

玉米和不同蔬菜间套模式对重金属 Pb、Cu、Cd 累积的影响研究

王吉秀, 祖艳群*, 李元, 湛方栋, 秦丽, 杨静, 傅志兴

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要 通过田间小区试验,研究了玉米、青花、白菜和油毛菜间作及套作马铃薯、豌豆和西葫芦对重金属 Cd、Pb、Cu 累积含量的影响。结果表明,玉米与油毛菜间作与单作相比较,玉米中 Cd 含量显著下降了 72.9%,油毛菜中 Cu 含量显著下降了 49.8%,套作西葫芦时 Pb 含量显著下降了 56.8%。间套作条件下,显著降低了重金属 Cd、Pb、Cu 在玉米和蔬菜可食部分的累积含量,与单作相比平均下降了 30%、37.9%和 28.6%。玉米和不同蔬菜间套模式是抑制作物可食部分吸收累积重金属 Pb、Cu、Cd 含量的有效措施。

关键词 玉米,蔬菜,间套模式,Pb,Cu,Cd,累积

中图分类号 S181 文献标志码 A 文章编号 1672-2043(2011)11-2168-06

Effects of Maize and Vegetable Intercropping System on Accumulation of Pb, Cu and Cd in Plants

WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun*, LI Yuan, ZHAN Fang-dong, QIN Li, YANG Jing, FU Zhi-xing

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

Abstract Field trials were carried out to investigate the effects of accumulation of Pb, Cu and Cd in plants under maize and vegetables intercropping system, such as cauliflower, cabbage, lettuce, pea, potato and pumpkin. The results showed that contents of Cd in maize, Cu in lettuce and Pb in pumpkin decreased by 72.9%, 49.8% and 56.8% in intercropping system compared with monoculture system. The contents of Cd, Pb and Cu in the edible part of maize and vegetables decreased 30%, 37.9% and 28.6% in intercropping system. It is an effective measurement to control the content of Cd, Pb and Cu in edible part of maize and vegetables using intercropping patterns.

Keywords maize; vegetable; intercropping system; Pb; Cu; Cd; accumulation

随着工业化过程的加快,工业“三废”对土壤环境质量的影响日益严重,农业用地的土壤质量关系到农产品的安全性和农田土壤环境的生态作用^[1],目前,农业生态环境的工业污染已越来越受到人们的关注^[2]。土壤作为各种工业废弃物的汇总地,各种污染物尤其是重金属,在土壤中不断累积,最终可通过土壤-作物生态系统而危害人类健康^[3]。重金属污染土壤农田的安全利用是当前我国急需解决的问题之一。利用生物多样性持续控制作物受外界条件的胁迫,是近年国内外研究的热点^[4]。间套作作为我国传统农业的精髓,是增加农田生物多样性的有效措施。利用间作套种持续控

制重金属的累积在国内外已有很多成功的范例^[5-7],但研究主要是利用筛选的超累积植物与农作物间套作,转移土壤中的重金属到超累积植物中,达到减少农作物吸收累积重金属含量的目的。由于超累积植物存在生长慢、周期长、生物量小、无经济收入等不足,直接影响着间套作修复土壤重金属污染的效率,这对于我国大部分土壤受重金属低度污染是不适用的。因此,本文以云南普遍种植的玉米和蔬菜间套作体系为对象,通过玉米与不同蔬菜间套作对可食部分重金属累积的含量研究,以期应用生物多样性控制重金属污染,提高玉米和蔬菜品质,实现优质农产品可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

晋宁县上蒜乡位于云南省中部,坐落在滇池东南

收稿日期 2011-05-14

基金项目:国家重大科技水专项滇池项目第四课题(2009ZX07102-004),云南省教育厅基金项目(2010C245)

