

邱 丹, 杜芮萍, 孟德凯, 等. 玉米套作蜈蚣草修复砷污染农田土壤的效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 101-107.

QIU Dan, DU Rui-ping, MENG De-kai, et al. Effect of maize (*Pteris vittata* L.) intercropping on remediation of As-contaminated farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 101-107.

玉米套作蜈蚣草修复砷污染农田土壤的效应研究

邱 丹^{1,2}, 杜芮萍^{1,2}, 孟德凯^{1,2}, 顾明华^{1,2}, 何 冰^{1,2}, 韦燕燕^{1,2}, 王学礼^{1,2*}

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 广西农业环境与农产品安全重点实验室培育基地, 南宁 530000)

摘 要:为探明作物-超富集植物套作模式对修复砷污染土壤的效应, 采用盆栽实验, 探讨了玉米 (*Zea mays* L.) 与蜈蚣草 (*Pteris vittata* L.) 开放性套作、限制性套作和单作模式对植物生长及 As 吸收累积的影响。结果表明: 和单作相比, 开放性套作和限制性套作模式下蜈蚣草生物量显著提高, 其地上部分别提高了 55.7% 和 43.9%, 但玉米生物量没有显著差异; 三种处理间除根无显著差异外, 玉米茎、叶和籽粒中 As 含量均呈单作 > 限制性套作 ≈ 开放性套作。和单作相比, 开放性套作和限制性套作显著降低了玉米茎、叶、籽粒中 As 含量, 茎中分别降低了 35.2% 和 31.9%, 叶片中分别降低了 21.9% 和 18.6%, 籽粒中分别降低了 24.2% 和 12.1%; 和单作相比, 限制性套作对蜈蚣草根砷含量影响不明显, 但显著提高了蜈蚣草地上部砷含量, 提高幅度达 11.3%; 开放性套作同时显著提高了蜈蚣草根和地上部砷含量, 分别提高了 32.4% 和 17.9%。开放性套作显著降低了玉米和蜈蚣草根际土有效态 As 含量, 分别降低了 9.3% 和 15.4%; 限制性套作显著降低了玉米根际土有效态 As 含量, 降低了 9.1%, 但对蜈蚣草有效态砷含量影响不显著。玉米与蜈蚣草套作抑制了玉米体内 As 的累积量, 同时促进了蜈蚣草的生长及对土壤中砷的吸收累积。这为中轻度砷污染农田的安全利用提供了参考依据。

关键词:套作; 砷; 玉米; 蜈蚣草; 效应

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)01-0101-07 doi:10.11654/jaes.2016-0920

Effect of maize (*Pteris vittata* L.) intercropping on remediation of As-contaminated farmland soil

QIU Dan^{1,2}, DU Rui-ping^{1,2}, MENG De-kai^{1,2}, GU Ming-hua^{1,2}, HE Bing^{1,2}, WEI Yan-yan^{1,2}, WANG Xue-li^{1,2*}

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Agri-Environment and Agri-products Safety, Nanning 530000, China)

Abstract: Arsenic, as a common metalloid element in the earth's crust, can enter the body by the food chain and does great damages to human health eventually. To explore the effect of crops-hyperaccumulation plants intercropping on remediation of As-contaminated farmland ecosystem, the effect of open intercropping, restrictive intercropping and monocropping on growth, As uptake and accumulation in maize (*Zea mays* L.) and *Pteris vittata* L. were investigated in a pot experiment. The results showed that: compared with monocropping, open intercropping and restrictive intercropping significantly increased the shoot biomass of *Pteris vittata* L. by 55.7% and 43.9%, respectively, but did not exert significant effect on maize biomass. As concentration in stems, leaves and corn kernel of restrictive intercropping as well as open intercropping maize were lower than those of monoculture maize, but no significant differences of As concentration in roots occurred among the three cultures. The decreased extents in As concentration of open intercropping and restrictive intercropping were 35.2% and 31.9% in stems, 21.9% and 18.6% in the leaves, and 24.2% and 12.1% in the corn kernel, respectively. Compared with monoculture, restrictive intercropping significantly increased As concentration of *Pteris vittata* shoots by 11.3%, but had no obvious effect on As concentra-

