

王沛裴, 郑顺林, 何彩莲, 等. 液体有机肥对铅、镉污染下马铃薯重金属吸收及干物质积累的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):425-431.
WANG Pei-pei, ZHENG Shun-lin, HE Cai-lian, et al. Effects of liquid organic fertilizer on absorption of lead and cadmium and dry matter accumulation in different organs of potato[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):425-431.

液体有机肥对铅、镉污染下马铃薯重金属吸收及干物质积累的研究

王沛裴¹, 郑顺林^{1,2*}, 何彩莲¹, 张琴¹, 万年鑫¹, 罗艳琴¹, 袁继超^{1,2}

(1.四川农业大学农学院, 成都 611130; 2.西南地区作物栽培重点实验室, 成都 611130)

摘要:采用盆栽实验,研究了 Pb、Cd 污染下,一种液体有机肥对马铃薯各器官 Pb、Cd 吸收量的影响及对马铃薯生长的缓解作用。结果表明:在基施液体有机肥作用下,马铃薯各器官对 Pb、Cd 的吸收具有明显差异,Pb 和 Pb、Cd 复合污染条件下,马铃薯 Pb、Cd 吸收情况一致,即根>叶>茎>块茎,而 Cd 污染下,马铃薯各器官吸收量变化规律为根>茎>叶>块茎;马铃薯的根冠比、干物质积累量和单株产量随液体有机肥浓度增加而增加,且各处理均在有机肥高浓度时达到最大值;马铃薯块茎中 Pb、Cd 吸收量在研究范围内随有机肥浓度的增加而减少,块茎中 Pb 吸收量比未施加液体有机肥组降低 34.7%,Cd 吸收量比未施加液体有机肥组降低 52.1%。综上认为在研究范围内,马铃薯底施液体有机肥对 Pb、Cd 污染均有较明显的缓解效应。Pb 污染下块茎中的 Pb 含量均超标,Cd 污染下,块茎膨大期块茎中的 Cd 含量全部未超标,块茎成熟期部分处理超标,可以通过适当提前收获,降低块茎的 Cd 吸收,达到安全标准。

关键词:液体有机肥;Pb、Cd 污染;马铃薯;缓解效应

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)03-0425-07 doi:10.11654/jaes.2016.03.003

Effects of liquid organic fertilizer on absorption of lead and cadmium and dry matter accumulation in different organs of potato

WANG Pei-pei¹, ZHENG Shun-lin^{1,2*}, HE Cai-lian¹, ZHANG Qin¹, WAN Nian-xin¹, LUO Yan-qin¹, YUAN Ji-chao^{1,2}

(1.College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Key Laboratory of Southwest Region Crop Cultivation, Chengdu 611130, China)

Abstract: Controlling heavy metal pollution that is a potential threat to crop growth in soil has been a hot topic. In this study, the effects of liquid organic fertilizer on the absorption of lead and cadmium in different organs of potato and on plant growth were investigated in pot experiment. Under liquid organic fertilizer as basal fertilizer, there are significant differences in the absorption of lead and cadmium in different organs of potato. In lead and lead/cadmium pollution, lead and cadmium accumulation by different parts of potato was roots>leaves>stems>tubers, whereas lead and cadmium accumulation was roots>stems>leaves>tubers in cadmium pollution. The root/shoot ratio, the accumulation of dry matter and the yield of single potato plant were the maximum at the highest organic fertilizer rate. Applying liquid organic fertilizer decreased lead and cadmium uptake in potato tubers by 34.7% and 52.1%, respectively, as compared to the control. Lead concentrations in potato tubers did not exceed the standard under lead pollution. However, cadmium concentrations in the tubers exceeded the standard during tuber expansion period though tuber cadmium in some treatments fell below the standard at the mature stage. The present experimental results show that liquid organic fertilizer can reduce the content of lead and cadmium in potato, and that harvesting potato earlier might reduce cadmium uptake by potato tubers.

