

间作对不同品种玉米和大叶井口边草吸收积累重金属的影响

秦 欢, 何忠俊, 熊俊芬*, 陈丽娟, 毕 云

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:采用土壤盆栽试验,研究砷(As)超积累植物大叶井口边草(*Pteris cretica* L.)与玉米品种云瑞6号(*Zea mays* L. Yunrui6)、云瑞8号(*Zea mays* L. Yunrui8)、云瑞88号(*Zea mays* L. Yunrui88)间作对其吸收积累重金属的影响。结果表明,不同玉米品种对大叶井口边草的生物量都有一定的抑制作用,均不同程度地降低了其生物量。与玉米间作显著提高了大叶井口边草地上部和根部对As、Cd的吸收,同时显著降低了地上部对Pb的吸收,而地下部对Pb的吸收却有明显增加,尤其以云瑞8号的间作效应最显著。与单作相比,间作能显著提高玉米各器官重金属含量,只有云瑞88号的茎中As含量明显降低,由单作的 $310.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至间作的 $145.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究初步表明,大叶井口边草与云瑞8号间作可提高修复As、Cd、Pb污染土壤的效率。

关键词:玉米;大叶井口边草;间作;重金属

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)07-1281-08

Effects of Intercropping on the Contents and Accumulation of Heavy Metals in Maize varieties and *Pteris cretica* L.

QIN Huan, HE Zhong-jun, XIONG Jun-fen*, CHEN Li-juan, BI Yun

(Faculty of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Intercropping as an effective approach has been proposed to improve soil contaminated by heavy metals. A soil pot-culture experiment was carried out to study the effects of intercropping on the heavy metals uptake by Maize varieties (*Zea mays* L. Yunrui6, *Zea mays* L. Yunrui8, *Zea mays* L. Yunrui88) with *Pteris cretica* L. (an arsenic-accumulating plant). The results showed that all tested maize varieties could reduce the biomass of *Pteris cretica* L., but there was no significant difference. Intercropping treatments significantly increased As and Cd concentration of the shoots and roots of *Pteris cretica* L. as well as Pb concentration in roots but significantly decreased Pb uptake in shoots. Intercropping *Pteris cretica* L. significantly increased the heavy metal content in different organs of maize, only the As uptake in the stem of *Zea mays* L. Yunrui88 was reduced from $310.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for mono-crop to $145.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Compared with monocropping method, intercropping of *Pteris cretica* L. and *Zea mays* L. Yunrui88 could significantly enhance the improvement efficiency of the soil contaminated by As, Cd, Pb in intercropping system.

Keywords: maize; *Pteris cretica* L.; intercropping; heavy metal

随着矿产资源的开发,矿区周围土壤重金属污染问题越来越受到国内外关注,而矿区周围农田土壤重金属污染问题,也随着经济发展越来越严重。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,其农田土壤污染主要集中在0~30 cm土层内,尤其是0~15 cm土层,Cd分别为国家土壤环境质量三级标准的60多倍和100多倍,Pb分别为1.72倍和2.72倍^[1]。云南省个旧市是我国著名的锡都,因盛产锡而闻名中外。郑国强等^[2]对个旧废弃矿及矿区农田土壤研究表明,个旧矿区废弃地重金属含量从高到低依次为Cd>Pb>As,其中Cd的地质累积指数最高,平均达到4.55以上,污

收稿日期:2011-12-29

基金项目:云南省科技厅应用基础研究基金资助项目(2008CD127)

作者简介:秦欢(1987—),女,河南焦作人,硕士研究生,主要从事污染土壤修复改良研究工作。E-mail:qinghuangxiang@163.com

* 通讯作者:熊俊芬 E-mail:xjunfen@hotmail.com

染等级为 5 级,属于极强度污染;Pb 的地质累积指数平均达到 3.08 以上,污染等级为 4 级,属于强度污染;As 的平均地质累积指数为 2.37,污染等级为 3 级,达到了中度污染以上。矿区周围农田土壤含有较高的重金属,而这些重金属可以被植物吸收,经过食物链进入人体,最终威胁人类健康^[3-4]。因此,矿区周围农田土壤的修复问题成为当今热点。

