

大理云龙地区玉米对重金属累积与转运的品种差异研究

字晓, 段艳涛, 张顺仁, 杨献清, 和培铖* (大理州农业科学推广研究院, 云南大理 671005)

摘要 在对泚江流域(云龙段)常年水稻种植区受污染耕地现状调查的基础上,进行当地主栽玉米品种筛选试验,通过检测玉米食用部分重金属含量,结合各参选品种产量,筛选出适宜于当地种植区、产量稳定、能安全利用的玉米品种,为大理云龙县泚江流域受污染耕地安全利用和调整修复治理提供技术支持。结果显示,在试验地块的土壤铅、镉重金属污染背景下(铅含量 310 mg/kg, 镉含量 9.29 mg/kg),4 个受试玉米品种中,红单 6 号、路单 12 号籽粒符合食品安全标准,会单 4 号、云瑞 8 号籽粒不符合食品安全标准,4 个品种茎叶饲用均不合格。各品种实际产量由高到低依次为路单 12 号、红单 6 号、云瑞 8 号、会单 4 号,再结合植株体内转移系数反映出的植株器官累积重金属元素特点,籽粒安全利用应首推路单 12 号。

关键词 重金属;低积累玉米品种;食品安全;云龙地区

中图分类号 S513 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)05-0026-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2023.05.007



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Variety Differences of Heavy Metal Accumulation and Transport in Maize in Yunlong Area of Dali

ZI Xiao, DUAN Yan-tao, ZHANG Shun-ren et al (Dali Academy of Agricultural Sciences, Dali, Yunnan 671005)

Abstract Based on the investigation of the current situation of polluted cultivated land in the perennial rice planting area of the Bijiang River Basin (Yunlong section), the screening test of locally cultivated maize varieties was carried out. By detecting the content of heavy metals in the edible part of maize and combining the yield of each candidate variety, the maize varieties suitable for the local planting area, stable yield and safe utilization were selected, which provided technical support for the safe use, adjustment, restoration and treatment of polluted cultivated land in the Bijiang River Basin of Yunlong County, Dali. The test results showed that under the background of heavy metal pollution of lead and cadmium in the soil of the test plot (lead content 310 mg/kg and cadmium content 9.29 mg/kg), the grains of Hongdan 6 and Ludan 12 met the food safety standards, but the grains of Huidan 4 and Yunrui 8 did not meet the food safety standards, and the stems and leaves of the four varieties were unqualified. The actual yields of four varieties were in the order of Ludan 12 > Hongdan 6 > Yunrui 8 > Huidan 4. Combined with the characteristics of heavy metal accumulation in plant organs reflected by the transfer coefficient in plant, Ludan 12 was the first one for safe utilization of grains.

Key words Heavy metals elements; Low accumulation maize varieties; Food safety; Yunlong area

土壤是农业生态系统的基础,是“舌尖上安全”的根本保证,是经济社会可持续发展的物质基础,关系到人民群众的身体健康。当前,我国土壤环境总体状况堪忧,部分地区污染较为严重,农业部农产品污染防治重点实验室对全国 300 000 hm² 基本农田保护区调查显示,重金属超标率达 12.1%,粮食重金属超标率在 10% 以上^[1]。重金属在土壤中具有隐蔽性、表聚性、不易降解性等特点^[2-3],由于重金属土壤污染问题情况复杂,具有地域性特点,受种植作物类型、方式以及当地气候、土壤类型与污染特征等条件的制约,其修复方法很难做到广适性,多数重金属土壤污染修复实用技术研究需针对当地情况进行^[4-7],目前针对大理州重金属土壤污染研究极为匮乏。大理州云龙县地处滇西澜沧江纵谷区,属于山区地形,可耕种面积小,耕地面积仅占全县土地面积的 6.65%,而林地面积占 69.8%^[8],泚江流域因为存在河流冲积土,地形较为平整,是宝贵的可种植地,该地长期种植水稻、玉米等粮食作物。该地区的泚江流域(云龙段)曾进行大规模铅锌矿采集^[9],研究发现由于泚江流域(云龙段)水质遭受矿区污染,泚江沿岸农田土壤普遍存在重金属 Zn、Cd、Pb 污染问题^[10-12],两岸农田长期引江水灌溉,将产生较大环境风险和食品安全隐患。

土壤重金属污染修复主要有 5 种方法:物理修复法、化学修复法、生物修复法、农业生态修复法和联合修复法。其中,生物修复法的利用前景最好,比物理、化学修复法成本低、处理效果好、操作过程简单、易于大规模推广使用,尤其是使用筛选后的特定植物带走土壤重金属污染物的方法,将富集重金属的植物收获并统一进行回收处理(焚烧、固化加工等)后,即完成了污染治理的整个过程^[13-14]。因此,生物修复法(植物修复)最大的难点集中在植株回收处理上,在产业不发达、交通不便的偏远地区,由于缺少配套处理设施,富集了大量重金属的植物无法处理,导致其中的污染物再次回到土壤中,无法起到降低土壤内重金属污染物的作用。另外,植物修复法周期较长,能吸收的重金属元素种类有限,需要使用联合修复法才能全面修复受污染耕地。