Keywords: liquid organic fertilizer; lead and cadmium pollution; potato; mitigation effect

收稿日期:2015-10-06

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAD06B0407);国家现代农业产业技术体系(马铃薯)建设专项(编号 CARS-P20);四川省育种攻关配套项目(2011NZ0098-15-5)

作者简介:王沛裴(1991—),女,重庆人,研究生,主要从事马铃薯高产栽培技术研究。E-mail: wangpp717@163.com

*通信作者:郑顺林 E-mail: zhengshunlin123@163.com

重金属污染具有相对稳定性和难降解性,因此对它的治理成为国内外研究热点^[1]。国家土壤环境质量二级标准规定,当土壤 $6.5 < \text{pH} < 7.5$ 时土壤 Pb 含量的临界值为 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd 为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Pb 作为植物生长非必需元素,主要被植物根部吸收、积累,通过破坏活性氧化代谢酶系统^[2],影响细胞代谢,抑制植物正常生长^[3]。低浓度 Cd 会促进植物生长^[4],高浓度 Cd 通过破坏植物抗氧化系统^[5],影响植物生长。研究发现小麦根、茎、叶长度和生物量都随 Cd 浓度的增大而逐渐下降^[6]。

目前重金属污染治理较理想的方法,是通过施用有机肥缓解重金属污染。有机肥分解时释放出热量、二氧化碳和氨等物质为植物生长提供能量,同时有机肥中的胡敏酸和富里酸与重金属形成难溶性沉淀(如硫化物)^[7],降低自由离子活度系数,降低重金属含量,为植物生长提供良好环境。罗连光等^[8]研究发现有机肥作用下,水稻获得最佳经济效益且重金属含量均未超标。唐明灯等^[9]发现 Pb、Cd 污染下,施加有机肥为生菜生长提供良好的生态环境。曾德武等^[10]与李正强等^[10]研究表明,有机肥能够提高植物地下生物量,减少重金属对作物根系的毒害作用。

2014 年四川首发土壤污染状况调查公报中,Cd 以 28.7% 的超标率成为主要污染物,对粮食安全存在较大的隐性风险,因此找到一种安全种植粮食的措施具有重要实践意义。本研究通过盆栽试验,以四大主粮之一的马铃薯为材料,在 Pb、Cd 重度污染的土壤中施加不同浓度液体有机肥,探索马铃薯各器官 Pb、Cd 吸收量的变化,揭示液体有机肥对 Pb、Cd 污染的缓解效果,寻找治理 Pb、Cd 污染的最佳浓度,为 Pb、Cd 污染的土壤安全生产马铃薯提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤属于壤土,取自四川省成都市温江区青浦园试验田,具体理化性质如下:Pb 含量 $28.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd 含量 $2.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $7.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $2.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $6.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $32.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH6.68。供试马铃薯为脱毒种薯川芋 117。供试有机肥为云南七彩环保科技有限公司提供的商品新型液体有机肥,其有机质 $\geq 30\%$, $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ 含量 $\geq 10\%$,氨基酸含量 $\geq 8\%$,pH5.8~6.8。供试药品 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 CdCl_2 为成都市科龙化工试剂厂提供的分析纯。

1.2 试验设计

采集土壤在除去残枝、石子等杂物后充分混匀,分装于规格一致的塑料桶中(直径 27 cm、高 25 cm),每桶土重 7 kg。 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 CdCl_2 与土壤混匀,且浓度分别为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤中有有机肥浓度分别为(C0) $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(C1) $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(C2) $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(C3) $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 四个处理。试验处理分 Pb 污染、Cd 污染和 Pb、Cd 复合污染三种污染模式,具体处理依次为:PbC0、PbC1、PbC2、PbC3;CdC0、CdC1、CdC2、CdC3;PbCdC0、PbCdC1、PbCdC2、PbCdC3。 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 CdCl_2 以及有机肥以溶液形式与土壤混匀。种植马铃薯前一星期,所有实验用土每日充分搅拌,使各桶土壤中重金属、有机肥均匀分布,试验分别以 PbC0、CdC0、PbCdC0 为各处理的对照,每处理 9 个重复。于 2015 年 2 月 10 日种植马铃薯,每盆种 3 株,2015 年 6 月 6 日收获。

1.3 指标测定及方法

在马铃薯块茎形成期、块茎膨胀期及块茎成熟期进行取样。每次采集马铃薯地上生物量和地下生物量,分根、茎、叶、块茎进行处理,自来水冲洗干净,蒸馏水润洗两次,烘箱内杀青 0.5 h 后,烘干至恒重,粉碎、磨细,过 100 目筛装袋备用。采用火焰原子吸收分光光度计测定样品中 Pb、Cd 含量。

1.4 数据分析

采用 Excel 软件与 DPS 软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 Pb 污染下液体有机肥对马铃薯 Pb 吸收的影响