植物修复具有可在污染现场进行、成本相对低廉、并可改善土质等优点^[5-7],而间套作体系应用于污染土壤的修复,是一条有效的新途径^[8]。吴启堂等^[9]将重金属超富集植物与低累积作物玉米套种,超富集植物提取重金属的效率比单种超富集植物明显提高,同时玉米能够生产出符合卫生标准的食品或动物饲料或生物能源,是一条不需要间断农业生产、较为经济合理的治理方法。蒋成爱等^[10]研究表明,间作体系条件能促进超富集植物对相应重金属的吸收,蒋成爱等将东南景天与不同根系植物间作,发现与玉米和大豆间作,可以显著提高东南景天地上部对 Zn、Pb、Cd 3 种重金属的吸收。刘海军等^[11]研究发现,马唐与玉米间作可以相互促进对镉的吸收。关于超积累植物与农作物间作^[12-13]修复重金属污染土壤的研究,以及不同作物间套作^[14]对重金属的吸收有不少报道;不同玉米品种对重金属 Cd、Pb、Zn 和 Cu 累积与转运的品种差异也有研究报道^[15]。而关于超积累植物与同一作物玉米不同品种间作修复重金属污染土壤的研究,却报道不多。本试验通过 As 超积累植物大叶井口边草与不同的玉米品种间作,比较不同玉米品种对大叶井口边草吸收积累 As 及 Pb、Cd 的影响,以及大叶井口边草对玉米自身吸收重金属特征的影响,筛选修复效果较好的植物组合种植方式,以期对矿区 As、Cd 和 Pb 复合污染土壤的修复和治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤选自云南省个旧市某污染农田。土壤类型为黄棕壤,取 0~20 cm 表层土壤,室内风干、磨碎、混匀、过 3 mm 筛,其基本理化性状见表 1。由表 1 可

见,土壤总砷含量 $177.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是国家土壤污染标准值^[16]的 4 倍多;镉达到三级污染标准,铅接近三级标准。

自中科院昆明植物园采集大叶井口边草孢子,在温室大棚培育成幼苗,待其长出约 5 片真叶时进行试验处理。玉米种子由云南省农科院粮作所玉米研究中心提供,品种分别为云瑞 6 号(*Zea mays* L. Yunrui6)、云瑞 8 号(*Zea mays* L. Yunrui8)、云瑞 88 号(*Zea mays* L. Yunrui88)。

1.2 试验方法

采用直径 18 cm、高 20 cm 的 PVC 盆进行土壤盆栽试验。土壤混匀后添加底肥量为 $\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=150:100:150$,每盆装土 2.5 kg,并加水至田间持水量的 70%,平衡 2 周后,每盆种植两株植物,间作或单作的植物分别按对角线均匀种在盆内,试验处理分别为:大叶井口边草单作(D/D);云瑞 6 号单作(Y6/Y6);云瑞 8 号单作(Y8/Y8);云瑞 88 号单作(Y88/Y88);大叶井口边草与云瑞 6 号间作(D/Y6);大叶井口边草与云瑞 8 号间作(D/Y8);大叶井口边草与云瑞 88 号间作(D/Y88),共 7 个处理。每个处理设 4 个重复,共 28 盆。挑选大小一致的大叶井口边草(5 至 6 片真叶,高约 10 cm)移入盆中,玉米种子经 10% H_2O_2 进行表面消毒 10 min 后浸泡 8 h 直接播种。每隔 2~3 d 给土壤浇水,保持土壤的湿润。经 3~4 d 玉米种子发芽,至玉米两叶一心时(约 10 d,苗高 13~15 cm)间苗,单作大叶井口边草与玉米每盆各留两株幼苗,间作留一株玉米和一株大叶井口边草,保证两株植物均匀分布在盆内两侧。2011 年 5 月 15 日播种,2011 年 8 月 15 日收获大叶井口边草及玉米。所有处理采取一致的肥水管理措施。

1.3 样品收集与分析测定

收获时,单作的大叶井口边草和玉米每盆植物收集为一个样;间作处理同一盆中不同植物分别收集为一个样品;收割时大叶井口边草分为地上和地下两部分,玉米分为根、茎、叶三部分。样品分别用自来水冲洗干净后再用去离子水冲洗 3~4 次,室内晾干后称其鲜重。植物样品装入牛皮纸信封后在 105 °C 下杀青

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the experimental soil

pH	有机质/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
							As	Pb	Cd
5.89	29.16	0.61	0.99	14.21	10.05	40.35	177.06	467.9	1.01

30 min, 在 70 ℃ 下烘干 48 h 后称干重。烘干样品用粉碎机全部粉碎、混匀后装入密封袋内备测。

称取 0.500 0 g 植物样品, 用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消煮, 原子吸收分光光度计 (TAS-990) 测定铅、镉含量, 砷的测定用二乙基二硫代氨基甲酸银法^[17]。

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件对试验数据进行方差分析, 显著性差异水平 P 取 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同处理植物的生物量

2.1.1 间作方式对大叶井口边草生物量的影响

从表 2 可以看出, 间作玉米对大叶井口边草的生物量具有一定的抑制作用。大叶井口边草与云瑞 88 号、云瑞 6 号间作时, 其生物量均低于大叶井口边草单作, 大叶井口边草单作生物量是 $2.06 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 间作云瑞 88 号、云瑞 6 号生物量分别为每株 0.89、1.29 g, 但降低幅度没有达到显著水平 ($P>0.05$); 与云瑞 8 号间作大叶井口边草根生物量增加 16%。间作玉米对大叶井口边草的生长产生一定的抑制, 但对大叶井口边草地上部生物量的影响并未达到显著水平。

表 2 间作不同品种玉米对大叶井口边草生物量的影响 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)

Table 2 Effects of intercropping on *Pteris cretica* L. biomass ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)

处理	地上部	根部	整株
D//D	1.37±0.46a	0.68±0.38a	2.06±0.84a
D//Y6	0.74±0.30a	0.59±0.32a	1.29±0.57a
D//Y8	0.96±0.38a	0.79±0.25a	1.79±0.65a
D//Y88	0.62±0.19a	0.25±0.07a	0.89±0.18a

注: 表中同列相同小写字母表示 $P>0.05$ 水平差异不显著, 表中数据为 3 次重复平均值±标准差。

Note: Same small letters in the same column meant no significant difference at 0.05 level among treatments, data are means of 3 replications (mean±SD).