鉴于大理云龙地处山区,为高山峡谷相间的破碎复杂地貌形态,山区面积占全县面积的 90%,属于偏远山区且工业较不发达^[15],全县主要经济总值来源是农业经济,占 45.27%。笔者认为最适合当地耕地安全利用的措施是植物修复法,但考虑到该地区工业不发达,缺少后续处置产业,筛选低积累品种实现食品安全反而是更加快捷、易推广的低成本做法。鉴于此,为使当地稀缺的耕种地得到安全有效利用,笔者在对泚江流域(云龙段)常年玉米种植区受污染耕地现状调查的基础上,进行玉米品种筛选试验,通过检测玉米食用部分重金属含量,结合各参选品种产量,筛选出适宜于种植区、产量稳定、适宜推广的重金属低积累玉米品种,为

基金项目 云南省 2020 年省级农业生产发展专项。

作者简介 字晓(1987—),女,云南巍山人,农艺师,硕士,从事农业环境保护研究。*通信作者,农艺师,硕士,从事农业环境保护研究。

收稿日期 2022-03-31

理云龙县泚江流域受污染耕地安全利用和修复治理提供技术支持。

1 材料与方

1.1 试验地概况 试验地点位于云龙县泚江江畔某村耕地,该田块在当地具有代表性,地势平坦、肥力均匀、排灌方便。该地在丰水期会受到泚江江水冲刷,存在污水污染。经取样检测,试验地块 pH 为 7.2,土壤镉含量为 9.29 mg/kg,汞含量为 0.489 mg/kg,砷含量为 16.3 mg/kg,铅含量为 310 mg/kg,铬含量为 44 mg/kg,属于受镉元素、铅元素污染耕地。

1.2 试验材料 试验采用玉米品种为红单 6 号、会单 4 号、云瑞 8 号、路单 12 号。

1.3 试验设计 试验设 4 个处理,处理编号红单 6 号(A)、会单 4 号(B)、云瑞 8 号(C)以及路单 12 号(D),3 次重复,共 12 个小区;随机区组排列,小区面积 24 m²(4 m×6 m)。小区四周均以田埂分隔,田埂作为过道,宽度均为 30 cm,高度为 25 cm,田埂外面包裹一层塑料薄膜;试验区进出水单进单排,中间设置一条进水沟,外侧设置 2 条排水沟,一侧一条,宽度 30 cm,高度 25 cm;试验区四周设保护行,每一边的宽度大于 2 m,以消除边际效应。小区布置情况如图 1。

播种方式为打塘点播。使用宽窄行种植,宽行距 90 cm,窄行距 30 cm,塘距 40 cm,每塘播种 3~5 粒,每塘留苗 2 株。整地、灌溉、施肥、病虫害防治、中耕培土及耕作管理措施与当地生产田相同。

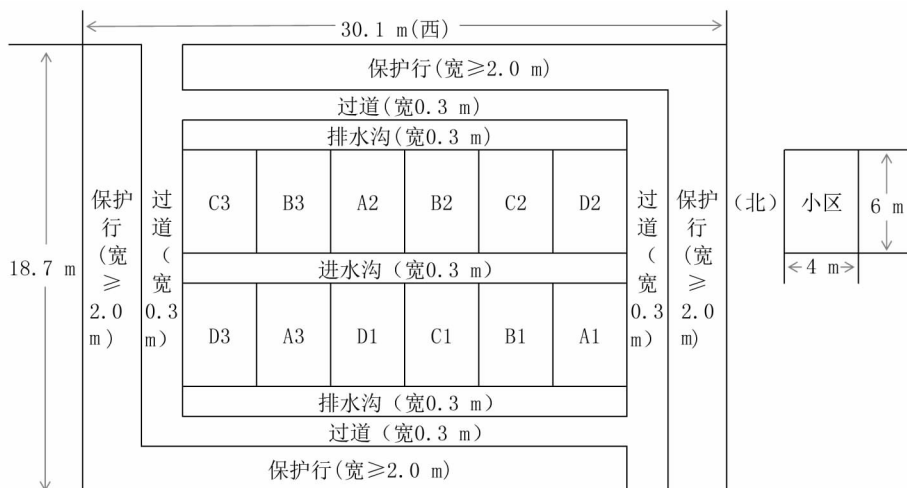


图 1 试验小区田间设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of field design of low accumulation variety screening test plot

