

玉米和羽扇豆、鹰嘴豆间作对作物 吸收积累 Pb、Cd 的影响

黄益宗, 朱永官, 胡 莹, 刘云霞

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:采用土壤盆栽试验研究玉米、羽扇豆和鹰嘴豆在不同分隔/间作方式下对 Pb、Cd 吸收积累的影响。试验结果表明,不同分隔/间作方式对玉米、羽扇豆和鹰嘴豆生物量变化有不同的影响。不同分隔/间作方式均显著影响玉米地下部对 Pb 的吸收,但是不同间作方式对玉米地上部 Pb 含量影响不大。塑料分隔以及玉米-鹰嘴豆间作可显著减少玉米地下部对 Pb 的吸收。在玉米单作中,塑料分隔和尼龙网分隔处理的玉米地下部 Pb 含量分别比不分隔处理时降低 41.1% 和 33.3%。在不分隔处理时,玉米-鹰嘴豆间作的玉米地下部 Pb 含量仅分别为玉米单作和玉米-羽扇豆间作时的 53.9% 和 63.8%。不同分隔方式对玉米地下部 Cd 含量影响较大,但是不管是间作还是分隔方式均对玉米地上部 Cd 含量影响不大。同时,还讨论了不同分隔/间作方式对羽扇豆和鹰嘴豆 Pb、Cd 含量的影响。作物根际土壤溶液 Pb 含量随着作物的生长而不断降低,但 Cd 含量却不断提高。不同分隔/间作方式对作物根际土壤溶液 Pb、Cd 含量也有一定影响。

关键词:玉米;羽扇豆;鹰嘴豆;间作;铅;镉

文章编号:1000-0933(2006)05-1478-08 **中图分类号:**Q143,S181,X171.5 **文献标识码:**A

Absorption and accumulation of Pb, Cd by corn, lupin and chickpea in intercropping systems

HUANG Yi-Zong, ZHU Yong-Guan, HU Ying, LIU Yun-Xia (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1478 - 1485.

Abstract: Owing to several human economic activities (such as application of municipal sewage sludge, atmospheric deposition of Cd, mining activities, application of chemical fertilizers and pesticides), lead (Pb) and cadmium (Cd) contamination of soils has become more and more serious in China.

The effects of different intercropping systems, namely, monoculture of corn (*Zea mays* var. Tiandan No. 8), corn/lupin (*Lupinus luteus* L.) and corn/chickpea (*Cicer arietinum* L.) on uptake and accumulation of Pb and Cd by these plants in soils contaminated with heavy metals were investigated in a greenhouse experiment. For intercropping treatments, there were the following separation modes: (1) no separation; (2) separation by a plastic barrier to eliminate root contact and solute movement; and (3) separation by a nylon mesh (30 μm) to prevent root contact but to allow solute exchange. The results showed that there were significant changes in biomass (shoot and root) of different crops under different intercropping and separation modes. The concentrations of Pb in the roots of corn were significantly affected by different intercropping systems and different separation modes, but Pb in the shoot of corn were not significantly different between separation modes. Pb concentrations were lower in the roots of corn cultivated in the compartments separated by plastic barrier or in corn/chickpea intercropping systems. The

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(40225002);中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-19)

收稿日期:2005-11-23; **修订日期:**2006-03-15

作者简介:黄益宗(1970-),男,广西南宁人,壮族,博士,副研究员,主要从事农林生态环境研究.E-mail: hyz@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: The project was supported by Outstanding Young Scientist Program of National Natural Science Foundation of China (No. 40225002); the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-19)

Received date: 2005-11-23; **Accepted date:** 2006-03-15

Biography: HUANG Yi-Zong, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in agriculture and forestry ecology and environment. E-mail: hyz@mail.rcees.ac.cn

concentrations of Cd in the shoot of corn were not significantly affected by both separateion modes and different intercropping systems, but there was significant difference in Cd accumulation in the roots of corn between separation modes. The changes in concentrations of Pb and Cd in lupin and chickpea plants under different intercropping systems and different separation modes were also discussed. The concentrations of Pb in rhizosphere soil solutions decreased with growth time, but the reverse was true for Cd. Pb and Cd concentrations in rhizosphere soil solutions were also affected by intercropping systems or separation modes.