由图 1 可知,液体有机肥作用下,马铃薯各器官在块茎成熟期对 Pb 的吸收情况:相同有机肥浓度下,根中 Pb 含量除 PbCdC0 大于 PbC0 处理、PbCdC3 大于 PbC3 处理外,其余均是 Pb、Cd 复合污染小于单一 Pb 污染(图 1a);茎中 Pb 含量除处理 PbCdC0 大于 PbC0,其余均是 Pb、Cd 复合污染大于单一 Pb 污染(图 1b);叶片中 Pb 含量除 PbCdC1 大于 PbC1 处理外,其余均是 Pb、Cd 复合污染小于单一 Pb 污染(图 1c);块茎中 Pb 含量均是 Pb、Cd 复合污染大于单一 Pb 污染(图 1d)。在整个生育期,马铃薯各个器官 Pb 吸收量依次为根>茎>叶>块茎,并且根、茎和块茎中 Pb 吸收量随着有机肥浓度的增加而减少,而叶中则是随着有机肥浓度的增加而增加。参照 GB 18406.1—2001,蔬菜中 $\text{Pb} \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,试验马铃薯块茎中 Pb 含量均超标(图 1d),但不同浓度有机肥作用下,各处

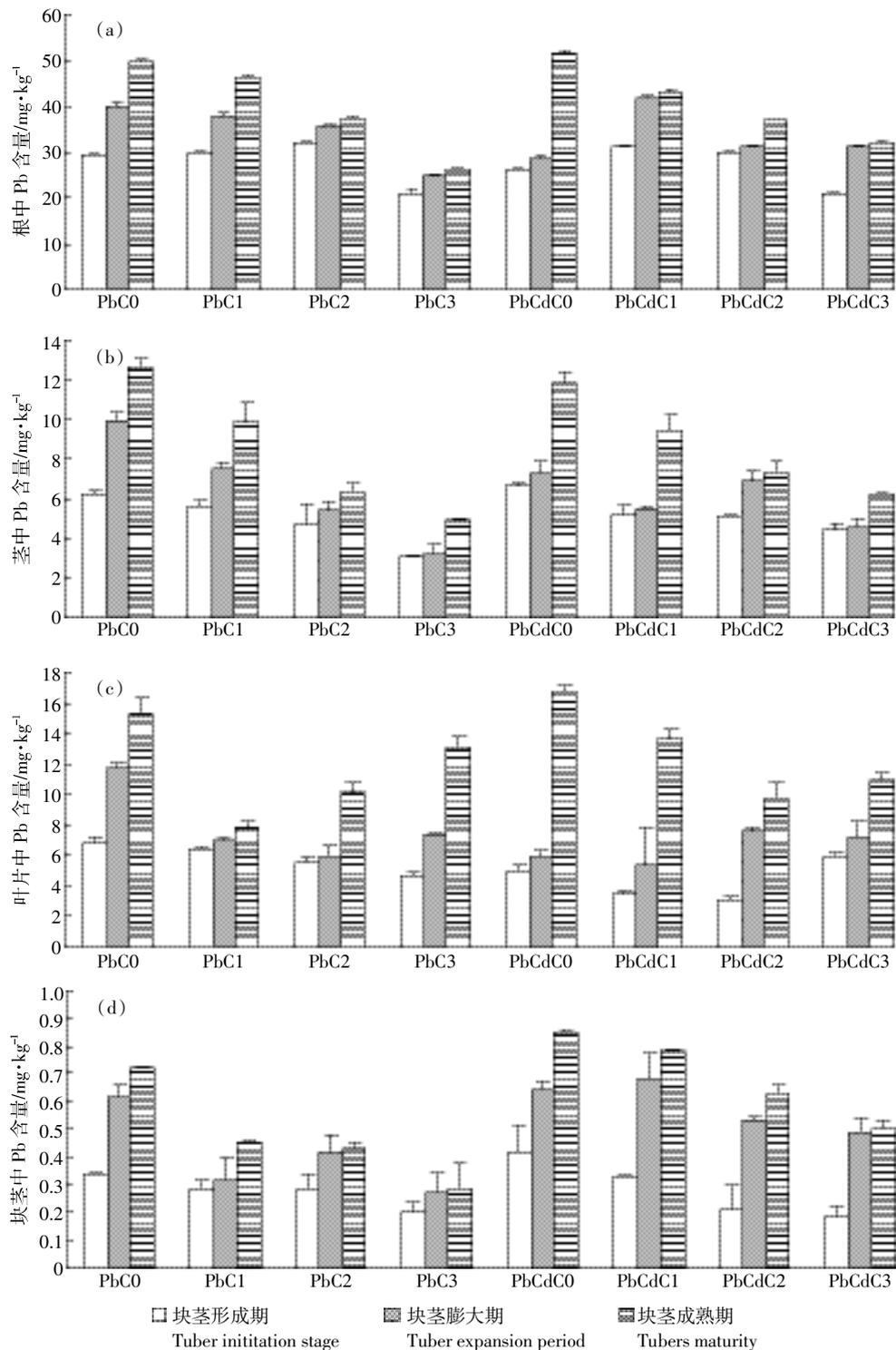


图 1 液体有机肥对马铃薯不同器官 Pb 吸收量的影响

Figure 1 Effects of liquid organic fertilizer on Pb absorption in different organs of potato