2.1.2 不同处理玉米的生物量

由表 3 来看, 与大叶井口边草间作增加了玉米叶和根的生物量, 茎部生物量也有明显提高; 云瑞 6 号、云瑞 88 号与大叶井口边草间作时生物量高于单作, 分别达到单作的 1.74、1.67 倍; 云瑞 8 号与大叶井口边草间作生物量也明显高于单作。在所有间作玉米品种中, 云瑞 6 号生物量最高 (每株 34.32 g), 明显大于其他两个玉米品种, 其生长过程可能对大叶井口边草产生了营养竞争作用。与表 2 相比, 说明大叶井口边草与玉米间作, 对玉米的生物量有促进作用, 却抑制

表 3 不同处理对玉米生物量的影响 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)

Table 3 Effect of different treatments on maize biomass ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)

处理	根	茎	叶	整株
Y6//Y6	2.51±0.12c	10.84±2.94a	6.39±0.48a	19.74±2.92ab
D//Y6	4.34±0.39a	19.17±6.89a	10.81±1.17a	34.32±7.96a
Y8//Y8	2.67±0.39c	11.88±3.24a	5.46±0.75b	20.00±3.99ab
D//Y8	3.65±0.21ab	18.47±2.28a	8.42±0.91ab	30.54±3.08ab
Y88//Y88	2.55±0.12c	7.35±1.24a	5.12±0.48b	15.02 ±1.67b
D//Y88	3.27±0.36bc	14.45±6.12a	7.36±2.00ab	25.09±8.12ab

注: 表中同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著, 表中数据为 3 次重复平均值±标准差, 下同。

Note: Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among treatments, data are means of 3 replications (mean±SD). The same below.

了大叶井口边草的生长。

2.2 不同处理植物地上部对重金属的提取量

不同种植方式下植物地上部对 3 种重金属 As、Pb 和 Cd 的吸收量见表 4。间作云瑞 8 号显著提高了大叶井口边草地上部对 As 的吸收量 ($P<0.05$), 与单作相比提高幅度达 41%, 而间作云瑞 6 号、云瑞 88 号明显降低了大叶井口边草地上部对 As 的吸收量; 间作玉米均显著降低了大叶井口边草地上部对 Pb 的吸收量, 降低幅度为 43%~46%; 间作云瑞 8 号提高了大叶井口边草地上部对 Cd 的吸收, 但间作云瑞 6 号、云瑞 88 号大幅度降低了大叶井口边草地上部对 Cd 的吸收, 尤其是间作云瑞 88 号, 降低幅度为 62%, 达到显著水平。间作玉米地上部对 As、Pb、Cd 的吸收量显著高于单作玉米地上部对 As、Pb、Cd 的吸收 ($P<0.05$), 云瑞 6 号、云瑞 8 号和云瑞 88 号在间作条件下对 As 的吸收量分别为单作的 2.43、5.02 倍和 1.48 倍, 对 Pb 的吸收量分别为单作的 6.26、6.08 倍和 1.79 倍, 对 Cd 的吸收量分别为单作的 3.8、1.46 倍和 3.4 倍。总的来看, 间作比单作更有利于 As-Pb-Cd 复合污染土壤的修复。

2.3 不同处理植物的重金属含量

2.3.1 间作不同玉米品种对大叶井口边草重金属含量的影响

方差分析显示 (图 1), 与玉米间作处理大叶井口边草地上部的 As、Cd 吸收量差异显著 ($P<0.05$)。与云瑞 6 号、云瑞 8 号和云瑞 88 号间作, 地上部 As 比大叶井口边草单作分别增加了 106%、116% 和 111%, 而 Cd 比单种分别增加了 103%、50% 和 164%, 其中与云瑞 8 号间作的大叶井口边草地上部 As 吸收最高, 地下部吸收 Pb 最高。在与玉米间作处理下大叶井口边