收稿日期: 2016-07-15

作者简介: 邱 丹 (1991—), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事植物修复技术研究。E-mail: 2447496512@qq.com

* 通信作者: 王学礼 E-mail: wxl0524@126.com

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2014GXNSFBA118223); 广西特聘专家工程专项经费项目 (2013B015)

Project supported: The Nature Science Foundation of Guangxi Province, China (2014GXNSFBA118223); Guangxi Special Invited Scientist Program (2013B015)

tion in *Pteris vittata*-roots, while open intercropping significantly increased As concentration of *Pteris vittata* in both roots by 32.4% and shoots by 17.9%, respectively. Open intercropping significantly reduced available arsenic concentration in maize and *Pteris vittata* rhizosphere soil, the decrease extents were 9.3% and 15.4%, respectively. Restrictive intercropping significantly reduced available arsenic concentration in maize rhizosphere soil by 9.1%, but had no obvious effect on available arsenic concentration in *Pteris vittata* rhizosphere soil. The results suggested that Maize(*Pteris vittata* L.) intercropping inhibited the As accumulation in maize, while promoted the growth, As uptake and accumulation in *Pteris vittata* L.. The results would provide a guidance for the safe use of low to moderate levels of arsenic contaminated farmland.

Keywords: intercropping; As; maize; *Pteris vittata*; effect

近年来,砷污染已经成为人们广泛关注的环境污染问题之一。我国土壤砷的背景值达 $11.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为世界平均值的 2 倍, 表层土壤中砷含量在 $0.01 \sim 626 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[1]。据 Allaway^[2]估计, 进入土壤中的 As 如果仅仅通过植物吸收需要 100 a 才能使其在土壤中消失, 故 As 一旦进入土壤, 治理难度大且花费时间长。目前我国农田土壤 As 污染的情况日趋严重, Rodriguez-lado 等^[3]研究成果显示, 我国有将近 2000 万人生活在土壤 As 污染的高风险区, 我国土壤溶液中砷浓度超过 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的地区总面积达 58 万 km^2 。砷可通过食物链进入人体, 对人类健康产生巨大威胁^[4]。广西是有色金属之乡, 开采冶炼金属矿物给矿区周围农田带来严重的砷污染^[5], 大量含砷矿渣的随意放置加快了砷的溶解及释放到土壤中的速度^[6]。如何在保证这些区域农产品安全及持续生产的同时, 进行污染土壤的修复已成为重要的研究课题。

植物修复具有原位修复的特点, 对土壤的影响较小, 且治理效果永久^[7]。超富集植物对重金属等污染物的富集能力很强, 吸收量较大, 因此可用于对污染土壤中重金属进行吸收、固定、降解^[8]。蜈蚣草是一种典型的砷超富集植物^[9], 它不仅对砷有很强的忍耐和富集能力, 同时生长快, 生物量大、适应性强, 已经广泛应用于砷污染土壤的修复中^[10]。但利用超富集植物修复污染土壤耗时较长, 使农业生产中断, 农田资源被浪费, 不符合我国的国情。吴启堂等^[11]提出将重金属超富集植物与低积累作物玉米套作, 超富集植物提取重金属的效率比单种下明显提高, 同时能够生产出符合卫生标准的玉米产品。蒋成爱等^[12]研究表明, 东南景天分别与玉米和大豆间作, 可以显著提高东南景天对 Cd、Pb、Zn 的吸收。谭建波等^[13]研究表明, 续断菊与蚕豆间套作提高了续断菊对 Cd 的吸收, 降低了蚕豆对 Cd 的吸收。但是王激清等^[14]研究发现, 在 Cd 污染的石灰性土壤上印度芥菜间作油菜, 促进了印度芥菜对 Cd 的吸收, 由于印度芥菜对养分的竞争能力较强且对土壤中难溶性 Cd 有很强的活化作用, 导致与之