理下马铃薯块茎中Pb吸收量存在明显差异。块茎成熟期,单因素污染下马铃薯块茎中Pb的吸收量减少率最大,处理PbC1、PbC2、PbC3与PbC0相比,其减少率分别为37%、40%、61%;块茎形成期,Pb、Cd复合污染下马铃薯块茎中的Pb吸收量减少率最大,处

理PbCdC1、PbCdC2、PbCdC3与PbCdC0相比,其减少率分别为22%、50%、57%(图1d)。这表明:在研究范围内随着液体有机肥浓度的增加,马铃薯块茎中Pb含量减少;块茎成熟期,液体有机肥在单因素污染下缓解效果最好;块茎形成期液体有机肥在Pb、Cd复

合污染下缓解效果最好。

2.2 Cd 污染下液体有机肥对马铃薯 Cd 吸收的影响

由图 2 可知, 整个生育期, 马铃薯各个器官 Cd 吸收量依次为根>茎、叶>块茎; 块茎成熟期 Pb、Cd 复合污染下, 马铃薯的根和叶随液体有机肥浓度增大 Cd 吸收量增加(图 2a、图 2c), 而茎和块茎随液体有

机肥浓度增大 Cd 吸收量减少(图 2b、图 2d)。液体有机肥作用下, 马铃薯块茎中 Cd 含量(参照 GB 18406.1—2001, 蔬菜中 $Cd \leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)变化如下: 块茎膨大期均未超标, 块茎成熟期, 单因素处理马铃薯块茎中 Cd 含量均未超标, Pb、Cd 复合处理只有处理 CdC3 未超标(图 2d)。但是随着有机肥浓度的变

