

玉米与龙葵间作模式对植物生长及Cd富集特征的影响

闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 林大松, 王雅君, 徐应明, 王瑞刚

引用本文:

闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 等. 玉米与龙葵间作模式对植物生长及Cd富集特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2162–2171.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0639>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响

陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 李博, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2103–2110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1446>

不同铜浓度下玉米间作豌豆对土壤铜的吸收效应研究

徐健程, 王晓维, 聂亚平, 罗杰, 杨潇一, 杨文亭

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1508–1514 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.011>

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

谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 李元, 祖艳群

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 53–60 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.007>

重金属Pb与抗生素对发光菌的联合毒性研究

李孟涵, 贺子琪, 苗家赫, 王凤贺

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1925–1936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0103>

酸与Cd污染农田的植物修复及健康风险评价

赵雪梅, 谢华, 吴开庆, 余孟好, 杨瑞刚, 李相林

农业环境科学学报. 2015(4): 702–708 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.014>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 等. 玉米与龙葵间作模式对植物生长及Cd富集特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2162–2171.

YAN Ren-jun, HAN Lei, ZHAO Ya-ping, et al. Effects of intercropping modes of *Zea mays* L. and *Solanum nigrum* L. on plant growth and Cd enrichment characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2162–2172.



开放科学 OSID

玉米与龙葵间作模式对植物生长及Cd富集特征的影响

闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 林大松, 王雅君, 徐应明, 王瑞刚*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为探究最优的间作修复模式,通过田间小区试验,以玉米和超富集植物龙葵为研究对象,设置单作玉米(CK1)、单作龙葵(CK2)、宽窄行玉米宽行间作单行龙葵(T1)、宽窄行玉米宽行间作双行交错龙葵(T2)、等行距单行玉米间作单行龙葵(T3)、等行距单行玉米间作双行交错龙葵(T4)、等4行距玉米间作等4行距龙葵(T5)7种植模式,研究不同模式下玉米和龙葵各器官生物量、土地当量比、Cd含量、富集系数和转运系数、总Cd提取量、根际土壤pH和有效态Cd含量的变化。结果显示,5种间作模式的土地当量比均大于1。与CK1相比,T3间作模式玉米产量增加15.6%,T1、T4、T5间作模式玉米产量降幅小于10%,T2间作模式玉米产量减少16.8%;与CK2相比,5种间作模式龙葵单株总生物量没有显著变化。5种间作模式没有显著改变玉米和龙葵各部位的Cd含量,以及生物富集系数和转运系数,但却显著提高了单位面积总Cd提取量,其中T4间作模式最高。除T5外,其他4种间作模式均显著降低了龙葵和玉米根际土壤pH,提高了龙葵根际土壤Cd有效态含量,却降低了玉米根际土壤Cd有效态含量。这表明玉米与龙葵表现为种间生长促进,T1、T3、T4、T5 4种间作模式不仅可以保障玉米稳产,而且能显著提高修复效率,实现边生产边修复的目的,其中T4间作模式最优。另外,沈阳地区龙葵种子在湖南表现出不适应性,建议选用当地龙葵进行间作修复。

关键词:玉米;龙葵;间作;生长;Cd富集

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2162-10 doi:10.11654/jaes.2020-0639

Effects of intercropping modes of *Zea mays* L. and *Solanum nigrum* L. on plant growth and Cd enrichment characteristics

YAN Ren-jun, HAN Lei, ZHAO Ya-ping, LIN Da-song, WANG Ya-jun, XU Ying-ming, WANG Rui-gang*

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to explore the appropriate intercropping restoration mode, a field plot experiment was conducted to investigate the changes in the biomass land equivalent ratio, Cd content, total Cd extraction, bioaccumulation coefficient (BCF), transfer coefficient (TF), pH, and available Cd content in the rhizosphere soil of *Zea mays* L. and the hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. in seven planting modes, including a monoculture of *Z. mays* (CK1), monoculture of *S. nigrum* (CK2), wide-narrow row of *Z. mays* and single row of *S. nigrum* intercropped between wide rows (T1), wide-narrow row of *Z. mays* and double row of interlaced *S. nigrum* intercropped between wide rows (T2), intercropped equidistant single row of *Z. mays* and single row of *S. nigrum* (T3), intercropped equidistant single row of *Z. mays* and double row of interlaced *S. nigrum* (T4), and *Z. mays* and *S. nigrum* intercropped with four equal rows (T5). The results showed that the land equivalent ratio of the five intercropping modes was greater than 1. Compared with that of CK1, the T3 intercropping mode increased the yield of *Z. mays* by 15.6%, the T1, T4, and T5 intercropping modes decreased the yield of *Z. mays* by less than 10%, and the T2 intercropping mode decreased the yield of *Z. mays* by 16.8%. Compared with that of CK2, the five intercropping modes did not change the total biomass per plant of *S. nigrum*. The five intercropping modes did not significantly change the Cd content, BCF, and TF of *Z. mays* and *S. nigrum*, but significantly increased the total Cd extraction per unit area, and that under the T4 intercropping mode was the highest. In

收稿日期:2020-06-08 录用日期:2020-07-09

作者简介:闫仁俊(1992—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要从事农田重金属污染修复研究。E-mail:1549423698@qq.com

*通信作者:王瑞刚 E-mail:3761520835@sina.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800904);国家自然科学基金项目(41877403)

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0800904); The National Natural Science Foundation of China(41877403)

addition to the T5 treatment, the other four intercropping modes significantly reduced the pH of the rhizosphere soil of *S. nigrum* and *Z. mays*, increased the Cd content of the rhizosphere soil of *S. nigrum*, and decreased the Cd content of the rhizosphere soil of *Z. mays*. This indicated that the intercropping modes improved the growth of *Z. mays* and *S. nigrum*. The intercropping modes of T1, T3, T4, and T5 not only ensured the stable yield of *Z. mays*, but also significantly improved the efficiency of restoration and reached the purpose of repairing while producing, and the T4 intercropping mode was the most effective. In addition, the *S. nigrum* in the Shenyang area was not adaptable in Hunan Province, so it was suggested to choose local *S. nigrum* for intercropping restoration.

