

钙多肽对水稻吸收重金属铅的影响

杨升, 毛文凌, 吴红红, 刘紫薇, 姚伦广, 汤行春, 李亚东

引用本文:

杨升, 毛文凌, 吴红红, 等. 钙多肽对水稻吸收重金属铅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1411-1419.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钾硅肥施用对水稻吸收铅、镉的影响

贾倩, 胡敏, 张洋洋, 孟远夺, 李小坤, 丛日环, 任涛

农业环境科学学报. 2015(12): 2245-2251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.001>

水旱轮作下钛石膏对土壤砷铅有效性的影响研究

邹丽娜, 徐婧婧, 陈铮铮, 原红红, 袁峰, 唐先进, 赵科理, 叶正钱

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 774-781 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1290>

水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响

张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 官迪, 彭华, 朱坚, 田发祥

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1867-1872 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0432>

联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 李懋松, 熊润忠, 秦太峰

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2217-2226 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0573>

不同物料对污染土壤中铅的钝化

陈杰, 张晶, 王鑫, 宋靖珂, 王学江

农业环境科学学报. 2015(9): 1674-1678 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨升, 毛文凌, 吴红红, 等. 钙多肽对水稻吸收重金属铅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1411–1419.

YANG S, MAO W L, WU H H, et al. Effects of calcium polypeptides on adsorption of the heavy metal lead in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1411–1419.



开放科学 OSID

钙多肽对水稻吸收重金属铅的影响

杨升¹, 毛文凌¹, 吴红红¹, 刘紫薇¹, 姚伦广², 汤行春¹, 李亚东^{1*}

(1. 湖北大学生命科学学院, 省部共建生物催化与酶工程国家重点实验室, 武汉 430062; 2. 南阳师范学院农业工程学院, 南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 河南 南阳 473061)

摘要:为了探究钙多肽对水稻吸收重金属铅的影响,以总铅含量分别为100、200、500 mg·kg⁻¹的土壤为研究对象,利用钙多肽为水稻种植肥料,常规复混肥为对照,研究钙多肽对土壤中有效态铅含量、pH以及水稻生长的影响效应,同时研究钙多肽对水稻不同生长期、不同部位铅含量和钙含量的影响。结果表明:钙多肽可降低土壤中有有效态铅含量,提高土壤pH。水稻种植实验中,钙多肽促进水稻生长,使株高提高6.8%~28.9%,千粒重提高6.5%~16.9%;钙多肽提高水稻根部的铅含量,降低水稻茎、叶和糙米中的铅含量,根部铅含量提高10.8%~120.6%,茎部铅含量降低2.2%~28.4%,叶部铅含量降低0.5%~28.6%,糙米铅含量降低13.3%~25.5%;同时钙多肽提高了水稻不同部位的钙含量,使根部钙含量提高1.7%~32.6%,茎部钙含量提高1.6%~17.5%,叶部钙含量提高1.1%~13.4%,糙米钙含量提高12.4%~21.5%。水稻茎、叶和糙米钙含量的增加与其铅含量的减少具有一定的相关性,其钙含量的增加抑制了其铅的富集。研究还表明钙多肽的作用随着时间的延长逐渐下降。

关键词:钙多肽;铅污染;水稻;原位钝化修复

中图分类号:X53;S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)07-1411-09 doi:10.11654/jaes.2021-0022

Effects of calcium polypeptides on adsorption of the heavy metal lead in rice

YANG Sheng¹, MAO Wenling¹, WU Honghong¹, LIU Ziwei¹, YAO Lunguang², TANG Xingchun¹, LI Yadong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Biocatalysis and Enzyme Engineering, School of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Mid-route Project of South-North Water Diversion of Henan Province, School of Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract: The study compared the effects of calcium polypeptides and conventional compound fertilizer on rice grown in soil containing different concentrations of lead (100, 200 mg·kg⁻¹, and 500 mg·kg⁻¹). These effects included those associated with the available lead content, pH of soil, and growth of rice. In addition, calcium and lead levels were monitored in selected rice tissues during the different stages of growth. The results revealed that compared with the conventional compound fertilizer, the utilization of calcium polypeptides could reduce the available lead content and increase the pH value of lead-contaminated soil. Moreover, applying calcium polypeptides resulted in the enhancements of plant height (6.8%~28.9%) and 1 000-grain weight (6.5%~16.9%). Furthermore, the application of calcium polypeptides contributed to an increase in the lead content of rice roots (10.8%~120.6%), but reductions in the stems (2.2%~28.4%), leaves (0.5%~28.6%), and brown rice (13.3%~25.5%). We also detected increases in the calcium contents of different rice tissues, namely, 1.7%~32.6% in roots, 1.6%~17.5% in stems, 1.1%~13.4% in leaves, and 12.4%~21.5% in brown rice. These results indicate that there is a negative correlation between the contents of calcium and lead in the stems, leaves, and brown rice of rice. However, it was found that the positive effects of calcium polypeptides decreased gradually over time.