作者简介:王吉秀(1975—),女,云南陆良县人,讲师,硕士,主要从事土壤污染和环境生态学研究。

*通讯作者:祖艳群 E-mail: zuyanqun@yahoo.com.cn

岸,三面环山,一面是平坝。地处东经 $120^{\circ}13' \sim 120^{\circ}52'$, 北纬 $24^{\circ}24' \sim 24^{\circ}28'$ 之间。全乡总面积 127.26 km^2 , 总人口 34 762 万人。属低纬高原亚热带季风气候区, 多年平均气温为 14.8°C , 年平均降水 891 mm , 主产稻谷、蚕豆、玉米、油菜籽, 盛产烤烟、蔬菜、花卉。上蒜乡 $1\,467 \text{ hm}^2$ 被规划为无公害蔬菜生产基地。晋宁县矿产资源十分丰富, 被誉为世界四大磷都之一, 矿藏有磷、铁、铜、锌等。磷储量 8.4 亿吨, 其中上蒜乡贮备 1 500 万 t, 全乡共有磷矿石企业 15 家。形成了以磷化工、建筑材料为主的南、北工业园区。

试验地点位于上蒜乡段七村主公路东侧 50 m 的农田, 土壤为山地砂质红壤。土壤有机质 $19.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.39 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $131.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.795 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $56.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全钾 $4.46 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $265.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 值 6.62。

1.2 供试作物

玉米: 海禾 28 号; 青花: 优秀; 白菜: 津绿; 油毛菜: 油毛菜; 豌豆: 荷兰合欢 99; 马铃薯: 合作 88; 西葫芦: 绿欧。

1.3 蔬菜种植模式和规格

5 月中旬种植玉米和第一茬蔬菜(青花、白菜和油毛菜), 种植模式为蔬菜单作和玉米蔬菜间作, 7 月下旬蔬菜收获。在 8 月上旬, 豌豆和西葫芦采用育苗移栽, 马铃薯采用种薯播种, 种植模式为玉米 || 青花-马铃薯间套作(A 模式)、玉米 || 白菜-豌豆间套作(B 模式)、玉米 || 油毛菜-西葫芦间套作(C 模式)、青花-马铃薯单作(D 模式)、白菜-豌豆单作(E 模式)、油毛菜-西葫芦单作(F 模式)和玉米单作(G 模式)。每种种植模式处理设 3 个小区, 小区面积 30 m^2 。

种植规格为: G 玉米单作 $80 \text{ cm}\times 20 \text{ cm}$, D 青花单作 $80 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}$, E 白菜单作 $80 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}$, F 油毛菜单作 $40 \text{ cm}\times 25 \text{ cm}$, D 马铃薯单作 $70 \text{ cm}\times 27 \text{ cm}$, E 豌豆单作 $120 \text{ cm}\times 1.5 \text{ cm}$, F 西葫芦单作 $100 \text{ cm}\times 50 \text{ cm}$ 。间套作模式的种植规格见表 1。

供试肥料为有机微肥、磷酸一铵、尿素、过磷酸钙; 有机微肥 $1\,500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷酸一铵 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 尿素 $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 过磷酸钙 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。所有肥料全部作为基肥, 一次性施入。

1.4 取样

试验样品是玉米和蔬菜成熟后, 每个处理随即取 5 株, 然后将 5 株作物的可食部分混合为 1 个样品, 带回实验室分析。

1.5 重金属含量测定方法

土壤重金属 Pb、Cu、Cd 全量采用王水(浓硝酸:浓盐酸=1:3)-高氯酸消煮, 植物样品采用硝酸-高氯酸消煮, 然后用火焰原子吸收分光光度法测定。为保证分析结果的可靠性, 分析过程中采用平行双样和国家标准物质土壤标准参考样(GSS-2)的方法控制测定质量, 整个分析过程所用试剂均为优级纯。

1.6 数据分析与方法

采用 Excel2000、DPS 等软件进行数据的计算、统计分析及绘图, 各组间差异均采用独立样本 t 检验进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同间套模式下各小区土壤中 Pb、Cu、Cd 的含量