Keywords: *Zea mays* L.; *Solanum nigrum* L.; intercropping; growth; Cd accumulation

据2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤总点位超标率达16.1%,土壤Cd污染点位超标率达到7.0%^[1]。Cd在土壤中具有水溶性和不可降解性,极易被农作物吸收,造成粮食减产和粮食污染。Cd污染导致我国粮食产量每年损失超过 1×10^7 t,总经济损失超过200亿元^[2-3]。Cd超标农产品中的Cd经食物链传递进入动物或人体,严重危害人类身体健康^[4-5]。植物修复具有操作简单、修复成本低、绿色环保等特点,对中轻度Cd污染土壤治理有较好的应用前景^[6-7]。然而,修复植物替代农作物破坏了农业生产结构,导致粮食产量降低,影响农民经济收入,不能满足我国的农业生产需求。

低积累作物和超富集植物的间作修复模式,不仅可以保障粮食生产的相对稳定,而且能起到明显的植物修复效果,实现边生产边修复目的,在耕地污染修复中越来越受重视。黄益宗等^[8]采用盆栽实验研究玉米(*Zea mays* L.)与羽扇豆和鹰嘴豆间作对Cd吸收的影响,结果表明玉米与鹰嘴豆间作模式下玉米籽粒对Cd的吸收显著降低。Jiang等^[9]研究表明东南景天和玉米间作显著提高东南景天地上部对Pb的吸收,降低玉米体内Pb含量。刘海军等^[10]采用盆栽实验研究玉米与马唐间作模式下玉米积累Cd的变化,发现玉米与马唐间作模式能降低玉米植株中的Cd含量。良好的间作修复模式是在保证玉米产量稳定的情况下,提高超富集植物的提取效率。因此,筛选出较好的间作修复模式尤为重要。目前,大多研究是通过盆栽试验研究间作模式下两种植物吸收和富集重金属的相关机理。而关于间作修复的田间试验研究相对较少,也没有真正形成可推广的田间间作修复技术模式。近年来,少数研究开始关注间作模式的大田试验和应用,如郭楠等^[11]研究了5种玉米与籽粒苋间作模式对单位面积玉米产量和修复效率的影响,并发现交错宽窄行玉米宽行间作单行籽粒苋有助于玉米产量的提高,玉米与籽粒苋等4行间作模式下籽粒苋Cd提取量最大。龙葵(*Solanum nigrum* L.)是在沈阳首

先发现的一种Cd超富集植物,具有生长适应性强且生物量大的特征,在农田重金属修复实践中具有很好的前景^[12]。而关于玉米与龙葵间作修复的大田试验还鲜见报道。

为此,本论文通过田间小区试验,研究了玉米与龙葵不同间作模式下玉米和龙葵各器官生物量、土地当量比、Cd含量、富集系数和转运系数、总Cd提取量、根际土壤pH和有效态Cd含量的变化,旨在探究玉米与龙葵的最优空间配置,筛选最优的间作修复模式,为受污染耕地边生产边修复提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试地点与材料

试验地点位于湖南省长沙县(28°45' N, 113°07' E),具有典型亚热带季风气候,春季和夏季降水偏多,全年平均气温18℃,年均降水量1358.6 mm,土壤发育于花岗岩母质麻沙泥^[13]。基本理化性质如下:pH 4.81,有机质25.93 g·kg⁻¹,CEC 9.24 cmol·kg⁻¹,全氮1.19 g·kg⁻¹,全磷1.05 g·kg⁻¹,全钾42.59 g·kg⁻¹,碱解氮88.40 mg·kg⁻¹,有效磷53.53 mg·kg⁻¹,速效钾78.46 mg·kg⁻¹,缓效钾89.07 mg·kg⁻¹,总Cd 0.64 mg·kg⁻¹,有效态Cd 0.36 mg·kg⁻¹。玉米品种为登海11号,购自湖南田丰农资种业有限公司。龙葵品种为产于辽宁沈阳的野生型龙葵,购自中国科学院沈阳应用生态研究所。

1.2 试验设计

在湖南省北山试验基地进行大田试验,共设7个种植模式,每个模式重复4次,共28个小区,每个小区面积为7 m×7 m=49 m²。试验小区种植模式见表1。

玉米在2018年7月20日播种,龙葵7月15日开始育苗,8月12日移栽到大田;待玉米长出3片叶子,进行间苗,每穴仅留1株。玉米与龙葵均在2018年10月18日收获。在玉米整个生长期,按当地农民的种植习惯来管理。

1.3 样品采集和前处理

种植玉米成熟后,分别采集玉米和龙葵植株样

表1 试验小区种植模式
Table 1 Planting mode of test plot

种植模式 Planting modes	种植编号 Planting No.	玉米行株距 Row and plant spacing of <i>Z. mays</i> /cm	龙葵行株距 Row and plant spacing of <i>S. nigrum</i> /cm	玉米和龙葵株数 Numbers of <i>Z. mays</i> and <i>S. nigrum</i>
玉米单作 Monoculture of <i>Z. mays</i>	CK1	70×25	—	280和0
龙葵单作 Monoculture of <i>S. nigrum</i>	CK2	—	50×60	0和168
宽窄行玉米宽行间作单行龙葵 Wide-narrow-row of <i>Z. mays</i> and single-row <i>S. nigrum</i> intercropped between wide rows	T1	100(宽)/40(窄) ×25	50×60	280和60
宽窄行玉米宽行间作双行交错龙葵 Wide-narrow-row of <i>Z. mays</i> and double-row interlaced <i>S. nigrum</i> intercropped between wide rows	T2	100(宽)/40(窄) ×25	33×60	280和120
等行距单行玉米间作单行龙葵 Equidistant single-row <i>Z. mays</i> and single-row <i>S. nigrum</i> intercropped	T3	100×20	50×60	245和84
等行距单行玉米间作双行交错龙葵 Equidistant single-row <i>Z. mays</i> and double-row interlaced <i>S. nigrum</i> intercropped	T4	100×20	33×60	245和168
玉米/龙葵等4行距间作 <i>Z. mays</i> and <i>S. nigrum</i> intercropped with equal 4 rows	T5	50×20	50×60	245和84

品,以及两者的根际土壤样品。每个小区随机采集3株玉米和3株龙葵植株样品作为本小区的玉米和龙葵植株的混合样品。利用抖根法采集相同植株的根际土壤,将其混合作为本小区玉米和龙葵的根际土壤样品。将玉米和龙葵植株分根、茎、叶和籽粒4部分,用自来水清洗干净后,再用去离子水冲洗两遍,然后在105℃烘箱中杀青30 min,70℃烘干至恒质量。用十分之一天平称量两种植株根、茎、叶各部分生物量和籽粒的产量,然后将根、茎、叶和籽粒分别粉碎,过100目筛后用于组织中Cd含量的测定。根际土壤样品自然风干后,研磨,过20目筛后备用。