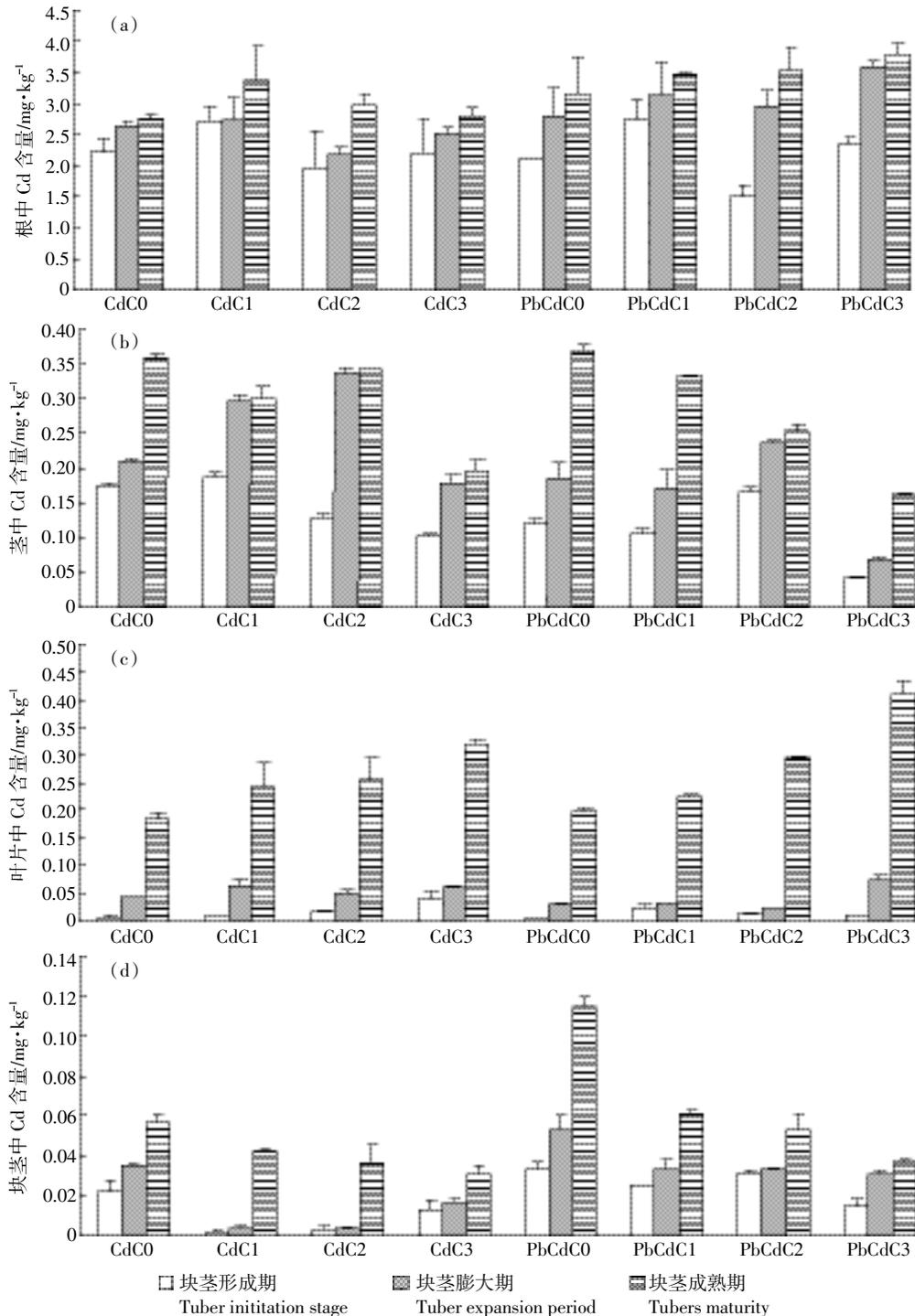


图 2 液体有机肥对马铃薯不同器官 Cd 吸收量的影响

Figure 2 Effects of liquid organic fertilizer on Cd absorption in different organs of potato

化,块茎中 Cd 含量呈现较大降低趋势。单因素污染在块茎膨大期,马铃薯块茎中的 Cd 含量减少率最大,处理 CdC1、CdC2、CdC3 与 CdC0 相比减少率分别为 91%、90%、51%;Pb、Cd 复合污染在块茎成熟期,马铃薯块茎中的 Cd 含量减少率最大,处理 PbCdC1、PbCdC2、PbCdC3 与 PbCdC0 相比减少率分别为 47%、54%、68%。这表明,在研究范围内,液体有机肥浓度越大,马铃薯块茎中 Cd 的吸收量越少;Cd 污染下,液体有机肥在块茎膨大期缓解效果最好;Pb、Cd 复合污染下,液体有机肥在块茎成熟期缓解效果最好。

2.3 马铃薯叶面积的变化

Pb、Cd 污染下,马铃薯叶面积随液体有机肥浓度的增大而增大,在相同浓度有机肥处理下,马铃薯叶面积变化规律基本是单一 Pb 污染>Pb、Cd 复合污染>单一 Cd 污染(表 1)。在块茎形成期和块茎膨大期,液体有机肥对单一 Pb 污染下马铃薯叶面积提升率分别为 55.37%、53.95%,单一 Cd 污染下马铃薯叶面积提升率分别为 74.05%、61.34%;块茎成熟期,单一 Pb 污染下液体有机肥对叶面积提升率下降为 12.31%,而单一 Cd 污染下叶面积提升率持续上升,其提升率为 74.39%。液体有机肥处于低浓度和中浓度时,对 Pb、Cd 复合污染下马铃薯叶面积提升率均较低,低浓度时提升率为 2.56%,中浓度时为 8.06%,在有机肥高浓度时叶面积表现出明显提升,平均达到 20.01%。这表明在研究范围内,液体有机肥对 Pb、Cd 污染下马铃薯叶面积增长有明显促进作用,在相同有机肥浓度

下,叶面积大小顺序为单一 Pb 污染>Pb、Cd 复合污染>单一 Cd 污染。

2.4 马铃薯各器官干物质质量的变化

如表 2、表 3 所示,Pb、Cd 污染下,马铃薯干物质质量、根冠比和单株产量变化趋势基本一致,即随着液体有机肥浓度的增大而增大。Cd 污染下,马铃薯干物质累积量、根冠比和总产量相对 Pb、Cd 复合污染呈降低趋势,且随着液体有机肥浓度增加,降低趋势越发不明显,即在块茎成熟期,Cd 污染下马铃薯干物质质量是 Pb、Cd 复合污染下干物质质量的 78.6%;Cd 污染下马铃薯单株产量是 Pb、Cd 复合污染下单株产量的 89.1%。这表明在研究范围内,Pb、Cd 污染下施加液体有机肥可以促进马铃薯生长;Pb、Cd 复合污染下,马铃薯干物质质量、根冠比、单株产量均高于 Cd 污染,但随着有机肥浓度的增大,差异越来越不明显。