表 4 不同种植方式植物地上部对重金属的提取量($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 4 Uptake of heavy metals in shoots of tested plants under different planting conditions($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	大叶井口边草			玉米		
	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
D//D	513.65 $\pm$ 70.86b	83.44 $\pm$ 8.37a	3.04 $\pm$ 0.01a			
Y6//Y6				73.57 $\pm$ 6.48e	10.85 $\pm$ 0.79d	0.45 $\pm$ 0.09d
Y8//Y8				140.22 $\pm$ 29.37cd	12.89 $\pm$ 0.67d	0.56 $\pm$ 0.01d
Y88//Y88				457.19 $\pm$ 16.29bc	12.69 $\pm$ 1.02d	2.41 $\pm$ 0.34b
D//Y6	327.31 $\pm$ 21.33b	45.35 $\pm$ 6.08b	2.63 $\pm$ 0.01a	178.86 $\pm$ 18.52cd	67.89 $\pm$ 1.52b	1.71 $\pm$ 0.06c
D//Y8	725.52 $\pm$ 80.52a	47.50 $\pm$ 12.09b	3.34 $\pm$ 0.15a	703.99 $\pm$ 16.67a	78.41 $\pm$ 0.58a	0.82 $\pm$ 0.06d
D//Y88	135.01 $\pm$ 30.52c	45.31 $\pm$ 21.07b	1.16 $\pm$ 0.13b	676.95 $\pm$ 36.43b	22.69 $\pm$ 1.08c	8.19 $\pm$ 0.04a

草地上部的 Pb 吸收显著降低,其中与云瑞 8 号间作的大叶井口边草地上部 Pb 吸收最低,为 $194.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,只有大叶井口边草单作的 56%;其次是与云瑞 88 号间作,大叶井口边草地上部的 Pb 吸收量为 $243.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是单作的 71%;与云瑞 6 号间作处理的相应值分别为 $262.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 76%。

大叶井口边草根重金属含量同样存在明显的间作效应,与玉米 3 个品种间作时,除云瑞 88 号 Pb 含量外,根部 As、Pb 和 Cd 吸收显著高于大叶井口边草单作 ($P<0.05$)。与云瑞 6 号间作大叶井口边草根 As、Pb 和 Cd 含量分别为单作的 2.43、9.08 倍和 4.71 倍;与云瑞 8 号间作的相应值分别为 1.89、10.62 倍和 5.99 倍;与云瑞 88 号间作的相应值分别为 2.22、1.83 倍和 6.98 倍。综合 3 种重金属的吸收情况来看,大叶井口边草与云瑞 88 号的间作效果较好。

2.3.2 不同处理对玉米各器官重金属含量的影响

从图 2 可以看出,与大叶井口边草间作提高了玉米根、茎和叶重金属含量,只有云瑞 88 号在与大叶井口边草间作后,茎 As 含量显著低于单作,只有单作的 47%。云瑞 6 号、云瑞 8 号和云瑞 88 号,在与大叶井口边草间作处理下,茎 As 吸收最高的是云瑞 6 号,其次为云瑞 8 号,而云瑞 88 号在单作处理下茎 As 含量显著高于间作,说明大叶井口边草间作玉米对玉米茎 As 的吸收有促进和抑制之分;与大叶井口边草间作后显著地提高了玉米 3 个品种根、叶对 As 的吸收,其中对云瑞 6 号的间作效应最显著;玉米 3 个品种各器官 As 含量单间作大致表现为根>茎>叶,只有云瑞 88 号单作时表现为茎>根>叶。玉米根、茎和叶对 Pb、Cd 的吸收,在与大叶井口边草间作时均得到显著提高;大叶井口边草则在与玉米间作后地上部 Pb 含量显著下降(图 1),说明玉米在提高自身对 Pb 吸收的同时,抑制了大叶井口边草地上部对 Pb 的吸收。玉米 3 个

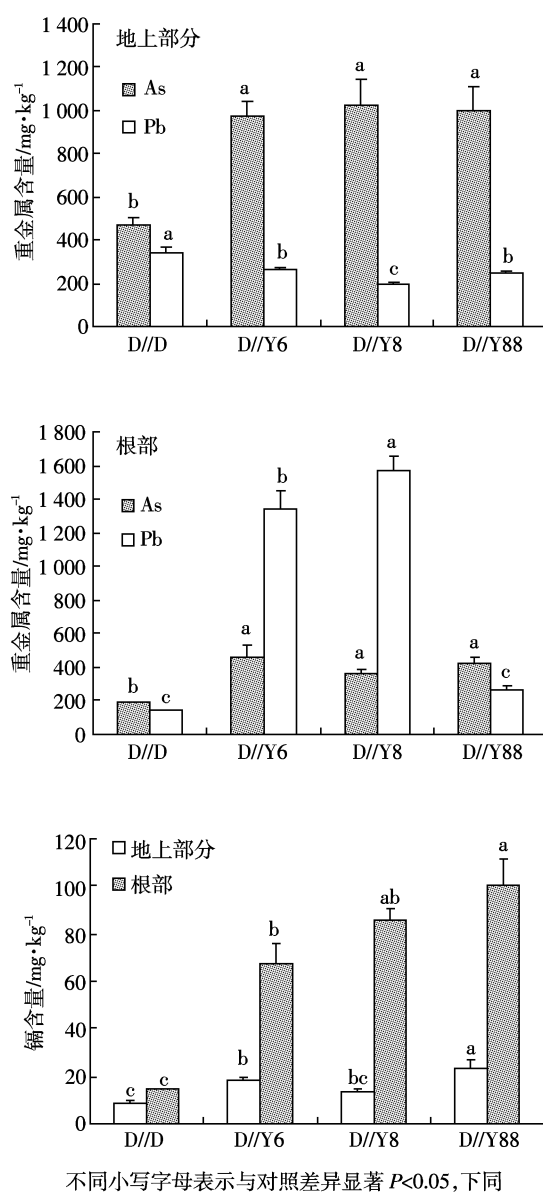


图 1 间作不同玉米品种对大叶井口边草重金属含量的影响
Figure 1 Effects of different intercropping modes on heavy metal concentrations of *Pteris cretica* L.