1.4 植物Cd含量的测定

称取过100目筛的玉米或龙葵植株样品0.250 0 g,加入10 mL硝酸消解,放入电热消解仪(ED54, LabTech, 中国)进行消解,经过80℃消解1.5 h、120℃消解1.5 h、150℃消解2 h后,升温至175℃赶酸至约1 mL,用1%硝酸多次冲洗消解管,将溶液移入25 mL容量瓶定容,4℃保存待测。用ICP-MS(iCAP Q, Thermo, 美国)测定待测液中Cd的含量。

1.5 土壤pH和有效态Cd含量测定

土壤pH测定:水土比2.5:1混合,振荡30 min,待溶液澄清后用pH计(PB-10, Sartorius, 德国)测定。

有效态Cd含量测定:取过20目筛的风干土样1.000 g放入50 mL离心管中,加入10 mL的0.1 mol·L⁻¹盐酸,在摇床上150 r·min⁻¹振荡2 h,然后3 000 r·min⁻¹离心20 min,再将上清液用定量滤纸过滤,然后转移

到试管中待测。用ICP-MS测定待测液中Cd的含量。同时使用土壤标准物质GBW07452(GSS-23)和绿茶标准物质GBW10052进行质量控制,检测数据控制在标准物质确定值与不确定度范围内,回收率90%~110%。

1.6 计算方法

植物单株地上部Cd提取量(g)=植物地上部Cd含量(μg·g⁻¹)×植物地上部生物量(g)

单位面积植物地上部总Cd提取量(g·m⁻²)=单株植物地上部Cd提取量(g·plant⁻¹)×小区植物株数/小区面积(m²)

不同种植模式单位面积地上部总Cd提取量(g)=单位面积玉米地上部总Cd提取量(g)+单位面积龙葵地上部总Cd提取量(g)

单位面积作物产量(g·m⁻²)=单株作物产量(g·plant⁻¹)×小区植物株数/小区面积(m²)

富集系数(BCF)=不同部位Cd含量(μg·g⁻¹)/土壤Cd含量(μg·g⁻¹)^[14]

转运系数(TF)=植物地上各部位Cd含量(μg·g⁻¹)/根Cd含量(μg·g⁻¹)^[15]

土地当量比(LER)=间作玉米地上部生物量(g)/单作玉米地上部生物量(g)+间作龙葵地上部生物量(g)/单作龙葵地上部生物量(g)^[16]

1.7 数据处理

采用Excel 2007和SPSS 16.0软件进行数据分析,利用单因素和Duncan法进行方差分析和多重比较(*P*<

0.05),用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 玉米和龙葵各部位生物量

由表2可知,与单作玉米相比,除叶生物量外,不同间作模式均不同程度地提高了单株玉米的根、茎、籽粒和总生物量,其中T3和T4间作模式增加幅度最大,且达到了显著水平(除T4的籽粒外, $P<0.05$)。

与单作龙葵相比,5种间作模式的龙葵单株生物量没有显著变化。但5种间作模式下龙葵各部位的生物量存在差异,与单作龙葵相比,T2间作模式显著降低龙葵根生物量,T3模式显著降低龙葵茎的生物量,T2、T4和T5间作模式显著增加叶生物量,T5间作模式显著增加根的生物量,T2间作模式显著增加龙葵果生物量,其他间作模式的龙葵果生物量没有显著差异。

2.2 不同种植模式下玉米和龙葵单位面积地上部总生物量和土地当量比

由表3可知,与单作玉米相比,玉米单位面积地上部总生物量在T3间作模式下达到最大,在T5模式却显著降低,在其他3种模式下有降低,但没有达到显著水平。与单作龙葵相比,龙葵单位面积地上部总生物量在T2间作模式下显著增加,在其他4种间作模式下均没有显著差异。5种间作模式的土地当量比(LER)均大于1。

2.3 玉米与龙葵各部位的Cd含量

如表4所示,玉米各部位Cd含量分布为:根>叶>茎>籽粒。与单作玉米相比,间作处理没有显著改变玉米籽粒中Cd含量,且所有处理玉米Cd含量均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—

表3 不同种植模式下玉米和龙葵单位面积地上部总生物量和土地当量比

Table 3 Aboveground total biomass per unit area and LER of *Z. mays* and *S. nigrum* in different planting modes

模式 Modes	玉米生物量 <i>Z.mays</i> biomass/ (kg·hm ⁻²)	龙葵生物量 <i>S.nigrum</i> biomass/ (kg·hm ⁻²)	土地当量比 LER
CK1	14 468±783ab	—	1.0
CK2	—	319±37b	1.0
T1	14 218±576bc	321±23b	2.00±0.07
T2	13 684±617bc	416±64a	2.28±0.44
T3	15 482±530a	306±45b	2.04±0.22
T4	14 034±1 480bc	380±63ab	2.16±0.18
T5	13 024±160c	391±70ab	2.13±0.19

2017)中Cd的限值;除T4间作模式显著增加玉米茎和叶Cd含量($P<0.05$),以及T5间作模式显著增加玉米叶Cd含量($P<0.05$)外,其他间作处理对玉米各部位的Cd含量没有显著影响。与单作龙葵相比,除T5间作模式显著增加根、茎Cd含量外($P<0.05$),其他间作处理没有显著改变龙葵根茎叶各部位的Cd含量,但间作处理(除T5外)显著降低了其果实中Cd的含量($P<0.05$)。

2.4 玉米与龙葵的富集系数和转运系数

由表5可知,玉米各部位BCF呈现根>地上部>籽粒,其中籽粒的BCF最低,仅为0.02~0.03。除T5间作模式显著降低玉米籽粒BCF、T4模式显著增加玉米地上部TCF外,其他间作处理并没有显著改变玉米根和地上部的BCF。龙葵根和地上部BCF均大于1,且地上部>根,地上部BCF为7.06~11.16。与单作龙葵相比,除T5模式显著增加根BCF外,其他间作模式对龙葵根部和地上部BCF无显著影响。