间作的油菜产量下降、体内 Cd 含量显著增加。可见, 植物间套作模式对污染土壤的修复以及农产品安全性应用方面的研究已得到广大研究人员的关注, 超富集植物与作物间套作能否实现边生产边修复是目前农田土壤重金属污染修复的研究热点。

本文通过玉米和蜈蚣草套作, 研究套作模式对玉米和蜈蚣草吸收积累 As 的效果; 通过分析套作模式下土壤有效态 As、根际土壤 pH、植物吸收积累 As 的变化, 初步阐明套作影响植物吸收重金属的作用机理。旨在为农田污染土壤的修复以及作物的安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米品种为课题组筛选出的低积累玉米品种正大 999, 蜈蚣草为富集能力较强的云南生态型。

供试土壤取自广西刁江流域某污染农田 0~20 cm 的表层土壤, 经过室温风干、磨碎、混匀、过 5 mm 筛备用。土壤的基本理化性质为: pH 6.40, 有机质 $24.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $1.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $17.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $122.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $29.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $116.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总砷 $550.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 实验方案

采用土培实验, 蜈蚣草-玉米套作实验设置 3 个处理, 每个处理 5 次重复。

开放性套作: 两种植物根系不隔离, 两根系完全交叉, 水分和养分及可移动的重金属可以自由流通, 种间地下部竞争和促进作用共存。

限制性套作: 两种植物根系采用 400 目尼龙纱网隔离, 两根系不交叉, 但水分和养分及可移动的重金属可以自由流通, 即重金属、养分移动的竞争作用仍然存在, 同时种间促进作用也可能发生。

单作: 根系用塑料薄膜隔离, 由于塑料薄膜不容许作物根系和养分以及水分穿过, 作物种间的促进作用和养分竞争作用均被消除。

实验盆栽所用塑料桶高 35.0 cm、直径 30.0 cm,装土 15.0 kg。各处理氮、磷、钾施用量相同, N 为 240 mg·kg⁻¹, P₂O₅ 为 120 mg·kg⁻¹, K₂O 为 240 mg·kg⁻¹, 所用肥料为尿素、氯化钾、磷酸二氢钾(经测定, 氯化钾和磷酸二氢钾中砷含量低于仪器检出限, 尿素中砷含量为 0.06 mg·kg⁻¹, 和土壤砷含量 550.5 mg·kg⁻¹ 相比可忽略不计)。于 2015 年 3 月 29 日将土壤和肥料混合均匀后装盆, 反复施水至土壤田间最大持水量。平衡一周后每盆种植一株蜈蚣草(因为蜈蚣草苗期生长速度较为缓慢, 所以提前种植一段时间蜈蚣草使其稳定), 于 2015 年 5 月 11 日, 将玉米种子浸泡 12 h 后播入每盆相应位置。每盆播 2 粒种子, 待长出幼苗后每盆留 1 株。于成熟期(2015 年 8 月 24 日)采集植物样品, 分析测定。

1.3 样品分析测试方法

土壤基本理化性状测定参照鲍士旦^[45]的方法: 土壤 pH 值采用 1:2.5 的土水比, 用酸度计(梅特勒-托利多 SevevMulti 型 pH 计)进行测定; 土壤有机质采用 H₂SO₄-K₂CrO₇ 外加热法测定; 土壤全氮采用半微量开氏法测定; 全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定; 全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定; 土壤速效磷采用 NaHCO₃-钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用 NH₄OAc-火焰光度法测定; 土壤 As 总量采用王水消解-氢化物发生原子荧光光谱法(HG-AFS, AF-610A 原子荧光光谱仪, 北京瑞利仪器公司)测定; 植株砷含量使用微波消解仪(MARS 6, 美国 CEM 公司), 浓硝酸(优级纯)消解, 并用氢化物发生原子荧光光谱法测定; 土壤有效态砷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提, 用氢化物发生原子荧光光谱法测定。采用国家标准物质(土壤: GBW-07405, 植物: GBW-07603)进行土壤和植物砷分析的质量控制, AF-610A 原子荧光光谱仪 As 检出限为 0.08 ng·mL⁻¹, 精密性(RSD)为 2%, 线性范围>103, 实验中 As 回收率为 90%~97%。分析中所用试剂均为优级纯。