品种各器官 Pb 含量单间作大致表现为叶>根>茎,只有云瑞 88 号间作时表现为茎>叶>根;云瑞 88 号与大叶井口边草间作后茎 Cd 含量为 $54.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是单作的 9.64 倍,显著高于其他两个玉米品种,玉米 3 个品种各器官 Cd 含量单间作大致表现为根>叶>茎。

2.4 不同处理植物的富集系数和转运系数

2.4.1 大叶井口边草与玉米的富集系数

由表 5 可见,不论单作还是间作,大叶井口边草对 As 的富集系数明显高于对 Pb、Cd 的富集系数,间作玉米 Y8 和 Y88 显著提高了大叶井口边草对 As 的富集系数,只有与云瑞 6 号间作差异不显著 ($P>0.05$),说明间作玉米对大叶井口边草 As 富集量有促进作用;大叶井口边草对 Pb 的富集系数在与玉米间

作后显著低于单作,间作对大叶井口边草富集 Pb 产生抑制作用,其中云瑞 6 号的抑制作用最小,其次是云瑞 88 号;与玉米间作明显提高了大叶井口边草对 Cd 的富集系数,其中与云瑞 88 号间作提高幅度达到单作的 61%,达到显著水平 ($P<0.05$)。由表 5 来看,大叶井口边草对 Pb、Cd 的富集系数均小于 1,而对 As 的富集系数远远大于 1。

与大叶井口边草间作对玉米 As 富集系数起到抑制作用,只有云瑞 6 号在与大叶井口边草间作后富集系数得到提高,间作约为单作的 1.4 倍;间作大叶井口边草显著降低了云瑞 88 号对 Pb 的富集系数,间作时富集系数为 0.079,只有单作的 35% 左右,而云瑞 6 号和云瑞 8 号对 Pb 的富集系数则在与大叶井口边草间作后显著提高;间作大叶井口边草对玉米 Cd 的富集系数也产生明显影响,其中云瑞 8 号在间作大叶井口边草后 Cd 富集系数明显小于单作,而云瑞 6 号与云瑞 88 号在间作后 Cd 富集系数却显著高于单作。这说明,间作大叶井口边草对玉米吸收累积重金属有促进和抑制之分。

2.4.2 大叶井口边草与玉米的转运系数

从表 6 可以看出,与玉米间作显著提高了大叶井口边草对 As 的转运系数,其中与云瑞 8 号间作提高幅度最大,其次为与云瑞 88 号间作,最后是与云瑞 6 号间作。间作玉米对大叶井口边草对 Pb 的转运系数也有显著影响,与云瑞 88 号间作显著提高了大叶井口边草对 Pb 的转运系数,提高幅度为单作的 67%;间作云瑞 6 号、云瑞 8 号时大叶井口边草对 Pb 的转运系数分别降低至单作的 43% 和 53%;大叶井口边草对 Cd 的转运系数同 Pb 转运系数相似,在与云瑞 88 号间作时提高幅度达到显著水平,而与云瑞 6 号和云瑞 8 号间作则都有明显降低,但降低幅度未达到显著水平 ($P>0.05$)。

间作大叶井口边草显著提高了云瑞 8 号对 As 的转运系数,间作处理的转运系数为单作的 1.19 倍,而云瑞 6 号、云瑞 88 号与大叶井口边草间作后对 As 的转运系数显著低于单作 ($P<0.05$);与大叶井口边草间作显著提高了玉米对 Pb 的转运系数,其中云瑞 88 号在间作条件下提高幅度最大,间作时转运系数为单作的 4.86 倍;云瑞 6 号间作大叶井口边草后对 Cd 的转运系数显著降低,只有单作的 65%,而与大叶井口边草间作却显著提高了云瑞 8 号、云瑞 88 号对 Cd 的转运系数,其中云瑞 88 号间作后 Cd 转运系数是单作的 4.41 倍。