3 讨论

液体有机肥相对普通有机肥的优势是含有大量氨基酸、腐植酸组分和较完全的营养元素,施入土壤后经分解合成相关物质,能够促进土壤形成良好的团粒结构,减少土壤中 Pb、Cd 有机质结合态或残渣态^[12],使土壤通气良好^[13],降低植物对土壤中 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸收,为植物的安全生长提供良好环境。

根冠比的高低决定植物根系活性的强弱,叶面积是植物受外界环境影响的直观表现。Pb、Cd 污染下,马铃薯总产量、叶面积、根冠比和干物质质量随液体有机肥浓度的增加而增加(表 1、表 2、表 3)。马铃薯各

表 1 马铃薯叶面积的变化

Table 1 Changes of leaf area of potato

处理	叶面积/cm ² ·片 ⁻¹			相对未施加有机肥处理叶面积增加率/%		
	块茎形成期	块茎膨大期	块茎成熟期	块茎形成期	块茎膨大期	块茎成熟期
PbC0	9.1±0.59ef	10.6±0.45f	16.2±0.98c	—	—	—
PbC1	12.2±0.97d	16.4±0.12bc	16.8±0.61cd	33.52	54.41	3.54
PbC2	14.2±0.71c	14.9±1.0c	19.2±0.93b	54.86	39.94	17.61
PbC3	16.2±0.53b	17.8±0.13b	18.9±0.23b	77.73	67.51	15.74
CdC0	7.9±0.51f	9.4±0.28f	10.2±0.13g	—	—	—
CdC1	9.9±0.75f	12.5±0.32e	14.6±0.95ef	25.67	32.53	42.76
CdC2	11.9±0.78d	13.1±0.75de	15.5±0.21de	50.41	37.63	51.43
CdC3	19.5±0.25a	20.1±0.43a	23.4±0.69a	146.07	113.86	128.99
PbCdC0	11.5±1.01d	13.3±0.18de	13.6±0.75f	—	—	—
PbCdC1	12.1±0.22d	13.5±1.1de	13.6±0.83f	5.38	1.77	0.54
PbCdC2	12.2±0.99d	14.3±0.25d	14.9±0.08e	6.28	7.83	10.08
PbCdC3	13.2±1.1cd	16.1±0.54d	16.9±0.32c	14.72	21.07	24.23

注:P<0.05。下同。

表2 马铃薯各器官干物质及根冠比的变化

Table 2 Changes of dry mass and root to shoot ratios of potato

处理	根/g·株 ⁻¹	茎/g·株 ⁻¹	叶/g·株 ⁻¹	根冠比	根冠比相对未施加有机肥处理提升率/%
PbC0	0.57±0.04abc	0.88±0.06e	1.52±0.11e	4.24	—
PbC1	0.60±0.03ab	1.21±0.05d	1.77±0.06d	4.96	17.15
PbC2	0.61±0.02ab	1.28±0.06d	1.82±0.09d	5.12	20.92
PbC3	0.66±0.04a	1.90±0.04b	2.99±0.11a	7.38	74.19
CdC0	0.40±0.03bc	0.52±0.05f	0.76±0.06g	3.16	—
CdC1	0.41±0.03c	0.68±0.02f	0.81±0.02g	3.59	13.67
CdC2	0.52±0.05ab	0.99±0.05e	1.19±0.08f	4.22	33.65
CdC3	0.65±0.06a	2.44±0.08a	3.02±0.16a	8.45	167.77
PbCdC0	0.49±0.04abc	1.04±0.04de	1.77±0.06d	4.76	—
PbCdC1	0.52±0.03ab	1.21±0.03d	1.79±0.07d	5.41	13.61
PbCdC2	0.59±0.05ab	1.43±0.03c	2.05±0.08c	5.87	23.17
PbCdC3	0.63±0.03ab	1.52±0.06c	2.28±0.12b	7.69	61.61

