

陈铭孙,李择桂,林贤柯,等.低镉铅甜玉米品种筛选及在间套种修复污染土壤中的应用[J].江苏农业科学,2018,46(17):285-289.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.17.073

低镉铅甜玉米品种筛选及在间套种 修复污染土壤中的应用

陈铭孙,李择桂,林贤柯,刘朋,卫泽斌,吴启堂

(华南农业大学资源环境学院/土壤环境与废物资源农业利用广东高校重点实验室,广东广州 510642)

摘要:在酸性矿山废水造成的镉铅复合污染农田土壤中,筛选出经济价值更高的甜玉米低积累镉铅的品种,而后应用在间套种修复污染土壤中。秋季田间试验结果表明,8个甜玉米品种中,JZY和CN-6品种重金属含量符合食用卫生标准,而且产量较高,在重金属污染地区推广较为合适。渗滤池中另一种中性污染土壤上JZY甜玉米与东南景天套种试验表明,JZY甜玉米籽粒重金属镉(Cd)和铅(Pb)含量符合食用卫生标准;无淋洗套种东南景天对Cd的提取率为2.74%,土壤Cd含量下降10.3%;混合螯合剂(mix chelant,MC)淋洗处理的土壤玉米籽粒Cd、Pb含量比未淋洗土壤进一步下降3.8%和6.9%,土壤Cd、Pb下降分别达到23.6%和22.5%。因此,甜玉米低镉铅品种及其间套种修复污染土壤具有应用潜力。

关键词:甜玉米;品种筛选;土壤修复;化学淋洗;重金属;食用卫生标准;产量;提取率

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)17-0285-05

我国农田土壤重金属污染问题严重^[1],对农产品的安全生产构成了严重威胁^[2],广东省是我国农田土壤重金属污染较严重的区域。张金莲等调查了广东省清远市农田土壤重金属污染情况,结果表明,与广东省土壤背景值相比,农田表层0~20 cm土壤中铅(Pb)、铜(Cu)、镉(Cd)、锌(Zn)、镍(Ni)和铬(Cr)元素含量表现出不同程度的富集。从单项污染指数来看,72.7%的表层土壤样品存在1种或几种重金属超标,以Cd、Cu、Pb和Zn污染为主,其中Cd污染比例最高,其次是Cu,最后是污染比例相当的Pb和Zn^[3]。李结雯等对广东省广州市番禺区农田土壤中砷(As)、汞(Hg)、Cu、Zn、Ni、Pb、

Cr、Cd等8种重金属的含量进行分析,结果表明,Cd的污染最普遍,其次是Hg^[4]。林荣誉等对广东省珠海市基本农田规划区的土壤样品进行测定分析,研究发现有7%的土壤处于中污染状态,53%的土壤处于轻污染状态^[5]。

目前,土壤重金属污染的修复途径主要有2种:(1)改变重金属在土壤中的存在形态,使其固定,降低其在环境中的迁移性和生物可利用性,即稳定化;(2)从土壤中去除重金属,使其存留浓度接近或达到背景值,即去(除)污化。方法包括客土、固定化、化学淋洗、电动修复、植物修复、微生物修复和动物修复,单独使用1种方法很难获得高效、低耗、低扰动的理想效果,对重金属污染土壤的治理应根据污染场地的实际情况采用最合理的方案^[6]。另外,采用抗污染低累积作物品种^[7]来减轻农作物可食部分重金属污染,这样能保持农业生产,对人体的危害降至最低,提高农民耕作的积极性,并且具有成本低的优点。目前,国内外正在兴起研究热潮,联合修复技术是目前的研究热点之一。其中,Wu等研究施加配制混合淋洗剂(mix chelant,MC)[柠檬酸:味精废液:乙二胺

收稿日期:2017-04-07

基金项目:国家自然科学基金(编号:21606092,41541012)。

作者简介:陈铭孙(1991—),男,广东肇庆人,硕士研究生,主要研究方向为污染土壤修复。E-mail:1225464608@qq.com。

通信作者:吴启堂,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为土壤污染防治、城市污水污泥的处理与利用、污染水体修复技术。E-mail:wuqitang@scau.edu.cn。

[15]周洪华,陈亚宁,李卫红.新疆铁干里克绿洲水文过程对土壤盐渍化的影响[J].地理学报,2008,63(7):714-724.