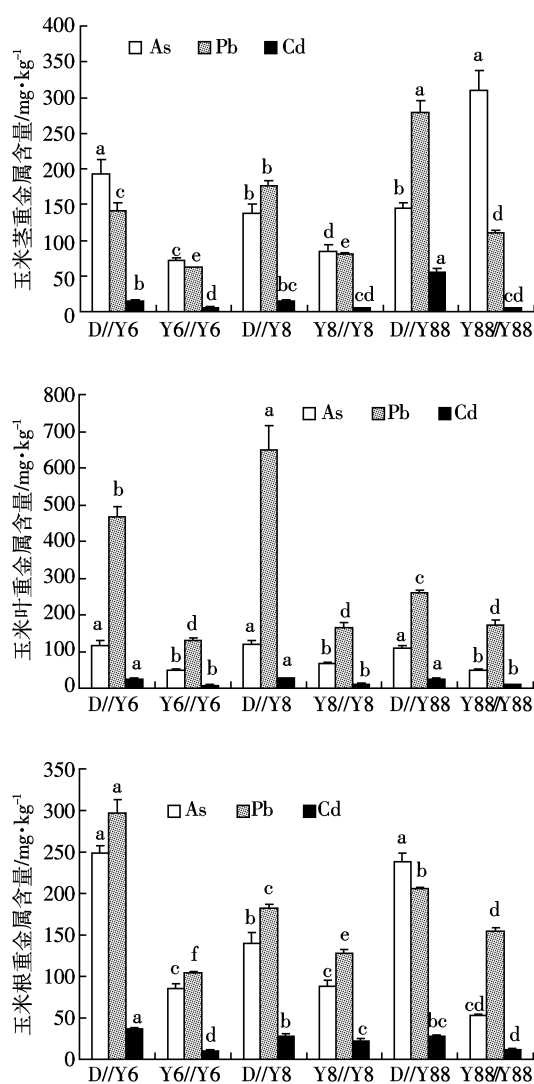


图2 间作大叶井口边草对玉米品种各器官吸收重金属的影响

Figure 2 Effects of intercropping *Pteris cretica* L. on heavy metal concentrations in different organs of maize

表 5 植物的富集系数
Table 5 Bioconcentration factor of the plants

处理	大叶井口边草			玉米		
	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
D//D	16.554±0.440b	0.231±0.004a	0.023±0.001b			
Y6//Y6				0.750±0.010b	0.088±0.005d	0.048±0.002c
Y8//Y8				0.837±0.029b	0.148±0.001c	0.087±0.001b
Y88//Y88				1.272±0.274a	0.228±0.001a	0.049±0.001c
D//Y6	17.213±0.531b	0.103±0.001b	0.024±0.002b	1.045±0.029ab	0.206±0.006a	0.088±0.001b
D//Y8	20.290±0.391a	0.010±0.003d	0.026±0.003b	0.730±0.020b	0.234±0.005a	0.083±0.004b
D//Y88	19.080±0.021a	0.069±0.001c	0.037±0.001a	0.955±0.035ab	0.079±0.004d	0.123±0.002a

表 6 植物的转运系数
Table 6 Translocation factor of the plants

处理	大叶井口边草			玉米		
	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
D//D	14.256±0.045d	1.760±0.021b	1.947±0.001b			
Y6//Y6				10.259±0.596d	19.496±0.244e	10.988±0.020b
Y8//Y8				11.550±0.150c	24.474±0.106c	3.868±0.064e
Y88//Y88				27.774±0.002a	14.274±0.018f	6.832±0.108c
D//Y6	15.803±0.002c	0.753±0.002d	1.935±0.001b	7.821±0.081e	21.264±0.276d	7.090±0.080c
D//Y8	18.401±0.030a	0.931±0.001c	1.857±0.049b	13.800±0.020b	55.584±1.016b	4.914±0.154d
D//Y88	17.842±0.001b	2.932±0.001a	2.830±0.010a	8.186±0.294e	69.352±0.027a	30.161±0.005a

3 讨论

3.1 植物在间作条件下的生长反应

本试验表明,间作玉米对大叶井口边草的生长有明显的抑制作用,同时显著增加了玉米的生物量。这可能是因为与玉米间作降低了大叶井口边草对养分吸收的竞争力,而个体较大的玉米则占据了优势,种间竞争机制发挥作用抑制了大叶井口边草的生长。叶方等^[18]研究了红壤旱地不同农田生态系统结构对玉米病虫害的影响,结果表明,间作、套种可减轻玉米病虫害。玉米生物量增加可能是因为病虫害得到控制,收获时只有少量玉米出现轻微中毒现象,并无病虫害。李潮海等^[19]连续两年(1998—1999)根据不同基因型玉米株形的差异和对病虫害、倒伏以及水分胁迫适应性的差异进行了组合间作试验,结果表明,合理间作的复合群体后期抗逆能力明显提高,其抗病虫、抗倒伏能力和对干旱的适应能力增强,说明间作对植物生物量具有促进或抑制的作用。因此,进行间套作要选择合适的植物种类进行种植,以达到促进超积累植物生物量的效果。