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土样采集.试验种植前采集基础土样,按梅花形 5 点采样法采集 1 次基础土壤混合样;作物收获后,采集试验小区土壤,各小区按梅花形 5 点采样法采集 1 次土壤混合样。土壤采样深度为 0~20 cm,采样量 2 kg/个。

1.4.2 植株样采集.在作物成熟后进行采样,每个小区选取 3 行,分别为中间行及两侧第 2 行,每行选取 5 株植株,共

取 15 株/区。取样时提前做好所有样品标签,取样后立即一一对应放置标签,避免出现样品混淆。土壤样品应及时风干;植株样品取回后先用自来水小心洗净根系泥土,再用超纯水清洗,之后晾干表面水分,进行烘干。

1.4.3 指标测定.土壤检测指标为 pH、镉、汞、砷、铅、铬、有效铅、有效镉;农作物(根、茎秆、籽粒)检测指标为镉、汞、砷、铅、铬,样品检测方法见表 1。

表 1 样品检测项目及方法

Table 1 Sample test items and methods

样品种类 Sample type	检测指标 Detection index	检测方法 Detection method
土壤 Soil	pH	土壤 pH 的测定 电位法 HJ 962—2018
	镉	土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法 GB/T 17141—1997
	汞	土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定 GB/T 22105.1—2008
	砷	土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定 GB/T 22105.2—2008
	铅	土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法 GB/T 17141—1997
	铬	土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法 HJ 491—2019
植株 Plant	有效态镉	土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法 标准 GB/T 23739—2009
	有效态铅	土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法 标准 GB/T 23739—2009
	镉	食品中镉的测定 GB 5009.15
	汞	食品中总汞及有机汞的测定 GB 5009.17
	砷	食品中砷的测定 GB 5009.11
	铅	食品中铅的测定 GB 5009.12
	铬	食品中铬的测定 GB 5009.123

1.5 评价方法及判定标准 玉米的根(R)、茎叶(SL)和籽粒(G)部位重金属富集系数和转运系数根据公式进行计算,玉米食用部位(籽粒)是否达到安全利用标准按照《食品安全国家标准-食品中污染物限量(GB 2762—2017)》判定,茎叶部位是否达到安全利用标准按照《饲料卫生标准(GB 13078—2017)》判定。

目前,对于重金属富集系数和转移系数还没有明确定义,结合前人研究^[6,15-18],作者认同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,该计算方法描述了在某种土壤重金属元素含量条件下植株体内重金属元素的累积情况,一定程度上反映了不同元素在土壤-植株各部位的累积储存能力。转移系数等于植物体2个部位之间的重金属浓度之比,该计算方式可以描述植物体内任意2部位之间的重金属元素累积情况,一定程度上反映了重金属在植物体内不同器官间的转移能力和分配情况。具体到该试验使用的公式为:

根部重金属富集系数(BCFR)=植物根部内重金属含量(mg/kg)/土壤中重金属含量(mg/kg) (1)

根部到茎叶重金属转运系数(TF_{R-SL})=植物茎叶重金属含量(mg/kg)/植物根部重金属含量(mg/kg) (2)

茎叶到籽粒重金属转运系数(TF_{SL-G})=植物籽粒重金属含量(mg/kg)/植物茎叶重金属含量(mg/kg) (3)

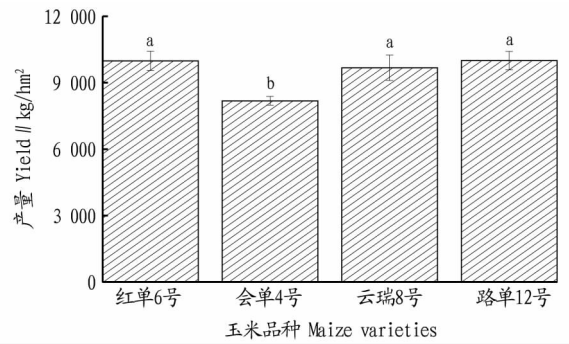
1.6 数据处理 采用 EXCEL 2007、SPSS 21.0、Origin 2019b 软件进行数据统计处理。

2 结果与分析

2.1 不同玉米品种的产量及生长情况比较 4个供试玉米品种的产量情况如图2,除会单4号产量显著偏低,其他3个品种产量均无显著性差异,产量最高的路单12号比最低的会单4号高出18.18%,因此从产量上来筛选适合当地的玉米品种,会单4号应可排除。4个供试玉米品种的株高穗位生长情况如图3。由图3可知,4个供试玉米品种的穗位处于整株植株离地约40.00%的位置,红单6号和路单12号株高较高,且两者间无显著差异,但与会单4号、云瑞8号间有显著差异;红单6号和路单12号穗位也较高,4个品种之间均存在显著性差异。