1.4 富集系数、转运系数和有效转运系数

植物重金属富集系数是植物中的 As 含量与土壤中 As 含量的比值, 富集系数可以大致反映出植物在相同 As 浓度的土壤中吸收 As 的能力^[9]。转运系数等于植物地上部重金属浓度与根部重金属浓度的比值, 有效转运系数等于植物地上部的重金属浓度和生物量乘积与其根部的重金属含量和生物量乘积的比值, 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^[16]。

1.5 实验数据处理统计方法

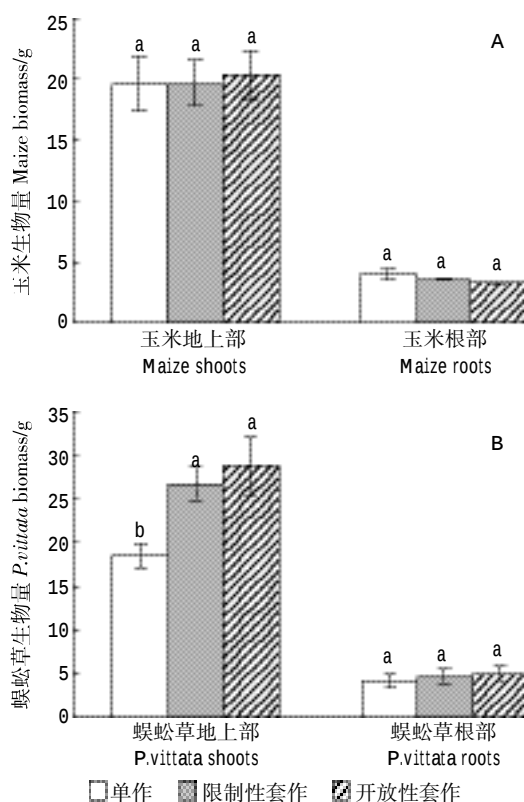
实验数据的处理以及图表等由 Microsoft Excel 2013 完成, 用 SPSS17.0 统计软件进行数据统计, 采用 Duncan 检验法进行多重比较检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下植物生物量

两种套作模式未对玉米的生长产生显著影响。由图 1A 可知, 开放性套作、限制性套作和单作的玉米地上部干重分别为 20.28、19.67、19.64 g。

两种套作模式显著提高了蜈蚣草地上部的生物量。由图 1B 可知, 与单作相比, 开放性套作和限制性套作的蜈蚣草地上部生物量分别提高了 55.7%和 43.9%。三个处理间蜈蚣草根生物量差异不显著。与单作相比, 开放性套作和限制性套作均有利于蜈蚣草的生长, 提高了蜈蚣草的生物量。



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different treatment. The same below

图 1 不同种植方式玉米和蜈蚣草生物量(干重)的影响
Figure 1 Effect of different planting pattern on maize and *P. vittata* biomass (Dry weight)

2.2 不同种植模式下植株砷含量

不同种植模式对玉米 As 含量的影响不同。从表 1 看出,三种处理间除根无显著差异外,茎、叶和籽粒中均呈单作>限制性套作≈开放性套作。三种种植模式下玉米根中砷含量差异不显著。和单作相比,限制性套作和开放性套作的玉米茎、叶、籽粒中 As 含量显著降低:茎中 As 含量分别降低了 31.9%和 35.2%;叶片中 As 含量分别降低了 18.6%和 21.9%;籽粒中 As 含量分别降低了 12.1%和 24.2%。这表明两种套作模式可以降低玉米各部位 As 含量。

不同种植模式对蜈蚣草体内 As 含量的影响不同。从表 2 可以看出,和单作相比,限制性套作对蜈蚣草根部分砷含量影响不明显,但显著提高蜈蚣草地上部砷含量,提高了 11.3%;开放性套作显著提高了蜈蚣草根和地上部砷含量,分别提高了 32.4%和 17.9%。这表明开放性套作可以显著提高蜈蚣草 As 含量。