Key words: corn; lupin; chickpea; intercrop; lead; cadmium

由于长期进行污水灌溉和污泥施用、人为活动引起的大气沉降、矿产资源的不合理开发以及化肥、农药的大量施用等,造成土壤重金属污染日趋严重。位于沈阳市西郊的张士灌区是全国有名的污灌区,灌区土壤镉含量高达 5 mg/kg,生产的稻米含镉量可达 1 mg/kg,超过国家标准 3~5 倍^[1]。不合理开采矿石将引发较为严重的土壤重金属污染问题。刘辉等发现北京市郊东三岔铅锌矿区周围土壤已受到较为严重的镉污染,且植物中的镉含量与土壤中碳酸盐结合态的镉含量呈显著的正相关^[2]。位于广西壮族自治区境内的刁江流域,由于长期不合理的矿产资源开发而导致该流域土壤重金属污染比较严重。该流域重金属污染最严重的金洞村,其农田土壤为 0~15 cm 和 15~35 cm 时,Cd 分别为国家土壤环境质量三级标推的 60 多倍和 100 多倍,Pb 分别为 1.72 和 2.72 倍^[3]。据周建利和陈同斌^[4]综述,我国上海、广州、天津、沈阳、西安等城郊的菜地土壤均受到重金属 Pb、Cd 等的污染。土壤重金属污染可影响作物的生长,进而经过食物链进入人体从而危害人体的健康。不同农业措施诸如土壤管理、水分管理、作物间作等将会影响作物对土壤重金属的吸收和积累,这方面的研究报道不多^[5,6]。

间混套作是我国传统的精耕细作的农业措施之一。豆科与禾本科植物间作是比较常见的一种间作方式,这种间作方式具有许多优点:1)植物可充分利用光、热、水、气等资源;2)豆科可向禾本科植物转移氮素^[7-9];3)促进禾本科植物对有机磷的吸收^[7,10,11];4)改善作物的铁营养状况^[7,12-14];5)提高作物的生物量和粮食产量^[7,10]。不同植物间作对土壤重金属迁移转化的影响很少有人报道^[5],本文开展豆科和禾本科作物间作对土壤重金属迁移转化影响机理的研究,将为土壤重金属污染防治提供一些理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自湖南省冷水江市铅锌矿尾矿砂土壤。土壤采回后经风干、磨碎、过 1 mm 筛、保存,以备试验分析及作物培养试验应用。土壤的基本理化性质为:土壤 pH 7.86,有机质 29.4 g/kg,CEC 4.80 cmol/kg,Pb679.08 mg/kg,Cd8.10 mg/kg。土壤颗粒组成:<0.02 mm 占 31.20 %。

1.2 供试作物

供试玉米由中国农业科学研究院提供,品种为甜单 8 号(*Zea mays* var. Tiandan No. 8)。羽扇豆(*Lupinus luteus* L.)和鹰嘴豆(*Cicer arietinum* L.)均由澳大利亚阿德莱德大学提供。种子经 10% H₂O₂ 溶液消毒 10 min,然后用水冲洗几遍,种子经催芽后直接播种至土壤中。

1.3 试验方法

试验用特制的 PVC 盆(直径 7 cm,高 17 cm)进行,PVC 盆有 3 种不同的分隔方式:用聚氯乙烯粘合剂将 30 μm 尼龙网粘在盆的中间,把盆分隔成 2 室(尼龙网分隔);同样的方法用塑料膜把盆分隔(塑料分隔);盆的中间没有任何分隔(不分隔)。间作方式有 3 种:玉米单作、玉米/羽扇豆间作和玉米/鹰嘴豆间作。9 个处理,每个处理 4 次重复,共 36 盆。每盆装土 800 g,栽植 2 株作物。在装土的过程中,把土壤溶液采样器(购自荷兰瓦格宁根大学)埋入土壤中,深度约在玉米的根际区内,用于采集土壤溶液。用去离子水调节土壤水分含量至田间持水量的 70%,土壤平衡 3 周,然后再播种玉米、羽扇豆和鹰嘴豆。每盆添加尿素 0.428 g/kg、硫酸钾 0.247 g/kg 作为作物生长所需的肥料。称重法每两天用去离子水给土壤补充水分。试验在可调节光照和温度的培养室内进行。

1.4 采样与分析

试验开始后,每隔7 d用10 mL医用注射器抽取土壤溶液,并放置于4℃的冰箱中保存。作物生长1个月后进行收获。植物样品在70℃的温度下烘干,并分别称量其地上部及地下部的干重。土壤基本性质测定:土壤pH值的测定采用土水比为1:2.5(H₂O)浸提,酸度计测定;土壤有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵法测定;土壤颗粒组成用比重计法测定^[15]。土壤Pb和Cd用王水消解,ICP-OES测定。

土壤溶液样品分析前需进行过滤,而植物样品用优级纯浓硝酸进行消解处理。用国家物质标准中心提供的污染茶叶样品(GBW 07605(GSV-4))进行质量控制,Pb和Cd回收率均为95%左右。土壤溶液和植物样品中的Pb和Cd均用ICP-MS测定。