2.2 不同玉米品种根、茎叶、籽粒中5种重金属含量比较 4个玉米品种根、茎叶、籽粒中5种重金属含量情况如表2。根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中谷物类限量指标,4个玉米品种的籽粒中会单4号、云瑞8号2个品种镉含量超标,分别超标66.7%和120.0%。据此判定,在试验地土壤重金属污染条件下,会单4号、云瑞8号籽粒不合格,红单6号、路单12号籽粒合格。根据《饲料卫生标准(GB 13078—2017)》可知,4个供试玉米品种茎叶的Cd含量均超标,会单4号茎叶Cr含量超标。因此,红单6号、路单12号的籽粒可用作食品原料或饲料原料,4个品种的茎叶均不能作为饲料使用。

2.3 不同玉米品种籽粒的5种重金属含量情况及富集系数、转移系数比较 根部重金属富集系数(BCF_R)在一定程

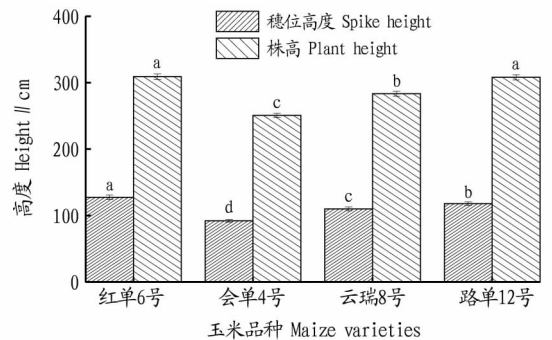


注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

Note: Different lowercases in the same column indicated significant differences at 0.05 level.

图2 不同玉米品种实际产量比较

Fig. 2 Comparison of actual yield of different corn varieties



注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

Note: Different lowercases in the same column indicated significant differences at 0.05 level.

图3 不同玉米品种穗位及株高比较

Fig. 3 Comparison of ear position and plant height of different maize varieties

度上可以反映植株对重金属的吸收情况,而植株各部位之间的转移系数可反映重金属在植株内部的转运分配情况。该试验的玉米根部5种重金属富集系数(BCF_R)及根-茎叶转移系数(TF_{R-SL})、茎叶-籽粒转移系数(TF_{SL-G})情况如图4、5、6,品种间富集系数和转移系数的差异情况见表3。从图4可以看出,路单12号Cd根部富集系数为0.6138,其他3个品种的Cd根部富集系数均大于1,说明该品种根部对Cd的富集能力低于其他3个品种,且差异显著($P < 0.05$)。所有供试玉米品种Hg、As、Pb、Cr的 BCF_R 均远小于1,表明供试玉米品种对于其余4种重金属元素累积能力均较弱。由图5可知,所有供试玉米品种Hg、As、Pb、Cr的 TF_{R-SL} 均小于1,Cd的 TF_{R-SL} 除红单6号小于1外,其他供试品种均大于1,说明5种重金属元素在根部向茎叶转移的过程中,Cd的转运量更大,茎叶部分Cd累积量是根部的1~2倍。由图6可知,所有供试玉米品种Hg、As、Pb、Cr、Cd的 TF_{SL-G} 均远远小于1,说明经过茎叶部分的大量积累,5种重金属元素转运到籽粒部分的含量都非常少。

结合5种重金属元素在4个供试玉米品种的富集、转运情况看,不同玉米品种各部位对重金属元素的富集和转运能力均不相同,但从该试验目的出发,根部富集能力越强的玉

米品种,吸收重金属元素越多,可能会导致整个植株初始吸收量大;根-茎叶转移能力强的玉米品种,可能会将重金属元素富集保存在茎叶部位,不利于玉米作为青贮饲料使用,但

一定程度上可以减少茎叶向籽粒的传输量;茎叶-籽粒转移能力越弱的玉米品种,越不容易从茎叶吸收,在籽粒累积重金属元素,有利于保障籽粒食用和饲用安全。

表 2 不同玉米品种根、茎叶、籽粒中 5 种重金属含量比较

Table 2 Comparison of the contents of five heavy metals in roots, stems, leaves and grains of different maize varieties 单位:mg/kg