表2 不同种植模式下玉米和龙葵单株各部位的生物量(g·plant⁻¹)

Table 2 Biomass of different parts of *Z. mays* and *S. nigrum* in different planting modes(g·plant⁻¹)

模式 Modes	玉米 <i>Z.mays</i>					龙葵 <i>S. nigrum</i>				
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain	总生物量 Total biomass	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit	总生物量 Total biomass
CK1	9.21±1.33d	104.57±12.70b	31.90±1.16a	116.59±2.31bc	262.27±12.49c	—	—	—	—	—
CK2	—	—	—	—	—	0.77±0.12b	3.49±0.29a	3.08±0.92c	3.03±0.79b	10.36±1.18ab
T1	13.23±0.71bc	111.56±0.70ab	30.33±0.65ab	106.80±9.75cd	261.91±10.10c	0.73±0.13bc	3.02±0.95ab	3.49±0.76bc	3.13±0.24b	10.37±0.78ab
T2	13.59±1.67b	113.61±1.04ab	28.76±2.95b	96.98±10.95d	252.94±12.43c	0.51±0.06c	2.91±0.63ab	4.90±0.67ab	4.69±0.71a	13.01±1.92a
T3	12.82±1.22bc	123.62±13.92a	31.80±2.72a	154.06±6.75a	322.31±10.63a	0.60±0.13bc	2.12±0.56b	3.64±0.39bc	3.44±0.50b	9.80±1.45b
T4	15.42±1.71a	126.13±19.30a	32.72±0.59a	121.69±10.17b	295.97±29.17b	0.82±0.06b	3.15±0.16ab	4.81±1.48ab	3.45±0.63b	12.22±1.94ab
T5	11.45±0.83c	108.49±1.73ab	31.31±1.22ab	120.55±4.08b	271.80±3.72c	1.29±0.27a	2.92±1.03ab	5.68±1.24a	3.15±0.60b	13.05±2.30a

注:同列的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters in same column denote statistically significant differences at 0.05 level. The same below.

表4 不同种植模式下玉米和龙葵各部位Cd含量(μg·g⁻¹)

Table 4 Cd concentration of different parts of *Z. mays* and *S. nigrum* in different planting modes(μg·g⁻¹)

模式 Modes	玉米 <i>Z. mays</i>				龙葵 <i>S. nigrum</i>			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit
CK1	0.85±0.16abc	0.26±0.08b	0.53±0.08b	0.02±0.00ab	—	—	—	—
CK2	—	—	—	—	4.25±0.33b	7.20±0.31bc	8.95±0.50a	1.84±0.25b
T1	0.68±0.13bc	0.30±0.06b	0.49±0.07b	0.02±0.00ab	3.91±0.46b	7.11±1.03bc	7.15±1.28a	1.39±0.26cd
T2	0.91±0.25ab	0.31±0.07b	0.58±0.18b	0.02±0.00ab	4.01±0.10b	7.96±0.84b	6.83±0.18a	1.18±0.15d
T3	0.56±0.09c	0.30±0.05b	0.60±0.15b	0.02±0.01ab	3.52±0.63b	6.49±0.86c	6.45±1.99a	1.32±0.13cd
T4	1.06±0.25a	0.44±0.05a	0.80±0.11a	0.02±0.00a	4.05±0.57b	7.57±0.61bc	8.71±0.89a	1.57±0.08c
T5	0.82±0.30abc	0.30±0.06b	0.67±0.12a	0.01±0.00b	5.90±0.84a	9.29±1.09a	8.75±2.76a	2.43±0.16a

表5 不同种植模式下玉米和龙葵的生物富集系数和转运系数

Table 5 BCF and TF of *Z. mays* and *S. nigrum* in different planting modes

模式 Modes	生物富集系数 BCF					转运系数 TF		
	玉米 <i>Z. mays</i>			龙葵 <i>S. nigrum</i>		玉米 <i>Z. mays</i>		龙葵 <i>S. nigrum</i>
	根/土 Root/Soil	籽粒/土 Grain/Soil	地上部/土 Shoot/Soil	根/土 Root/Soil	地上部/土 Shoot/Soil	籽粒/根 Grain/Root	地上部/根 Shoot/Root	地上部/根 Shoot/Root
CK1	1.32±0.25abc	0.03±0.00a	0.29±0.06b	—	—	0.02±0.00a	0.22±0.08a	—
CK2	—	—	—	6.64±0.51b	9.46±1.06abc	—	—	1.43±0.16ab
T1	1.06±0.21bc	0.03±0.00ab	0.31±0.05b	6.12±0.72b	8.33±1.42bc	0.03±0.01a	0.31±0.09a	1.37±0.19ab
T2	1.55±0.34ab	0.03±0.01ab	0.35±0.09b	6.27±0.16b	7.77±0.38bc	0.02±0.01a	0.23±0.05a	1.24±0.05b
T3	0.88±0.14c	0.02±0.01ab	0.30±0.06b	5.50±0.98b	7.06±1.46c	0.03±0.01a	0.34±0.03a	1.29±0.21ab
T4	1.66±0.38a	0.03±0.01a	0.47±0.05a	6.33±0.89b	9.77±0.86ab	0.02±0.00a	0.29±0.07a	1.57±0.29a
T5	1.29±0.47abc	0.02±0.00b	0.33±0.07b	9.22±1.32a	11.16±2.78a	0.02±0.00a	0.28±0.09a	1.20±0.22b

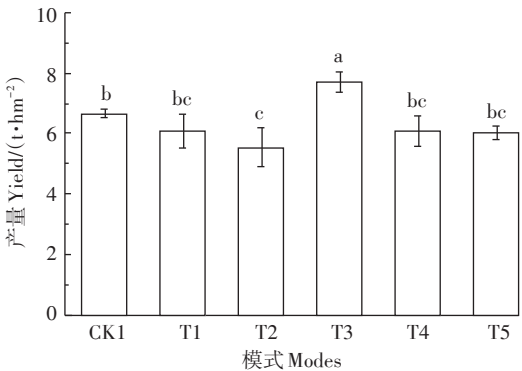
玉米TF地上部>籽粒,籽粒TF仅为0.02~0.03。与单作玉米相比,间作处理并没有显著改变玉米地上部和根的TF。龙葵地上部TF为1.20~1.57。与单作龙葵相比,间作模式对龙葵地上部TF也无显著影响。

