

引用格式:

李勇进, 匡政成, 陈浩东, 郭利双, 罗红兵. 长株潭地区低镉积累玉米品种的筛选[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 125–131.

LI Y J, KUANG Z C, CHEN H D, GUO L S, LUO H B. Screening of *Zea mays* cultivars with low cadmium accumulation in the Chang-Zhu-Tan area[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(2): 125–131.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 长株潭地区低镉积累玉米品种的筛选

李勇进<sup>1</sup>, 匡政成<sup>1,2#</sup>, 陈浩东<sup>2</sup>, 郭利双<sup>2</sup>, 罗红兵<sup>1\*</sup>

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省棉花科学研究所, 湖南 常德 415101)

**摘要:**以 18 个玉米品种为材料, 通过田间试验, 研究不同品种对土壤中镉(Cd)元素累积和富集的差异, 以期筛选出适宜长株潭地区种植的低积累 Cd 玉米品种。结果表明: 18 个玉米品种茎叶 Cd 含量存在显著差异, 其中 15 个玉米品种茎叶的 Cd 含量超过了《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)要求, 超标率为 83.33%; 籽粒 Cd 含量存在极显著差异, 其中有 5 个玉米品种(先达 901、庆农 13、祥玉 88、祥玉 10 号、新中玉 801)的籽粒 Cd 含量超过了《食品安全国家标准 食品中污染物限量》要求, 不能食用, 占供试品种的 27.78%; 18 个玉米品种茎叶 Cd 的富集系数为 0.28~2.72, 籽粒 Cd 的富集系数为 0.03~0.30, 籽粒 Cd 的转运系数为 0.03~0.28, 均小于 1, 说明玉米对土壤 Cd 有一定的吸附能力, 但茎叶向籽粒转运 Cd 的能力较弱, 导致玉米籽粒对 Cd 的富集能力较低。根据玉米产量、田间倒伏以及籽粒 Cd 积累情况, 初步筛选出 3 个适宜长株潭地区种植的低积累 Cd 玉米品种豫丰玉 88、福科 07、大天 1 号。

**关键词:** 玉米; 低镉积累; 品种筛选; 富集系数; 转运系数; 长株潭地区

中图分类号: S513.037

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)02-0125-07

## Screening of *Zea mays* cultivars with low cadmium accumulation in the Chang-Zhu-Tan area

LI Yongjin<sup>1</sup>, KUANG Zhengcheng<sup>1,2#</sup>, CHEN Haodong<sup>2</sup>, GUO Lishuang<sup>2</sup>, LUO Hongbing<sup>1\*</sup>

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Cotton Research Institute, Changde, Hunan 415101, China)

**Abstract:** The differences of Cd accumulation and enrichment in soil were studied by 18 maize varieties in the field, in order to select the low accumulation cadmium maize varieties suitable for the Chang-Zhu-Tan area. The results showed that there were significant differences in Cd content in stem and leaf of 18 maize varieties, and there was a significant difference in Cd content in grains; the Cd content of stem and leaf of 15 maize varieties exceeded the requirements of feed hygiene standard (GB 13078-2017), the exceeding rate was 83.33%, and 5 maize varieties exceeded the national food safety standard. The requirements of “limit of pollutants in food” accounted for 27.78% of the tested varieties; the enrichment coefficient of Cd in stem and leaf of 18 maize varieties was 0.28-2.72, the enrichment coefficient of Cd in grain was 0.03-0.30, and the transport coefficient of Cd in grain was 0.03-0.28, all of which were less than 1, indicating that the corn had some absorption capacity to the Cd of soil, but the ability of transferring Cd from stem and leaf to grain

收稿日期: 2021-04-12

修回日期: 2022-03-22

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5291)

作者简介: 李勇进(1987—), 男, 湖南祁阳人, 博士, 主要从事玉米栽培、玉米种质资源创新与利用研究, 451490306@qq.com; #并列第一作者, 匡政成(1988—), 男, 湖南祁东人, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物遗传育种研究, 18873692752@163.com; \*通信作者, 罗红兵, 博士, 教授, 主要从事作物遗传育种研究, hbluo48@sohu.com

was weak, which leads to the low enrichment capacity of Cd in corn seeds. According to the corn yield and the accumulation performance of Cd in the grain, three low accumulation cadmium maize varieties including Yufengyu 88, Fuke 07, Datian 1 suitable for the Chang-Zhu-Tan area were preliminarily selected according to the corn yield and the accumulation performance of Cd in the grain.

