

施用蔗渣对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响研究

孙文博, 莫创荣*, 安鸿雪, 刘侃, 崔雯, 张超兰, 李小明

(广西大学环境学院, 南宁 530004)

摘要:采用化学反应的合成方法向蔗渣中引入巯基官能团,并进行电镜扫描和红外光谱分析。在此基础上,通过土壤培养试验和生物盆栽试验,研究了蔗渣和改性蔗渣对模拟镉(Cd)污染农田土壤中镉的赋存形态和生物有效性的影响。结果表明,采用该合成方法,成功地向蔗渣中引入了巯基官能团。在土壤培养试验中,有机物对土壤Cd赋存形态的转化与土壤pH的相关性不明显,但与土壤中胡敏酸(HA)和富里酸(FA)含量的变化具有一定的相关性:土壤中HA含量随培养时间的延长而逐渐升高,各处理土壤弱酸提取态Cd含量相应减少,而土壤残余态Cd含量则逐渐增加,且巯基蔗渣的作用效果均强于未改性蔗渣。在生物盆栽试验研究中,外加 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd显著降低了小白菜的生物量,而施用有机物料对小白菜均有显著的增产效果,研究结果同时表明蔗渣和巯基蔗渣都不同程度降低了土壤有效态Cd的含量以及小白菜地上部分的镉含量,且巯基蔗渣的作用效果较为显著。另外,小白菜地上部分镉含量与小白菜生物量呈现显著负相关,与土壤有效镉含量呈显著正相关。

关键词:蔗渣;镉;生物有效性

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)09-1793-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.09.013

Effects of Bagasse Application on Speciation and Bioavailability of Cadmium in Contaminated Soil

SUN Wen-bo, MO Chuang-rong*, AN Hong-xue, LIU Kan, CUI Wen, ZHANG Chao-lan, LI Xiao-ming

(School of Environmental Studies, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To investigate the effect of bagasse on speciation and bioavailability of Cd in agricultural soil, the unmodified and thiol-modified bagasse were used as soil ameliorants in pot experiments and soil culture experiments, and the surface of thiol-modified bagasse was further characterized by SEM and FTIR. The results showed that about 0.96% of thiol was grafted onto the bagasse fibers. No significant correlation was found between the chemical speciation of Cd and pH in the soil, but the concentration of humic acid (HA) and fulvic acid (FA) in soils was found to correlate with that of Cd: The concentration of HA in the soil decreased with the incubation time, and the exchangeable Cd decreased, while the residual Cd increased in the soil, and the chemically thiol-modified sugarcane bagasse was more effective than the unmodified one. In the pot experiment, *Brassica Chinensis* biomass was decreased significantly by the addition of Cd ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) compared with uncontaminated soil. The two amendments significantly improved biomass, and remarkably decreased Cd content in *Brassica Chinensis* and the content of DTPA extractable Cd in the Cd-contaminated soil, and the effect of thiol-modified bagasse was more remarkable than unmodified one. It was also found that the concentration of Cd in *Brassica Chinensis* has a significant negative correlation with the biomass, whereas it has a significant positive correlation with the content of DTPA extractable Cd.

Keywords: bagasse; cadmium; bioavailability

甘蔗渣是一种农林废弃物,是甘蔗经压榨糖分后所产生的一种纤维状副产物,大约占原料甘蔗质量的22%~24%(其中含水分50%),工业生产中每生产1 t

蔗糖,就会产生2~3 t的蔗渣^[1],我国是仅次于巴西和印度的世界第三甘蔗种植大国,南方蔗区甘蔗年产量超过7000万t,蔗渣的产量达到700万t^[2]。甘蔗渣作为天然纤维物质,纤维素含量约占蔗渣干重的一半,其他为木质素(24.5%)、半纤维素(19.95%)、脂肪和蜡(3.5%)、灰分(2.4%)、二氧化硅(2.0%)以及其他成分(1.7%)等^[3],并且其来源集中、产量大,成分相对稳

收稿日期:2013-01-20

作者简介:孙文博(1987—),女,湖南娄底人,硕士,研究方向为土壤重金属污染修复。E-mail:sunwenbo87@126.com

*通信作者:莫创荣 E-mail:mochuangrong@163.com

定,是一种重要的可再生生物资源。

目前,蔗渣作为生物吸附剂在水处理等方面已经具有相当多的应用和研究;如染料废水的吸附研究^[4],氨氮的吸附研究^[5],糖蜜的吸附研究^[6]以及重金属的吸附研究^[7]等。研究发现,蔗渣具有多孔和比表面积大的优点,因此其具有一定的亲和吸附性,而蔗渣纤维素分子内含有大量的羟基和酚基,同时还含有许多游离醇羟基,假如在纤维素分子上添加合适的官能团,那么蔗渣便可以有效地吸附水中重金属和有毒有机物^[8]。国内外相关研究者为了提高纤维素的吸附能力,对纤维素结构进行了改性,从而增加其吸附能力和吸附范围。实验研究中发现巯基化合物中的巯基与某些重金属离子有很强的络合作用,因此以巯基为功能团的分离富集技术发展很快,应用也日趋广泛。