Keywords: calcium polypeptides; lead contamination; rice; in situ immobilization remediation

收稿日期:2021-01-08 录用日期:2021-03-29

作者简介:杨升(1980—),男,湖北荆州人,博士,研究方向为环境微生物。E-mail:sunrise1980@126.com

*通信作者:李亚东 E-mail:lyd5555@sina.com

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(D20181002)

Project supported: The Education Department of Hubei Province(D20181002)

随着人类活动的日益加剧,土壤重金属污染日趋严重。铅(Pb)是一种典型的重金属污染物,土壤中高浓度的铅可以直接或通过改变土壤微生物营养循环,扰乱植物的生理活动^[1]。此外通过食物循环,土壤中过量的铅可富集到人体,进而对神经系统、生殖、新陈代谢产生负面影响^[2-4]。根据我国农业农村部稻米及其制品质量监督检验测试中心早期对全国稻米市场进行的安全性抽检结果,可以看出稻米中超标最严重的元素是铅,其超标率达到了28.4%^[5]。因此降低土壤-水稻体系中重金属铅的污染,对保障粮食的产量和品质具有重要意义。

目前在土壤重金属污染治理研究中,原位钝化修复技术是一种常用的方法,钝化修复材料包括含硅钝化材料(硅肥、沸石、硅藻土等)、含钙钝化材料(石灰、熟石灰、石膏等)、有机钝化材料(有机肥、腐植酸、粪便等)、生物质炭(骨炭、秸秆炭、木材炭等)、含磷钝化材料(磷矿粉、磷酸钙、过磷酸钙等)等^[6-8]。钙多肽是本研究团队自主研发的一种含钙离子的多肽制剂,利用含蛋白的废弃物经过生化技术解析而成,整体呈黄色粉状,无刺激性难闻气味,含钙6.39%,含氮9.61%,pH 10.33^[9-10]。相比市售有机肥,钙多肽肥效快,并能很好地促进作物生长,同时经过生化高温解析后,钙多肽无病虫卵,相比尿素无挥发,且具有多次施加土壤无板结现象等特点^[11]。基于钙多肽自身特性,其作为一种有机肥料在土壤原位钝化修复中应兼具含钙钝化材料和有机钝化材料的特性——通过提高土壤的pH以及自身所携带的有机基团结合重金属离子,从而达到降低土壤中重金属有效态含量的目的^[12]。因此本研究将钙多肽作为肥料,应用于铅污染土壤的水稻种植中,研究了其对水稻生长的影响以及水稻不同部位对铅离子和钙离子的吸收变化等,为铅污染土壤修复提供了一种新的材料,同时也为钙多肽在重金属铅的污染治理应用中提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验土壤

实验土壤采自湖北大学沙湖周边水稻土,其基本理化性质见表1。待土壤自然风干后将土样中的大

颗粒块及肉眼可见的其他异物剔除,粉碎后过2 mm尼龙筛备用。

取上述研磨好的土壤,均匀喷洒优级纯硝酸铅-去离子水溶液并搅拌均匀,根据我国《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),使土壤总铅含量分别达到100 mg·kg⁻¹(水田铅污染风险筛选值以下)、200 mg·kg⁻¹(风险筛选值以上)以及500 mg·kg⁻¹(风险管制值)。配制好的土壤老化处理1个月后风干,磨碎并过2 mm尼龙筛后备用。

1.2 实验材料

实验水稻为湘两优900,是由湖南年丰种业科技有限公司和湖南省杂交水稻研究中心用广湘24S×R900选育而成的水稻品种,审定编号为国审稻20170053。钙多肽为实验室课题组制备^[9-10],对照复混肥为挹江牌复混肥料(N14-P5-K6),其他试剂均为国产优级纯。

1.3 土壤钝化

称取100 g上述老化处理的铅含量为500 mg·kg⁻¹的土壤于小塑料盆中,与水稻种植实验中肥料的施加量保持一致(每千克土壤施氮0.45 g),每盆分别加入钙多肽0.47 g,对照复混肥0.32 g,每组重复3次,加入去离子水(以没过土壤表面1 cm为准),称质量并记录,置于阴凉处。每隔2 d称1次质量,并加入去离子水以维持质量恒定。在30、60、120 d时分别取样,测量土壤中有效态铅含量。

1.4 水稻种植

分别称取3 kg上述老化好的3种不同含量铅污染的土壤于直径25 cm花盆内,以相同含氮量为标准(每千克土壤施氮0.45 g),实验组每盆分别加入钙多肽14.1 g,对照复混肥9.6 g,提前将肥料与土壤混合均匀,再进行水稻种植,每组重复3次,并参照复混肥中钾和磷的含量,用磷酸二氢钾和过磷酸钙补齐钙多肽中钾和磷的含量。水稻在正常土壤中培育,待苗长到一掌宽度时(30 d),两株为一穴,一盆6穴,移栽到上述花盆并置于温室中,LED全波长补光,加湿器保证湿度,种植120 d。

1.5 实验样品测定

采用叶绿素测定仪SPAD502测定植物相对叶绿

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil

总氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	总磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	总钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	总铅 Total Pb/(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	pH
0.75±0.07	0.89±0.08	5.46±0.29	43.98±5.02	12.37±0.12	6.56±0.03

素。植物中铅的测定参考《食品安全国家标准:食品中铅的测定》(GB 5009.12—2017)中的方法。植物中钙的测定方法根据《食品安全国家标准:食品中钙的测定》(GB 5009.92—2016)。土壤中全铅的测定参考《土壤质量:铅、镉的测定——石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)中的方法。土壤中有效态铅的测定参考《土壤质量:有效态铅和镉的测定——原子吸收法》(GB/T 23739—2009)中的方法。土壤pH测定参考《土壤检测》(NY/T 1121.2—2006)中的方法。植物试样消解分别采用各自国标中的湿法消解,植物和土壤中铅、钙含量分析测试仪器采用安徽皖仪科技 WYS2200 火焰-石墨炉一体机原子吸收分光光度计。