从图 1 知, 不同间套模式下各小区土壤中 Pb、Cu、Cd 含量差异都不显著, Pb 的含量范围为 120.2

表 1 玉米/蔬菜间套作模式的种植规格

Table 1 Planting specification of intercropping patterns

| 模式 Planting patterns | 玉米:蔬菜 Maize:Vegetables | 玉米 Maize | | 蔬菜 Vegetables | | |
|--|---------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | | 行距 Line spacing/cm | 株距 Row spacing/cm | 窄行 Narrow line/cm | 宽行 Wide line/cm | 株距 Row spacing/cm |
| A 玉米间作青花 Maize/ Cauliflower intercropping | 1:2 | 150 | 20 | 60 | 90 | 30 |
| B 玉米间作白菜 Maize/ Cabbage intercropping | 1:2 | 150 | 20 | 60 | 90 | 30 |
| C 玉米间作油毛菜 Maize/ Lettuce intercropping | 1:4 | 150 | 20 | 30 | 60 | 20 |
| A 玉米套作马铃薯 Maize/ Potato intercropping | 1:2 | 150 | 20 | 70 | 80 | 25 |
| B 玉米套作豌豆 Maize/Pea intercropping | 1:1 | 150 | 20 | — | 150 | 1.2 |
| C 玉米/西葫芦套作 Maize/ Pumpkin intercropping | 1:2 | 150 | 20 | — | 75 | 65 |

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 246.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $205.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cu 的含量范围为 $67.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 115.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $92.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cd 的含量范围为 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 7.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图中的 Cd 含量扩大了 10 倍作图), 平均值为 $5.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以《国家土壤环境质量标准》的二级标准的最低值 (Pb $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cu $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 作为标准, 除了 Pb 不超标之外, Cu 和 Cd 的含量均超标, 平均超出最低标准 46.1% 和 94.2%。

2.2 不同间套模式对玉米和蔬菜累积 Cd 含量的影响

从图 2 可看出, 单作和间套作降低了玉米和蔬菜可食部分镉的含量, 玉米单作、玉米和青花间作、玉米和油毛菜间作时, 玉米的可食部分镉的含量分别是 $0.048 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.013 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 即玉米与青花或油毛菜间作时, 其可食部分镉的含量显著降低, 分别比单种玉米下降了 59.9% 和 72.9%, 差异显著。除玉米和白菜间作时镉的含量为 $0.073 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 差异不显著; 青花单作与间作相比镉含量下降了

33.7%; 西葫芦单作与间套作相比镉含量下降了 65.7%。马铃薯、白菜、油毛菜和豌豆单作与间套作相比差异不显著。

单作时玉米和蔬菜可食部分镉含量范围为 $0.013 \sim 0.106 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.060 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 间套作时玉米和蔬菜可食部分镉含量范围为 $0.010 \sim 0.083 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 单作和间套作比较镉含量平均下降了 30%, 说明间套作有利于减少重金属在玉米和蔬菜可食部分镉的累积量。

不同的蔬菜累积镉的含量也不同, 3 个平行小区数据差异分析知 ($P < 0.05$), 单作时累积镉的含量为青花、白菜 > 西葫芦、马铃薯、豌豆 > 油毛菜; 间作时累积镉的含量为西葫芦 > 青花、白菜、马铃薯 > 豌豆、油毛菜。

2.3 不同间套模式对玉米和蔬菜累积 Pb 含量的影响

从图 2 可看出, 单作和间套作降低玉米和蔬菜可食部分铅的含量, 玉米单作、玉米和青花间作、玉米和

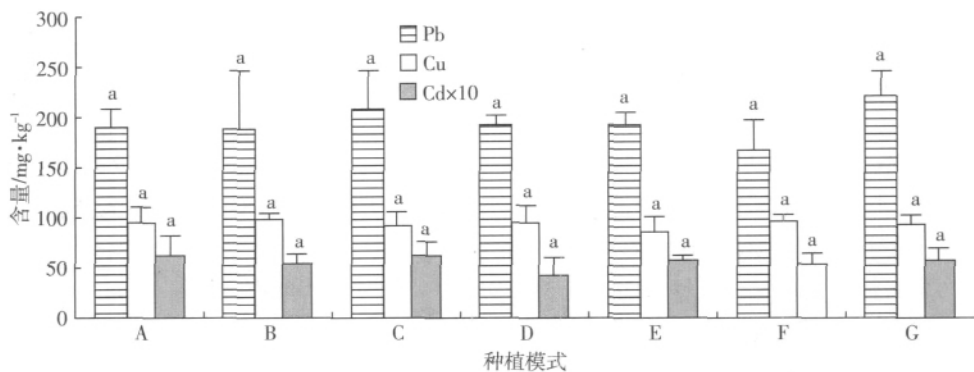
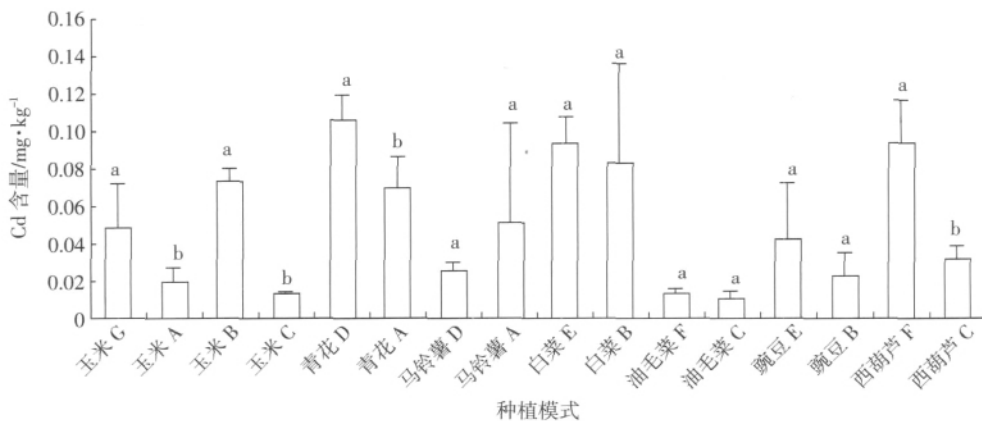