[16]丁建丽,姚远,王飞.干旱区土壤盐渍化特征空间建模[J].生态学报,2014,34(16):4620-4631.

[17]马成霞,丁建丽,杨爱霞,等.绿洲区域土壤盐渍化主要参数的空间异质性分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(2):144-150.

[18]梁建财,史海滨,李瑞平,等.不同覆盖方式对中度盐渍土壤的改良增产效应研究[J].中国生态农业学报,2015,23(4):416-424.

[19]张添佑,王玲,王辉,等.玛纳斯河流域盐渍化灌区生态环境遥感监测研究[J].生态学报,2017,37(9):3009-3018.

[20]梁建财,史海滨,李瑞平,等.秸秆覆盖秋浇后盐渍土壤冻融过程及水盐运移特征[J].水土保持学报,2017,31(5):145-151.

[21]孙博,解建仓,汪妮,等.秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐影响的试验研究[J].水土保持通报,2011,31(3):48-51.

[22]张金珠,王振华,虎胆·吐马尔白.秸秆覆盖对土柱垂直一维水分传输与蒸发的影响[J].干旱区研究,2015,32(5):861-868.

[23]乔海龙,刘小京,李伟强,等.秸秆深层覆盖对水分入渗及蒸发的影响[J].中国水土保持科学,2006,4(2):34-38.

[24]李芙蓉,杨劲松,吴亚坤,等.不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J].土壤,2013,45(6):1101-1107.

[25]于舜章,陈雨海,周勋波,等.冬小麦期覆盖秸秆对夏玉米土壤水分动态变化及产量的影响[J].水土保持学报,2004,18(6):175-178.

[26]封晓辉,张秀梅,郭凯,等.覆盖措施对咸水结冰灌溉后土壤水盐动态和棉花生产的影响[J].棉花学报,2015,27(2):135-142.

四乙酸 (ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) : 氯化钾 (KCl) 浓度比 = 10 : 1 : 2 : 3.5] 对东南景天与玉米套种两者吸收重金属的影响, 结果表明, 该方法能够提高东南景天对重金属的富集, 而且低累积作物茎叶也可用作饲料^[8]。卫泽斌等在植物套种和螯合剂施用对重金属污染土壤的长期修复效果以及对地下水可能的环境风险试验中发现, 东南景天与玉米的套种适合于春夏季进行, 施加螯合剂可以促进重金属向下层土迁移, 渗滤液重金属含量会提高, 但未明显超过地下水Ⅲ级标准^[9]。本试验针对 7 个甜玉米品种, 并和 1 个低 Cd 饲料玉米品种进行对比, 开展试验研究, 探讨其对 Cd 和 Pb 元素积累能力的差异, 筛选出低 Cd、Pb 甜玉米品种, 从而降低玉米重金属含量超标的风险, 在饲料玉米的基础上提高玉米

表 1 2 种试验土壤的基本理化性质

土壤类型	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值
田间试验土壤	1.96 ± 0.14	0.61 ± 0.04	18.10 ± 0.98	35.70 ± 2.51	4.29 ± 0.38
渗滤池试验土壤	2.61 ± 0.13	0.69 ± 0.04	11.64 ± 0.66	38.68 ± 1.28	6.59 ± 0.05

1.2 供试试剂与仪器

试剂: 硝酸、氢氟酸、高氯酸、盐酸 (优级纯, 购于广州化学试剂厂)、KOH (购于广东省广州市东圃化工园), Ca(OH)₂ (购于湖南省翁源县某石灰石厂)。

主要仪器: 火焰原子吸收光谱仪 (日本日立 Z-2300 型), 石墨炉原子光谱仪 (日本日立 Z-2700 型), 自动定氮仪 (上海纤检仪器有限公司 KDN-103F), 消化炉 (上海精宏实验设备有限公司 HYP-1040), pH 计 (上海精科仪器有限公司雷磁 PHS-3C)。