**Keywords:** maize; low cadmium accumulation; variety screening; enrichment coefficient; transport coefficient; Chang-Zhu-Tan area

工业、农业和城市化快速发展及“三废”不科学排放导致农田重金属污染加重<sup>[1]</sup>。据不完全统计,中国重金属污染耕地面积约  $2.0 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>, 占总耕地面积的 16.7%<sup>[2]</sup>, 其中以镉(Cd)污染最为严重, 涉及 11 个省市的 25 个地区<sup>[3]</sup>, 影响着粮食生产与食品安全。如何有效减少重金属 Cd 在农作物中的富集和累积已成为当前研究的热点之一。

筛选对重金属抗性强、累积量低的农作物品种是实现重金属污染耕地安全利用的重要途径<sup>[4-5]</sup>。研究<sup>[6-7]</sup>表明, 玉米品种对重金属 Cd 的累积差异显著, 通过种植低累积 Cd 玉米品种, 能有效降低玉米产品的 Cd 污染风险。陈建军等<sup>[8]</sup>筛选出云瑞 8 号、会单 4 号、路单 7 号等 3 个低累积 Cd 玉米品种; 赵丽芳等<sup>[9]</sup>筛选出银糯 1 号、彩糯 10 号、科甜 981、苏科糯 3 号等 4 个低累积 Cd 玉米品种。但这些低累积 Cd 玉米品种都存在一定的地域性<sup>[10-11]</sup>, 有可能不适合在湖南省长株潭(长沙、株洲、湘潭)地区种植。本研究中, 以 18 个玉米品种为材料, 通过大田试验, 研究不同玉米品种在长株潭地区的产量和 Cd 富集系数, 旨在筛选出低累积 Cd 玉米品种, 为当地玉米丰收和食品安全提供技术支撑。

## 1 供试玉米和土壤概况

### 1.1 供试品种

18 个供试玉米品种先达 901、齐单 6 号、敦玉 518、庆农 13、豫丰玉 88、潞玉 13、渝 1505、先玉 1388、祥玉 88、祥玉 10 号、福科 07、吉湘玉 533、吉湘玉 210、大丰 28、厚积 2158、大天 1 号、新中玉 801、临奥 1 号为湖南省主栽玉米品种和国内推广面积较大的玉米品种, 均购自当地种子市场。

### 1.2 土壤概况

土壤 pH 值 6.73, 有机质含量 24.0 g/kg, 有效磷、速效钾、水解性氮、全 Cd 含量分别为 7.91、

64.30、107.00、1.52 mg/kg。根据《土壤环境质量: 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018), 试验地土壤中 Cd 含量高于农用地土壤污染风险筛选值, 低于农用地土壤污染风险管制值。

## 2 方法

### 2.1 试验设计

试验于 2016 年在湖南省株洲县松西子社区(27.72°N, 113.13°E)进行。3 月 27 日播种。18 个玉米品种为 18 个处理, 每个处理 3 次重复, 随机区组排列, 共 54 个小区, 小区面积为 14.4 m<sup>2</sup>(6 m×2.4 m)。每小区 72 穴, 株行距分别为 33、60 cm。其他栽培管理按当地大田管理进行。

### 2.2 测定项目及方法

#### 2.2.1 农艺性状的测定

按照《湖南省玉米品种试验观察记载项目、方法及标准》调查每个处理的生育期、株型、粒型、株高、穗位高、倒伏率、穗长、穗粗、穗行数、行粒数、出籽率、百粒质量和产量。

#### 2.2.2 Cd 含量的检测

玉米成熟后按照五点取样法在每个小区分别采集约 500 g 的茎叶和籽粒样品, 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重, 粉碎过筛(孔径 150 μm)。保存, 备用。每个样品称取 0.5 g, 分别加至干净的消解管中, 加入浓 HNO<sub>3</sub> 后在电热消解仪上进行消解, 冷却、定容、过滤后采用 ICP-OES(Agilent 5800, USA)测定 Cd 含量。