2 结果与讨论

2.1 不同间作和分隔方式对作物生物量变化的影响

不同分隔/间作方式对玉米、羽扇豆和鹰嘴豆生物量的影响见表1。生长1个月的玉米、羽扇豆和鹰嘴豆的地上部和地下部生物量分配比例不一样。对玉米而言,地上部生物量基本是地下部生物量的1倍左右,鹰嘴豆地上部和地下部生物量比例接近于2.0,而羽扇豆这个比例大于2.0以上。对数据进行方差分析统计,发现不同分隔方式对玉米地上部生物量影响达到显著水平($p < 0.05$),而不同间作方式以及间作方式和分隔方式的交互作用对地上部生物量的影响没有达到显著水平。在玉米单作中,玉米地上部生物量在不分隔处理时均比尼龙网分隔和塑料分隔时减少18.2%。不同间作方式对玉米地下部生物量的影响也达到 $p < 0.05$ 的显著水平,而不同分隔方式以及间作方式和分隔方式的交互作用对地下部生物量变化影响不大。

在玉米-羽扇豆间作和玉米-鹰嘴豆间作中,不同分隔方式对羽扇豆或鹰嘴豆的地上部和地下部生物量影响也不大。在相同的分隔方式中作物的总生物量由大到小的变化趋势为:玉米-羽扇豆间作 > 玉米单作 > 玉米-鹰嘴豆间作。例如在不分隔处理中,玉米/羽扇豆间作的总生物量为1.20 g,大于玉米单作的0.95 g,也大于玉米-鹰嘴豆间作的0.89 g。在尼龙网分隔和塑料分隔时也出现这种趋势,这是因为羽扇豆的生物量比其它两种作物大,而且玉米-羽扇豆间作有利于玉米的生长,而玉米-鹰嘴豆间作稍微抑制玉米的生长所致。对作物总生物量数据进行方差分析统计,发现只有不同间作方式对作物总生物量影响达到显著水平($p < 0.05$),而不同分隔方式以及间作和分隔方式的交互作用对作物总生物量影响没有达到显著水平。

2.2 不同分隔/间作方式对作物吸收积累Pb和Cd的影响

2.2.1 Pb 不同分隔/间作方式对玉米地上部和地下部Pb含量的影响见表2。各个处理的玉米地下部Pb含量范围在63.96~139.03 mg/kg之间,而地上部仅为2.14~3.94 mg/kg,说明Pb从地下部向地上部转移的量十分少。从表2可以看出,不同分隔方式对玉米地上部Pb含量影响差异显著($p < 0.05$)。在同一种间作方式中,玉米地上部Pb含量均可以看出这样的趋势:塑料分隔 > 不分隔 > 尼龙网分隔。例如在玉米单作中,尼龙网分隔处理的玉米地上部Pb含量显著低于塑料分隔和不分隔处理,仅分别为它们的60.9%和68.2%,但是塑料分隔和不分隔处理Pb含量没有差异。在玉米-羽扇豆间作中,尼龙网分隔处理的玉米Pb含量比塑料分隔处理减少26.4%。在玉米-鹰嘴豆间作中,塑料分隔处理的玉米地上部Pb含量分别比尼龙网分隔和不分隔处理提高79.0%和32.8%,而尼龙网分隔和不分隔处理之间差异不显著。这是因为不同的分隔方式使作物的根系相互作用不一样,导致其吸收和转移Pb的量有差异。

不同分隔方式对玉米地下部Pb含量影响达到极显著水平($p < 0.001$)。在不同的间作方式中,玉米地下部Pb含量均是不分隔和尼龙网分隔处理大于塑料分隔处理。在玉米单作中,塑料分隔和尼龙网分隔处理的Pb含量差异不明显,但是它们均显著低于不分隔处理的Pb含量(139.03 mg/kg),分别比不分隔处理时降低41.1%和33.3%。在玉米-羽扇豆间作中,塑料分隔处理的Pb含量分别比不分隔和尼龙网分隔处理降低30.3%和21.8%。在玉米-鹰嘴豆间作中,塑料分隔的玉米地下部Pb含量比尼龙网分隔处理降低20.4%。

表 1 不同分隔/间作方式对玉米、羽扇豆和鹰嘴豆生物量的影响

Table 1 Effects of different separated/intercropping modes on biomass of corn, lupin and chickpea

间作方式 Intercropping mode	分隔方式 Separated mode	生物量 Biomass				总生物量 Total biomass (g/pot)
		玉米 Corn (g/plant)		羽扇豆或鹰嘴豆 Lupin or Chickpea (g/plant)		
		地上部 Overground	地下部 Underground	地上部 Overground	地下部 Underground	
玉米单作 Monoculture of corn	不分隔 No separation	0.27 (0.03)*	0.21 (0.02)	—	—	0.95 (0.11)
	塑料分隔 Separation by plastic barrier	0.33 (0.02)	0.21 (0.02)	—	—	1.07 (0.08)
	尼龙网分隔 Separation by nylon mesh	0.33 (0.02)	0.22 (0.02)	—	—	1.10 (0.08)
玉米/羽扇豆 Corn/Lupin	不分隔 No separation	0.31 (0.04)	0.23 (0.03)	0.46 (0.04)	0.20 (0.03)	1.20 (0.14)
	塑料分隔 Separation by plastic barrier	0.35 (0.04)	0.24 (0.02)	0.47 (0.06)	0.18 (0.03)	1.24 (0.15)
	尼龙网分隔 Separation by nylon mesh	0.32 (0.01)	0.21 (0.02)	0.44 (0.02)	0.19 (0.02)	1.16 (0.07)
玉米/鹰嘴豆 Corn/Chickpea	不分隔 No separation	0.27 (0.02)	0.17 (0.01)	0.27 (0.04)	0.18 (0.02)	0.89 (0.08)
	塑料分隔 Separation by plastic barrier	0.27 (0.02)	0.18 (0.01)	0.36 (0.08)	0.19 (0.03)	1.00 (0.15)
	尼龙网分隔 Separation by nylon mesh	0.29 (0.02)	0.19 (0.02)	0.36 (0.05)	0.22 (0.02)	1.06 (0.11)