1.6 实验数据处理

水稻不同部位铅富集系数=水稻不同部位铅含量/土壤总铅含量。转运系数为植株地上部分(茎和叶)重金属含量与根系重金属含量比值^[13]。实验数据采用SPSS 20、Excel进行方差分析及差异性分析,*T*分析检测,置信区间为95%,方差齐性检测相等(原始数据符合正态分布)采用方差齐*P*值,反之采用方差不齐*P*值。

2 结果与分析

2.1 土壤pH和有效态铅含量的变化

不同时间段测定的土壤pH结果如图1a所示,钙多肽相比复混肥能提高土壤的pH,前期能提高0.18个单位(10 d),然而随时间的延长,二者的差异逐渐减小。同时土壤钝化实验表明(图1b),钙多肽相比

复混肥能降低土壤有效态铅含量,不同时间分别降低6.8%(30 d)、9.6%(60 d)、6.9%(120 d)。结合土壤pH的变化可以发现,土壤培养后期,不同处理组间pH差异减小,但有效态铅含量仍呈现显著差异,说明土壤pH的变化并不是钙多肽钝化铅的主要原因,钙多肽对铅的钝化作用可能主要是由于其自身所携带的有机基团与土壤中铅的结合,从而降低了土壤有效态铅含量。

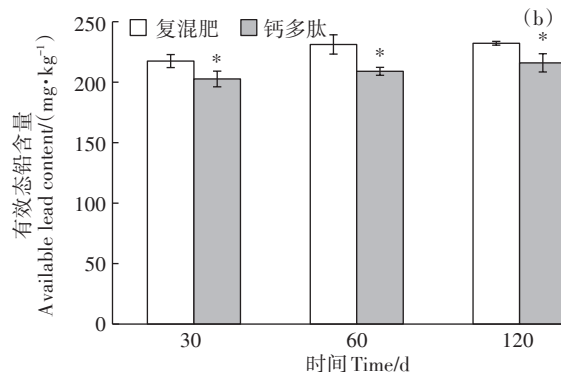
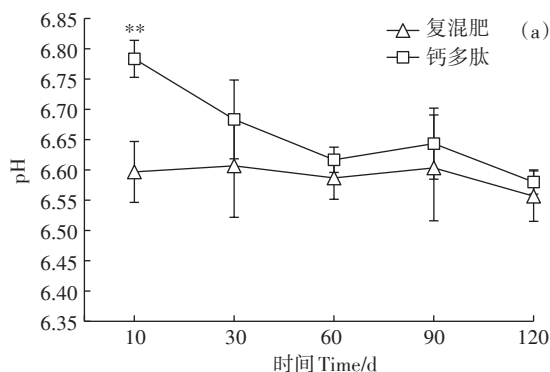
2.2 水稻相对叶绿素含量、株高和千粒重的变化

2.2.1 不同处理对水稻相对叶绿素含量的影响

土壤铅污染可影响植物叶绿素的合成,而有机肥的施加可有效提高植物叶绿素含量,增加其光合作用。实验过程中可以直观地观察到水稻移栽后前、中期复混肥处理组水稻叶面发黄,而钙多肽处理组水稻叶面乌绿(图2a)。对于3种铅污染土壤,水稻移栽30 d和60 d时的水稻叶片相对叶绿素含量如图2b所示,钙多肽处理组相对叶绿素含量均高于复混肥处理组:移栽30 d时,水稻叶片相对叶绿素含量分别提高21.2%(100 mg·kg⁻¹),19.3%(200 mg·kg⁻¹),15.4%(500 mg·kg⁻¹);移栽60 d时,水稻叶片相对叶绿素含量分别提高11.9%(100 mg·kg⁻¹),15.0%(200 mg·kg⁻¹),10.7%(500 mg·kg⁻¹)。结果表明钙多肽处理降低了土壤铅污染对水稻叶片叶绿素含量的影响,其水稻生长状态更好。

2.2.2 不同处理组对水稻株高、千粒重的影响

水稻移栽120 d后,分别测定3种铅含量污染的土壤中不同处理组水稻株高及千粒重,如表2所示,基于钙多肽处理组水稻前期良好的生长状态,其株高及千粒重均优于复混肥处理组。水稻株高,钙多肽相



*表示各处理在0.05水平上差异显著,**表示各处理在0.01水平上差异极显著,***表示各处理在0.001水平上差异极显著。下同

* means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$, *** means $P < 0.001$. The same below