相关报道称磷酸盐、石灰性物质、有机物料等可作为改良剂,通过离子交换、吸附、沉淀等钝化作用使重金属在土壤中存在的形态发生变化而影响其生物有效性^[9]。廉价易得的有机物料如猪粪、秸秆^[10-11]、泥炭^[12]等,因其具有减少污染和化肥的使用等优点,作为土壤改良剂对重金属污染土壤进行修复,越来越受到人们的关注。但有机物料蔗渣作为土壤改良剂应用于重金属污染农田中的研究鲜见报道,本文通过对Cd污染的农田土壤施入蔗渣及自制改性蔗渣,以Cd富集能力较强的小白菜为供试作物,研究有机物料蔗渣对农田土壤Cd的形态和生物有效性的影响,从而为蔗渣修复镉污染农田土壤提供了数据依据,具有重要的理论意义和实际意义。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

供试蔗渣:取自南宁糖业造纸厂,有机碳含量为316.7 g·kg⁻¹,全镉含量为0.5 mg·kg⁻¹。经粉碎处理成细粉末,过0.15 mm筛。

供试植物:小白菜,购于南宁农贸市场,品种为上海青(*B. Chinensis*)。

供试土壤:采自广西大学农田实验基地,采样深度为0~20 cm,土壤样品经室温风干后过2 mm筛,备用。土壤pH为8.17,有机质含量为21.56 g·kg⁻¹,全氮、全磷、全钾的含量分别为0.9、0.7、25.8 g·kg⁻¹,试验时向土壤中均匀喷施硝酸镉[Cd(NO₃)₂·4H₂O,分析纯],使镉的添加浓度为5 mg·kg⁻¹。搅拌均匀后在60%田间持水量下老化培养3个月后风干,过2 mm筛,作为Cd污染土壤,备用。

1.2 试验方法

1.2.1 蔗渣改性试验

取过0.15 mm筛的蔗渣60 g放入1000 mL的烧杯中,加入300 mL无水乙醇和300 mL 1% NaOH,在室温下浸泡24 h后,用去离子水洗至pH近中性,过滤,烘干。取30 g干燥后固体用1000 mL 1%巯基乙酸浸泡搅拌12 h后,用去离子水洗至中性,过滤,在70℃干燥箱中干燥24 h。再置干燥器中保存。此改性过程所发生的化学反应为:



1.2.2 土壤培养试验

称取老化3个月得到的镉污染土壤400 g装入塑料带盖容器中,共设5种处理方法:CK(不加有机物料),蔗渣2%(OB2),蔗渣5%(OB5),巯基蔗渣2%(MB2),巯基蔗渣5%(MB5)。每种处理方法重复3次,其中2%和5%分别表示有机物料干重占风干土重的2%和5%。混合均匀后调节至田间持水量的60%,并在(25±5)℃的条件下进行恒温培养。分别于培养起始时和培养15、30、45、60、90 d后,采集土壤样品。采样时将土充分混匀进行取样,剩余土样继续培养,所取土壤样品风干,过2 mm筛,备用。

1.2.3 生物盆栽试验

盆栽试验共设6种处理方法:(1)CK(未添加Cd的土壤),(2)Cd(5 mg·kg⁻¹模拟Cd污染土壤),(3)Cd+OB2(2%蔗渣),(4)Cd+OB5(5%蔗渣),(5)Cd+MB2(2%巯基蔗渣),(6)Cd+MB5(5%巯基蔗渣)。每种处理方法重复3次。将供试土壤装入塑料花盆中,每盆装土500 g,施加等量底肥,肥料为尿素和磷酸二氢钾(均为化学纯),每千克土用量为:N 0.2 g、P₂O₅ 0.3 g、K₂O 0.2 g。混合均匀,浇水平衡一周后,播种小白菜,出苗一周后间苗,每盆留苗4株,保持土壤含水量为田间持水量的50%。生长45 d后收获小白菜,用自来水冲洗干净,擦干水分,称取鲜样质量。于90℃杀青0.5 h,在55℃下烘干,称干重,将植物样用不锈钢粉碎机进行粉碎,备用。小白菜收获后,将土壤从盆中倒出,风干,去除其中根茬,磨碎过2 mm筛,备用。