* 括号内数字表示误差限,总生物量为玉米和羽扇豆或鹰嘴豆的地上部和地下部总和 Date in brackets represent the standard errors; The date of total biomass is the summation of overground and underground biomass of corn and lupin or chickpea

不同的间作方式对玉米地下部 Pb 含量的影响也达到极显著水平($p < 0.001$)。在不同的分隔方式中,玉米-鹰嘴豆间作的 Pb 含量均比玉米单作和玉米-羽扇豆间作时低。比如在不分隔处理时,玉米单作、玉米-羽扇豆间作和玉米-鹰嘴豆间作的 Pb 含量分别为 139.03 mg/kg、117.49 mg/kg 和 74.97 mg/kg,玉米-鹰嘴豆间作的 Pb 含量仅分别为玉米单作和玉米-羽扇豆间作时的 53.9% 和 63.8%。玉米在与羽扇豆和鹰嘴豆的间作条件下,由于豆科植物可促进土壤氮、磷的释放,提高玉米对有机磷^[11]、有效氮^[7-9]等元素的吸收,从而提高玉米抵抗重金属的毒害能力。另外,磷可降低土壤中 Pb 的生物有效性^[16],这可能是玉米吸收 Pb 减少的原因之一。在塑料分隔处理中,玉米-鹰嘴豆间作的玉米地下部 Pb 含量均显著低于玉米单作和玉米-羽扇豆间作;在尼龙网分隔处理中,玉米-鹰嘴豆间作的 Pb 含量也显著低于玉米-羽扇豆间作。从表 2 中还可以看出,不同间作和分隔方式的交互作用对玉米地下部 Pb 含量的影响达到了极显著水平($p < 0.001$),而对玉米地上部 Pb 含量的影响不大。

对羽扇豆和鹰嘴豆来说,Pb 从地下部向地上部转移的量也十分少,这两种作物的地上部 Pb 含量仅分别为地下部的 1.2%~3.3% 和 3.2%~4.0%(表 3)。羽扇豆和鹰嘴豆地下部 Pb 含量差异较大。在不分隔和塑料分隔处理中,鹰嘴豆地下部 Pb 含量分别比羽扇豆降低 56.1% 和 66.0%,而地上部 Pb 含量差异不明显。在尼龙网分隔处理中,这两种作物不管在地上部还是在地下部其 Pb 含量均有显著差异,地上部鹰嘴豆 Pb 含量比羽扇豆降低 43.1%,而地下部也降低 52.7%。

同一种作物在不同的分隔方式中 Pb 含量也不一样。对羽扇豆而言,地上部和地下部 Pb 含量不同分隔处理间均没有达到显著差异水平,而鹰嘴豆地下部 Pb 含量不同分隔处理间有显著差异,塑料分隔和尼龙网分隔处理 Pb 含量分别比不分隔处理降低 40.4% 和 26.0%(表 3)。

表 2 不同分隔/间作方式对玉米 Pb 含量 (mg/kg) 的影响

Table 2 Effects of different separated/intercropping modes on Pb concentration of corn

间作方式 Intercropping mode	地上部 Overground			地下部 Underground		
	不分隔 No separation	塑料分隔 Separation by plastic barrier	尼龙网分隔 Separation by nylon mesh	不分隔 No separation	塑料分隔 Separation by plastic barrier	尼龙网分隔 Separation by nylon mesh
玉米单作 Monoculture of corn	3.14 (0.24) *	3.51 (0.25)	2.14 (0.08)	139.03 (14.21)	81.90 (6.87)	92.74 (7.55)
玉米/羽扇豆间作 Corn/Lupin	2.73 (0.55)	3.04 (0.21)	2.24 (0.35)	117.49 (16.98)	81.85 (10.39)	104.69 (15.96)
玉米/鹰嘴豆间作 Corn/Chickpea	2.97 (0.25)	3.94 (0.64)	2.20 (0.24)	74.97 (5.30)	63.96 (6.55)	80.32 (7.21)
方差分析 Analysis of variance						
分隔方式(C)Separated mode(C)		$p < 0.05$			$p < 0.001$	
间作方式(I)Intercropping mode(I)		NS			$p < 0.001$	
C × I		NS			$p < 0.001$	
LSD _{0.05}		0.78			15.77	