图1 土壤pH和有效态铅含量

Figure 1 The pH and available lead content of soil in different treatments

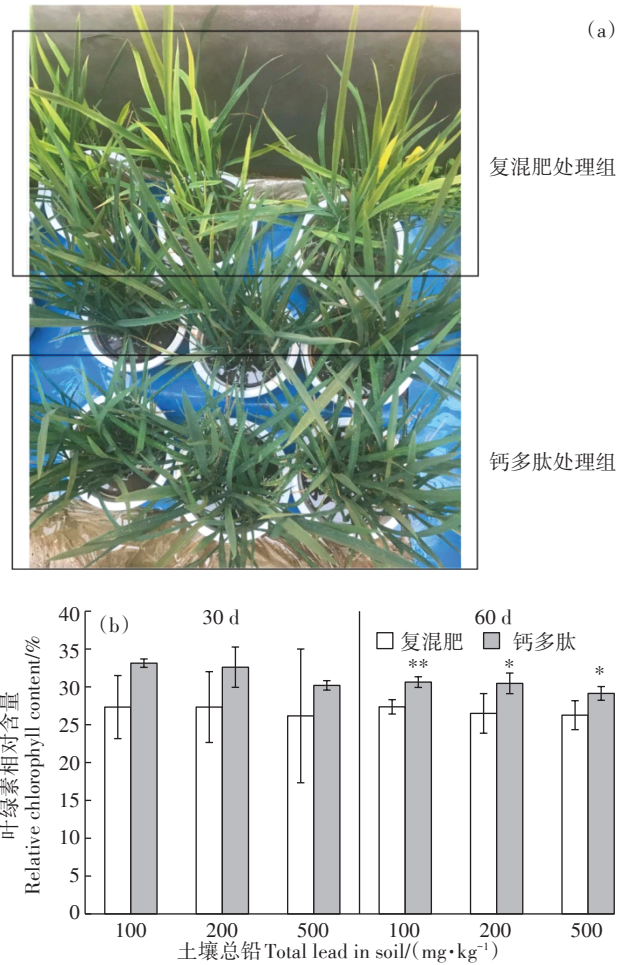


图2 移栽30 d的水稻秧苗和水稻叶片相对叶绿素含量
Figure 2 Rice for transplanting 30 days and the relative chlorophyll content of rice leaves

比复混肥提高28.9%(100 mg·kg⁻¹),23.7%(200 mg·kg⁻¹),6.8%(500 mg·kg⁻¹);水稻千粒重,钙多肽相比复混肥提高6.5%(100 mg·kg⁻¹),7.6%(200 mg·kg⁻¹),1.7%(500 mg·kg⁻¹)。结果表明,相比复混肥,钙多肽能够在铅污染土壤中促进水稻生长,其可作为水稻种植的一种优质有机肥料,本实验还进一步检测了水稻在种植过程中不同时期、不同部位铅含量的变化。

2.3 糙米铅含量与钙含量的变化

水稻移栽120 d后收割水稻,测定糙米中铅含量。如图3a所示,糙米中铅含量的变化规律整体上随土壤铅污染浓度的升高而逐渐增加。同时比较钙多肽处理组与复混肥处理组发现,钙多肽处理使糙米中铅含量较复混肥处理分别降低25.5%(100 mg·kg⁻¹)、17.3%(200 mg·kg⁻¹)、13.3%(500 mg·kg⁻¹)。参考食品安全国家标准(GB 2762—2017)发现,在土壤总铅含量为200 mg·kg⁻¹的实验中,钙多肽处理组的糙米铅含量达标(小于0.2 mg·kg⁻¹),而复混肥处理组超标。上述结果表明,当土壤铅浓度在水田铅污染风险筛选

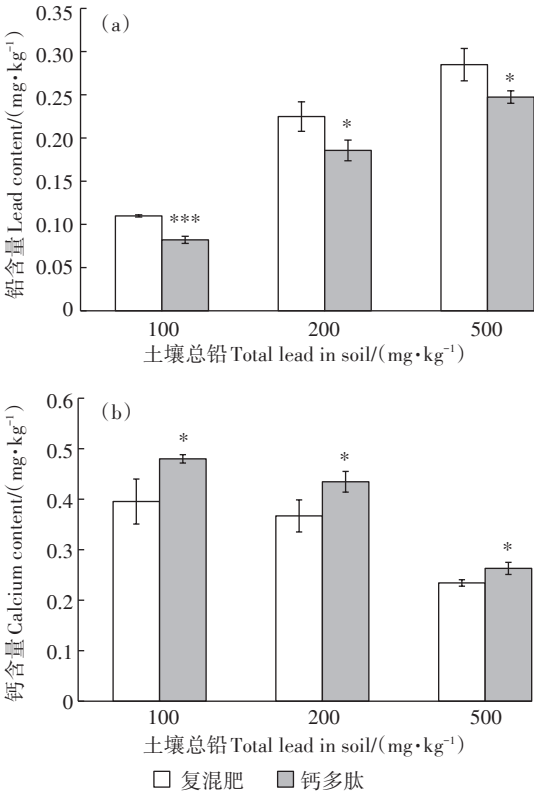


图3 糙米中铅和钙的含量

Figure 3 Lead and calcium content of brown rice in different treatments

表2 不同处理组水稻株高与千粒重

Table 2 Plant height and 1 000-grain weight of rice under different treatments

土壤总铅 Total lead in soil/(mg·kg ⁻¹)	株高 Plant height/cm		千粒重 1 000-grain weight/g	
	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides
100	88.37±2.55	113.87±4.35**	21.03±0.68	22.40±1.1
200	87.73±1.39	108.50±2.65***	18.37±0.55	19.77±0.51*
500	76.50±2.36	81.73±1.98*	11.03±0.64	12.90±0.46*

注:*表示两处理间在0.05水平上差异显著,**表示在0.01水平上差异极显著,***表示在0.001水平上差异极显著。下同。
Note:* means $P<0.05$,** means $P<0.01$,*** means $P<0.001$. The same below.

值以上时,钙多肽作为肥料能种植出铅达标的大米;而当土壤总铅浓度达到水田铅污染风险管制值时,即便钙多肽相比复混肥能够降低糙米铅含量,但糙米铅含量仍未达到国家标准。同时钙多肽相比复混肥提高了糙米中钙的含量(图3b),钙含量分别提高21.5% ($100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、18.3% ($200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、12.4% ($500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。整体比较两组实验的结果发现,糙米中铅含量与钙含量的变化呈现相反的趋势。

2.4 水稻根、茎、叶中铅含量的变化

2.4.1 不同处理对水稻根、茎、叶中铅含量的影响

种植过程中,水稻对铅的吸收主要集中在根,其次是茎,最后是叶。如表3所示,整体上水稻中铅的含量依次是根>茎>叶,同时相同条件下,土壤铅含量越高,水稻各部位所含铅越高。在不同处理下,钙多肽处理组水稻根部铅含量明显高于复混肥处理组,根