2.3 不同种植模式下土壤 pH 值

三种种植方式下玉米、蜈蚣草的根际土壤 pH 值均高于非根际土壤(表 3)。开放性套作显著提高了蜈蚣草根际土壤 pH 值,限制性套作对蜈蚣草根际土壤

pH 影响不显著。两种种植方式下,玉米根际土壤 pH 值均无显著差异。

2.4 不同种植模式下土壤有效态 As 含量

不同种植方式下蜈蚣草、玉米根际土壤有效态 As 含量不同。由图 2 可以看出,开放性套作蜈蚣草根际土壤有效态 As 含量显著高于单作,提高了 15.4%,限制性套作对蜈蚣草根际土壤有效态 As 含量影响不明显。而开放性套作和限制性套作下,玉米根际土壤有效态 As 含量显著低于单作,分别比单作降低了 9.3%、9.1%。表明两种套作模式可以降低玉米根际土壤有效态 As 含量,提高蜈蚣草根际土壤有效态 As 含量。

2.5 不同种植模式下植株体内 As 累积特征

不同种植模式下玉米叶和茎的富集系数、转运系数和有效转运系数均小于 1。表 4 为不同种植模式玉米地上部的积累特征。由表 4 可知,与单作相比,限

表 2 不同种植方式下蜈蚣草各部位 As 含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 As concentration of each part of the *P.vittata* under different planting pattern(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	蜈蚣草根 <i>P.vittata</i> roots	蜈蚣草地上部 <i>P.vittata</i> shoots
单作 Monoculture	897.0±50.1b	1 218.9±40.0b
限制性套作 Restrictive intercropping	930.6±57.5b	1 356.5±55.5a
开放性套作 Open intercropping	1 187.9±57.5a	1 436.7±78.4a

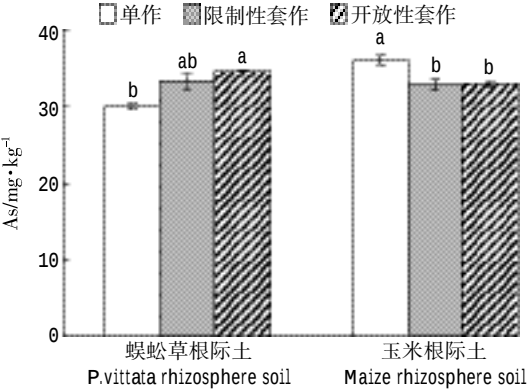


图 2 土壤有效态 As 含量

Figure 2 The concentration of available As in soil

表 1 不同种植方式下玉米各部位 As 含量(mg·kg⁻¹)
Table 1 As concentration of each part of the maize under different planting pattern(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	玉米根 Maize roots	玉米茎 Maize shoots	玉米叶 Maize leaves	玉米籽粒 Maize seeds
单作 Monoculture	31.03±6.10a	6.77±0.58a	5.11±0.24a	0.33±0.016a
限制性套作 Restrictive intercropping	29.20±2.45a	4.61±0.59b	4.16±0.40b	0.29±0.010b
开放性套作 Open intercropping	27.83±2.27a	4.39±0.46b	3.99±0.19b	0.25±0.002b

注:表中数据为平均值±标准误差(n=3);同列数据不同小写字母表示 5%显著水平(P<0.05)。下同。
Note: Different letters in same list indicate significant difference(P<0.05). The same below.

表 3 不同种植方式对土壤 pH 的影响
Table 3 Effect of different planting pattern on soil pH

处理 Treatment	蜈蚣草根际土 <i>P.vittata</i> rhizosphere soil	玉米根际土 Maize rhizosphere soil	非根际土 Non-rhizosphere soil
单作 Monoculture	6.60±0.05b	6.82±0.09a	6.53±0.12a
限制性套作 Restrictive intercropping	6.75±0.05ab	6.78±0.10a	6.50±0.09a
开放性套作 Open intercropping	6.85±0.07a	6.75±0.14a	6.50±0.10a