1.3 测试项目和方法

蔗渣的表征分析:以喷金法采用S-3400N型扫描电子显微镜进行蔗渣和改性蔗渣表面形貌观察,采用FTIR-850型傅里叶变换红外光谱仪进行红外光谱分析。用直接碘量法分析蔗渣中S元素含量。土壤中镉形态分级采用BCR四级分组法,将土壤Cd分为:弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残余态。土壤

中全镉含量采用王水-高氯酸消煮,待测液中 Cd 用原子吸收分光光度法测定^[13]。土壤有效镉采用 DTPA-CaCl₂-TEA 提取,原子吸收分光光度法测定。土壤 pH 采用电位法测定,土水比 1:2.5^[13]。土壤胡敏酸(HA)和富里酸(FA)用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH+0.1 mol·L⁻¹ NaP₂O₇ 浸提,土水比 1:10,在(60±2)℃下恒温提取 1 h,再用酸沉淀法分离 HA 和 FA^[14];HA 和 FA 中有机碳含量用丘林法测定^[13]。盆栽试验小白菜样品中 Cd 含量测定:用 HNO₃-H₂O₂ 微波消解炉消解,原子吸收光谱法测定。用国家标准物质(GBW08510)进行分析质量控制。

试验数据采用 SPSS 和 Origin 进行统计分析和图形制作。

2 结果与分析

2.1 巯基改性蔗渣的表征

原蔗渣(OB)和巯基改性蔗渣(MB)的扫描电镜照片见图 1,红外光谱分析见图 2。

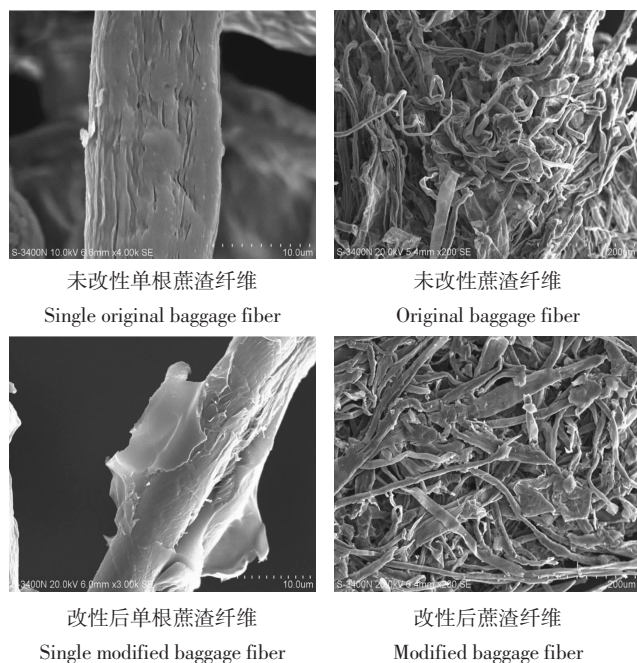


图 1 改性前后蔗渣纤维电镜扫描图

Figure 1 SEM of original and modified bagasse fiber

由图 1 可以看出,OB 表面较为粗糙,棱角分明,具有明显的蔗渣纤维纹路,MB 的表面变得相对光滑,尖锐的棱角明显减少。说明蔗渣粉末参与了化学反应,致使其表面结构发生了一定的变化^[15]。由图 2 可见,与 OB 相比,MB 在 3300 cm⁻¹ 和 900~1100 cm⁻¹

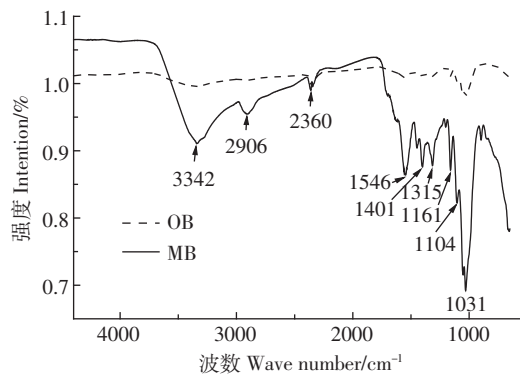


图 2 蔗渣和巯基改性蔗渣的红外光谱图

Figure 2 FTIR of the bagasse and thiol-modified bagasse

附近的 O-H 和 C-N 伸缩振动峰均有增强的迹象,证明有大量羟基和氨基被引入到原渣中^[16]。MB 在约 1546 cm⁻¹ 处的伸缩振动峰增强,这是由于酯基中的 C=O 振动形成的,说明有大量的酯基中的 C=O 通过酯化反应被引入到了 MB,表明巯基乙酸被成功引入^[15]。另外,MB 在 2360 cm⁻¹ 处出现了明显的 S-H 振动峰,证实发生了上述的化学反应。元素分析表明,MB 中巯基含量为 0.96%。