1.3 试验设计

品种筛选试验地总面积 110 m², 试验时间为 2015 年 4—7 月。设置 3 个区组 (3 个重复), 8 个处理 (品种), 共 24 个小区, 每个小区面积 2 m², 8 个处理 (品种) 在区组内随机排列。玉米种子共 8 个品种, 其中甜玉米品种 7 个, SMP1260、SMHTN、CN6 号、SSXM、JZY、FM、HZ, 笔者所在课题组已筛选出的低累积饲料玉米品种 1 个, 云石-5 号。玉米 4 月底播种, 每个小区定植 10 株, 7 月初收获。

渗滤池试验时间为 2015 年 11 月至 2016 年 6 月, 由于 CN6 品种春夏季种植产量低, 渗滤池试验玉米品种采用 JZY, 均与东南景天套种, 再分 3 个处理: 处理 1, FeCl₃ 淋洗, 处理 2, 混合螯合剂 (MC) 淋洗以及对对照组 (不作淋洗处理), 每一块面积是 0.9 m × 0.9 m, 每个处理设 3 个重复, 随机排列。11 月先种植超富集植物东南景天, 每个小区均匀种植 100 株大小相近的东南景天苗, 3 月每个小区种植 6 株玉米, 5 月收获东南景天, 6 月收获玉米, 灌溉水为自然降水和自来水。

每个月施复合肥 1 次, 每小区 10 g, 玉米成熟前 1 个月喷洒杀虫剂除虫。

1.4 样品收集与处理方法

样品采集: 种植玉米前采集起始土壤样品, 玉米收获前 1 个月收获东南景天, 玉米收获时采集土壤样品及玉米籽粒、茎叶植物样品, 东南景天。土壤样品用土钻分别采集 0~20、20~40 cm 2 个土层。

样品处理: 土壤样品采集后置于通风阴凉处风干, 过 20、100 目尼龙筛, 储存于封口袋中待测。玉米茎叶采集后用自

种植效益, 并将筛选出的甜玉米品种应用于与东南景天的间套种修复污染土壤中, 验证筛选出的品种应用效果。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物

玉米品种筛选田间试验选址为广东省韶关市某地, 属中亚热带季风气候, 平均气温 20.4 ℃, 年降水量 1 778 mm, 无霜期 312 d。试验田污染来源为多金属矿矿山废水污染河流, 多年灌溉污染河水污染农田。8 种玉米种子和东南景天苗均采自浙江衢州某古老铅锌矿渗滤池, 试验土壤来自乐昌某铅锌矿污染的农田, 土壤基本理化性质详见表 1。

来水清洗泥土, 再用双蒸水润洗, 晾干, 玉米棒脱粒, 放入大信封中置于烘箱内 105 ℃ 杀青 30 min, 65 ℃ 烘干至恒质量, 用高速粉碎机粉碎, 储存于封口袋中待测。收获的东南景天用自来水冲洗干净, 再用双蒸水漂洗 3 次, 晾干, 置于信封中烘干, 粉碎贮存于封口袋中备测。

1.5 测定方法

土壤理化性质指标的分析方法参照鲁如坤的方法^[10]进行, 土壤和植物重金属分析方法采用国家标准方法^[11]。

1.6 数据处理

数据处理用 Excel 软件, 显著性分析 SAS 8.0。

2 结果与分析

2.1 玉米产量

如表 2 所示, 玉米的品种不同, 其产量存在较大差异, 玉米籽粒产量由大到小顺序为 CN6 号 > HZ > 云石-5 号 > JZY > HTN > FM > SMP1260 > SSXM。JZY、CN6 号、HZ 籽粒产量超过或者接近饲料玉米云石-5 号籽粒产量, 可将上述 3 个品种定为高产品种, 其中 CN6 号产量达到 0.299 kg/m²。茎叶产量由大到小顺序为 SMP1260 > JZY > FM > HZ > HTN > CN6 号 > 云石-5 号 > SSXM。SSXM 由于气候等原因, 其籽粒、茎叶产量最低, 不适于在广东地区种植。