图 1 土壤中 Pb、Cu、Cd 的含量

Figure 1 Pb, Cu and Cd concentrations in soil



玉米和同种蔬菜的不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

Values with different letter in maize and same vegetables indicate a significant difference ($P < 0.05$)

图 2 不同间套模式对玉米和蔬菜可食部分 Cd 含量的影响

Figure 2 Effects of different intercropping patterns on Cd concentrations in edible part of maize and different vegetables

白菜间作、玉米和油毛菜间作,玉米的可食部分铅的含量分别是 $0.507 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.342 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.378 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单作与间作相比较铅的含量分别下降了 40.8%、32.5%和 25.4%,差异显著,除玉米和油毛菜间作时与玉米单作相比较差异不显著,青花单作与间作相比,青花可食部分铅含量下降了 65.2%;马铃薯单作与间套作相比,马铃薯铅含量下降了 33.5%;油毛菜、豌豆和西葫芦单作与间套作相比铅含量分别下降了 29.9%、31.4%和 56.8%,单作与间套作相比差异显著。

单作时玉米和蔬菜可食部分铅含量范围为 $0.103 \sim 0.908 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.461 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;间套作时玉米和蔬菜可食部分铅含量范围为 $0.056 \sim 0.514 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.286 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单作和间套作比较铅含量平均下降了 37.9%,说明间套作有利于减少重金属在玉米和蔬菜可食部分铅的累积量。

不同的蔬菜累积铅的含量也不同,单作时累积铅的含量为西葫芦>马铃薯>豌豆、青花、白菜、油毛菜;间作时累积铅的含量为马铃薯>豌豆>西葫芦>青花、白菜、油毛菜。

2.4 不同间套模式下对玉米和蔬菜累积 Cu 含量的影响

从图 2 可看出,单作和间套作降低玉米和蔬菜可食部分铜的含量,玉米单作、玉米和青花间作、玉米和白菜间作、玉米和油毛菜间作,玉米铜的含量分别是 4.41 、 2.88 、 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单作与间作相比较,玉米铜的含量分别下降了 34.8%、43.3%和 40.4%,差异显著,除玉米和青花间作时与玉米单作相比较差异不显著,青花单作与间作相比铜含量下降了

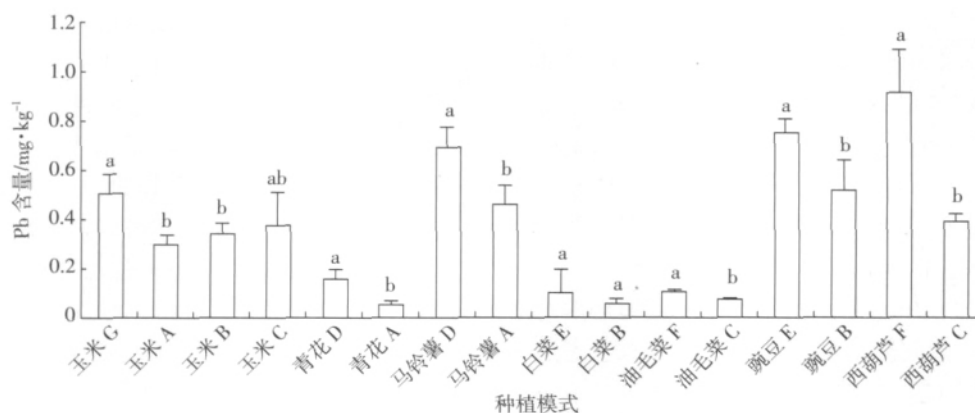
43.6%;马铃薯单作与间套作相比铜含量下降了 28.9%;油毛菜和西葫芦单作与间套作相比铜含量分别下降了 49.8%和 29.4%,单作与间套作相比差异较显著。