植株部位 Position	处理编号 Treatment code	汞 Hg	砷 As	铅 Pb	铬 Cr	镉 Cd
根 Roots	A	0.019 0±0.000 6 a	1.330 0±0.283 1 a	12.626 7±0.424 4 c	4.636 7±0.672 6 c	5.436 7±0.626 4 b
	B	0.018 7±0.000 3 a	1.093 3±0.374 9 a	12.120 0±0.219 4 c	13.590 0±0.473 4 b	8.320 0±0.155 9 a
	C	0.015 0±0.000 6 b	1.216 7±0.312 0 a	14.636 7±0.124 1 a	15.186 7±0.666 8 ab	8.250 0±0.115 5 a
	D	0.012 0±0.000 6 c	0.913 3±0.185 5 a	13.650 0±0.121 2 b	16.626 7±0.539 8 a	5.536 7±0.417 0 b
茎叶 Stems and leaves	A	0.007 8±0.000 3 a	0.246 7±0.014 5 a	2.650 0±0.000 0 a	2.540 0±0.127 0 c	5.493 3±0.536 5 c
	B	0.007 6±0.000 6 a	0.250 0±0.011 5 a	4.550 0±1.200 9 a	6.630 0±0.254 0 a	9.110 0±0.450 3 b
	C	0.003 9±0.000 6 b	0.296 7±0.026 0 a	2.956 7±0.285 8 a	2.720 0±0.300 2 c	18.440 0±0.866 0 a
	D	0.003 8±0.000 3 b	0.186 7±0.003 3 b	2.390 0±0.023 1 b	3.666 7±0.170 3 b	8.080 0±0.687 0 b
籽粒 Seeds	A	—	0.013 7±0.000 3 b	0.064 0±0.002 9 a	0.330 0±0.028 9 a	0.070 0±0.005 8 c
	B	—	0.016 7±0.000 9 a	0.057 0±0.014 4 a	0.120 0±0.057 7 b	0.166 7±0.014 5 b
	C	—	0.013 7±0.000 3 b	0.085 7±0.003 8 a	0.200 0±0.000 0 ab	0.220 0±0.000 0 a
	D	—	0.015 7±0.000 3 a	0.119 0±0.035 2 a	0.296 7±0.060 6 a	0.033 3±0.003 3 d

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著;“—”表示对应部位含量未检出。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences at 0.05 level; “—” indicated that the content in the corresponding part was not detected.

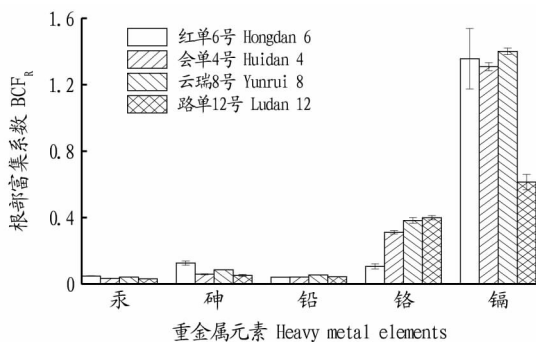


图 4 不同玉米品种根部的富集系数比较

Fig. 4 Comparison of enrichment factors of roots of different maize varieties

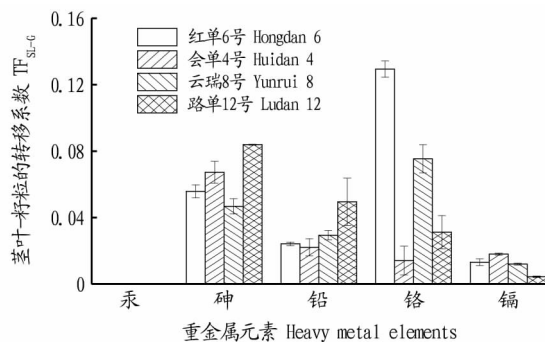


图 6 不同玉米品种茎叶-籽粒的转移系数比较

Fig. 6 Comparison of stem leaf grain transfer coefficient of different maize varieties

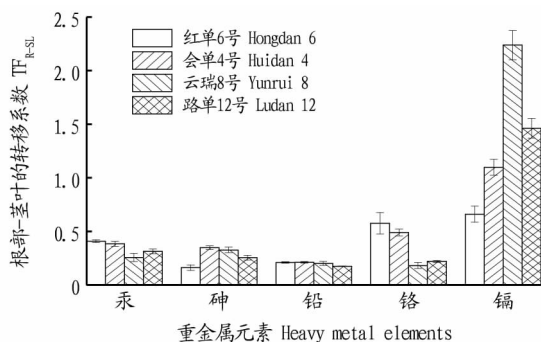


图 5 不同玉米品种根部-茎叶的转移系数比较

Fig. 5 Comparison of root stem leaf transfer coefficients of different maize varieties

3 讨论

从供试玉米的产量及株高穗位的生长情况来看,株高、穗位较高的 2 个玉米品种正好在籽粒安全利用判定合格,这也说明生物量大能够分散重金属元素在植株籽粒部位的

累积,使得重金属元素不易传输转运到籽粒部位有关,也可能和玉米茎秆结构特点有关,木质部装载在重金属 Cd 进入植物地上部的过程中具有重要作用^[19]。茎秆长使重金属元素在木质部里距离运输较长,其中细胞壁中疏水性的木栓层也减少了金属元素从根部质外体途径到根部木质部的转运效率,从而一定程度降低了重金属元素转运到籽粒的含量^[20]。