部铅含量相对提高10.8%~120.6%,而水稻茎和叶中铅含量,钙多肽处理组要低于复混肥处理组,茎部铅含量相对降低2.2%~28.4%,叶部铅含量相对降低0.5%~28.6%。这表明,钙多肽对水稻根部吸收铅具有促进作用,而对水稻茎和叶吸收铅具有抑制作用。

同时观察水稻根、茎、叶对铅的富集系数(表4)发现,整体上土壤铅含量越低,水稻各部位的富集系数越高,其主要原因可能是土壤中总铅含量较低。在不同处理下,钙多肽处理组水稻根部铅富集系数高于复混肥处理组,而水稻茎和叶的富集系数要低于复混肥处理组。另外高含量铅污染土壤($500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比低含量铅污染土壤($100, 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),钙多肽处理组对水稻根部铅富集系数的提高更为显著,最多可增加0.302。与之相反,在低含量铅污染土壤中($100, 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),钙多肽处理组对水稻茎部和叶部的铅富集系数降低更

表3 水稻根、茎、叶中铅的含量

Table 3 Lead content in root, stem and leaf of rice

处理 Treatments		$100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides
30 d	根 Root/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	53.77±5.30	63.71±8.72	56.25±3.32	76.61±3.24**	125.39±1.16	276.60±7.57***
	茎 Stem/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	20.73±3.01	15.52±0.64*	25.12±2.79	19.59±1.17*	59.31±1.93	44.44±2.15*
	叶 Leaf/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	15.68±1.42	11.19±1.28*	28.63±0.74	21.12±3.00*	31.30±1.49	23.62±1.05*
60 d	根 Root/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	78.65±3.03	91.85±6.37*	100.90±0.46	111.82±1.26***	154.74±12.37	278.73±10.57***
	茎 Stem/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	21.23±2.33	16.81±2.04	30.64±1.53	21.95±3.08*	49.12±2.12	39.33±0.50**
	叶 Leaf/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	21.23±1.21	17.87±0.20*	27.19±3.45	21.64±1.79	44.80±3.05	38.45±0.57*
120 d	根 Root/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	108.66±11.73	117.80±4.52	204.70±3.34	220.83±13.88	361.04±8.77	446.98±10.59***
	茎 Stem/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	42.39±1.09	40.65±0.55	60.70±0.70	58.15±2.91	86.48±5.97	84.58±7.59
	叶 Leaf/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	38.50±2.62	33.50±1.31*	44.03±3.37	37.23±1.73*	70.20±2.36	69.81±8.59

表4 水稻根、茎、叶的铅富集系数

Table 4 Lead accumulation coefficient in root, stem and leaf of rice

处理 Treatments		$100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides
30 d	根 Root	0.538	0.637	0.281	0.383	0.251	0.553
	茎 Stem	0.207	0.155	0.126	0.098	0.118	0.089
	叶 Leaf	0.157	0.112	0.143	0.106	0.063	0.047
60 d	根 Root	0.787	0.919	0.505	0.559	0.309	0.557
	茎 Stem	0.212	0.168	0.153	0.110	0.098	0.079
	叶 Leaf	0.212	0.179	0.136	0.108	0.090	0.077
120 d	根 Root	1.087	1.178	1.024	1.104	0.722	0.894
	茎 Stem	0.424	0.407	0.304	0.291	0.173	0.169
	叶 Leaf	0.385	0.335	0.220	0.186	0.141	0.140

为显著,茎最多降低0.052,叶最多降低0.050。实验表明在低含量铅污染土壤中,钙多肽对水稻茎和叶中铅富集的抑制效果更为显著。

2.4.2 不同时间段水稻根、茎、叶中铅含量的变化

在水稻整个生长过程中,对于3种铅含量污染的土壤,所有处理组随时间的延长,水稻根、茎、叶中铅的含量均逐渐增加,富集系数也逐渐提高(表3和表4)。但比较钙多肽处理组与复混肥处理组发现,随时间的延长,钙多肽对水稻根部铅吸收的促进作用和对茎部与叶部铅吸收的抑制作用逐渐减弱;对水稻根部铅吸收的促进作用由18.6%降低到8.4%(100 mg·kg⁻¹)、36.2%降低到7.9%(200 mg·kg⁻¹)、120.6%降低到23.8%(500 mg·kg⁻¹);对水稻茎部铅吸收的抑制作用由25.1%降低到4.1%(100 mg·kg⁻¹)、22.0%降低到4.2%(200 mg·kg⁻¹)、25.1%降低到2.2%(500 mg·kg⁻¹);对水稻叶部铅吸收的抑制作用由28.6%降低到12.9%(100 mg·kg⁻¹)、26.2%降低到15.4%(200 mg·kg⁻¹)、14.2%降低到0.5%(500 mg·kg⁻¹)。同时水稻根、茎、叶中铅的富集系数整体上随时间的延长,钙多肽处理组相比复混肥,其作用也逐渐减弱,该现象在铅为500 mg·kg⁻¹的污染土壤中更为明显。上述结果表明,钙多肽对水稻根部铅吸收的促进作用和对茎与叶铅吸收的抑制作用具有一定的时效性,其原因可能是由于钙多肽随水稻生长逐渐消耗,其效果随时间的延长逐渐减弱。