3.2 间作后植物吸收积累重金属的变化

从测定结果来看(图1),间作玉米可以显著提高

大叶井口边草地上部和根部对 As、Cd 的吸收,Pb 的吸收量则是大叶井口边草地上部单作大于与玉米间作,且主要集中在根部;而富集系数和转运系数,除了 As,并没有呈相应提高的趋势。有研究显示,植物根系可以分泌质子,从而促进植物对土壤中元素的活化和吸收,在根细胞质膜上专一性金属还原酶的作用下,土壤中高价金属离子被还原,溶解性增加。这可能是间作玉米促进大叶井口边草大量吸收重金属的原因。吴启堂等^[9]研究显示,将重金属超富集植物与低累积作物玉米套种,超富集植物提取重金属的效率比单种超富集植物明显提高。卫泽斌等^[20]研究也表明,间套作方式可以提高植物对重金属的提取效率,这种方式也可以替代螯合诱导植物修复中的化学螯合剂。

富集系数等于植物体内重金属浓度与土壤中重金属的浓度之比,是描述化学物质在生物体内累积趋势的重要指标,在一定程度上反映了不同元素在土壤-植物系统中的迁移能力^[21]。由表5看出,大叶井口边草对 Pb、Cd 的富集系数均小于1,而对 As 的富集系数均大于16,这与韦朝阳、陈同斌等^[22]的研究结果相符合,大叶井口边草是 As 超累积植物。转运系数等于植物地上部重金属浓度和生物量的乘积与其地下

部重金属浓度和生物量的乘积之比,用来评价植物将重金属从根部向地上部的运输和富集能力。比较表5、表6可以看出,间作处理的大叶井口边草根 Pb、Cd 的累积明显大于地上部,说明这两种重金属主要集中在大叶井口边草的根部,这也是间作处理大叶井口边草 Pb、Cd 转运系数降低的主要原因。

试验结果显示,间作大叶井口边草对玉米各器官的重金属吸收有促进作用,但对3种重金属的吸收累积并没有呈现器官间的一致性;间作大叶井口边草与玉米单作对重金属的转运系数,则因重金属种类和玉米品种不同而异。由表6可见,间作大叶井口边草除云瑞8号外,云瑞6号、云瑞88号对As的转运系数都呈显著降低,特别是云瑞88号,单作转运系数(27.774)为间作(8.186)的3.4倍,由于大叶井口边草是As超积累植物,可能在一定程度上阻碍了玉米根部As向地上部的转运;玉米本身作为Pb低积累作物,当与大叶井口边草间作以后,转运系数均显著提高,提高幅度最大的是云瑞88号,间作(69.352)为单作(14.274)的4.86倍,这可能是因为该土壤重金属背景值本身就比较,农作物的耐性与转运机制也比别的省份强;玉米对Cd的转运系数,只有云瑞6号在间作处理时低于单作,其他两种则表现为单作低于间作,特别是云瑞88号,间作转运系数为单作的4.41倍。

玉米富集系数的变化也表现为与大叶井口边草间作大于单作。曹莹等^[23]发现,铅、镉共存时,铅可以促进镉在玉米体内的吸收,并认为铅的存在可能会提高镉对玉米的毒性,而镉则呈现抑制玉米对铅吸收的趋势。这3个品种玉米对3种重金属的富集系数和转运系数大幅高于前人试验^[11-13,24-25],与李凝玉等^[21]研究结果也不一致,其原因还有待进一步研究。

4 结论

将大叶井口边草与玉米不同品种间作后,可以大幅度提高大叶井口边草对As的累积量,而间作后对玉米重金属吸收的影响因重金属种类和玉米品种而异。从间作对大叶井口边草和玉米品种生物量的增加,大叶井口边草对As、Pb、Cd的提取量和玉米品种对As、Pb的提取量来看,间作的3个玉米品种以云瑞8号间作效果最佳。再结合富集系数和转运系数综合分析,表明云瑞8号可以作为As、Pb、Cd污染土壤的修复植物与大叶井口边草间作应用。因此,针对云南省个旧农田土壤问题,如果选择大叶井口边草为主

修复植物,可以与云瑞8号间作,从而有效提高对As、Pb、Cd的清除效率。但云瑞8号玉米是否可作为粮食食用或作为饲料,还要进行深入研究。

参考文献:

- [1] 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[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):152-155. SONG Shu-qiao, LIANG Li-fang, ZHOU Yong-zhang, et al. The situation and remedial measures of the cropland polluted by heavy metals from mining along the Diaojiang Rive[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 152-155.
- [2] 郑国强,方向京,张洪江,等.云南省个旧锡矿区重金属污染评价及植被恢复初探[J].水土保持通报,2009,29(6):208-212. ZHENG Guo-qiang, FANG Xiang-jing, ZHANG Hong-jiang, et al. Heavy metal pollution and vegetation restoration in Gejiu Tin Deposit in Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(6): 208-212.
- [3] Eapen S, D'Souza S F. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals[J]. *Biotechnology Advances*, 2005, 23: 97-114.
- [4] Singh O V, Labana S, Pandey G Budhiraja, et al. Phytoremediation: An overview of metal/lion decontamination from soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 61: 405-412.
- [5] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, 1: 81-126.
- [6] McGrath S P, Zhao F J, Lombi E. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides[J]. *Advances in Agronomy*, 2002, 75: 1-56.
- [7] Lone M I, He Z L, Stoffella P J, et al. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives[J]. *Zhejiang Univ Sci B*, 2008, 9(3): 210-220.
- [8] 卫泽斌,郭晓方,丘锦荣,等.间套作体系在污染土壤修复中的应用研究进展[J].农业环境科学学报,2010,29(增刊):267-272. WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, QIU Jin-rong, et al. Innovative technologies for soil remediation: Intercropping or co-cropping[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl): 267-272.
- [9] WU Q T, Samake M, Mo C H, et al. Simultaneous sludge stabilization and metal removal by metal hyper-accumulator plants[R]. Transactions of 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, 2002: 355.
- [10] 蒋成爱,吴启堂,吴顺辉,等.东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J].中国环境科学,2009,29(9):985-990. JIANG Cheng-ai, WU Qi-tang, WU Shun-hui, et al. Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9): 985-990.
- [11] 刘海军,陈源泉,隋鹏,等.马唐与玉米间作对镉的富集效果研究初探[J].中国农学通报,2009,25(15):206-210. LIU Hai-jun, CHEN Yuan-quan, SUI Peng, et al. The uptake and accumulation effect of Cd in the Maize-crabgrass in intercropping system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(15): 206-210.
- [12] 黑亮,吴启堂,龙新宪,等.东南景天和玉米套种对Zn污染污泥

- 的处理效应[J]. 环境科学, 2007, 28(4):852-858.
- HEI Liang, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Effect of co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):852-858.
- [13] 王激清, 茹淑华, 苏德纯, 等. 印度芥菜和油菜互作对各自吸收土壤中难溶态镉的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5):890-894.
- WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Effects of Indian mustard and oilseed rape CO-cropping on absorbing insoluble cadmium of contaminated soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5):890-894.
- [14] 熊国焕, 高建培, 王宏宾, 等. 间作条件下螯合剂对龙葵和大叶井口边草吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4):666-676.
- XIONG Guo-huan, GAO Jian-pei, WANG Hong-bin, et al. Effects of chelators on the uptake of heavy metals by *Solanum nigrum* and *Pteris cretica* var. *Nervosa* growing in an intercropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4):666-676.
- [15] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4):367-371.
- GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, QIU Jin-rong, et al. Differences between corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metal[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):367-371.
- [16] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 1995.
- State Bureau of Environmental Protection, State Bureau of Technical Supervision. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils [S]. 1995.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3rd. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] 叶 方, 黄国勤. 红壤旱地不同农田生态系统结构对玉米病虫害的影响[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1):50-51.
- YE Fang, HUANG Guo-qin. Maize diseases and pests of field ecosystems under different structures on dryland red soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1):50-51.
- [19] 李潮海, 苏新宏, 孙敦立, 等. 不同基因型玉米间作复合群体生态生理效应[J]. 生态学报, 2002, 22(12):2096-2103.
- LI Chao-hai, SU Xin-hong, SUN Dun-li. Ecophysiological characterization of different maize (*Zea mays* L.) genotypes under Mono-or intercropping conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12):2096-2103.
- [20] 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪, 等. 利用套种和混合添加剂修复重金属污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1262-1263.
- WEI Ze-bin, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil with mixed chelators in co-crop system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1262-1263.
- [21] 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 等. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6):1369-1373.
- LI Ning-yu, LI Zhi-an, DING Yong-zhen, et al. Effects of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6):1369-1373.
- [22] 韦朝阳, 陈同斌, 黄泽春, 等. 大叶井口边草: 一种新发现的富集种的植物[J]. 生态学报, 2002:777-778.
- WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin, HUANG Ze-chun, et al. Cretan brake (*Pteris cretica* L.): An arsenic-accumulating plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002:777-778.
- [23] 曹 莹, 刘 洋, 王国骄, 等. 铅和镉复合胁迫下玉米对铅吸收特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(3):91-95.
- CAO Ying, LIU Yang, WANG Guo-jiao, et al. Differences in lead and cadmium concentrations among plant tissues of 25 Maize cultivars under the combined stress of lead and cadmium[J]. *Journal of Maize Science*, 2007, 15(3):91-95.
- [24] 黄益宗, 朱永官, 胡 莹, 等. 玉米和羽扇豆、鹰嘴豆间作对作物吸收积累 Pb、Cd 的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(5):1478-1485.
- HUANG Yi-zong, ZHU Yong-guan, HU Ying, et al. Absorption and accumulation of Pb, Cd by corn, lupin and chickpea in intercropping systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1478-1485.
- [25] 孙向辉, 滕 应, 骆永明, 等. 多氯联苯复合污染农田土壤的植物协同修复效应[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9):1281-1286.
- SUN Xiang-hui, TENG Ying, LUO Yong-ming, et al. Combined phytoremediation effect of several plants in PCBs contaminated farmland soils[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9):1281-1286.