表 2 玉米籽粒和茎叶产量

玉米品种	籽粒产量 (kg/m ²)	茎叶产量 (kg/m ²)
SMP1260	0.054 ± 0.005cd	0.072 ± 0.006a
HTN	0.138 ± 0.052bc	0.034 ± 0.008bc
JZY	0.226 ± 0.080ab	0.040 ± 0.009b
CN6 号	0.299 ± 0.117a	0.031 ± 0.002bc
SSXM	0.022 ± 0.010d	0.025 ± 0.006c
FM	0.098 ± 0.025cd	0.036 ± 0.005bc
HZ	0.290 ± 0.061a	0.035 ± 0.011bc
云石-5 号	0.282 ± 0.021a	0.028 ± 0.009bc

注: 同列数据后不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.2 品种筛选试验玉米重金属含量

分析各玉米品种籽粒 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量, 结果如表 3

所示,玉米籽粒重金属含量品种间差异较大,其中 SMP1260、HTN、JZY、CN6 号、HZ、云石-5 号籽粒 Cd 含量低于食品卫生标准(0.1 mg/kg),SSXM、FM 籽粒 Cd 含量略高于食品卫生标准,分别是食品卫生标准的 1.11、1.23 倍,籽粒 Cd 含量由小到大顺序为 CN6 号 < 云石-5 号 < JZY < HTN < SMP1260 < HZ < SSXM < FM。8 个玉米品种籽粒 Pb 含量检测结果均不超过食品卫生标准(0.2 mg/kg),籽粒 Pb 含量由小到大顺序为 SSXM < 云石-5 号 < SMP1260 < JZY < HZ < CN6 号 < FM < HTN。

如表 4 所示,8 个品种玉米茎叶 Cd、Pb 含量符合有机肥重金属卫生标准,生产出的玉米茎叶均可用于制作有机肥。

茎叶 Cd 含量由小到大顺序为 CN6 号 < 云石-5 号 < HTN < HZ < JZY < SMP1260 < SSXM < FM,其中只有 SSXM、FM 2 个品种茎叶 Cd 含量超过饲料卫生标准(1 mg/kg),分别是饲料卫生标准的 1.56、1.98 倍,其余品种 Cd 含量符合饲料卫生标准。茎叶 Pb 含量由小到大顺序为云石-5 号 < HZ < SMP1260 < JZY < FM < CN6 号 < HTN < SSXM,其中 HTN、SSXM 2 个品种茎叶 Pb 含量超过饲料卫生标准(5 mg/kg),分别是饲料卫生标准的 1.09、1.68 倍,其余品种 Pb 含量符合饲料卫生标准。综合 Cd、Pb 2 种指标,SMP1260、JZY、CN6 号、HZ、云石-5 号玉米茎叶重金属含量符合饲料卫生标准,可以用于动物饲料生产。

表 3 不同玉米品种籽粒重金属含量

玉米品种	重金属含量(mg/kg)			
	Cd	Pb	Cu	Zn
SMP1260	0.078 ± 0.018cd	0.068 ± 0.036a	4.16 ± 0.34de	37.7 ± 2.7cd
HTN	0.062 ± 0.032de	0.153 ± 0.102a	4.59 ± 0.31cd	33.6 ± 1.5cd
JZY	0.042 ± 0.013ef	0.069 ± 0.029a	5.94 ± 0.31b	41.3 ± 5.4c
CN6 号	0.019 ± 0.004f	0.102 ± 0.051a	4.16 ± 0.22cd	36.8 ± 3.2cd
SSXM	0.111 ± 0.002b	0.051 ± 0.088a	4.95 ± 0.69c	73.5 ± 4.9a
FM	0.123 ± 0.030a	0.128 ± 0.070a	6.95 ± 0.58a	59.7 ± 9.4b
HZ	0.093 ± 0.004bc	0.085 ± 0.078a	6.67 ± 0.84ab	56.9 ± 1.6b
云石-5 号	0.029 ± 0.004f	0.052 ± 0.000a	3.08 ± 0.05e	31.4 ± 2.5d