制性套作和开放性套作玉米叶 As 的富集系数分别降低了 20.0%、30.0%, 转运系数分别降低 24.1%、30.5%, 有效转运系数分别降低 26.5%、20.2%; 玉米茎 As 的富集系数均降低了 33.3%, 转运系数分别降低 36.0%、42.5%, 有效转运系数分别降低 16.3%、27.2%。这表明两种套作模式下玉米的 As 累积系数均低于单作。

不同种植方式下蜈蚣草地上部的富集系数、转运系数和有效转运系数均大于 1。表 5 为不同种植模式下蜈蚣草地上部的积累特征。由表 5 可知, 与单作相比, 限制性套作和开放性套作蜈蚣草地上部 As 富集系数分别提高了 11.3%、17.9%, 有效转运系数分别提高 97.8%、83.6%。限制性套作下蜈蚣草地上部的转运系数比单作高 26.7%, 而开放性套作与单作差异很小。这表明限制性套作和开放性套作模式下的蜈蚣草地上部富集系数高于单作。

3 讨论

生物量是反映植物生长状况和土壤环境变化的重要指标之一。本研究中, 三种种植模式对玉米的生物量总体影响不大, 但开放性套作和限制性套作下蜈蚣草长势较好, 根系生物量高于单作, 根系的旺盛生长有利于促进蜈蚣草吸收土壤中的营养元素, 并且套作时玉米和蜈蚣草距离较近, 蜈蚣草是喜阴植物, 玉米的生长可为蜈蚣草提供荫蔽作用, 更好地促进蜈蚣草的生长。开放性套作和限制性套作均可有效降低玉

米 As 含量并且显著提高蜈蚣草 As 含量, 其中开放性套作的效果最佳。已有的研究表明, 植物套作可以提高土壤中微生物的丰度和活性以及土壤酶活性, 还能通过对植物根系分泌物、土壤微生物、土壤酶活的影响, 改变土壤的 pH 值, 影响重金属的生物有效性^[17-18]。两种作物根系分泌物的种类、数量、组成不同, 在限制性套作和开放性套作模式下, 一种植物的根系分泌物可以在土壤中扩散到另一种植物根际, 改变根际土壤中重金属的有效性, 从而影响植物对重金属的吸收^[18]。在本实验中, 开放性套作模式下玉米和蜈蚣草的根系相互接触, 部分根系处于一个共同的根际环境中, 蜈蚣草具有强吸收并富集砷的能力, 与玉米产生强烈的竞争作用, 并且蜈蚣草根系的旺盛生长更利于吸收土壤中的砷, 使影响效果更为明显。这可能是开放性套作模式下降低玉米中 As 含量及提高蜈蚣草中 As 含量的机制之一。

大量研究结果表明, 土壤中 As 的形态与土壤 pH 值有密切的关系, 玉米与蜈蚣草套作模式下, 根际土壤 pH 的改变影响了 As 的形态, 进而影响了 As 在土壤中的生物有效性。陈静等^[19]研究发现, 在红壤中, pH 值是影响土壤对 As 吸附、解吸的重要因素, pH 值的升高能够降低 As 的吸附量, 且吸附态 As 的解吸量随着 pH 的升高而增加。在酸性环境中有利于 As 的吸附, 在碱性环境中有利于 As 的解吸。陈同斌等^[20]研究发现, 随着 pH 值的升高, 水稻各部位含砷量增加, 而 pH 降低则可以减少水稻对砷的吸收。在土壤中, As

表 4 不同种植方式对玉米累积特征的影响
Table 4 Effect of different planting pattern on maize characteristics of accumulation

处理 Treatment	玉米叶 Maize leaves			玉米茎 Maize shoots		
	富集系数 Enrichment factor	转运系数 Translocation factor	有效转运系数 Effective translocation factor	富集系数 Enrichment factor	转运系数 Translocation factor	有效转运系数 Effective translocation factor
单作 Monoculture	0.010±0.001a	0.187±0.016a	0.641±0.023a	0.012±0.001a	0.247±0.018a	0.521±0.022a
限制性套作 Restrictive intercropping	0.008±0.001b	0.142±0.007b	0.472±0.018b	0.008±0.001b	0.158±0.009b	0.436±0.014b
开放性套作 Open intercropping	0.007±0.001b	0.130±0.006b	0.511±0.021b	0.008±0.001b	0.143±0.007b	0.379±0.009c