2.5 不同种植模式下玉米单位面积产量

如图1所示,玉米单位面积产量的排序为T3>CK1>T1>T4>T5>T2。与单作玉米相比,T3处理显著增加了玉米产量,增加幅度为15.6%;T2处理显著降低了玉米产量,降低幅度为16.8%;T1、T4、T5间作模式下玉米产量稍微降低,降幅均在10%以内,且没有达到显著水平。

2.6 不同种植模式单位面积地上部总Cd提取量

图2为玉米和龙葵单位面积总Cd提取量的变化,不同种植模式下,T1~T5间作模式单位面积总Cd提取量高于单作玉米和单作龙葵,其排序为T4>T2>T5>T3>T1>CK1>CK2,且除T1外,其他4种间作模式均达到了显著水平($P<0.05$),其中T4间作模式增加幅度最大,比单作玉米增加了150.5%,其次是T2间作模式,比单作玉米增加72.4%。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同
Different small letters denote statistically significant differences at 0.05 level. The same below

图1 不同种植模式下玉米单位面积产量

Figure 1 Yield of *Z. mays* in different planting modes

2.7 不同种植模式下玉米与龙葵根际土壤pH和有效态Cd含量

不同种植模式下玉米根际土壤pH的变化如图3A所示,与单作玉米相比,T2、T3和T4处理显著降低了根际土壤的pH值($P<0.05$),而T1和T5没有显著改

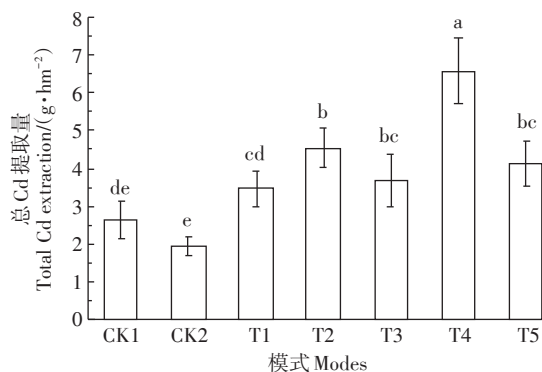


图2 不同种植模式单位面积地上部总Cd提取量

Figure 2 The aboveground total Cd extraction amount per unit area in different planting modes

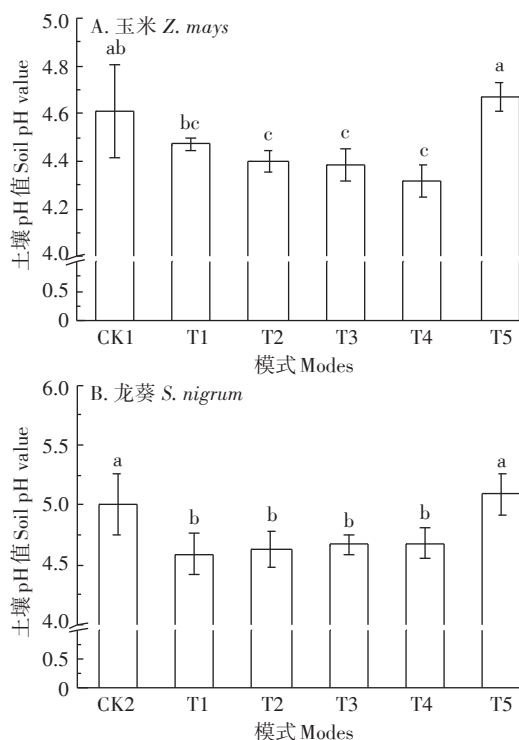


图3 不同种植模式下玉米和龙葵根际土壤pH值

Figure 3 The pH value in rhizosphere soil of *Z. mays* and *S. nigrum* in different planting modes

变根际土壤pH值。与龙葵单作相比,除T5没有显著改变龙葵根际土壤pH值外,其他间作模式均显著降低了龙葵根际土壤pH值($P<0.05$)(图3B)。

不同间作模式下玉米根际土壤有效态Cd含量的变化如图4A所示,与单作玉米相比,除T5显著增加其根际土壤有效态Cd含量($P<0.05$)外,其他间作处理均显著降低了根际土壤有效态Cd的含量($P<0.05$),其中T1降低幅度最大,达到19.07%。不同间作模式下龙葵根际土壤有效态Cd含量的变化如图4B所示,与CK2

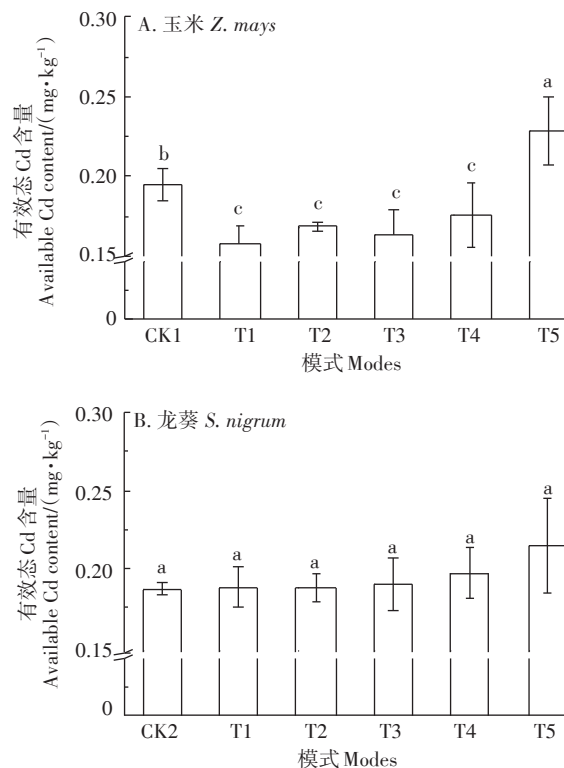


图4 不同种植模式下玉米和龙葵根际土壤有效态Cd含量

Figure 4 Available Cd content in rhizosphere soil of *Z. mays* and *S. nigrum* in different planting modes