表 4 不同玉米品种茎叶重金属含量

玉米品种	重金属含量(mg/kg)			
	Cd	Pb	Cu	Zn
SMP1260	0.589 ± 0.153b	2.027 ± 0.625bc	7.23 ± 0.54d	11.13 ± 1.18c
HTN	0.447 ± 0.198b	5.444 ± 3.749ab	12.88 ± 0.49a	28.02 ± 8.34b
JZY	0.552 ± 0.298b	3.237 ± 0.598abc	12.60 ± 0.34a	26.46 ± 5.82b
CN6 号	0.213 ± 0.117b	4.371 ± 2.586abc	10.03 ± 0.99b	25.83 ± 8.81b
SSXM	1.559 ± 0.046a	5.841 ± 1.002a	10.06 ± 0.06b	48.47 ± 1.32a
FM	1.984 ± 0.701a	4.367 ± 0.755abc	9.00 ± 1.32bc	30.65 ± 1.39b
HZ	0.472 ± 0.191b	1.930 ± 1.712bc	7.75 ± 1.12cd	22.71 ± 2.17b
云石-5 号	0.332 ± 0.108b	1.602 ± 0.976c	6.80 ± 1.11d	25.47 ± 6.52b

2.3 各品种玉米富集系数

表 5 显示,玉米种植前后土壤重金属浓度变化不大。根据生物富集系数公式: $BCF = C_p / C_s$,结合表 3、表 4、表 5 中玉米籽粒、茎叶重金属含量计算得出各品种玉米富集系数,结果如表 6 所示。从籽粒富集系数看,8 个品种籽粒 Cd 富集系数均 < 1,尤其是籽粒 Pb 富集系数远小于 1,茎叶 Pb 富集系数也 < 1,茎叶 Cd 富集系数除 SSXM、FM 2 个品种 > 1,其余品种均 < 1,说明籽粒对重金属不富集,茎叶只有 SSXM、FM 2 个品种对 Cd 体现出富集。

2.4 套种试验玉米产量和重金属含量

选定 JZY 为应用品种,其因为重金属含量符合食品卫生标准,而且产量较好。分析各处理之下玉米籽粒 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量,结果如下表 7 所示,其中籽粒 Cd 含量均低于食品卫生标准(0.1 mg/kg),三个处理籽粒 Cd 含量非常接近,并没显著差异。籽粒 Pb 含量检测浓度低于食品卫生标准(0.2 mg/kg)。

各处理之下玉米茎叶 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量,结果如下表

8 所示,生产出的玉米茎叶均可用于制作有机肥。各处理重金属含量并没有明显差异。茎叶重金属 Cd 含量符合饲料卫生标准(1 mg/kg),茎叶重金属 Pb 含量符合饲料卫生标准(5 mg/kg),可以用于动物饲料生产。

各处理之下玉米籽粒和茎叶产量如表 9 所示,未淋洗 + 套种处理的籽粒产量最高,FeCl₃ 淋洗 + 套种处理的籽粒产量最低与其他处理产量有明显差异。MC 淋洗 + 套种的茎叶产量最高,达 1.256 kg/m²,且各处理没有显著性差异。

2.5 东南景天产量和重金属提取量

各处理东南景天重金属含量和产量如表 10 所示,Cd 和 Pb 含量没有显著性差异,东南景天对 Cu 和 Pb 基本不富集,对 Cd 和 Zn 具有富集作用,只有套种处理的东南景天 Zn 含量高达 6 154 mg/kg,是 MC 淋洗 + 套种处理东南景天 Zn 含量的 22.3 倍。东南景天的产量有显著性差异,其中只有套种处理的东南景天产量最高,是 MC 淋洗 + 套种处理产量的 4.98 倍。