2.5 水稻根、茎、叶中钙含量的变化

水稻不同生长时期根、茎、叶中钙的含量如表5所示。整体上水稻叶中钙含量大于茎和根,而在水稻移栽后的前、中期,茎和根中的钙含量相比,并不具有

规律性,但在后期(120 d),水稻根部钙含量大于茎,这可能是由于在水稻生长后期,水稻茎中的钙大量向叶部转移造成的。同时随时间的延长,整体上水稻根、茎、叶中钙的含量逐渐增加。比较不同铅含量污染土壤中水稻根、茎、叶中钙含量的变化发现,土壤中铅含量越高,水稻根、茎、叶中钙含量越低,该现象在水稻生长后期(120 d)更为明显。

比较钙多肽处理组与复混肥处理组水稻根、茎、叶中的钙含量发现,钙多肽相比复混肥能增加水稻根、茎、叶中的钙含量,100、200、500 mg·kg⁻¹铅污染土壤分别相对提高1.7%~32.6%、1.6%~17.5%、1.1%~13.4%。另外随水稻生长时间的延长,整体上水稻移栽前后、中期(30、60 d)相比后期(120 d),钙多肽对提高水稻各部位钙含量的作用更为明显,这可能与钙多肽随水稻生长逐渐被消耗以及吸收二氧化碳形成钙的沉淀有关。整体上比较钙多肽与复混肥对水稻根、茎、叶中钙含量的影响发现,钙多肽在低含量铅污染土壤(100、200 mg·kg⁻¹)中的效果要好于高含量铅污染土壤(500 mg·kg⁻¹),其原因可能是铅与钙存在竞争,高浓度的铅影响了植物对钙的吸收与转运。

3 讨论

铅是植物非必需元素,具有毒性,土壤中铅污染对动植物和人类都存在不利影响。钙是植物必需营养元素之一,大量研究表明,土壤中添加钙能降低土壤中重金属对植物的毒害作用^[6]。含钙钝化材料钝化土壤重金属,主要是通过提高土壤pH,进而降低土壤中重金属有效态含量。有文献报道,含钙钝化材料

表5 水稻根、茎、叶钙的含量

Table 5 Calcium content in root, stem and leaf of rice

处理 Treatments		100 mg·kg ⁻¹		200 mg·kg ⁻¹		500 mg·kg ⁻¹	
		复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides	复混肥 Compound fertilizer	钙多肽 Calcium polypeptides
30 d	根 Root/(g·kg ⁻¹)	0.69±0.01	0.75±0.01**	0.95±0.01	1.26±0.11**	0.84±0.02	0.99±0.03**
	茎 Stem/(g·kg ⁻¹)	1.11±0.10	1.23±0.06	1.00±0.15	1.13±0.05	0.99±0.06	1.02±0.06
	叶 Leaf/(g·kg ⁻¹)	1.76±0.06	1.97±0.07*	1.81±0.04	2.01±0.09*	1.74±0.02	1.76±0.02
60 d	根 Root/(g·kg ⁻¹)	1.90±0.07	2.09±0.06*	1.14±0.05	1.18±0.01	1.04±0.13	1.13±0.08
	茎 Stem/(g·kg ⁻¹)	1.23±0.04	1.43±0.11*	1.94±0.16	2.28±0.13*	0.95±0.16	1.09±0.22
	叶 Leaf/(g·kg ⁻¹)	2.39±0.03	2.71±0.16*	2.12±0.59	2.33±0.08	1.65±0.08	1.84±0.07*
120 d	根 Root/(g·kg ⁻¹)	2.82±0.14	3.07±0.24	2.55±0.10	2.72±0.14	2.17±0.40	2.29±0.36
	茎 Stem/(g·kg ⁻¹)	2.47±0.35	2.51±0.11	1.98±0.15	2.25±0.25	1.52±0.34	1.66±0.45
	叶 Leaf/(g·kg ⁻¹)	16.55±0.60	17.69±0.33*	12.43±0.28	13.29±0.21*	10.21±0.65	11.45±0.39*

能使土壤pH提高超过1个单位^[14-15],但本实验中钙多肽提高土壤pH的效果并不十分明显,其原因可能是本次实验中施加钙多肽时要参照其所含氮量,因此施加的钙含量远低于文献中的含量。同时随着时间的延长,钙多肽对土壤pH的影响逐渐减弱,其原因可能是钙多肽相比复混肥能提高土壤微生物的种群及丰度(结果待发表),进而逐渐提高了土壤中二氧化碳的含量,而二氧化碳溶解后可增加土壤中的酸根离子,同时也可与钙离子结合形成沉积,从而影响到土壤的pH^[16]。

在土壤修复研究中,钙在土壤中作为竞争离子起作用多见于镉污染土壤的修复(因二者离子半径相差较小),与抑制镉的效果相比,钙对水稻根部铅吸收的竞争抑制效果并不明显,这是因为铅不仅可以利用植物根部 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 通道,也可以利用植物的非选择性阳离子通道等进入植物根部^[17-19]。本研究将钙多肽作为肥料应用于铅污染土壤的水稻种植,结果发现其相比复混肥提高了水稻根部铅的含量,虽然同时提高了根部钙含量,但对于水稻根部铅吸收,钙并没有表现出明显的竞争性;另外在钙多肽土壤钝化实验中,土壤有效态铅含量的降低,主要是铅与钙多肽所携带的有机基团的结合,随着钙多肽逐渐降解而被植物和微生物利用,钙多肽对铅的钝化能力逐渐下降,土壤中有效态铅含量会逐渐上升,进而增加水稻根部铅的含量;同时在对重金属污染土壤的修复过程中,过多的阳离子可以将土壤中重金属离子置换出来,从而增加了土壤中重金属有效态含量^[20],本实验中随着钙多肽的逐渐消耗,过多的钙离子逐渐游离出来,其也可能增加了土壤中有效态铅含量,进而增加水稻根部铅的含量;最后在水稻种植实验中,钙多肽相比复混肥能促进水稻的生长,水稻的根系也更为发达,在单株水稻盆栽实验中水稻根部干质量,钙多肽相比复混肥增