### 2.3 数据分析与统计

茎叶富集系数(BCF)、籽粒富集系数(BCF)、籽粒转运系数(TF)参考文献[12-13]进行计算。

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 21.0 进行数据分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 供试玉米品种的田间种植表现

由表 1 可知, 供试品种生育期为 115~117 d, 生育期相近; 供试品种株高为 257.20~298.30 cm, 平均 276.37 cm, 部分品种间差异极显著, 其中大天 1 号的株高最高, 新中玉 801 最矮; 供试品种穗位高为 90.60~136.40 cm, 平均 116.90 cm, 部分品种间差异极显著, 其中大天 1 号的穗位高最高, 敦

玉 518 的最低; 供试品种倒伏率为 0%~20.83%, 平均 3.70%, 部分品种间差异极显著, 其中厚积 2158、渝 1505、潞玉 13 和敦玉 518 倒伏较严重, 先达 901、齐单 6 号和祥玉 10 号 3 个品种无倒伏现象。就株型而言, 平展型玉米品种最多(9 个), 占 50.00%; 紧凑型玉米品种最少(1 个), 占 5.56%; 半紧凑型玉米品种 8 个, 占 44.44%。就粒型而言, 马齿型玉米品种 10 个, 占 55.56%; 半马齿型玉米品种 8 个, 占 44.44%。

表 1 供试品种的基本特征

品种	生育期/d	株型	粒型	株高/cm	穗位高/cm	倒伏率/%
先达 901	116	平展	马齿	(294.30±10.45)AB	(134.40±6.29)A	(0.00±0.00)B
齐单 6 号	116	半紧凑	马齿	(282.20±6.92)CDE	(105.20±7.60)D	(0.00±0.00)B
敦玉 518	115	平展	半马齿	(258.50±5.91)I	(90.60±8.69)E	(15.28±6.94)A
庆农 13	116	平展	半马齿	(263.40±5.56)HI	(105.60±5.70)D	(4.63±0.80)B
豫丰玉 88	117	半紧凑	半马齿	(264.60±5.38)HI	(114.60±6.44)C	(0.93±0.80)B
潞玉 13	117	半紧凑	半马齿	(283.50±8.55)CD	(111.70±5.06)CD	(18.06±1.39)A
渝 1505	115	平展	半马齿	(285.30±8.08)C	(133.80±7.79)A	(18.52±4.88)A
先玉 1388	115	半紧凑	马齿	(295.70±6.55)AB	(135.80±4.94)A	(0.93±0.80)B
祥玉 88	116	平展	马齿	(265.30±6.72)GHI	(96.10±8.02)E	(3.24±1.60)B
祥玉 10 号	115	平展	半马齿	(274.10±5.32)EFG	(124.10±7.98)B	(0.00±0.00)B
福科 07	116	半紧凑	半马齿	(257.40±6.36)I	(113.20±6.89)CD	(2.31±2.12)B
吉湘玉 533	117	半紧凑	马齿	(265.70±5.41)GHI	(111.70±7.67)CD	(0.93±1.60)B
吉湘玉 210	116	半紧凑	马齿	(274.90±5.32)DEF	(124.60±6.33)B	(1.85±0.80)B
大丰 28	117	紧凑	马齿	(287.70±5.08)BC	(115.60±5.53)C	(1.85±2.12)B
厚积 2158	115	平展	半马齿	(296.50±6.19)AB	(135.10±3.60)A	(20.83±5.01)A
大天 1 号	117	平展	马齿	(298.30±5.52)A	(136.40±5.72)A	(1.39±1.39)B
新中玉 801	117	平展	马齿	(257.20±5.49)I	(105.60±5.06)D	(2.31±1.60)B
临奥 1 号	117	半紧凑	马齿	(270.00±14.39)FGH	(110.10±5.72)CD	(3.70±1.60)B
平均值				276.37	116.90	3.70