从供试玉米的富集系数、转移系数来看,不同玉米品种对 Hg、As、Pb、Cr、Cd 共 5 种元素的累积、转运能力各不相同,但根到茎叶的转运能力远大于茎叶到籽粒的转运能力,因此重金属元素在籽粒部分的累积含量均较茎叶部大幅降低或未检出。这可能和玉米植株生物量较大,使得重金属元素不易传输转运到籽粒部位有关,也可能和玉米茎秆结构特点有关。低积累植物对重金属的排斥机制通常认为包括 2 个方面:一是减少根部对重金属的吸收,二是重金属在根部通过区室化保存,限制向地上部转移^[21]。经过根部区室化保存

和细胞木双层阻隔的特性,使玉米植株吸收的重金属元素易于在根和茎叶中富集,只有少部分转运到籽粒中。

表3 不同品种玉米富集系数及转运系数比较

Table 3 Comparison of enrichment coefficients and transport coefficients of different maize varieties

指标 Index	玉米品种 Corn varieties	Hg	As	Pb	Cr	Cd
BCF _R	红单6号	0.048 3±0.001 5 a	0.126 2±0.012 1 a	0.041 5±0.001 4 b	0.106 2±0.015 4 c	1.356 2±0.181 7 a
	会单4号	0.034 0±0.000 6 c	0.059 1±0.002 8 c	0.042 1±0.000 8 b	0.311 2±0.010 8 b	1.308 2±0.024 5 a
	云瑞8号	0.042 0±0.001 6 b	0.085 1±0.001 4 b	0.054 8±0.000 5 a	0.382 8±0.016 8 a	1.400 7±0.019 6 a
	路单12号	0.031 2±0.001 5 c	0.052 1±0.005 4 c	0.043 6±0.000 4 b	0.399 0±0.013 0 a	0.613 8±0.046 2 b
TF _{R-SL}	红单6号	0.409 2±0.014 2 a	0.161 9±0.024 8 c	0.210 3±0.007 1 a	0.576 6±0.100 1 a	0.661 1±0.074 7 d
	会单4号	0.384 7±0.023 3 ab	0.348 1±0.017 2 a	0.211 4±0.006 9 a	0.489 7±0.032 0 a	1.097 8±0.074 7 c
	云瑞8号	0.256 8±0.037 1 c	0.326 8±0.025 9 ab	0.201 9±0.018 8 ab	0.181 5±0.027 8 b	2.239 0±0.136 4 a
	路单12号	0.313 9±0.022 2 bc	0.254 8±0.022 9 b	0.175 1±0.002 8 b	0.220 6±0.008 9 b	1.463 1±0.092 5 b
TF _{SL-C}	红单6号	—	0.055 8±0.003 9 bc	0.024 2±0.001 1 b	0.129 4±0.004 9 b	0.013 1±0.002 0 a
	会单4号	—	0.067 3±0.006 6 b	0.022 1±0.005 2 b	0.014 1±0.008 7 a	0.018 0±0.000 7 c
	云瑞8号	—	0.046 8±0.004 6 c	0.029 4±0.002 8 ab	0.075 4±0.008 5 b	0.012 0±0.000 6 b
	路单12号	—	0.083 9±0.000 3 a	0.049 5±0.014 3 a	0.031 2±0.010 0 c	0.004 4±0.000 4 c

注:同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著;“—”表示对应部位含量未检出。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences at 0.05 level; “—” indicated that the content in the corresponding part was not detected.

从供试玉米的重金属含量情况来看,云瑞8号和会单4号的籽粒重金属含量不符合国家食品安全标准。这与秦欢等^[17,22]的研究结果不同,秦欢等使用的供试土壤Cd仅为1.01 mg/kg,与该试验地受污染程度相差甚远,且2位作者的研究结论均以富集系数和转移系数筛选低累积品种,缺少对品种食用部分(籽粒)的安全判定,因此作者认为该研究筛选结果更具参考价值。从食品安全利用的角度筛选低累积品种,应优先关注含量这一绝对数值,再参考富集系数或转移系数。刘维涛等^[23]认为,理想的重金属低积累植物应同时具备以下4个特征:该植物的地上部和根部的重金属含量都很低或者可食部位低于有关标准,该植物对重金属的累积量小于土壤中该重金属的浓度,即富集系数<1;该植物从根部重金属向地上部转运能力较差,即转运系数<1;该植物对重金属毒害具有较高的耐受性,在较高的重金属污染下能够正常生长且生物量无显著下降。而该筛选试验中,红单6号玉米品种出现根部重金属富集系数大于1但籽粒含量不超标的情况。实际上任超等^[24]研究中出现了部分玉米品种富集和转运系数小于1但籽粒Cd含量超标现象,他认为“关于可食部分BCF和TF小于1的限定过于宽泛,应以保障食品安全为底线”;冯爱焯等^[6]经研究筛选出的推荐水稻品种也存在根部富集系数大于1的情况,重金属在水稻系统内的累积、转运和外排过程非常复杂,单一考量某一作用的强弱或者水稻某一部位的累积情况难以说明水稻整体对重金属的累积情况。综上所述,作者认为富集系数或转移系数大只能说明该植株该部位容易累积该重金属元素,是一个相对量,并不能体现该植株的重金属累积量,也就不能体现该品种是否是低累积品种。从该研究为山区人民筛选高效安全利用玉米品种的目的出发,在参考陈亮妹等^[25]的观点后,作者认为具有现实指导意义的重金属低积累作物应具有以下特征:①作物可食用或可利用部位的重金属含量低于相关标准限值;②向可食用或可利用部位转移的转移系数较小;③在受