单作时玉米和蔬菜可食部分铜含量范围为 $0.71 \sim 10.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $4.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;间套作时玉米和蔬菜可食部分铜含量范围为 $0.72 \sim 7.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $3.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单作和间套作比较铜含量平均下降了 28.6%,说明间套作有利于减少重金属在玉米和蔬菜可食部分铜的累积量。

不同的蔬菜累积铜的含量也不同。单作时累积铜的含量为西葫芦>马铃薯>豌豆>油毛菜>青花、白菜;间作时累积铜的含量为豌豆>西葫芦、马铃薯>青花、白菜、油毛菜。

3 讨论

植物间套作在植物修复过程中通常被忽略,实际上这种技术在农业生产中会频繁使用。从作物科学的角度来看,短期内(2~3年)单独种植同种植物还是可以接受的。如果多年种植同种植物,杂草、虫害和植物疾病的发作几率会增加数倍至几十倍。然而,植物修复的过程通常时间较长,因此间套作是必须采用的^[8]。普通作物间作套种交互作用对植物吸收重金属方面有少量研究。蔬菜 and 玉米是滇池流域主要种植的作物之一,玉米套作蔬菜种植模式在经济和生态学上具有明显的效益。本试验结果中单作与间套作对于玉米和蔬菜可食部分 Cd 含量显著影响的是玉米和青花间作、玉米和油毛菜间作,套种西葫芦、Pb

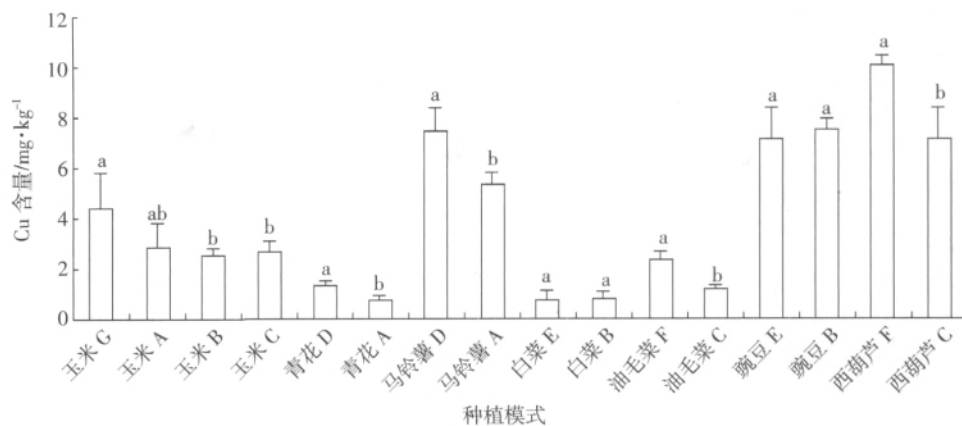


玉米和同种蔬菜的不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

Values with different letter in maize and same vegetables indicate a significant difference ($P < 0.05$)

图 3 不同间套模式下玉米和蔬菜中 Pb 含量

Figure 3 Effects of different intercropping patterns on Pb concentrations in edible part of Maize and different vegetables



玉米和同种蔬菜的不同字母表示有显著差异 ($P<0.05$)

Values with different letter in maize and same vegetables indicate a significant difference ($P<0.05$)

图 4 不同间套模式对玉米和蔬菜中 Cu 含量的影响

Figure 4 Effects of different intercropping patterns on Cu concentrations in edible part of Maize and different vegetables

