟. 典型矿物材料钝化修复重金属污染农田土壤的作用及机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.

- REN Ling-wei. Study on the function and mechanism of typical mineral material passivation and remediation of heavy metal contaminated farmland soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [2] Peng C, Wang M E, Chen W P. Modelling cadmium contamination in paddy soils under long-term remediation measures: Model development and stochastic simulations[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 146–155.
- [3] 李富荣, 李敏, 朱娜, 等. 水作和旱作施用改良剂对蔬菜-土壤系统中铅镉生物有效性的影响差异[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1477–1483.
- LI Fu-rong, LI Min, ZHU Na, et al. Comparing the effects of soil amendments on Pb and Cd bioavailability in water spinach under water submersion cultivation and dry farming conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1477–1483.
- [4] 胡丽萍, 周国兴, 刘光敏, 等. 组配改良剂对黄瓜铅积累及营养品质的影响[J]. 农业工程, 2017, 7(3): 153–158.
- HU Li-ping, ZHOU Guo-xing, LIU Guang-min, et al. Effects of combined modifier on lead accumulation and nutritional quality of cucumber[J]. *Agricultural Engineering*, 2017, 7(3): 153–158.
- [5] 陈远其, 张煜, 陈国梁. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1419–1424.
- CHEN Yuan-qi, ZHANG Yu, CHEN Guo-liang. Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1419–1424.
- [6] Huang G, Su X, Rizwan M S, et al. Chemical immobilization of Pb, Cu, and Cd by phosphate materials and calcium carbonate in contaminated soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(16): 16845–16856.
- [7] Nayak A K, Raja R, Rao K S, et al. Effect of fly ash application on soil microbial response and heavy metal accumulation in soil and rice plant[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2015, 114: 257–262.
- [8] Guo X, Li H, Chen H. The effects of biochar and intercropping on the Cd, Cr and Zn speciation in soils and plant uptake by *Machilus pauhoi* [J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2017, 98(4): 574–581.
- [9] Zornoza R, Faz Á, Martínez-martínez S, et al. Marble waste and pig manure amendments decrease metal availability, increase soil quality and facilitate vegetation development in bare mine soils[C]. Vienna: EGU General Assembly, 2013.
- [10] 许浩, 韩丽媛, 茹淑华, 等. 不同有机肥中Cu、Zn在农田土壤中的有效性及形态归趋[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 998–1009.
- XU Hao, HAN Li-yuan, RU Shu-hua, et al. Bioavailability and for tendency of Cu and Zn in farmland soils after application of different organic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 998–1009.
- [11] Zhao Y C, Yan Z B, Qin J H, et al. Effects of long-term cattle manure application on soil properties and soil heavy metals in corn seed production in Northwest China[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2014, 21(12): 7586–7595.
- [12] 李影, 吴景贵, 陈猛. 不同有机物料与化肥配施对黑土重金属各形态的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 178–182.

- LI Ying, WU Jing-gui, CHEN Meng. Influence of different organic materials applied with chemical fertilizers on existing forms of heavy metals in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2):178-182.
- [13] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):258-261.
GAO Yi-dan, LIANG Cheng-hua, PEI Zhong-jian, et al. Effects of biochar and lime on the fraction transform of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):258-261.
- [14] 徐智, 范茂攀, 王宇蕴, 等. 废烟末袋式堆肥基础工艺参数研究[J]. 云南农业大学学报, 2013, 28(4):607-611.
XU Zhi, FAN Mao-pan, WANG Yu-yun, et al. Study on packaged composting process parameters of tobacco waste[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2013, 28(4):607-611.
- [15] 李成学, 郭建芳, 何忠俊, 等. 微生物菌剂对油枯堆肥过程中理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):389-394.
LI Cheng-xue, GUO Jian-fang, HE Zhong-jun, et al. Microbial strains affect the physical and chemical properties when composting canola meal[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):389-394.
- [16] 刘超, 徐智, 李少明, 等. 不同比例鸡粪-废烟末混合堆肥过程的研究[J]. 云南农业大学学报, 2015, 30(5):799-803.