东南景天提取量如表 11 所示,由于产量的关系,各处理东南景天对每种重金属的提取量都有显著性差异,未淋洗 +

表 5 玉米种植前后表层土壤重金属含量

种植状态	玉米品种	重金属含量(mg/kg)			
		Cd	Pb	Cu	Zn
种植前	SMP1260	0.923 ± 0.117a	292.4 ± 11.3b	329.9 ± 14.5b	506.3 ± 37.1a
	HTN	0.625 ± 0.292ab	356.7 ± 34.2ab	377.0 ± 45.6ab	420.8 ± 59.5bc
	JZY	0.568 ± 0.183b	309.9 ± 55.5ab	367.6 ± 34.6ab	391.8 ± 49.7c
	CN6 号	0.800 ± 0.058ab	375.9 ± 79.0a	393.9 ± 27.3a	456.7 ± 21.5abc
	SSXM	0.906 ± 0.184a	289.9 ± 23.5b	378.9 ± 11.1ab	492.4 ± 44.1ab
	FM	0.921 ± 0.091a	376.2 ± 37.2a	406.5 ± 22.2a	503.1 ± 30.0a
	HZ	0.892 ± 0.208a	328.0 ± 30.2ab	365.2 ± 32.1ab	436.9 ± 34.2abc
	云石 - 5 号	0.901 ± 0.048a	365.2 ± 20.4ab	403.5 ± 10.7a	448.8 ± 9.9abc
种植后	SMP1260	1.040 ± 0.319a	335.3 ± 17.9bc	333.1 ± 13.1ab	523.1 ± 86.7a
	HTN	0.949 ± 0.076a	397.5 ± 48.9a	345.6 ± 19.5ab	494.1 ± 41.8a
	JZY	0.950 ± 0.051a	321.1 ± 11.6bc	335.7 ± 5.4ab	496.8 ± 12.0a
	CN6 号	0.809 ± 0.024a	354.1 ± 27.3ab	345.0 ± 8.1ab	433.9 ± 8.3a
	SSXM	0.862 ± 0.046a	315.3 ± 42.2bc	353.0 ± 16.7a	460.9 ± 18.7a
	FM	1.091 ± 0.323a	338.6 ± 16.6b	352.3 ± 9.3a	503.1 ± 79.8a
	HZ	0.996 ± 0.155a	282.7 ± 20.4c	321.3 ± 22.4b	488.7 ± 36.7a
	云石 - 5 号	0.980 ± 0.042a	309.4 ± 18.6bc	348.4 ± 10.2ab	483.4 ± 9.2a

表 6 各品种玉米富集系数

玉米品种	籽粒富集系数		茎叶富集系数	
	Cd	Pb	Cd	Pb
SMP1260	0.08	0.000 2	0.60	0.006 5
HTN	0.08	0.000 4	0.57	0.014 4
JZY	0.06	0.000 2	0.73	0.010 3
CN6 号	0.02	0.000 3	0.26	0.011 8
SSXM	0.13	0.000 2	1.76	0.016 0
FM	0.12	0.000 4	1.97	0.012 2
HZ	0.10	0.000 3	0.50	0.006 3
云石 - 5 号	0.03	0.000 2	0.35	0.004 7

套种处理东南景天对 Cd 提取量为 14.65 mg/m²,提取率为 2.74%,分别是 FeCl₃ + 套种处理、MC + 套种处理的 1.95、6.85 倍。未淋洗 + 套种处理东南景天对 Zn 提取量高达 2 719 mg/m²,分别是 FeCl₃ + 套种处理,MC + 套种处理的 2.22、9.22 倍。

2.6 套种试验土壤重金属变化

渗滤池各处理土壤重金属含量如表 12 所示。各处理过后土壤 4 种重金属含量都有不同程度下降,其中 Cd 含量下降最明显,未淋洗 + 套种处理和 FeCl₃ 淋洗 + 套种处理 Cd 含量分别下降 10.4%、15.1%,MC 淋洗 + 套种 Cd、Pb 含量下降最多,分别下降 23.6%、22.5%。

表 7 套种试验的玉米籽粒重金属含量

套种处理	重金属含量(mg/kg)			
	Cd	Pb	Cu	Zn
未淋洗 + 套种	0.053 ± 0.006a	0.087 ± 0.008a	4.72 ± 0.18a	36.1 ± 2.0a
FeCl ₃ 淋洗 + 套种	0.052 ± 0.014a	0.095 ± 0.086a	4.92 ± 0.33a	40.5 ± 2.6a
MC 淋洗 + 套种	0.051 ± 0.015a	0.081 ± 0.010a	5.11 ± 0.61a	41.7 ± 7.8a