2.2 有机物料对土壤 pH 含量变化的影响

有机物料施用后土壤的理化性质发生了一定的变化,其中 pH 值的变化如图 3 所示。

在 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理土壤中,和未加有机物料处理(CK)相比,施用蔗渣和巯基蔗渣的初期(15 d),土壤 pH 值未发生显著变化;从第 45 d 开始,有机物料显著地降低了土壤 pH 值,在第 60 d 降幅最大,与对照 CK 相比,OB2 和 MB2 处理的土壤 pH 分别降低了 0.29 和 0.23 个单位,而 OB5 和 MB5 处理土壤 pH 值分别降低了 0.36 和 0.24 个单位。这可能是因为蔗渣为未腐熟的有机物,进入土壤后,随着蔗渣的分解可

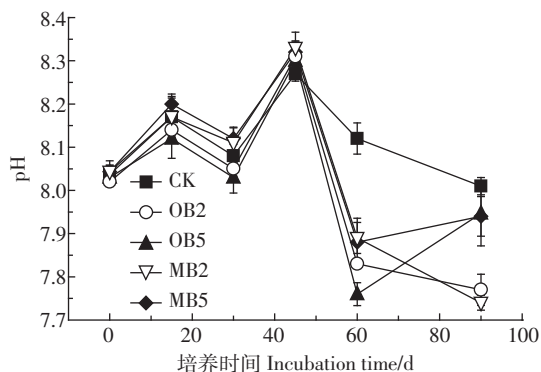


图 3 有机物料对 pH 的影响

Figure 3 The effect of organic materials on soil pH

产生大量的中间产物有机酸,从而导致土壤 pH 随着时间的延长而下降。

2.3 有机物料对土壤有机质组分含量变化的影响

有机物料蔗渣对土壤的有机质含量变化产生显著影响。

由图 4 可知,随着培养时间的延长,施用有机物料处理的土壤 HA 含量逐渐增加,FA 的含量则逐渐下降。与对照相比,蔗渣和疏基蔗渣均显著地增加了土壤 FA 和 HA 的含量。培养 90 d 时,OB2 和 MB2 处

理的土壤 HA 比对照分别增加 109.04% 和 107.83%, FA 分别增加 73.42% 和 54.43%。而施用 OB5 和 MB5, 与对照相比,其土壤 HA 分别增加 116.27% 和 122.29%, FA 分别增加 89.87% 和 50.63%。另外,每组处理的 HA 都逐渐上升,在 60 d 后趋于稳定,而 FA 则逐渐下降,60 d 后又稍稍回升。