相比,T1~T5间作模式下龙葵根际土壤有效态Cd含量均有不同程度增加,但未达到显著水平。

3 讨论

3.1 不同间作模式对玉米和龙葵生长的影响

间作条件下,植物既有种内相互作用又有种间相互作用,种间相互作用包括种间竞争、种间促进和种间补偿,当种间竞争大于促进时,间作没有优势,相反才能表现出间作优势^[17]。本试验结果显示,玉米与龙葵5种间作模式下,玉米单株各部位的生物量均高于单作玉米。一方面的原因是玉米与龙葵间作系统中玉米的行距增加,且龙葵植株矮小,未对玉米形成空间竞争关系,所以间作模式促进了玉米对光的利用,进而促进了玉米的生长。另一方面,间作模式可以通过改变根系分泌物的种类、数量以及微生物的种群,进而改变土壤养分的有效性,提高间作模式对养分的利用率来促进生长^[18-19]。这与间作模式下的许多研究结果一致,如玉米与籽粒苋间作模式也不同程度地促进了玉米单株的生长^[11];玉米与续断菊间作体系下,玉米生物量相比单作增加了29.02%^[20];玉米和东南景天间作,两种植物单株生物量都有增加^[21]。综合

玉米单株籽粒产量和种植密度,T3间作模式下,玉米单位面积产量较单作增加15.6%,而T2间作模式玉米产量较单作减少16.8%,T1、T4、T5间作模式玉米产量基本稳定。间作修复的主要目的是在保障玉米不大幅度减产(减产幅度小于10%)条件下提高修复效率,实现边生产边修复,T1、T3、T4和T5间作模式能维持玉米产量稳定或增产,具有经济可行性。

许多研究发现,和玉米间作的富集植物生长被抑制。如郭楠等^[11]发现间作模式下籽粒苋单株生物量显著降低,降幅达83.9%~96.9%。秦欢等^[22]的研究也发现,间作模式下玉米对大叶井口边草的生物量有一定的抑制作用。本试验结果显示,与单作龙葵相比,5种间作模式的龙葵单株总生物量没有显著变化。这说明玉米的生长没有从光照和土壤营养方面影响到龙葵的生长。另外,原产于沈阳的龙葵在湖南出现不适应,植株比较矮小,其单株生物量远低于沈阳种植的龙葵生物量^[23],可能与土壤和气候条件变化有关,湖南为酸性土壤,而沈阳为碱性土壤,湖南炎热多雨,沈阳冷凉干燥。进而推测,间作模式对龙葵生长的影响可能远小于土壤和气候条件的影响。

国际上通常用土地当量比(LER)来衡量间作后是否具有产量优势,当 $LER > 1$,表明有间作优势, $LER < 1$ 为间作劣势^[24]。农业生产上很多作物间作模式LER都大于1,如玉米/大豆LER为1.65~1.71^[25]、玉米/蚕豆LER为1.21~1.23^[26]、玉米/小麦 $LER > 1$ ^[27]、玉米/烟草LER为1.31~1.84^[28]等。另外,郭楠等^[11]研究也发现,玉米间作修复植物既能保证玉米的产量,又能增加修复植物的生物量。本试验发现T1~T5间作模式的土地当量比全部大于1,说明玉米与龙葵间作模式可以提高单位面积的总生物量,两种植物表现为种间促进作用。

3.2 不同间作模式对玉米和龙葵累积转运Cd的影响

在富集植物和作物的间作体系中,两种植物通过根际分泌物相互作用,影响到根际土壤的pH值和重金属的有效性,进而改变两种植物对重金属的吸收和富集能力。间作体系中的植物种类、土壤类型、间作方式等都会影响到间作植物对重金属的吸收和富集。许多研究发现,间作体系不仅能促进富集植物对重金属的富集,同时还能减少作物对重金属的富集。如郭楠等^[11]发现,籽粒苋和玉米间作,不仅可以减少玉米籽粒对Cd的富集,同时还增加了籽粒苋对Cd的富集,可能与间作体系导致籽粒苋根系分泌大量草酸,增加了根际土壤Cd的活性有关。李凝玉等^[29]、Zhao

等^[30]也得出相似的结果。这种间作模式是最理想的间作模式。但有些间作模式正好相反,抑制富集植物对Cd的富集,促进作物对Cd的富集;还有一些间作模式导致富集植物和作物富集Cd同时增加或者同时减少^[11,29-30]。本研究结果显示,5种间作处理没有显著改变玉米籽粒和其他各部位的Cd含量(除T4间作模式显著增加地上部含量外),以及龙葵各部位Cd的含量(除T5间作模式显著增加根Cd含量外)。但值得注意的是,5种间作模式单位面积地上部总Cd提取量显著高于单作玉米和单作龙葵,说明间作体系总体上促进了两种作物对Cd的吸收和富集,这可能与间作导致根际环境改变有关,特别是根际土壤的pH和Cd的生物有效性^[31-32]。另外,所有种植模式玉米Cd含量均显著低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中Cd的限值,说明玉米和龙葵间作模式可以实现玉米安全生产。

许多研究发现,间作体系中,植物根系交叉在一起,富集植物根系分泌大量的有机酸,有机酸与Cd离子形成螯合物,降低土壤的pH,提高Cd的生物有效性,进而促进富集植物对Cd的吸收和富集^[33-36]。本研究表明,与单作玉米相比,T2、T3、T4间作模式下玉米根际土壤pH显著降低($P < 0.05$)。与单作龙葵相比,T1、T2、T3、T4间作模式龙葵根际土壤pH显著降低($P < 0.05$),而T5间作模式未显著改变龙葵根际土壤的pH。这可能与T1~T4间作模式中玉米和龙葵的根系充分交叉、根系相互作用增强,进而引起龙葵根系分泌有机酸增加有关;而T5模式中仅有少部分根系交叉、根系相互作用较弱,未能引起根系大量分泌有机酸。另外,本研究还发现,与单作龙葵相比,各间作模式龙葵的根际有效态Cd含量都呈增加趋势。这进一步说明,T1~T4间作模式可能引起根系分泌的有机酸等含量增加,导致根际土壤pH降低,pH的降低促进了根际土壤中Cd离子的释放,进而促进了根际土壤Cd生物有效性的增加。Lin等^[37]也发现了相似的结果,龙葵与樱桃间作增加了龙葵根际土壤Cd的生物有效性,提高了龙葵对Cd的提取量。值得注意的是,与玉米单作相比,T1~T4间作模式虽然降低了根际土壤pH,却也显著降低了根际土壤中Cd的有效性($P < 0.05$),这可能与龙葵和玉米根系对有效态Cd的竞争吸收有关,龙葵对Cd的吸收和转运能力显著高于玉米,使得玉米根际土壤中有效态Cd大量向龙葵根际转移,被龙葵根系吸收,进而引起了玉米根际土壤Cd有效性的降低。Wu等^[38]在玉米和东南景天间