* 括号内数字表示误差限 Date in brackets represent the standard errors

表 3 不同分隔方式对羽扇豆和鹰嘴豆 Pb 和 Cd 含量 (mg/kg) 的影响

Table 3 Effects of different separated/intercropping modes on Pb, Cd concentrations of lupin and chickpea

分隔方式 Separated mode	羽扇豆 Lupin				鹰嘴豆 Chickpea			
	地上部 Overground		地下部 Underground		地上部 Overground		地下部 Underground	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
不分隔 No separation	1.94 (0.27) *	0.06 (0.01)	167.86 (23.47)	5.35 (0.18)	2.30 (0.59)	0.08 (0.03)	72.86 (9.19)	2.79 (0.14)
塑料分隔 Separation by plastic barrier	2.53 (0.21)	0.06 (0.01)	127.97 (17.78)	3.95 (0.78)	1.66 (0.26)	0.11 (0.03)	43.46 (4.82)	2.12 (0.15)
尼龙网分隔 Separation by nylon mesh	3.74 (0.83)	0.07 (0.01)	113.97 (12.01)	3.68 (0.20)	2.13 (0.70)	0.12 (0.04)	53.93 (3.17)	2.96 (0.09)
显著性 Remarkable level	NS	NS	NS	$p < 0.05$	NS	NS	$p < 0.05$	$p < 0.01$

* 括号内数字表示误差限 Date in brackets represent the standard errors

2.2.2 Cd 与 Pb 不一样,玉米从地下部向地上部迁移的 Cd 较多。玉米地上部 Cd 含量为地下部的 22.3% ~ 82.1%。不同间作和分隔方式对玉米地上部 Cd 含量影响不大,方差分析统计结果表明差异不显著,但是其交互作用影响达到 $p < 0.05$ 的显著水平(表 4)。说明间作和分隔方式的共同作用可影响 Cd 向玉米地上部转移。同样,不同间作方式对玉米地下部吸收 Cd 影响也不大,但是不同分隔方式以及间作和分隔方式的交互作用对玉米地下部 Cd 含量影响分别达到极显著 ($p < 0.001$) 和显著水平 ($p < 0.01$)。在玉米-羽扇豆间作中,塑料分隔和尼龙网分隔处理的玉米地下部 Cd 含量分别比不分隔处理减少 17.2% 和 30.1%。在玉米-鹰嘴豆间作中,塑料分隔处理的 Cd 含量比不分隔处理减少 41.7%,也比尼龙网分隔处理减少 31.7%。说明塑料分隔处理可降低玉米根系对 Cd 的吸收积累,塑料分隔阻断作物之间的相互作用,这可能是导致玉米根系吸收积累 Cd 较少的原因之一。

羽扇豆和鹰嘴豆的地上部和地下部 Cd 含量相差较大,这与玉米有区别。此两种作物的地上部 Cd 含量分别为地下部的 1.1% ~ 1.9% 和 3.8% ~ 5.3%。不同分隔方式除了对羽扇豆和鹰嘴豆的地下部 Cd 含量影响达到显著水平以外,对这两种作物的地上部 Cd 含量影响均没有达到显著水平(表 3)。对羽扇豆来说,塑料分隔和尼龙网分隔处理的地下部 Cd 含量分别为 3.95 mg/kg 和 3.68 mg/kg,分别比不分隔处理减少 26.2% 和 31.2%。鹰嘴豆的地下部 Cd 含量在塑料分隔处理时为 2.12 mg/kg,少于不分隔(2.79 mg/kg)和尼龙网分隔处理(2.96 mg/kg)的 Cd 含量。

表 4 不同分隔/间作方式对玉米 Cd 含量(mg/kg)的影响

Table 4 Effects of different separated/intercropping modes on Cd concentration of corn

间作方式 Intercropping mode	地上部 Overground			地下部 Underground		
	不分隔 No separation	塑料分隔 Separation by plastic barrier	尼龙网分隔 Separation by nylon mesh	不分隔 No separation	塑料分隔 Separation by plastic barrier	尼龙网分隔 Separation by nylon mesh
玉米单作 Monoculture of corn	1.52 (0.20) *	1.08 (0.18)	0.92 (0.21)	2.33 (0.22)	2.20 (0.13)	2.35 (0.18)
玉米/羽扇豆间作 Corn/Lupin	0.53 (0.09)	1.40 (0.40)	1.37 (0.41)	2.39 (0.10)	1.98 (0.10)	1.67 (0.08)
玉米/鹰嘴豆间作 Corn/Chickpea	0.63 (0.06)	1.19 (0.06)	0.52 (0.07)	2.66 (0.16)	1.55 (0.06)	2.27 (0.09)
方差分析 Analysis of variance						
分隔方式(C)Separated mode(C)		NS			p < 0.001	
间作方式(I)Intercropping mode(I)		NS			NS	
C × I		p < 0.05			p < 0.01	
LSD _{0.05}		0.46			0.27	