2.4 有机物料对土壤 Cd 各形态变化的影响

试验表明,土壤 Cd 形态随培养时间而显著地变化(图 5)。

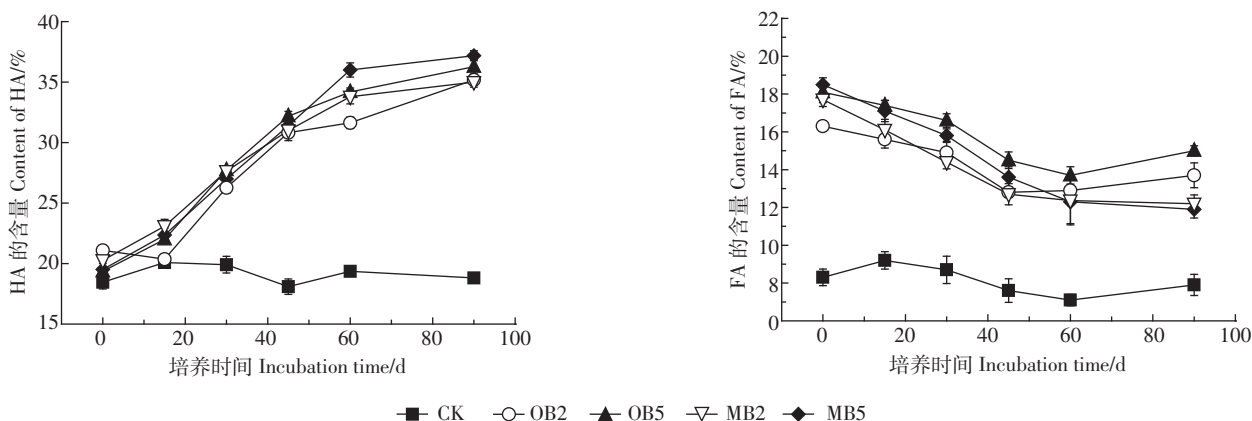


图 4 有机物料对土壤 HA 和 FA 的影响

Figure 4 The effect of organic materials on soil HA and FA

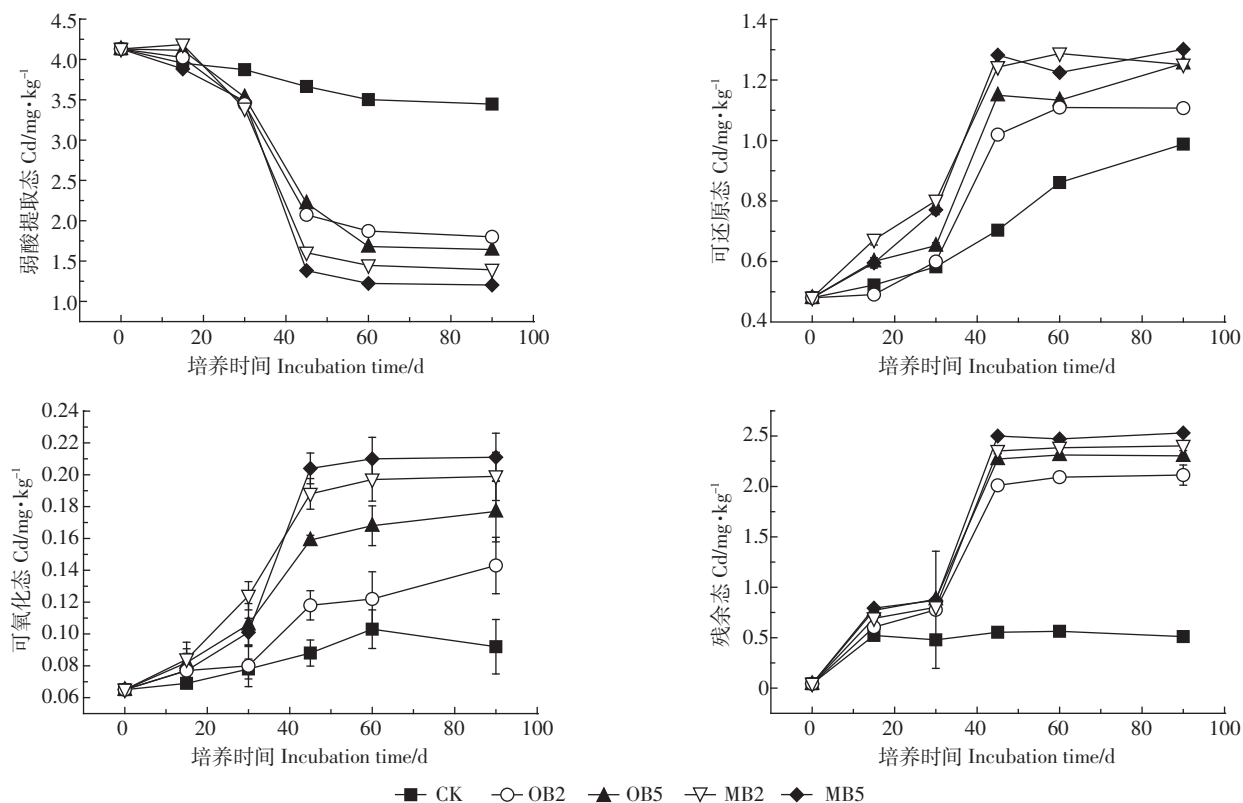


图 5 有机物料对土壤 Cd 形态的影响

Figure 5 The effect of organic materials on the fraction of Cd in soils

随有机物料添加浓度的升高,土壤弱酸提取态 Cd 含量不断降低,与未添加有机物料的对照相比,蔗渣在培养初期对弱酸提取态 Cd 含量的影响不显著,到 45 d 时可显著降低土壤弱酸提取态 Cd 含量,但随着培养时间的延长,蔗渣对增加弱酸提取态 Cd 含量的影响逐渐减少。与对照相比,加入 OB2 和 OB5 培养至 45 d 时,弱酸提取态 Cd 含量分别降低 43.44% 和 39.34%,加入 MB2 和 MB5 培养至 45 d 时,弱酸提取态 Cd 含量分别降低 56.28% 和 62.30%。添加氨基改性蔗渣的土壤中,Cd 弱酸提取态的降低幅度明显大于未改性蔗渣处理土壤的降低幅度。还原态、氧化态和残余态 Cd 含量均随培养时间的延长不断增长,在 30 d 时,均出现最大增长幅度,45 d 之后趋于平稳。加入 OB2 和 OB5 培养至 45 d 时,残余态 Cd 含量分别增加 265.45% 和 312.73%,而 MB2 和 MB5 处理土壤中,残余态 Cd 含量分别增加 327.27% 和 354.55%。在等量施加水平上,氨基蔗渣比蔗渣更能降低土壤 Cd 的弱酸提取态含量,并且更能增加土壤 Cd 的残余态含量。这说明,氨基蔗渣比蔗渣对土壤重金属 Cd 的钝化效果更明显。

2.5 有机物料对小白菜生长、镉含量及土壤有效镉的影响

表 1 为蔗渣和氨基蔗渣的不同施加量对小白菜的生长,镉含量以及土壤有效镉的影响。

观察发现,小白菜移栽 16 d 后,单施镉处理的植株出现叶尖失绿黄化,植株生长停滞,叶小而少等明显的镉毒害症状。施入蔗渣和氨基蔗渣后,症状减轻。从表 1 可以看出,镉对小白菜的生长有明显的影响,与 CK 处理相比较,施镉处理的小白菜的地上部分生