重金属元素污染的条件下能够有较好的产量;④筛选出的重金属低积累作物的低积累特性要能够复现(3季及以上),且盆栽试验应用需到大田进行验证。

4 结论

(1)参考《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017),Cd在谷物类限量为0.1 mg/kg,4个供试玉米品种的Cd含量范围是0.046~0.237 mg/kg,是限量值的46%~237%,说明在试验地区,当土壤Cd元素含量超过风险管控值3倍多时,4个供试玉米作物的食用部位Cd含量只有红单6号和路单12号为安全范围;Pb在谷物类限量为0.2 mg/kg,4个供试玉米品种的Pb含量范围是0.038~0.079 mg/kg,是限量值的19.0%~39.5%,说明在试验地区,当土壤Pb元素含量超过风险筛选值,低于风险管控值时,4个供试玉米作物的食用部位Pb含量均为安全范围。

(2)综合分析可知,在该试验地使用红单6号、会单4号、云瑞8号、路单12号4个玉米品种进行5种重金属低积累品种筛选试验,首先排除会单4号和云瑞8号2个籽粒不合格的品种,红单6号和路单12号籽粒合格,产量表现也较好,可以作为籽粒低积累品种用于食用。另外路单12号的根-茎叶转移系数(TF_{R-SL})大于红单6号,比后者大54.82%,且茎叶-籽粒转移系数(TF_{SL-C})也是4个供试品种中最小,因此路单12号为首推安全品种。

参考文献

- [1] 蔡美芳,李开明,谢丹平,等.我国耕地土壤重金属污染防控策略研究[C]//2014中国环境科学学会学术年会论文集(第八、九章).北京:中国环境科学出版集团,2014:275-282.
- [2] 顾继光,林秋奇,胡韧,等.土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望[J].土壤通报,2005,36(1):128-133.
- [3] 崔德杰,张玉龙.土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J].土壤通报,2004,35(3):366-370.
- [4] 王娟,苏德纯.基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析[J].农业环境科学学报,2021,40(3):493-500.
- [5] 李娜,贺红周,冯爱焯,等.渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术[J].环境科学,2019,40(10):4637-4646.