* 括号内数字表示误差限 Date in brackets represent the standard errors

2.3 土壤溶液中 Pb 和 Cd 含量的动态变化

不同分隔/间作方式对玉米根际土壤溶液 Pb 含量的影响见图 1。从图中可以看出,土壤溶液 Pb 含量在作物生长初期比较高,第 7 天时达 12 μg/L 以上,第 14 天时迅速下降到 5 μg/L 左右,14 d 以后土壤溶液 Pb 含量变化不明显。这是因为鹰嘴豆等作物在生长过程中其根系不断分泌一些有机酸、氨基酸等物质,土壤在这些酸性物质的作用下磷释放不断增加,而磷可降低土壤中铅的生物有效性,提高土壤中铅的化学稳定性^[16,17]。

不分隔处理中,玉米-羽扇豆间作的土壤溶液 Pb 含量比玉米单作和玉米-鹰嘴豆间作时稍高,但是经统计学统计差异不显著。塑料分隔处理中,玉米-鹰嘴豆间作的土壤溶液 Pb 含量比玉米单作和玉米-羽扇豆间作时稍高,差异也不显著。尼龙网分隔处理中,不同间作方式间的土壤溶液 Pb 含量没有太大差异。

玉米根际土壤溶液 Cd 含量随作物生长时间延长而发生的动态变化情况与 Pb 不一样,随着时间的延长而不断地提高。各个处理中 Cd 含量从第 7 天的 1.5 μg/L 左右提高到第 28 天的 4.3 μg/L 以上(图 1)。这是因为随着作物的不断生长,其根系分泌的有机酸、氨基酸及一些酚类物质不断增加,这些物质与 Cd 作用下可增加 Cd 的移动性^[6,18-20],这可能促进 Cd 向土壤溶液淋溶。在不分隔处理中,玉米-羽扇豆间作的土壤溶液 Cd 含量比玉米单作时稍高,玉米-鹰嘴豆间作时最低,但是不同间作之间差异不显著。在塑料分隔处理中,玉米-羽扇

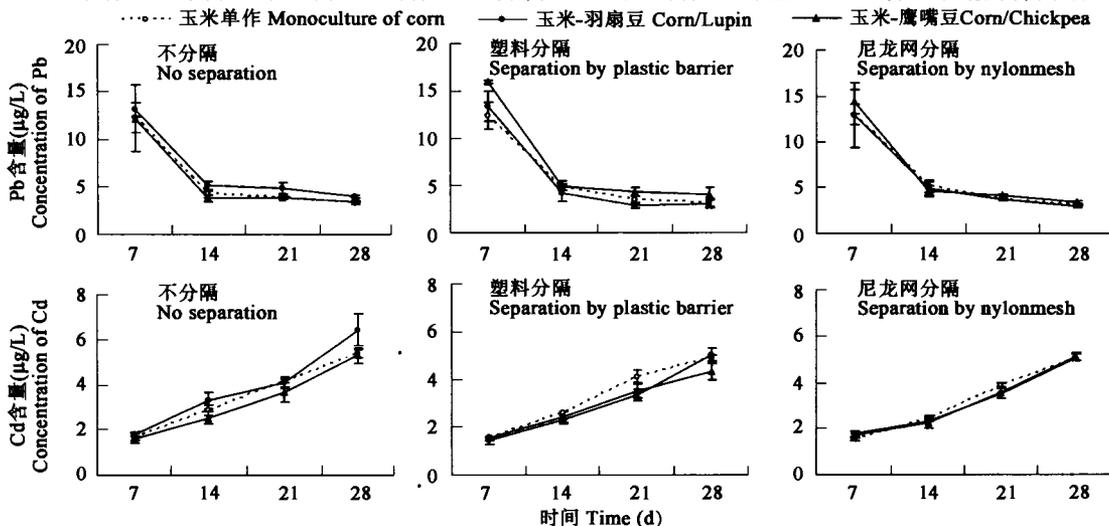


图 1 不同分隔/间作方式对玉米根际土壤溶液 Pb、Cd 含量的影响

Fig. 1 Effects of different separated/intercropping modes on Pb, Cd concentrations in rhizosphere soils solution for corn