物量降低了 50.80%。与施镉处理相比较,施入蔗渣和氨基蔗渣明显提高了小白菜的地上部分生物量,施入 OB2、OB5、MB2 和 MB5 后,小白菜的产量分别提高了 47.01%、52.24%、45.27% 和 51.24%。施用蔗渣和改性蔗渣后,小白菜的生物量和镉含量以及土壤中有效态镉的含量均呈现显著性差异。相关分析表明,小白菜镉含量与小白菜地上部分生物量呈现显著负相关,其回归方程为:

$$y(\text{植株镉含量}) = 20.62 - 2.40x(\text{地上部生物量}), r = 0.921$$

与施镉处理相比较,施用 OB2、OB5、MB2 和 MB5 处理的小白菜镉含量分别下降了 21.95%、31.40%、49.80% 和 55.56%。土壤有效态镉含量分别较施镉处理降低了 37.07%、38.94%、42.68% 和 44.55%。相关分析表明,土壤有效镉含量与小白菜镉含量呈显著正相关,其回归方程为:

$$y(\text{土壤有效镉}) = 0.086 + 0.28x(\text{植株镉含量}), r = 0.954$$

说明,蔗渣和氨基蔗渣降低土壤有效镉含量是其减轻镉对小白菜毒害的原因。另外,同等施加水平上,氨基蔗渣比蔗渣对土壤 Cd 的钝化效果更显著,更能降低土壤 Cd 的生物有效性。

3 讨论

大量实验研究表明,有机物料主要通过影响土壤 pH 值及土壤中有机质组分含量的变化来调节土壤重金属的赋存形态,从而影响其生物有效性。pH 通过影响 Cd^{2+} 水解、 Cd^{2+} 与 H^+ 交换作用、吸附表面类型和吸附表面电荷等影响土壤对镉的吸附^[17],当 pH 降低时有利于 Cd 由低活性态向高活性态转化。而在本研究中,向土壤中施入蔗渣和氨基蔗渣并未通过 pH 的变化来影响 Cd 形态的转化,这主要与 pH 的变化程度相关。有研究证明,土壤 pH 的改变并不一定会直接造成土壤重金属形态的相应改变,这是因为土壤 pH 对土壤 Cd 活性的影响还与土壤有机质含量、阳离子交换量、盐基饱和度、粘土矿物总量及类型等多种因素有关^[18]。有机物料施入土壤分解后产生有机质,腐殖质作为有机质的主要成分通常占土壤有机质的 60%~80%^[19],能与土壤中的重金属形成络合物。腐殖质中含有胡敏素、富里酸(FA)、胡敏酸(HA)等腐植酸,其中 FA 和 HA 含有大量与金属离子发生反应的功能团,因此对土壤中重金属的形态变化、迁移、生物有效性起着重要作用。

表 1 有机物料对小白菜生长、镉含量及土壤有效镉的影响
Table 1 Shoot dry weight, Cd concentration and DTPA extractable Cd on different Cd contaminated soils with organic materials