作模式中也得出相同的结论。Tang等^[39]也得出相似的结论。而T5模式由于玉米和龙葵根系互作较弱,导致根际土壤Cd的有效性无显著变化。

富集系数(BCF)是指植物地上部Cd含量与土壤中Cd含量之比,能够直观反映植物地上部Cd的富集能力^[40]。转移系数(TF)能反映植物根系转运Cd到地上部的能力^[41]。本试验结果显示,无论单作还是间作模式,龙葵地上部BCF和TF均大于1;与单作模式相比,间作模式对龙葵地上部的BCF和TF无显著影响。这说明龙葵体内的Cd主要存在于地上部,与居述云等^[42]的研究结果相似,间作模式并没有显著促进Cd向地上部转运和富集,可能与间作模式未对龙葵的生长产生抑制有关。与霍文敏等^[43]的研究结果相似,间作模式增加了龙葵对Cd的吸收。郭楠等^[11]研究发现间作模式导致籽粒苋BCF和TF增加,可能与间作模式抑制富集植物籽粒苋生长导致Cd浓度在其体内产生富集效应有关。与单作玉米相比,T4模式显著增加了玉米地上部BCF,但未显著改变其TF,其他4种间作模式对玉米地上部的BCF和TF均没有显著影响。这说明T4间作模式能更有效地促进Cd在玉米地上部的富集,可能与T4间作模式玉米和龙葵的根系的交互作用更充分有关,因为T4间作模式玉米和龙葵的行株距最小。目前,关于间作模式对富集植物和作物富集转运Cd的影响机制尚不清楚,还需要进一步研究。

植物提取量由植物地上部的重金属含量和生物量两个因素决定^[44]。卫泽斌等^[45]研究表明间作模式可以提高富集植物对Cd的提取效率。但也有研究发现,修复植物单作总Cd的提取量高于间作模式,如郭楠等^[11]研究发现,各间作模式Cd的单位面积提取总量均高于单作玉米且均低于单作籽粒苋,主要原因是玉米间作籽粒苋显著抑制了籽粒苋的生长,致使间作模式显著降低籽粒苋对Cd的提取,进而减少间作模式单位面积Cd的提取量。本试验的结果则不同,与单作玉米相比,5种间作模式单位面积总Cd的提取量显著增加,其中T4间作模式增幅最大,其次是T2间作模式。这表明间作模式能显著提高植物修复的效率,主要的原因是间作模式在玉米地上部总Cd提取量没有下降的情况下增加了龙葵的提取量。值得注意的是,单作龙葵总Cd提取量反而最低,可能与龙葵的生态型不适应湖南气候有关,本试验所用的龙葵种子来自沈阳,气候条件对龙葵生长的抑制作用远大于间作玉米对龙葵生长的影响。同样的现象也发生在

广东韶关的试验中,而利用韶关当地的龙葵生态型,其生长状态良好,因此建议在龙葵修复试验中选择当地的生态型。

3.3 不同间作模式的综合分析

最优的间作修复模式是在保证作物产量不显著降低和作物可食部位Cd含量不变或降低的同时,最大限度地提高单位面积总Cd的提取量,进而实现边生产边修复的目的。就作物可食部位Cd含量而言,5种间作模式均没有显著改变玉米籽粒中Cd含量,且所有种植模式玉米Cd含量均显著低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中Cd的限值;就单位面积玉米产量而言,T3>CK1>T1>T4>T5>T2,T3处理显著增加了玉米产量;T1、T4、T5间作模式下玉米产量稍微降低,降幅均在10%以内,且没有达到显著水平;就总Cd提取量而言:T4>T2>T5>T3>T1>CK1>CK2,且T4模式相比单作玉米提高150%以上。综上所述,T4间作模式既保证了玉米的籽粒Cd含量达标和基本稳产,又最大限度地增加了单位面积总Cd的提取量。T4间作模式的行距均为100 cm,保证了玉米行与行的通风透光,同时,该模式间作双行龙葵,使玉米和龙葵根系相互促进作用增强,进而提升了玉米单株的产量,虽然单位面积种植数量降低,但产量没有显著变化;同时,由于玉米和龙葵根系更充分的相互作用,降低了玉米根际土壤的pH,促进了Cd向玉米茎和叶中转移富集,进而提高了整个间作系统的修复效率。与本试验玉米和龙葵的间作模式不同,玉米和籽粒苋T1间作模式有助于提高玉米产量,T5间作模式有助于单位面积Cd提取量的最大化^[11]。间作模式的差异不仅与间作植物地上部与地下部的相互作用有关,而且与间作修复植物的气候适应性有关,相关的机理还需要进一步研究。

4 结论

(1)除宽窄行玉米宽行间作双行交错龙葵模式(T2)外,其他4种间作模式单位面积玉米产量无显著降低,其中等行距单行玉米间作单行龙葵模式(T3)玉米产量还增加15.6%。间作模式对玉米籽粒及各部位的Cd含量和龙葵各部位的Cd含量无显著影响,却显著提高了单位面积总Cd提取量,其中等行距单行玉米间作双行交错龙葵模式(T4)最高。

(2)除玉米/龙葵等4行距间作模式(T5)外,其他4种间作模式显著降低了龙葵和玉米根际土壤pH,增加了龙葵根际土壤Cd的有效性,相反却降低了玉米

根际土壤Cd的有效性,可能与龙葵根系的竞争吸收有关。

(3)等行距单行玉米间作双行交错龙葵(T4)模式既保证了玉米的籽粒Cd含量达标和基本稳产,又最大限度地增加了单位面积总Cd的提取量,是最优的玉米与龙葵的间作修复模式。