豆间作和玉米-鹰嘴豆间作的土壤溶液 Cd 含量均比玉米单作时稍低,但是不同间作间差异也不显著。尼龙网分隔处理中,不同间作导致土壤溶液 Cd 含量变化差别不大。

羽扇豆和鹰嘴豆根际土壤溶液 Pb 和 Cd 含量的变化见图 2,从图中得出,土壤溶液 Pb 含量也是从第 7 天到第 14 天迅速下降,第 14 天后变化不大。第 7 天时,羽扇豆根际土壤溶液 Pb 含量在不分隔、塑料分隔和尼龙网分隔处理时分别为 17.55 $\mu\text{g/L}$ 、16.73 $\mu\text{g/L}$ 和 10.95 $\mu\text{g/L}$,到第 14 天时分别下降到 4.21 $\mu\text{g/L}$ 、5.36 $\mu\text{g/L}$ 和 4.58 $\mu\text{g/L}$ 。同样,在不分隔、塑料分隔和尼龙网分隔处理,鹰嘴豆根际土壤溶液 Pb 含量第 14 天时比第 7 天时分别降低 70.5%、59.3% 和 72.0%。羽扇豆和鹰嘴豆根际土壤溶液 Pb 含量有差异的原因可能是在不同分隔方式时这两种作物分泌有机酸、氨基酸和酚类物质的量不一样,其溶解土壤中磷的能力有差异,导致土壤中铅的化学稳定性不一样。羽扇豆和鹰嘴豆根际土壤溶液 Cd 含量与玉米一样也随着作物的生长而不断提高。而羽扇豆的提高幅度比鹰嘴豆稍高一些,这可能是羽扇豆根系分泌的有机酸及酚类物质更有利于 Cd 的迁移。

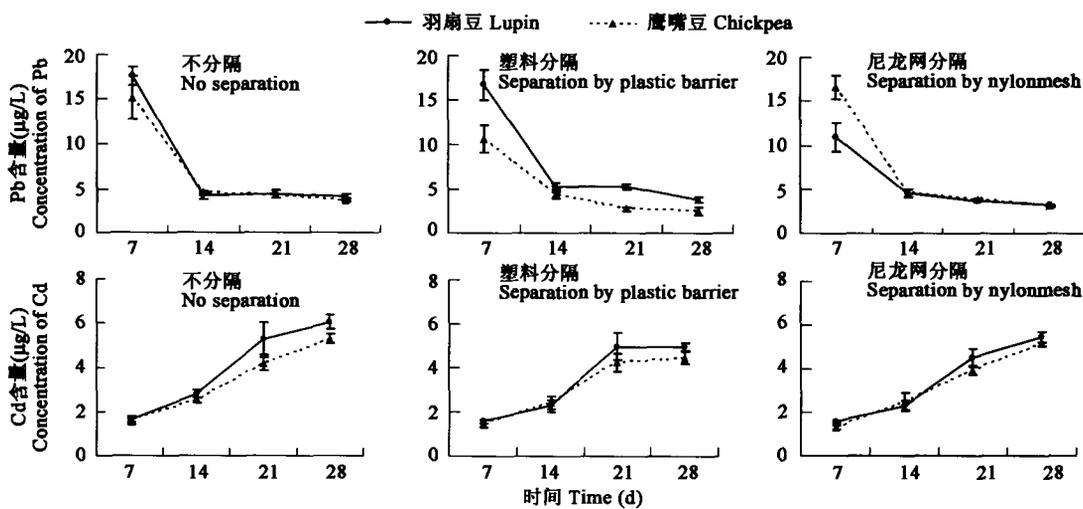


图 2 不同分隔方式对羽扇豆和鹰嘴豆根际土壤溶液 Pb、Cd 含量的影响

Fig. 2 Effects of different separated/intercropping modes on Pb, Cd concentrations in rhizosphere soils solution for lupin and chickpea

3 结论

(1) 不同分隔方式对玉米地上部生物量、不同间作方式对玉米地下部生物量以及作物总生物量影响达到显著水平 ($p < 0.05$)。不同分隔方式对羽扇豆和鹰嘴豆生物量影响没有达到显著水平;

(2) 不同间作和分隔方式均显著影响玉米地下部对 Pb 的吸收,但是不同间作方式对玉米地上部 Pb 含量影响不大。塑料分隔以及玉米-鹰嘴豆间作可降低玉米地下部对 Pb 的吸收;

(3) 不同分隔方式对玉米地下部 Cd 含量影响较大,但是不管是间作还是分隔方式均对玉米地上部 Cd 含量影响不大;不同分隔方式对羽扇豆地下部 Cd 含量以及鹰嘴豆地下部 Pb、Cd 含量有显著影响;

(4) 作物根际土壤溶液 Pb 含量随着作物的生长而不断降低,但 Cd 含量却不断提高。不同间作和分隔方式对作物根际土壤溶液 Pb、Cd 含量也有一定影响。

References:

- [1] Liao Z J. Environmental Chemistry of Microelements and Their Biology Effects. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1993. 299 ~ 302.
- [2] Liu H, Feng L, Chen M. Study on soil Cd contamination in diggings. Coloured Metal, 2004, 56(4): 47 ~ 48.
- [3] Song S Q, Liang L F, Zhou Y Z, et al. The situation and remedial measures of the cropland polluted by heavy metals from mining along the Dianjiang River. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(2): 152 ~ 155.
- [4] Zhou J L, Chen T B. Situation and prospect of research on heavy metal pollution in vegetables and soils for vegetable cultivation in urban areas of China. Journal of Hubei Agricultural College, 2002, 22(5): 476 ~ 480.