加25.9%(30 d),61.3%(60 d),105.1%(120 d),而水稻在生长过程中,其根部会分泌大量低分子量有机酸,这些有机酸能够活化土壤中的铅,进而增加了水稻根部对铅的吸收^[19]。

钙能影响重金属在植物中的转运^[21-22],本实验中钙多肽相比复混肥虽增加了水稻根部铅的含量,但却降低了于水稻茎、叶和糙米中铅的含量,水稻根部的铅向上转运受到抑制,转运系数如表6所示。在3种铅含量土壤中,钙多肽处理组根-茎、根-叶的转运系数都低于复混肥。该结果与铅污染土壤水稻种植中施加石灰相似,原因主要有两个:一是水稻根部铁膜能吸收大量重金属,重金属在铁膜处以不活跃的形式存在,从而束缚了水稻下部的铅向地上部转运^[15];二是石灰增加了水稻中钙的含量,在铅转运过程中,钙与铅竞争相同的转运离子通道蛋白,进而降低了水稻根部的铅向地上部转运^[23]。本实验并没有单独分离根部铁膜,并未测定其铅含量,所以钙多肽提高根部铅含量可能是其中有部分铅储存于铁膜中以不活跃的形式存在,从而降低了根部的铅向地上部转运。同时本研究也发现在水稻铅的转运过程中,钙与铅呈现出一定的竞争性,因此对钙多肽抑制效果显著的低含量铅污染土壤($100、200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)下的水稻茎、叶以及糙米中钙含量的相对增加量与铅含量的相对减少量做相关性分析(采用Pearson分析),结果如图4所示。水稻茎、叶和糙米中钙含量的相对增加量与铅含量的相对减少量呈一定正相关关系,其相关系数为0.484($P=0.034$),水稻茎、叶和糙米中钙与铅的含量存在一定的竞争关系,这可能是钙多肽相比复混肥能抑制水稻地下部铅向茎、叶和糙米中转运的一个原因。

另外,随着时间的延长,钙多肽处理组相比复混肥处理组,其对水稻各部位铅含量与钙含量的影响逐渐减弱,主要原因是实验中除前期施加钙多肽后,中途

表6 水稻地下/地上部铅的转运系数

Table 6 Transfer factors of Pb in underground/aboveground organs of rice

处理 Treatments	$100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	复混肥	钙多肽	复混肥	钙多肽	复混肥	钙多肽
	Compound fertilizer	Calcium polypeptides	Compound fertilizer	Calcium polypeptides	Compound fertilizer	Calcium polypeptides
30 d 根-茎 Root-stem	0.386	0.244	0.447	0.256	0.473	0.161
根-叶 Root-leaf	0.292	0.176	0.509	0.276	0.250	0.085
60 d 根-茎 Root-stem	0.270	0.183	0.304	0.196	0.317	0.141
根-叶 Root-leaf	0.270	0.195	0.269	0.194	0.290	0.138
120 d 根-茎 Root-stem	0.390	0.345	0.297	0.263	0.240	0.189
根-叶 Root-leaf	0.354	0.284	0.215	0.169	0.194	0.156

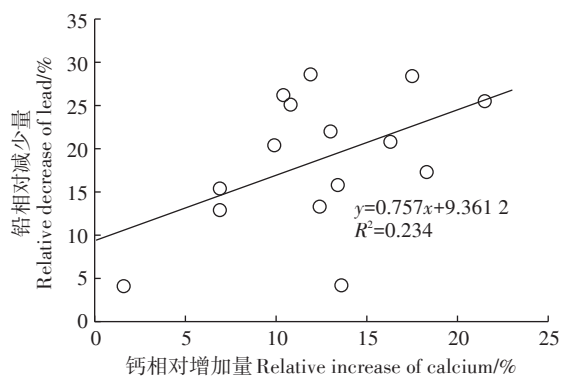


图4 水稻茎、叶和糙米中钙的相对增加量与铅的相对降低量的相关性

Figure 4 Correlation between relative increase of calcium and relative decrease of lead in rice stem, leaf and brown rice

未追加钙多肽,在水稻生长过程中,钙多肽逐渐消耗,钙被水稻和微生物逐渐吸收、钙离子与其他金属离子置换而发生沉淀等,这些都使得钙多肽与复混肥差异在前期到达一个峰值后逐渐缩小,但这也为后续应用研究提供了一定的参考,在重金属污染土壤的作物种植过程中,根据作物吸收转运规律,优化钙多肽施加方式,其效果可能会更好。

4 结论

(1)土壤钝化实验中,钙多肽能在前期明显提高土壤的pH;钙多肽能降低铅污染土壤的有效态铅含量。

(2)钙多肽能降低土壤铅污染对水稻叶片叶绿素含量的影响,促进水稻生长。

(3)钙多肽能提高水稻根部的铅含量,降低水稻茎、叶和糙米中的铅含量;同时钙多肽能提高水稻各部位的钙含量,水稻茎、叶和糙米中钙含量的增加与其铅含量的减少具有一定相关性,其钙含量的增加抑制了其铅的富集。

参考文献:

- [1] ZENG L S, LIAO M, CHEN C L, et al. Effects of lead contamination on soil microbial activity and rice physiological indices in soil-Pb-rice (*Oryza sativa* L.) system[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(4): 567-574.
- [2] OGUNDIRAN M B, LAWAL O O, ADEJUMO S A. Stabilisation of Pb in Pb smelting slag-contaminated soil by compost-modified biochars and their effects on maize plant growth[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2015, 6(8): 771.
- [3] BOOSTANI H R, NAJAFI-GHIRI M, HARDIE A G, et al. Comparison of Pb stabilization in a contaminated calcareous soil by application of

vermicompost and sheep manure and their biochars produced at two temperatures[J]. *Applied Geochemistry*, 2019, 102: 121-128.