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National survey of soil pollution bulletin[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014.
- [2] Hu Y, Cheng H, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92/93:515-532.
- [3] Williams P N, Lei M, Sun G, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(3):637-642.
- [4] Zhuang P, McBride M B, Xia H, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5):1551-1561.
- [5] Du Y, Hu X F, Wu X H, et al. Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan Province, central south China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(12):9843-9856.
- [6] Aziz R, Rafiq M T, Li T, et al. Uptake of cadmium by rice grown on contaminated soils and its bioavailability/toxicity in human cell lines (Caco-2/HL-7702) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(13):3599-3608.
- [7] Li J R, Xu Y M. Immobilization remediation of Cd-polluted soil with different water condition[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193:607-612.
- [8] 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.
- [9] Jiang C A, Wu Q T, Sterckeman T, et al. Coplanting can phytoextract similar amounts of cadmium and zinc to monocropping from contaminated soils[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36:391-395.
- [10] 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 intercropping system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(15):206-210.
- [11] 郭楠, 迟光宇, 史奕, 等. 玉米与籽粒苋不同种植模式下植物生长及Cd累积特征[J]. *应用生态学报*, 2019(9):3164-3174.
GUO Nan, CHI Guang-yu, SHI Yi, et al. Plant growth and accumulation characteristics to Cd in different planting modes of maize and *Amaranthus hypochondriacus*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019(9):3164-3174.
- [12] 魏树和, 周启星, 王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. *环境科学*, 2005(3):169-173.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics[J]. *Environmental Science*, 2005(3):169-173.
- [13] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8):1818-1826.
XUE Tao, LIAO Xiao-yong, WANG Ling-qing, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1818-1826.
- [14] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. Principles and methods of contaminated soil repair[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [15] Fayiga A O, Ma L Q, Cao X D, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(2):289-296.
- [16] 李隆. 间套作体系豆科作物固氮生态学原理与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
LI Long. Principles and applications of nitrogen fixation ecology of legume crops in intercropping system[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013.
- [17] Vandermeer J H. Loose coupling of predator-prey cycles: Entrainment, chaos, and intermittency in the classic macarthur predator-competitor equations[J]. *American Naturalist*, 1989, 141:687-716.
- [18] 焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 等. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(14):4324-4330.
JIAO Nian-yuan, NING Tang-yuan, YANG Meng-ke, et al. Effects of maize // peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14):4324-4330.
- [19] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 玉米-大豆间作系统的作物资源竞争[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):139-146.
LÜ Yue, WU Pu-te, CHEN Xiao-li, et al. Resource competition in maize / soybean intercropping system[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):139-146.
- [20] 谭建波, 陈兴, 郭先华, 等. 续断菊与玉米间作系统不同植物部位Cd、Pb分配特征[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4):700-707.
TAN Jian-bo, CHEN Xing, GUO Xian-hua, et al. Distribution characteristics of Pb and Cd in different parts of *Sonchus asper* and *Zea mays* in an intercropping system[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2015, 24(4):700-707.
- [21] 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 cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9):985-990.
- [22] 秦欢, 何忠俊, 熊俊芬, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1281-1288.
- QIN Huan, HE Zhong-jun, XIONG Jun-fen, et al. Effects of intercropping on the contents and accumulation of heavy metals in maize varieties and *Pteris cretica* L. [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1281-1288.
- [23] 殷永超, 吉普辉, 宋雪英, 等. 龙葵(*Solanum nigrum* L.)野外场地规模Cd污染土壤修复试验[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3060-3067.
- YIN Yong-chao, JI Pu-hui, SONG Xue-ying, et al. Field experiment on phytoremediation of cadmium contaminated soils using *Solanum nigrum* L. [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3060-3067.
- [24] Willey R W. Intercropping—its importance and research needs. part 1. Competition and yield advantages[J]. *Field Crop Abstracts*, 1979, 32: 1-10.
- [25] Gao Y, Duan A, Qiu X, et al. Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and soybean[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(4): 952-958.
- [26] Li L, Yang S, Li X, et al. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean[J]. *Plant and Soil*, 1999, 212(2): 105-114.
- [27] Li L, Sun J, Zhang F, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients [J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123-137.
- [28] Li C Y, Sun J H, Zhang F S, et al. Crop diversity for yield increase[J]. *Plos One*, 2009, 4(11): 8049.
- [29] 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.
- [30] Zhao Y, Liu L J, Dang J H, et al. Effects of intercropping different crops with maize on the uptake of the PAHs and heavy metal[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(7): 138-141.
- [31] Dong J, Mao W H, Zhang G P, et al. Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity: A review[J]. *Plant Soil and Environment*, 2007, 53(5): 193-200.
- [32] Martinez-Alcala I, Clemente R, Bernal M P. Metal availability and chemical properties in the rhizosphere of *Lupinus albus* L. growing in a high-metal calcareous soil[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 201(1/2/3/4): 283-293.
- [33] 崔晓荧, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2177-2184.
- CUI Xiao-ying, QIN Jun-hao, LI Hua-shou. Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2177-2184.
- [34] 熊婕, 朱奇宏, 黄道友, 等. 南方典型稻区稻米镉累积量的预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 22-28.
- XIONG Jie, ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, et al. Prediction model for the accumulation of cadmium in rice in typical paddy fields of south China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 22-28.
- [35] Qiu G, Zhu M, Meng J, et al. Changes in soil microbial biomass C, ATP and microbial ATP concentrations due to increasing soil Cd levels in Chinese paddy soils growing rice (*Oryza sativa*) [J]. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2): 1-12.
- [36] Anderson T A, Guthrie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. *Environmental Science and Technology*, 1993, 27(13): 2630-2636.
- [37] Lin L, Liao M, Mei L, et al. Two ecotypes of hyperaccumulators and accumulators affect cadmium accumulation in cherry seedlings by intercropping[J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2014, 33(4): 45-48.
- [38] 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: 355.
- [39] Tang Y, He J, Yu X N, et al. Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum photeinocarpum* from two ecoclimatic regions promotes growth and reduces cadmium uptake of eggplant seedlings[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(3): 638-644.
- [40] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(1): 37-43.
- [41] Sun Y B, Zhou Q X, Diao C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(5): 1103-1110.
- [42] 居述云, 汪洁, 宓彦彦, 等. 重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子间作和轮作修复[J]. 生态学杂志, 2015(8): 107-112.
- JU Shu-yun, WANG Jie, MI Yan-yan, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbi-zincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015(8): 107-112.
- [43] 霍文敏, 赵中秋, 王丽, 等. 不同超富集、富集植物-玉米间作模式对玉米中镉吸收、转运的影响研究[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 118-127.
- HUO Wen-min, ZHAO Zhong-qiu, WANG Li, et al. Study of the effects of intercropping different hyperaccumulator and accumulator plants on Cd uptake on and transportation by maize[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 118-127.
- [44] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14(3): 277-282.
- [45] 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.