表 8 套种试验玉米茎叶重金属含量

玉米品种	重金属含量(mg/kg)			
	Cd	Pb	Cu	Zn
未淋洗 + 套种	0.191 ± 0.100a	2.03 ± 0.70a	8.59 ± 1.07a	51.5 ± 7.9a
FeCl ₃ 淋洗 + 套种	0.194 ± 0.064a	2.42 ± 0.70a	8.05 ± 1.22a	61.1 ± 6.7a
MC 淋洗 + 套种	0.176 ± 0.007a	2.45 ± 0.28a	8.22 ± 1.26a	66.8 ± 31.8a

表 9 套种试验玉米产量

套种处理	籽粒产量(kg/m ²)	茎叶产量(kg/m ²)
未淋洗 + 套种	0.401 ± 0.051a	1.248 ± 0.309a
FeCl ₃ 淋洗 + 套种	0.238 ± 0.053b	0.873 ± 0.135a
MC 淋洗 + 套种	0.387 ± 0.038a	1.256 ± 0.236a

3 讨论与结论

不同品种的 Cd、Pb 含量存在差异,说明筛选低 Cd、Pb 甜玉米品种是可行的,由于气候不同,玉米产量之间也存在差异,有些品种不适合于当地的气候水土条件,淋洗剂对土壤中

Cd、Pb 的淋洗效果比较明显,对东南景天的产量和玉米的产量也有一定的影响,对于施加螯合剂可能产生的地下水污染风险,可以通过在深层土壤添加固定剂有效固定表层淋滤下来的重金属。MC 淋洗过后的土壤抑制植物生长,导致生物量偏低,土壤有些板结。MC 淋洗效果对土壤重金属效果较好,主要是因为 MC 的施加促进了土壤重金属的淋滤,导致表层土壤 Zn 和 Cd 含量最低,表层淋滤出的重金属向下层迁移,套种 + MC 处理的下层土壤的重金属明显增加。东南景天不是 Pb 超富集植物,植物对土壤 Pb 提取量贡献较小,主要依赖 MC 淋洗剂对 Pb 的淋滤,因此未施加 MC 处理的土壤 Pb

表 10 东南景天的重金属含量和产量

套种处理	重金属含量 (mg/kg)				产量 (kg/m ²)
	Cd	Pb	Cu	Zn	
未淋洗 + 套种	33.8 ± 10.8a	46.8 ± 12.7a	7.75 ± 0.51ab	6 154 ± 1 481a	2.94 ± 0.38a
FeCl ₃ 淋洗 + 套种	37.1 ± 7.6a	48.8 ± 8.6a	9.80 ± 1.71a	587 ± 297a	1.27 ± 0.38b
MC 淋洗 + 套种	19.6 ± 6.9a	35.1 ± 2.2a	6.93 ± 0.45b	276 ± 740b	0.59 ± 0.20c

表 11 东南景天的提取量

套种处理	提取量 (mg/m ²)			
	Cd	Pb	Cu	Zn
未淋洗 + 套种	14.65 ± 2.49a	20.58 ± 1.47a	3.46 ± 0.57a	2 719 ± 594a
FeCl 淋洗 + 套种	7.52 ± 0.95b	9.96 ± 1.79b	2.10 ± 0.81b	1 223 ± 288b
MC 淋洗 + 套种	2.14 ± 1.11c	3.59 ± 0.81c	0.72 ± 0.21c	295 ± 130c

表 12 渗滤池各处理土壤重金属含量

套种处理	重金属含量 (mg/kg)			
	Cd	Pb	Cu	Zn
原土壤	2.12 ± 0.09	1 042.0 ± 44.3	50.32 ± 9.05	1 239.6 ± 71.3
未淋洗 + 套种	1.90 ± 0.04a	1 019.3 ± 11.9a	44.80 ± 1.59a	1 167.0 ± 24.2a
FeCl ₃ 淋洗 + 套种	1.80 ± 0.13ab	955.9 ± 43.0b	45.13 ± 0.67a	1 090.5 ± 11.3ab
MC 淋洗 + 套种	1.62 ± 0.09b	807.7 ± 5.4c	44.47 ± 0.58a	1 124.4 ± 26.5b