- [4] 杨慧珠,程乾坤,王新璋,等.改性拜耳法赤泥颗粒的制备及对土壤铅的稳定化处理[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(4): 1171-1181.
- YANG H Z, CHENG Q K, WANG X Z, et al. Preparation of modified Bayer process red mud granules and stabilization treatment of lead in soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(4): 1174-1181.
- [5] 林蒲田.土壤污染不容忽视[J]. *湖南农业*, 2011(8): 13.
- LIN P T. Soil pollution should not be ignored[J]. *Hunan Agriculture*, 2011(8): 13.
- [6] LWIN C S, SEO B H, KIM H U, et al. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality: A critical review[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64(2): 156-167.
- [7] CAO P, QIU K, ZOU X, et al. Mercapto propyltrimethoxysilane-and ferrous sulfate-modified nano-silica for immobilization of lead and cadmium as well as arsenic in heavy metal-contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115152.
- [8] NEJAD Z D, JUNG M C. The effects of biochar and inorganic amendments on soil remediation in the presence of hyperaccumulator plant[J]. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2017, 8(4): 317-329.
- [9] 李亚东,王行国.一种治理重金属污染土壤的肽钙盐原位钝化剂及其制备与应用: ZL2014101281337[P]. 2015-08-19.
- LI Y D, WANG X G. A calcium peptide in situ passivator for heavy metal contaminated soil and its preparation method and application: ZL2014101281337[P]. 2015-08-19.
- [10] 苏芳芳.钙多肽对小白菜富集Cd²⁺的竞争性抑制效应[D].武汉:湖北大学, 2018: 11.
- SU F F. The competitive inhibitory effect of calcium polypeptides on enrichment of Cd²⁺ of *Brassica campestris* L. planting in polluted soil[D]. Wuhan: Hubei University, 2018: 11.
- [11] 薛文杰.蛋白肽对土壤微生态和植物生长的调控效应研究[D].武汉:湖北大学, 2014: 82-85.
- XUE W J. Research on the effect of peptide on soil microecology and plant growth[D]. Wuhan: Hubei University, 2014: 82-85.
- [12] 黄家森,牟海燕,赖西聪,等.重金属污染土壤原位钝化技术研究进展[J]. *四川化工*, 2018, 21(2): 9-12.
- HUANG J S, MOU H Y, LAI X C, et al. In situ passivation remediation of heavy metals-contaminated soils: A review[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2018, 21(2): 9-12.
- [13] ASHRAF U, MAHMOOD M H R, HUSSAIN S, et al. Lead(Pb) distribution and accumulation in different plant parts and its associations with grain Pb contents in fragrant rice[J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 126003.
- [14] 刘勇,刘燕,朱光旭,等.石灰对Cu、Cd、Pb、Zn复合污染土壤中重金属化学形态的影响[J]. *环境工程*, 2019, 37(2): 158-164.
- LIU Y, LIU Y, ZHU G X, et al. Effects of lime on chemical forms of heavy metals under combined pollution of Cu, Cd, Pb and Zn in soils[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(2): 158-164.
- [15] XIE T, LI Y, DONG H, et al. Effects and mechanisms on the reduc-

- tion of lead accumulation in rice grains through lime amendment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 173:266–272.
- [16] 刘若琪, 刘薇, 袁利, 等. 不同改良剂对植烟土壤微生物特征和酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(5):520–527. LIU R Q, LIU W, YUAN L, et al. Effects of different amendments on soil microbial characteristics and enzyme activities in tobacco planting soil [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, 38(5):520–527.
- [17] FAHR M, LAPLAZE L, BENDAOU N, et al. Effect of lead on root growth[J]. *Frontiers in Plant science*, 2013, 4:175.
- [18] KANU A S, ASHRAF U, MO Z, et al. Calcium amendment improved the performance of fragrant rice and reduced metal uptake under cadmium toxicity[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(24):24748–24757.
- [19] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同类型钙化合物对污染土壤水稻吸收累积Cd Pb的影响及机理[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):78–84. LIU Z B, JI X H, PENG H, et al. Effects of calcium compounds on uptake and accumulation of Cd and Pb by rice and its mechanism in polluted soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):78–84.
- [20] YE W, WU F, ZHANG G, et al. Calcium decreases cadmium concentration in root but facilitates cadmium translocation from root to shoot in rice[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2020, 39(1):422–429.
- [21] HUANG D, GONG X, LIU Y, et al. Effects of calcium at toxic concentrations of cadmium in plants[J]. *Planta*, 2017, 245(5):863–873.
- [22] 张琼, 陆銮眉, 戴清霞, 等. 钙对非洲凤仙铅累积特性的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(6):1069–1074. ZHANG Q, LU L M, DAI Q X, et al. The effect of calcium on the content of lead in *Impatiens walleriana*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(6):1069–1074.
- [23] LI H, XU H, ZHOU S, et al. Distribution and transformation of lead in rice plants grown in contaminated soil amended with biochar and lime [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 165:589–596.