表 5 不同种植方式对蜈蚣草累积特征的影响
Table 5 Effect of different planting pattern on P.vittata characteristics of accumulation

处理 Treatment	富集系数 Enrichment factor	转运系数 Translocation factor	有效转运系数 Effective translocation factor
单作 Monoculture	2.216±0.071b	1.269±0.108b	4.699±0.675b
限制性套作 Restrictive intercropping	2.466±0.101a	1.608±0.117a	9.296±0.954a
开放性套作 Open intercropping	2.612±0.142a	1.239±0.107b	8.628±0.886a

主要以阴离子的形式存在,pH降低时,含砷阴离子可以迅速地被带有正电荷的氢氧化铁等吸附,pH值升高时,吸附剂表面负电荷增多,从而促进含砷阴离子向外溶解,导致土壤吸附As的能力降低^[21-22]。本研究结果表明,玉米与蜈蚣草开放性套作显著提高了蜈蚣草根际土壤的pH和有效态As含量,pH值的升高导致土壤表面负电荷增多,从而降低了土壤对As的亲合力^[23],促进了含砷阴离子向外溶解,提高了土壤中As的生物有效性,增加了蜈蚣草对As的吸收。开放性套作显著降低玉米根际土中的有效态As含量,降低了土壤中As的生物有效性,从而减少了玉米对As的吸收。

富集系数可以大致反映出植物在相同As浓度的土壤中吸收As的能力。在本研究中发现玉米各部位对As的富集系数均小于1,玉米套作蜈蚣草时,玉米叶片与茎的富集系数均小于单作,且玉米叶片的As富集系数小于玉米茎,说明套作可以降低玉米对As的吸收能力,并使更少量的As向地上部运输。而蜈蚣草对As的富集系数大于2,与陈同斌等^[9]的研究结果相符合,验证了蜈蚣草对As的超富集能力。开放性套作和限制性套作下蜈蚣草对As的富集系数均大于单作,说明两种套作模式可提高蜈蚣草对As的吸收能力,使更多的As向地上部运输。转运系数和有效转运系数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^[16]。套作降低了玉米将As向地上部转运的能力,而提高了蜈蚣草将As向地上部转运的能力。