表3 马铃薯单株产量变化

Table 3 Yields of single potato plant

处理	产量/ g·株 ⁻¹	相对未施 有机肥处理 提高率/%	相同有机肥浓度下 Pb 污染相对复合 处理提高率/%	相同有机肥浓度下 Cd 污染相对复合 处理提高率/%
PbC0	44±1.4cd	—	14.7	—
PbC1	47±3.2bc	6.2	13.3	—
PbC2	54±1.1ab	23.7	22.6	—
PbC3	55±2.2a	26.4	6.2	—
CdC0	29±2.8gh	—	—	-23.9
CdC1	30±1.6h	5.5	—	-25.3
CdC2	42±1.6fg	43.2	—	-5.6
CdC3	55±3.8a	90.6	—	6.2
PbCdC0	38±4.4de	—	—	—
PbCdC1	41±4.8efg	7.4	—	—
PbCdC2	44±3.4bcd	15.4	—	—
PbCdC3	52±3.2abc	36.4	—	—

器官 Pb、Cd 吸收量与张玉秀等^[14]研究一致,即根>茎、叶>块茎,且根对 Pb、Cd 吸收量随液体有机肥浓度的增大而增加。根吸收 Pb、Cd 量大的主要原因是液体有机肥增加植物根际环境中的有机酸、腐殖质等,使根系分泌大量植物络合素等物质,促进土壤重金属的溶解和根系的吸收,所以大部分 Pb²⁺、Cd²⁺滞留在马铃薯根部^[16],只有一小部分 Pb²⁺、Cd²⁺被植物吸收后转运进入马铃薯各器官。

Pb 污染下,马铃薯块茎中 Pb 吸收量小的原因是:一方面液体有机质抑制土壤对 Pb²⁺的吸附,促进对 Pb 的解析^[15],使土壤 Pb²⁺的有效态含量降低,活性下降,抑制 Pb²⁺由土壤向植物体系中的迁移^[16];另一

方面块茎中 Pb²⁺需要通过根部转运至叶片后再合成淀粉并且通过消耗能量和载体运输至块茎,其过程复杂、程序繁多,所以最后进入块茎的 Pb²⁺含量最少。Cd 污染下,马铃薯块茎中 Cd 吸收量小的原因是:一方面随有机肥浓度增大根系分泌物增加(包括有机酸),并使分泌物与 Cd 通过竞争性结合后滞留在根表面的 Cd²⁺量增加,因此通过主动运输转移至其他器官的 Cd²⁺量减少;另一方面马铃薯根系向地上部分输送营养时,各个器官都会对 Cd²⁺产生截留作用,随着有机肥浓度的增大截留作用增强(图 2a、图 2c),所以大部分 Cd²⁺被截留在根、茎、叶中,最后到达马铃薯块茎中的 Cd²⁺较低。另外 Pb、Cd 复合污染时,植物对 Pb、Cd 的吸收可能存在拮抗作用,高浓度 Pb 会抑制植物对 Cd 的吸收,占用 Cd 的转运蛋白酶,减少马铃薯对 Cd 的吸收量,但随着有机肥浓度的增加这种抑制作用越来越弱。

Pb、Cd 污染下,马铃薯块茎对 Pb、Cd 的转运能力减弱^[17],而液体有机肥的施加能够恢复其 Pb、Cd 转运能力。液体有机肥作用下,虽然在研究范围内马铃薯块茎中 Pb、Cd 含量未完全达标(图 1d、图 2d),但块茎中 Pb、Cd 含量随液体有机肥浓度的升高而减少。实验结果发现,块茎中 Pb、Cd 含量减少除有机肥对马铃薯块茎自身的影响外,与马铃薯其他器官 Pb、Cd 的吸收量是密不可分的。相关性分析表明,Pb 污染下,块茎中 Pb 含量与根呈极显著相关($r=0.6586^{**}$),与茎呈极显著相关($r=0.7698^{**}$),与叶呈极显著相关($r=0.7248^{**}$);Cd 污染下,块茎中 Cd 含量与根呈显著相关($r=0.4735^{*}$),与茎呈显著相关($r=0.4814^{*}$),

与叶呈显著相关($r=0.465\ 3^*$)。

4 结论

本实验研究范围内发现:Pb污染下,块茎成熟期马铃薯块茎中Pb吸收量最少;Cd污染下,块茎膨大期马铃薯块茎Cd吸收量最少;单因素污染下块茎中Pb、Cd吸收量低于Pb、Cd复合污染;马铃薯块茎中的Pb、Cd含量随液体有机肥浓度的增大而减少。

参考文献:

- [1] 刘小文,齐成媚,欧阳灿斌,等. Pb、Cd及其复合污染对紫茎泽兰生长及吸收富集特征的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):876-883.
LIU Xiao-wen, QI Cheng-mei, OUYANG Can-bin, et al. Growth and absorption enrichment of *Eupatorium Adenophorum* Spreng to lead, cadmium and their combined stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 876-883.
- [2] 周芙蓉. 侧柏和国槐对干旱和铅胁迫的耐性及对铅污染土壤的修复[D]. 杨凌:西北农业大学, 2014.
ZHOU Fu-rong. Tolerance of *Platycladus orientalis* and *Sophora Japonica* to drought, lead stress and restoration of lead-contaminated soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [3] 叶文. 赤胫散在Cd、Pb和Zn胁迫下的耐性机理和富集特征[D]. 成都:四川农业大学, 2013.
YE wen. Tolerance mechanism and accumulation characteristic of *Polygonum runcinatum* under cadmium, lead and zinc stress[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [4] 谌金吾,孙一铭,王凤英,等. 三叶鬼针草毛状根的诱导及其对重金属Cd、Pb蓄积[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5):1596-1602.
CHEN Jin-wu, SUN Yi-ming, WANG Feng-ying, et al. Induction and accumulation of cadmium and lead by hairy root of *Bidens pilosa*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015,35(5):1596-1602.
- [5] 钱萍. 硫化氢对铝胁迫下油菜生长的影响及调控机理研究[D]. 浙江:浙江大学, 2014.
QIAN Ping. Effect of hydrogen sulfide on the growth of *Brassica napus* under aluminum stress and its regulation mechanism[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [6] 陈翠红. 土壤典型PPCPs污染及重金属Cd的联合毒性及机理[D]. 天津:南开大学, 2010.
CHEN Cui-hong. Joint toxicity and mechanisms of typical PPCPs and Cd in soil[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [7] 聂义宁,张爱星,高阳,等. 密云水库上游铁矿区重金属在胡敏酸中的分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):266-273.
NIE Yi-ning, ZHANG Ai-xing, GAO Yang, et al. Distribution of heavy metals in humic acids of iron mine soil in upper area of Miyun Reservoir [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 266-273.
- [8] 罗连光,崔新卫,杨勇,等. 有机无机肥配施对超级杂交稻产量构成及植株重金属含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012,28(1): 67-71.
LUO Lian-guang, CUI Xin-wei, YANG Yong, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield composition and heavy metal content of super hybrid rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(1): 67-71.
- [9] 唐明灯,艾绍英,罗英健,等. 有机无机配施对生菜生长及其Cd、Pb含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6):1104-1110.
TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LUO Ying-jian, et al. Effects of organic manures on the growth, Cd and Pb concentrations of lettuce plant based on the same nitrogen level[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6):1104-1110.
- [10] 曾德武,李帆,赵建武,等. 烟草重金属污染及其防控措施研究进展[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(1): 127-132.
ZENG De-wu, LI Fan, ZHAO Jian-wu, et al. Advance in tobacco heavy metal pollution and its controlling measures[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2014, 35(1):127-132.
- [11] 李正强,熊俊芬,马琼芳,等. 4种改良剂对Pb锌尾矿污染土壤中光叶紫花苜蓿生长及重金属吸收特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010,18(1):158-163.
LI Zheng-qiang, XIONG Jun-fen, MA Qiong-fang, et al. Effect of different amendments on growth and metal accumulation in *Vicia villosa* Roth *varglabrescens* cv Yunguangzao in soils polluted with lead/zinc mine tailings[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 158-163.
- [12] 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.
- [13] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(4): 613-623.
- [14] 张玉秀,于飞,张媛雅,等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5):1317-1321.
ZHANG Yu-xiu, YU Fei, ZHANG Yuan-ya, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008,16(5):1317-1321.
- [15] 李仁英,周志高,岳海燕,等. 水溶性有机质对南京城郊菜地土壤Pb吸附解吸行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 867-873.
LI Ren-ying, ZHOU Zhi-gao, YUE Hai-yan, et al. Effect of dissolved organic matter on adsorption-desorption of Pb in the vegetable soil from a suburb of Nanjing, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(5): 867-873.
- [16] 陈恒宇,郑文,唐文浩. 改良剂对Pb污染土壤中Pb形态及植物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):170-173.
CHEN Heng-yu, ZHENG Wen, TANG Wen-hao. The effectiveness of amendment on Pb form and bioavailability in Pb contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(1): 170-173.
- [17] 武倩倩. 块根、块茎类植物修复土壤铅、镉污染的试验研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2014.
WU Qian-qian. The phytoremediation experimental study of root tuber plants and tuber plants for Pb、Cd contaminated soil[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014.