含量产生显著影响的是玉米和青花间作、玉米和马铃薯间作、玉米和油毛菜间作、豌豆间套种、西葫芦间套种。Cu 含量产生显著影响的是玉米和青花间作、玉米和马铃薯间作、玉米和油毛菜间作、西葫芦间套种。不同种植模式对同种重金属在作物可食部分的含量产生的影响相差较大。但从结果看,玉米和青花间作及套种西葫芦的种植模式与单作相比对于降低 Cd、Pb、Cu 的含量比较显著。吴华杰等间作小麦//水稻发现,间作交互作用降低了两作物地上部 Cd 的吸收积累,也降低了小麦籽粒的 Cd 浓度,但水稻籽粒的 Cd 浓度有所升高^[9]。薛建辉等将杉木和茶树间作,发现间作杉木可降低茶园土壤 Pb、Ni、Mn、Zn 元素含量,间作茶树叶片中 Pb、Mn、Cu、Zn 含量均显著低于单作茶园,说明间作杉木可以减少茶叶中重金属含量,改善茶叶品质^[10]。

本试验中玉米与不同蔬菜间套作对重金属的累积含量影响发现,同种蔬菜单作与间套作比较,重金属在可食部分的含量差异显著,这说明间作体系地上部植物多样性与地下部根际土壤多样性存在紧密联系^[11]。地上部与地下部亚系统相互联系的观点为研究农田生态系统开拓了一个新的观点,人们传统只关注地上部亚系统,现在已越来越清楚地认识到是两个亚系统相互反馈、共同影响生态系统的组成和生态过程^[12]。植物间套作能增加地上部的生物多样性,这不仅可改善地上部生态功能,还可改变根际微生物的数量^[13]。小麦与蚕豆间作降低蚕豆枯萎病的发病率和病情指数,增加根际的细菌、真菌、放线菌数量、微生物总数和微生物多样性^[14]。外生菌根真菌能在它们的子

实体中积累高量的 Cd,维持一定浓度的 Zn 和 Cu,排斥 Pb,这表明真菌对 Cu 和 Zn 等必需营养元素的吸收起着调节作用^[15]。

Whiting 等研究了锌超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 和同属的非超积累植物 *Thlaspi arvense* 套种在添加 ZnO 或 ZnS 的土壤上的交互作用,与单种相比,*Thlaspi caerulescens* 的吸锌量显著增加,而与之互作的 *Thlaspi arvens* 吸锌量则明显降低,并将其原因推测为 *Thlaspi caerulescens* 有很强的吸锌能力,能优先吸收土壤中的锌,从而减少了 *Thlaspi arvense* 对锌的吸收^[16],并未查明更深层次的原因。黑亮等用 Zn 的超富集植物东南景天和玉米套种,东南景天提取重金属的效率明显提高,玉米茎叶内的重金属含量降低^[5],初步查明了在套种条件下,玉米对促进超富集东南景天吸收更多重金属的原因是玉米根系降低溶液 pH 和提高水溶性有机物(DOC)以及 Zn/Cd 浓度;王激清等^[17-18]通过温室土培盆栽试验研究了印度芥菜和油菜套种对各自吸收土壤中难溶态镉(CdCO_3)的影响,结果表明,与单种相比,套种对印度芥菜吸收镉的能力无显著影响,但却可以显著增加油菜植株体内的镉含量,即与 Whiting 等人的研究结果不同,也未探求其更深层次的原因。本研究中玉米和不同的蔬菜间套作,与单作相比较,Cd、Pb、Cu 在玉米和蔬菜可食部分的累积含量平均下降了 30%、37.9%和 28.6%,玉米和不同蔬菜间套作,玉米和蔬菜累积重金属的含量差异也比较大,推测重金属的吸收累积可能和玉米蔬菜根系作用有关,是根系的分泌作用还是其他的作用机理,还待进一步研究。

4 结论

(1)晋宁县上蒜乡段七村大田试验小区中重金属 Pb、Cu、Cd 含量平均值分别为 $205.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $92.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以《国家土壤环境质量标准》的二级标准为依据,除 Pb 不超标之外,Cu 和 Cd 的含量均超标,平均超出标准 46.1%和 94.2%。

(2)玉米与油毛菜间作与单作相比较玉米中 Cd 含量显著下降 72.9%,油毛菜中 Cu 含量显著下降 49.8%,套作西葫芦时 Pb 含量显著下降 56.8%。