LIU Chao, XU Zhi, LI Shao-ming, et al. Research on different proportions of chicken manure-tobacco fine waste on compost process[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2015, 30(5):799-803.
- [17] 罗连光, 李先, 贺爱国, 等. 不同微生物菌剂对甘蔗滤泥腐解效果的影响[J]. 湖南农业科学, 2008(6):61-62.
LUO Lian-guang, LI Xian, HE Ai-guo, et al. Effects of different microbial agents on fermentation of bagasse sludge in composting[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2008(6):61-62.
- [18] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1500-1510.
WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn and Cd in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8):1500-1510.
- [19] 周利强, 尹斌, 吴龙华, 等. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. 土壤, 2013, 45(2):227-232.
ZHOU Li-qiang, YIN Bin, WU Long-hua, et al. Effects of different organic amendments on uptake of heavy metals in rice from contaminated soil[J]. *Soils*, 2013, 45(2):227-232.
- [20] 王金贵. 我国典型农田土壤中重金属镉的吸附-解吸特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
WANG Jin-gui. Adsorption-desorption characteristics of cadmium in typical agricultural soils in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [21] Huang B, Li Z W, Huang J Q, et al. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 264(2):176-183.
- [22] Liu X F, Hicher P, Muresan B, et al. Heavy metal retention properties of kaolin and bentonite in a wide range of concentration and different pH conditions[J]. *Applied Clay Science*, 2016, 119(2):365-374.
- [23] 杜斌, 赵秀兰. 紫色水稻土对镉吸附解吸特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(14):8139-8142.
DU Bin, ZHAO Xiu-lan. Adsorption and desorption characteristics of cadmium in three purplish paddy soils[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(14):8139-8142.
- [24] 陈苏, 孙铁珩, 孙丽娜, 等. Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在根际和非根际土壤中的吸附-解吸行为[J]. 环境科学, 2007, 28(4):843-851.
CHEN Su, SUN Tie-heng, SUN Li-na, et al. Sorption-desorption behavior of Cd^{2+} and Pb^{2+} in rhizosphere and bulk soil[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):843-851.
- [25] 程启明, 黄青, 刘英杰, 等. 花生壳与花生壳生物炭对镉离子吸附性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):2022-2029.
CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIU Ying-jie, et al. Adsorption of cadmium on peanut shell and its biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):2022-2029.
- [26] Walker D J, Clemente R, Roig A, et al. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(2):303-312.
- [27] 陕红, 刘荣乐, 李书田. 施用有机物料对土壤镉形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):136-144.
SHAN Hong, LIU Rong-le, LI Shu-tian. Cadmium fractions in soils as influenced by application of organic materials[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):136-144.
- [28] 胡斌, 王丹, 王松山, 等. 铜、硒复合污染对小白菜生长及金属吸收和转运的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9):2033-2041.
HU Bin, WANG Dan, WANG Song-shan, et al. Uptake and transport of exogenous Cu and Se in pakchoi and their effects on growth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9):2033-2041.
- [29] 邱萍, 张念, 姚晶, 等. 油枯不同施用量对烤烟产量和质量的影响[J]. 植物医生, 2010(4):34-36.
QIU Ping, ZHANG Nian, YAO Jing, et al. Effects of different application rates on yield and quality of tobacco[J]. *Plant Doctor*, 2010(4):34-36.
- [30] 王学礼, 黄小青, 杜芮萍, 等. 滤泥有机肥对镉砷复合污染农田玉米吸收重金属的影响[J]. 广西农学报, 2015, 30(3):24-27.
WANG Xue-li, HUANG Xiao-qing, DU Rui-ping, et al. Effects of filtered mud organic fertilizer on heavy metal accumulation in maize planted at Cd/As combined polluted farmland[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2015, 30(3):24-27.
- [31] 李少明, 邓文祥, 郭亚妮, 等. 微生物菌剂对烟末堆肥理化性状及种子发芽指数的影响[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(5):706-709.
LI Shao-ming, DENG Wen-xiang, GUO Ya-ni, et al. Effects of microbial strains on physical and chemical changes of tobacco fine waste compost and on germination index of *Brassica chinensis* L.[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, 22(5):706-709.