4 结论

(1)玉米套作蜈蚣草未对玉米产量产生显著影响,但提高了蜈蚣草生物量。

(2)玉米和蜈蚣草开放性套作显著提高了蜈蚣草根际土有效态砷含量,促进了蜈蚣草对砷的吸收累积,同时降低了玉米根际土有效态砷含量,降低了玉米对砷的吸收累积。

(3)在本研究条件下,玉米套作蜈蚣草可以较好地应用于砷污染农田土壤。该种植方式可以在保证农产品安全生产的同时,为修复重金属污染农田土壤提供参考依据,具有实际的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
CHEN Huai-man. Environmental soil science[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] Allaway W H. Agronomic controls over the environmental cycling of trace element[J]. Advances in Agronomy, 1968, 20: 235-274.
- [3] Rodriguez-lado L, Sun G, Berg M, et al. Groundwater arsenic contamination throughout China[J]. Science, 2013, 341(6148): 866-868.
- [4] Rosas-Castor J M, Guzmán-Mar J L, Hernández-Ramírez A, et al. Arsenic accumulation in maize crop (*Zea mays*): A review[J]. Science of the Total Environment, 2014: 176-187.
- [5] 李 衡, 徐文忻, 李香兰. 广西有色金属矿山固体废弃物现状和利用研究[J]. 云南冶金, 2011, 40: 73-75.
LI Heng, XU Wen-xin, LI Xiang-lan. Present state and utilization research of solid wastes of nonferrous metal mine in Guangxi[J]. Yunnan Metallurgy, 2011, 40: 73-75.
- [6] 周楠楠. EDTA强化茶皂素对土壤中Cu、Zn、Cd淋洗修复的影响研究[D]. 山东农业大学, 2011.
ZHOU Nan-nan. The improved leaching of Cu, Zn, Cd contaminated soil by synergistic effect of tea saponin and EDTA[D]. Shandong Agriculture University, 2011.
- [7] 沈冶金, 刘德良, 郭宇翔, 等. 煤矿废弃地重金属含量及3种土著先锋植物吸收特征[J]. 广东农业科学, 2011, 20: 134-138.
SHEN Qia-jin, LIU De-liang, GUO Yu-Xiang, et al. Heavy metal content in abandoned coal mine and the absorption characteristics of three kinds of indigenous pioneer plants[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 20: 134-138.
- [8] Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. Yield performance and land-use efficiency of barley and fababean mixed cropping in Ethiopian highlands[J]. European Journal Agronomy, 2006, 25: 202-207.
- [9] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002(3): 207-210.
CHEN Tong-bin, WEI Chao-yang, HUANG Ze-chun, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its enrichment characteristics of arsenic[J]. Chinese Science Bulletin, 2002(3): 207-210.
- [10] Chen T B, Liao X Y, Huang Z C, et al. Phytoremediation of As-contaminated soil in China[M]//Willey, Neil Ed. Phytoremediation: Methods and Reviews. Humana Press, NJ., 2007: 393-404.
- [11] Wu Q T, Samake M, Mo C H, et al. Simultaneous sludge stabilization and metal removal by metal hyper-accumulator plants[C]. Bangkok, Transactions of 17th World Congress of Soil Science, 2002: paper no. 355.
- [12] 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.
- [13] 谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 等. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与Cd形态分布状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 53-60.
TAN Jian-bo, ZHAN Fang-dong, LIU Ning-ning, et al. Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 53-60.
- [14] 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-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Effects India mustard and oilseed rape co-cropping on absorbing insoluble cadmium of contaminated soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5): 890-894.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 100-115.
- BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 100-115.
- [16] 秦丽, 祖艳群, 湛方栋, 等. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 471-477.
- QIN Li, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill. and maize in intercropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 471-477.
- [17] 王吉秀, 祖艳群, 李元, 等. 玉米和蔬菜不同间套模式对重金属Pb、Cu、Cd累积的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2168-2173.
- WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Effects of maize and vegetable intercropping system on accumulation of Pb, Cu and Cd in plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2168-2173.
- [18] 安玲遥. 作物间作对重金属吸收的影响及其机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 11-15.
- AN Ling-yao. Research of crop intercropping effect on the absorption of heavy metal and its mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 11-15.
- [19] 陈静, 王学军, 朱立军. pH对砷在贵州红壤中的吸附的影响[J]. *土壤*, 2004, 36(2): 211-214.
- CHEN Jing, WANG Xue-jun, ZHU Li-jun. Effect of pH on the adsorption of arsenic in the red soil of Guizhou[J]. *Soil*, 2004, 36(2): 211-214.
- [20] 廖晓勇, 陈同斌, 肖细元, 等. 污染水稻田中土壤含砷量的空间变异特征[J]. *地理研究*, 2003, 22(5): 635-643.
- LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, XIAO Xi-yuan, et al. Spatial distributions of arsenic in contaminated paddy soil[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(5): 635-643.
- [21] 许嘉琳, 杨居荣, 荆红卫. 砷污染土壤的作物效应及其影响因素[J]. *土壤*, 1996, 38(2): 85-89.
- XU Jia-lin, YANG Ju-rong, JING Hong-wei. Crop effect on arsenic contaminated soil and its influencing factors[J]. *Soil*, 1996, 38(2): 85-89.
- [22] 雷梅, 陈同斌, 范稚莲, 等. 磷对土壤中砷吸附的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1989-1992.
- LEI Mei, CHEN Tong-bin, FAN Zhi-lian, et al. Effect of phosphorus on arsenic adsorption by three different soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1989-1992.
- [23] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. *土壤*, 1999(5): 261-265, 280.
- LUO Yong-ming. Metal contaminated soil phytoremediation[J]. *Soil*, 1999(5): 261-265, 280.