- [5] Wu H J, Li L, Zhang F S. The influence of interspecific interactions on Cd uptake by rice and wheat intercropping. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2003, 5(5): 43 ~ 46.
- [6] Huang Y Z, Zhu Y G, Tong Y P, Hu Y, Liu Y X. Absorption and accumulation of Cd in corn: effects by soil water contents. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2832 ~ 2836.
- [7] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient ~ use efficiency. *Plant and Soil*, 2003, 248: 305 ~ 312.
- [8] Ye Y L, Li L, Sun J H, Zhang F S. Effect of root separation on plant nitrogen uptake and soil nitrate nitrogen residual in fababean/maize intercropping. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 13 ~ 16, 53.
- [9] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 965 ~ 973.
- [10] El Dessougi H, Dreese A Z, Claassen N. Growth and phosphorus uptake of maize cultivated alone, in mixed culture with other crops or after incorporation of their residues. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166 (2): 254 ~ 261.
- [11] Li L, Tang C X, Rengel Z, Zhang F S. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source. *Plant and Soil*, 2003, 248: 297 ~ 303.
- [12] Zuo Y M, Li X L, Cao Y P, Zhang F S. Effect of maize/peanut intercropping on iron nutrition of peanut. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3 (2): 153 ~ 159.
- [13] Zuo Y M, Li X L, Wang Q J, Cao Y P, Zhang F S. Study on mechanisms of improvement of iron nutrition of peanut by intercropping with maize or wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(5): 489 ~ 495.
- [14] Zuo Y M, Zhang F S. Effects of peanut intercropping with different gramineous species and their intercropping model on iron nutrition of peanut. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(3): 300 ~ 306.
- [15] Lu R K. *Methods for Soils Agricultural Chemical Analysis*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [16] Chen S B, Zhu Y G, Yang J H. Mechanism of the effect of phosphorus on bioavailability of heavy metals in soil-plant systems. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(8): 1 ~ 7.
- [17] Zhu Y G, Chen S B, Yang J C. Effects of soil amendments on lead uptake by two vegetable crops from a lead-contaminated soil from Anhui, China. *Environment International*, 2004, 30 (3): 351 ~ 356
- [18] Krishnamurti G S R, Cieslinski G, Huang P M, VanRees K C J. Kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids: Implication in cadmium availability. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26 (1): 271 ~ 277.
- [19] Onyatta J O, Huang P M. Kinetics of cadmium release from selected tropical soils from Kenya by low-molecular-weight organic acids. *Soil Science*, 2003, 168 (4): 234 ~ 252.
- [20] Kumari K. Effect of cadmium, copper and zinc cations on the movement of different amino acids in silt loam soil. *Indian J Agric Chem*, 1988, 21: 171 ~ 179.

参考文献:

- [1] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应. 北京: 中国环境科学出版社, 1993. 299 ~ 302.
- [2] 刘辉, 冯流, 陈明. 矿区土壤镉污染研究. *有色金属*, 2004, 56(4): 47 ~ 48.
- [3] 宋书巧, 梁利芳, 周永章, 等. 广西刁江沿岸农田受矿山重金属污染现状与治理对策. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 152 ~ 155.
- [4] 周建利, 陈同斌. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状与展望. *湖北农学院学报*, 2002, 22(5): 476 ~ 480.
- [5] 吴华杰, 李隆, 张福锁. 水稻/小麦间作中种间相互作用对镉吸收的影响. *中国农业科技导报*, 2003, 5(5): 43 ~ 46.
- [6] 黄益宗, 朱永官, 童依平, 胡莹, 刘云霞. 土壤水分变化对玉米吸收积累镉的影响. *生态学报*, 2004, 24(12): 2832 ~ 2836.
- [8] 叶优良, 李隆, 孙建好, 张福锁. 地下部分隔对蚕豆/玉米间作氮素吸收和土壤硝态氮残留影响. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 13 ~ 16, 53.
- [9] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究. *中国农业科学*, 2005, 38(5): 965 ~ 973.
- [12] 左元梅, 李晓林, 王永歧, 曹一平, 张福锁. 玉米花生间作对花生铁营养的影响. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(2): 153 ~ 159.
- [13] 左元梅, 李晓林, 王秋杰, 曹一平, 张福锁. 玉米、小麦与花生间作改善花生铁营养机制的探讨. *生态学报*, 1998, 18(5): 489 ~ 495.
- [14] 左元梅, 张福锁. 不同间作组合和间作方式对花生铁营养状况的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(3): 300 ~ 306.
- [15] 鲁如坤主编. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [16] 陈世宝, 朱永官, 杨俊诚. 土壤-植物系统中磷对重金属生物有效性的影响机制. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(8): 1 ~ 7.