处理	植株地上部分干重/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	植株镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	土壤有效态镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
CK	8.17a(0.259)	0.724e(0.135)	0.08c(0.014)
Cd	4.02c(0.887)	10.681a(0.787)	3.21a(0.233)
Cd+OB2	5.91b(1.009)	8.336b(0.187)	2.02b(0.121)
Cd+OB5	6.12b(0.305)	7.327c(0.376)	1.96b(0.075)
Cd+MB2	5.84b(1.441)	5.362d(0.715)	1.84b(0.233)
Cd+MB5	6.08b(0.551)	4.747d(0.348)	1.78b(0.085)

注:同一列中不同小写字母表示差异达到 5% 显著水平;括号中数据为标准差。

Note: Different small letters in the same column mean significance at 5% level. Data in parentheses refer to standard deviation.

蔗渣作为改良剂施入土壤中,经腐烂分解产生腐植酸,其分子内含有羧基、羟基、醇羟基和酚羟基等多种活性官能团^[20],能与Cd离子发生相互作用,形成稳定的螯合物。在有机物的腐解初期,形成FA的速度要大于HA,随着培养时间延长,在微生物的作用下,FA转化为HA,因而FA的含量逐渐降低,HA的含量逐渐增加^[21]。Cd与大分子量的HA结合趋于稳定,形成难溶性螯合物而吸附于土壤中^[22],难以被植物吸收。因此,蔗渣有效地降低了土壤中有效态Cd的含量,从而影响植株对土壤Cd的吸收。相关分析表明,土壤残余态Cd含量与土壤HA含量呈显著正相关,与FA含量关系不显著。另外,巯基化处理蔗渣使得巯基有效结合于蔗渣纤维素官能团上,更加有利于吸附土壤Cd离子。而且,巯基化处理过程也加剧了蔗渣的腐解,使其钝化效果比未改性的蔗渣显著。

本研究还表明,施用蔗渣和巯基蔗渣对镉处理下小白菜有明显的增产效果,这是因为蔗渣在土壤中被微生物分解产生有机质的过程提升了土壤的肥力,同时蔗渣降解所产生的腐植酸中含有羧基、羟基、酚羟基等基团对植物生长也有一定刺激作用。添加蔗渣和巯基蔗渣还能减轻镉污染土壤对小白菜的毒害作用,其缓解镉毒害作用的机理是:蔗渣降解所产生的腐植酸具有络合镉的作用,促进Cd由有效态向残余态转化,有效地减少了小白菜对土壤中Cd的吸收。另外,由于巯基改性蔗渣的纤维素基团上被引入了-S-H,使得改性蔗渣对Cd的吸附和络合作用远远大于未改性蔗渣,同时也降低了土壤有效态Cd的含量。因此,施用巯基改性蔗渣的盆栽中,小白菜可食部分Cd的含量要远低于未改性蔗渣。

综上所述,本课题研究为合理利用有机物料来降低土壤Cd的有效性提供了数据支持和理论依据。但是由于实际污染土壤与实验室模拟污染土壤之间存在一定的差异,而且,由于土壤环境的复杂性,改性蔗渣对Cd污染土壤的钝化效果是否长期稳定,还需要进一步研究和验证。

4 结论

(1)本试验条件下施用蔗渣和巯基蔗渣均能显著降低土壤中弱酸提取态Cd的含量,同时增加了土壤中残余态Cd的含量。土壤Cd赋存形态的转化与土壤中pH的变化关系不明显,但与HA和FA含量的变化具有一定的相关性。土壤中HA含量随培养时间的延长而逐渐升高,FA含量逐渐降低。各处理土壤弱

酸提取态Cd含量相应减少,而土壤残余态Cd含量则逐渐增加,且巯基蔗渣的作用效果均强于未改性蔗渣,5%添加量的作用效果均强于2%添加量。

(2)外加 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd显著降低了小白菜的生物量,而施用有机物料对小白菜均有显著的增产效果,同时蔗渣和巯基蔗渣都不同程度地降低了土壤有效态Cd的含量以及小白菜地上部分的镉含量,且巯基蔗渣的作用效果更显著。另外,小白菜地上部分镉含量与小白菜生物量呈现显著负相关,与土壤有效镉含量呈显著正相关。

参考文献:

- [1] Satyanarayana K G, Guimaraes J L, Wypych F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications[J]. *Composites: Part A*, 2007(38): 1694-1709.
- [2] Wang Yun-pu, Li Ji-hua, Liu Yu-huan, et al. Comprehensive utilization of bagasse: State of the art[J]. *Chinese Agric Sci Bull*, 2010, 26(16): 370.
- [3] Ma Sen, Xue Xiao-li, Yu Shu-juan, et al. High-intensity ultrasound irradiated modification of sugarcane bagasse cellulose in an ionic liquid[J]. *Industrial Crops and Products*, 2011, 33(1): 1-5.
- [4] 安世杰, 孙宜敏. 甘蔗渣对染料废水的吸附试验研究[J]. *工业用水与废水*, 2007, 38(6): 81-83.
- AN Shi-jie, SUN Yi-min. Test of dyeing wastewater adsorption by sugarcane residues[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2007, 38(6): 81-83.
- [5] 梁美娜, 朱义年, 刘辉利, 等. 蔗渣吸附剂的制备及其对氨氮的吸附研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(6): 93-98.
- LIANG Mei-na, ZHU Yi-nian, LIU Hui-li, et al. Adsorptive removal of $\text{NH}_3\text{-N}$ from wastewater by absorbent made of bagasse[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(6): 93-98.
- [6] 齐晓庆, 何华柱, 周锡文, 等. 改性蔗渣纤维素对糖蜜吸附作用的研究[J]. *现代食品科技*, 2012, 28(5): 502-504.
- QI Xiao-qing, HE Hua-zhu, ZHOU Xi-wen, et al. Effect of modified bagasse cellulose on the adsorption of molasses[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2012, 28(5): 502-504.
- [7] 伍婵翠, 梁英, 唐新智, 等. 多氨基改性蔗渣对水溶液中 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 吸附性能的研究[J]. *材料导报*, 2012, 26(6): 86-89.
- WU Chan-cui, LIANG Ying, TANG Xin-zhi, et al. Adsorption behavior of the multi-amino-modified bagasse for $\text{Pb}(\text{II})$, $\text{Zn}(\text{II})$, $\text{Cd}(\text{II})$ and $\text{Cu}(\text{II})$ in aqueous solution[J]. *Materials Review*, 2012, 26(6): 86-89.
- [8] Osvaldo Karnitz Jr, Leandro Vinicius Alves Gurgel, et al. Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 1291-1297.
- [9] 何飞飞, 曾建兵, 吴爱平, 等. 改良剂修复利用镉污染菜地土壤的田间效应研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(31): 247-251.
- HE Fei-fei, ZENG Jian-bing, WU Ai-ping, et al. Study on the im-

- provement of Cd contaminated soil by different soil amelioration materials in vegetable field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(31): 247–251.
- [10] 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.
- [11] 潘奕, 周立祥. 施用有机物料对土壤中 Cu、Cd 形态及小麦吸收的影响: 田间微区试验[J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(2): 142–146.
- PAN Yi, ZHOU Li-xiang. Influence of applying organic manures on the chemical form of Cu and Cd in the contaminated soil and on wheat uptake: Field micro-plot trials[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(2): 142–146.
- [12] 咸翼松. 施用泥炭对土壤镉形态及其植物有效性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- XIAN Yi-song. Effects of peat application on chemical fractions and bioavailability of cadmium in contaminated soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [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.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [14] 文孝启. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- WEN Xiao-qi. Approach for soil organic matter[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984.
- [15] Zhu J, Deng B, Yang J, et al. Modifying activated carbon with hybrid ligands for enhancing aqueous mercury removal[J]. *Carbon*, 2009, 47(8): 2014–2025.
- [16] Chai L Y, Li Q Z, Zhu Y H, et al. Synthesis of thiol-functionalized spent grain as a novel adsorbent for divalent[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 101(15): 6269–6272.
- [17] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. pH 对土壤及其组分吸附和解吸镉的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24: 320–324.
- ZHANG Hui-min, XU Ming-gang, LÜ Jia-long, et al. A review of studies on effects of pH on cadmium sorption and desorption in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24: 320–324.
- [18] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱鏺, 等. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究[J]. 地质前缘, 2005, 12(1): 252–260.
- YANG Zhong-fang, CHEN Yue-long, QIAN Xun, et al. A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 252–260.
- [19] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- HUANG Chang-yong. Edaphology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] 陈同斌, 陈志军. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 183–186.
- CHEN Tong-bin, CHEN Zhi-jun. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 183–186.
- [21] Koukal B, Guéguen C, Pardos M, et al. Influence of humic substance on the toxic effect of cadmium and zinc to the green alga *Pseudokirchneriella subcapitata*[J]. *Chemosphere*, 2003, 53: 953–961.
- [22] 陈茂林. 城市污泥中重金属元素形态与生物可利用性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- CHEN Mao-lin. Study on fraction and bioavailability of heavy metal elements in sewage sludge[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.