(3)间套作条件下,显著降低了重金属 Cd、Pb、Cu 在玉米和蔬菜可食部分的累积含量,与单作相比平均下降了 30%、37.9%和 28.6%。

参考文献:

- [1] 马智宏,王北洪,王纪华.不同种植方式下土壤中重金属分布的研究及评价[J].安徽农业科学,2008,36(13):5596–5597,5521.
MA Zhi-hong, WANG Bei-hong, WANG Ji-hua. Research and Evaluation on the Distribution of heavy metals in soil under Different planting Models[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(13): 5596–5597, 5521.
- [2] 张先福,樊立超,宋晓平,等. Hg、As、Cr、Cd 在食物链中迁移规律的研究[J].西北农林科技大学学报,2001,29(1):103–105.
ZHANG Xian-fu, FAN Li-chao, SONG Xiao-ping, et al. A study on the migrating rule of Hg, As, Cr, Cd elements in food chain[J]. *Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For*, 2001, 29(1): 103–105.
- [3] 严连香,黄标,邵学新,等.不同工业企业周围土壤-作物系统重金属 Pb、Cd 的空间变异及其迁移规律[J].土壤学报,2009,46(1):52–62.
YAN Lian-xiang, HUANG Biao, SHAO Xue-xin, et al. Spatial Variability and transfer of Pb and Cd in soil-crop system around different types of factories[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 52–62.
- [4] Wolfe, M S. Crop strength through diversity[J]. *Science*, 2000, 406: 681–682.
- [5] 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,2007,25(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, 25(4): 852–858.
- [6] 李凝玉,李志安,丁永祯,等.不同作物与玉米间作对玉米吸收累积镉的影响[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.
- [7] Li N Y, Li Z A, Zhuang P, et al. Cadmium uptake from soil by maize with intercrops[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2008, 10(8): 1007–1015.
- [8] 杨兵.利用苕麻和香根草修复重金属污染土壤的研究[D].中山大学博士学位论文,2007.
Yang Bing. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by ramie(*Boehmeria nivea*) and *Vetiver*[D]. Zhongshan University, 2007.
- [9] 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[J].中国农业科技导报,2003(5):43–47.
Wu H J, Li L, Zhang F X. The influence of intercrop interactions on Cd uptake by rice and wheat intercropping[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2003(5): 43–47.
- [10] 薛建辉,费颖新.间作杉木对茶园土壤及茶树叶片重金属含量与分布的影响[J].生态与农村环境学报,2006,22(4):71–73,87.
XU Jian-hui, FEI Ying-xin. Effects of intercropping *Cunninghamia lanceolata* in tea garden on contents and distribution of heavy metals in soil and tea leaves[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(4): 71–73, 87.
- [11] Song Y N, Zhang F S, Marschner P, et al. Effect of intercropping on crop yield chemical and microbiological in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), and faba bean (*Vicia faba* L.)[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43: 565–574.
- [12] Xu G H, Zheng H Y. Manual of Methods for Soil Microbial Analysis. Beijing: Agricultural Press, 1986: 102–110.
- [13] Lu Y H, Zhang F S. The advances in rhizosphere microbiology[J]. *Soil*, 2006, 38(2): 113–121.
- [14] 董艳,汤利,郑毅,等.施氮对间作蚕豆根际微生物区系和枯萎病发生的影响[J].生态学报,2010,30(7):1797–1805.
DONG Yan, TANG Li, ZHENG Yi, et al. Effects of N application on rhizosphere microflora and fusarium wilt occurrence of intercropped faba bean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1797–1805.
- [15] 廖继佩,林先贵,曹志洪.内外生菌根真菌对重金属的耐受性及机理[J].土壤,2003,35(5):370–377.
LIAO Ji-pei, LIN Xian-gui, CAO Zhi-hong. Tolerance of mycorrhizal fungi to heavy metals and mechanisms[J]. *Soil*, 2003, 35(5): 370–377.
- [16] Whiting S N, Leake J R, McGrath S P, et al. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of cocropped *Thlaspi armstrongii*[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(15): 3237–3241.
- [17] 王激清,茹淑华,苏德纯.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-qin, 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.
- [18] 卫泽斌,吴启堂,龙新宪.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. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil with mixed chelators in co-crop system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1262–1263.