参考文献

- [1] 陈洁. 宁夏沙湖水环境预警研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [2] 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(3): 394-401.
- [3] 姜加虎, 窦鸿身, 黄群. 湖泊资源特征及其功能的关系分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 386-391.
- [4] XU F L, TAO S, DAWSON R W, et al. Lake ecosystem health assessment: Indicators and methods[J]. Water research, 2001, 35(13): 3157-3167.
- [5] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 海河水利, 2003(1): 6-8, 70.
- [6] 康思宇, 周林飞, 胡艳海. 基于景观变化的河口湿地生态环境需水量研究[J]. 节水灌溉, 2018(7): 51-55.
- [7] YU T, ZHANG Y, WU F C, et al. Six-decade change in water chemistry of large freshwater Lake Taihu, China[J]. Environmental science & technology, 2013, 47(16): 9093-9101.
- [8] 邱小琮, 赵红雪, 尹娟. 爱伊河生态环境需水量研究[J]. 节水灌溉, 2015(8): 63-66.
- [9] 高晓月, 郭勇, 刘明喆. 白洋淀流域河湖生态环境需水研究[C]// 阅海大学, 贵州省水利学会. 2017(第五届)中国水生态大会论文集. 北京: 北京沃特咨询有限公司, 2017: 7-17.
- [10] 张彩华, 余殿, 张维军, 等. 宁夏哈巴湖国家级自然保护区湿地植物群落特征与生态需水量[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 50-55.
- [11] 赵晓瑜, 杨培岭, 任树梅, 等. 基于生态水位差比法的高海拔湿地生态环境需水量研究: 以乌梁素海湿地为例[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 59-65.
- [12] 郭琦, 尹娟, 邱小琮, 等. 银川市阅海湖水环境容量评估[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 290-294, 300.
- [13] 杨永宇. 黑河流域水环境因子分析及水环境质量综合评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [14] 李斌, 白维东, 杨永宇, 等. 阅海湖水环境因子时空分布特征及水环境综合评价[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(8): 40-42, 63.
- [15] 刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604-609.
- [16] 许文杰. 城市湖泊综合需水分析及生态系统健康评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [17] 刘蕾蕾. 建湖生态城市建设中水面率及生态河道构建研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [18] 李延林. 宁夏典型湖泊生态环境需水量研究: 以沙湖为例[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [19] 胡东起, 徐慧. 城市生态环境需水量计算方法与应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 29-34.
- [20] 龙邵霞. 基于生态系统健康的湖泊生态需水研究: 以厦门杏林湾为例[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2007.
- [21] 李金燕, 张维江. 宁夏固原城乡饮用水水源工程受水区林地生态环境需水量研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(1): 63-67.
- [22] 黄小敏. 鄱阳湖湿地生态需水研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [23] 赵晓瑜, 杨培岭, 任树梅, 等. 内蒙古河套灌区湖泊湿地生态环境需水量研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 126-129.
- [24] 何明哲. 基于生态红线划分的生态用水合理配置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [25] 范学军, 钟颖. 城市景观生态环境需水规划方法研究[J]. 知识经济, 2010(10): 121.
- [26] 喻泽斌, 龙腾锐, 王敦球. 河流景观生态环境需水量计算方法研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(1): 71-75.
- [27] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [28] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量等级划分与实例分析[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 21-28.
- [29] 李海东, 尹倩瑜, 游立新. 宜昌沙河河道整治引水水源及环境需水量研究[J]. 水道港口, 2019, 40(1): 106-112.
- [30] 余歆睿, 乔利伟, 徐丹, 等. 考虑生态环境需水的七浦塘水量分配研究[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 119-122, 155.
- [31] 邢华超. 东昌湖水环境容量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [32] 孙栋元, 杨俊, 胡想全, 等. 疏勒河中游绿洲生态环境需水研究: II. 生态环境需水量与水资源管理对策[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 280-284.
- [33] 齐拓野, 米文宝, 邱开阳, 等. 干旱区湿地生态需水量研究: 以银川市阅海湿地为例[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 76-82.
- [6] 冯爱焯, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 988-1000.
- [7] 赵丽芳, 黄鹏武, 宗玉统, 等. 适宜浙南地区种植的重金属低累积玉米品种筛选[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(8): 1370-1372.
- [8] 黎春梅. 云南大理白族自治州土地利用结构研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2011: 68-72.
- [9] 陈春. 珠江流域环境保护综合治理措施探讨[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(2): 52-57.
- [10] 周鸿斌, 角媛梅, 史正涛, 等. 云南珠江沿岸农田土壤磁测分析与重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1586-1591.
- [11] 金修齐, 王朋, 郭秉林, 等. 小尺度农田土壤 Pb、Zn 和 Cd 空间分布及污染评价: 以云南珠江沿岸某农田为例[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 6190-6195.
- [12] 陈柯臻, 吴文卫, 赵海光, 等. 生态环境污染防治战略及经济高质量协同发展研究: 以珠江流域(云龙段)为例[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(4): 16-18.
- [13] 袁婧. 油菜与亚麻对农田重金属累积特征及其收获物后续处理[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019: 4-5.
- [14] 郭虎. 生物质炭对重金属污染土壤水稻镉吸收的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 4-6.
- [15] 云龙县人民政府网站. 云龙概况[EB/OL]. (2021-10-26) [2022-02-09]. <http://www.ylx.gov.cn/ylxrzmzf/c102588/202110/3bc433daca5433480d5e0c688968963.shtml>.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 陈婧, 王博, 郭昱言, 等. 土壤重金属污染及其修复技术研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2010, 20(5): 66-67, 72.
- [20] 宋瑜, 马艳华, 唐希望, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内转运途径研究进展[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29(3): 56-59.
- [21] BAKER A J M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals[J]. Journal of plant nutrient, 1981, 3(1/2/3/4): 643-654.
- [22] 邵忱忱, 牛婧, 张仕颖, 等. 铅锌镉复合污染条件下玉米低累积品种的筛选[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(12): 107-117.
- [23] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 63-67.
- [24] 任超, 肖建辉, 李竟天, 等. 不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4232-4252.
- [25] 陈亮妹, 李江遐, 胡兆云, 等. 重金属低累积作物在农田修复中的研究与应用[J]. 作物杂志, 2018(1): 16-24.

(上接第 30 页)