含量没有明显降低。

许多研究表明,只要选择合适的重金属低积累玉米品种,受重金属污染的田地也能生产出安全的产品^[12-13]。甜玉米的经济价值较高,能够带动农民生产的积极性。本研究通过对 8 个玉米品种的试验研究再一次表明,通过品种筛选,也能找到合适的符合食用卫生标准且产量较好的重金属低累积甜玉米品种。

在品种筛选结果中,SMP1260、HTN、JZY、CN6 号、HZ、云石-5 号籽粒 Cd 含量低于食品卫生标准(0.1 mg/kg),SSXM、FM Cd 含量略高于食品卫生标准,分别是食品卫生标准的 1.11、1.23 倍,籽粒 Pb 含量检测结果均不超过食品卫生标准(0.2 mg/kg),SSXM、FM 2 个品种茎叶 Cd 含量超过饲料卫生标准(1 mg/kg),分别是饲料卫生标准的 1.56、1.98 倍,其余品种 Cd 含量符合饲料卫生标准。茎叶 Pb 含量由小到大顺序为云石-5 号 < HZ < SMP1260 < JZY < FM < CN6 号 < HTN < SSXM,其中 HTN、SSXM 2 个品种茎叶 Pb 含量超过饲料卫生标准(5 mg/kg),分别是饲料卫生标准的 1.09、1.68 倍,其余品种 Pb 含量符合饲料卫生标准。综合 Cd、Pb 2 种指标,SMP1260、JZY、CN6 号、HZ、云石-5 号玉米茎叶重金属含量符合饲料卫生标准,可以用于动物饲料生产。从籽粒产量来看,JZY、HZ、CN6 号产量比较高,其中 JZY 产量为 0.226 kg/m²。籽粒对重金属都不富集,茎叶只有 SSXM 和 FM 对 Cd 的富集,综合选取 JZY 作为应用试验品种,在另一种污染土壤渗滤池试验结果表明,结合超富集植物套种修复,FeCl₃ 淋洗以及 MC 淋洗使玉米籽粒和茎叶的重金属浓度也符合食用卫生标准,保持在比较低的安全水平,籽粒和茎叶对重金属均不富集,MC 淋洗处理的玉米籽粒 Cd、Pb 含量比未淋洗处理下降 3.8% 和 6.9%,土壤 Cd、Pb 含量分别下降 23.6% 和 22.5%。因此,甜玉米低镉铅品种及其间套种修复污染土壤具有应用潜力。

参考文献:

- [1] 仲维科,樊耀波,王敏健. 我国农作物的重金属污染及其防止对策[J]. 农业环境保护,2001,20(4):270-272.
- [2] 张小敏,张秀英,钟太洋,等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学,2014,35(2):692-703.
- [3] 张金莲,丁疆峰,卢桂宁,等. 广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价[J]. 环境科学,2015(7):2633-2640.
- [4] 李结雯,李超,黄纯琳,等. 广州市番禺区农田土壤重金属污染调查分析[J]. 中国环保产业,2015(8):65-69.
- [5] 林荣誉,苏结雯,吴灵. 珠海市农用地土壤重金属污染情况调查[J]. 资源节约与环保,2016(8):180-181.
- [6] 凌辉,谢水波,唐振平,等. 重金属污染土壤的修复方法及其在几类典型土壤修复中的应用[J]. 四川环境,2012,31(1):118-122.
- [7] 许涛,郭孟康,张自于. 重金属低积累玉米品种筛选研究[J]. 现代农业科技,2015(21):48-49.
- [8] Wu Q T, Wei Z B, Ouyang Y. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii*, h: effects of chelator and co-planting[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2007, 180(1):131-139.
- [9] 卫泽斌,郭晓方,吴启堂,等. 植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究[J]. 环境科学,2014(11):4305-4312.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 中国农业科技出版社,2000.
- [11] 中国标准出版社第二室. 有色金属工业标准汇编:稀土金属及其合金化学分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [12] 雷恩,刘艳红. 个旧矿区周边农田高产、重金属低积累玉米品种的筛选[J]. 江苏农业科学,2015,43(9):124-127.
- [13] 代全林,袁剑刚,方炜,等. 玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异[J]. 植物生态学报,2005,29(6):992-999.