同列数据不同大写字母示差异极显著( $P<0.01$ )。

#### 3.2 供试玉米品种产量及其农艺性状差异

由表 2 可知, 供试品种的穗长为 15.07~19.64 cm, 平均为 15.66 cm, 部分品种间差异极显著, 其中敦玉 518 的穗最长, 吉湘玉 210 的最短; 供试品种的穗粗为 4.61~5.38 cm, 平均为 4.92 cm, 品种间差异不显著, 其中新中玉 801 的穗最粗, 大丰 28 的最细; 供试品种的穗行数为 14.00~19.03, 平均为 16.42, 部分品种间差异极显著, 其中福科 07 的穗行数最多, 临奥 1 号的最少; 供试品种行粒数为

30.73~40.57, 平均值为 35.88, 部分品种间差异极显著, 其中临奥 1 号的行粒数最多, 先达 901 的最少; 供试品种的出籽率为 79.43%~96.20%, 平均值为 85.69%, 品种间差异不显著, 其中出籽率最高的是新中玉 801, 最低的是庆农 13; 供试品种的百粒质量为 28.40~38.93 g, 平均为 33.28 g, 部分品种间差异极显著, 其中豫丰玉 88 的百粒质量最高, 庆农 13 的最低。

表 2 供试玉米品种的产量性状

品种	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数	行粒数	出籽率/%	百粒质量/g
先达 901	(15.93±0.80)CD	4.79±0.14	(14.20±0.20)C	(30.73±1.25)F	83.20±2.55	(37.33±0.75)AB
齐单 6 号	(18.77±0.96)ABC	4.74±0.24	(16.03±1.25)ABC	(37.77±2.99)ABC	89.76±2.59	(32.33±2.11)CDE
敦玉 518	(19.64±2.71)A	5.33±0.20	(17.60±2.02)AB	(37.00±1.04)ABC	84.58±3.52	(38.47±0.95)A

表 2(续)

品种	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数	行粒数	出籽率/%	百粒质量/g
庆农 13	(17.70±2.18)ABCD	4.82±0.38	(16.33±1.96)ABC	(37.40±1.20)ABC	79.43±9.64	(28.40±0.70)F
豫丰玉 88	(19.00±0.23)AB	4.99±0.35	(17.03±0.25)ABC	(34.50±0.62)BCDEF	86.69±1.92	(38.93±1.94)A
潞玉 13	(19.48±1.16)A	5.07±0.16	(17.62±0.04)AB	(34.30±2.12)BCDEF	84.88±3.67	(34.17±3.84)BCD
渝 1505	(18.46±0.36)ABC	4.99±0.07	(17.00±0.53)ABC	(35.50±0.66)BCDE	84.68±3.33	(34.17±0.38)BCD
先玉 1388	(17.34±0.44)ABCD	4.71±0.06	(15.20±0.87)BC	(35.40±0.92)BCDE	80.44±0.72	(28.63±1.17)F
祥玉 88	(17.71±0.99)ABCD	5.07±0.30	(16.13±1.33)ABC	(38.30±2.11)AB	85.21±2.96	(32.47±0.50)CDE
祥玉 10 号	(18.25±1.37)ABC	4.92±0.14	(18.33±0.90)AB	(33.50±2.26)CDEF	86.43±4.57	(32.83±1.00)CDE
福科 07	(16.38±0.70)BCD	5.09±0.45	(19.03±1.02)A	(31.97±1.76)EF	88.87±2.22	(34.93±0.97)BC
吉湘玉 533	(16.76±0.25)ABCD	4.71±0.60	(16.43±0.21)ABC	(36.43±1.11)ABCD	85.59±3.22	(33.40±0.69)CDE
吉湘玉 210	(15.07±0.33)D	4.75±0.06	(15.93±0.12)ABC	(32.36±0.25)DEF	87.43±0.54	(30.30±0.52)EF
大丰 28	(17.66±0.24)ABCD	4.61±0.15	(15.63±0.86)BC	(37.13±0.70)ABC	85.85±2.87	(33.60±0.70)CDE
厚积 2158	(17.71±1.21)ABCD	4.86±0.06	(15.46±0.76)BC	(40.23±2.97)A	82.89±2.01	(30.57±1.50)DEF
大天 1 号	(17.07±1.11)ABCD	4.84±0.02	(15.60±0.40)BC	(37.40±1.14)ABC	85.13±0.99	(32.20±0.70)CDE
新中玉 801	(16.26±0.78)BCD	5.38±0.40	(17.97±3.27)AB	(35.37±2.62)BCDE	96.20±17.59	(32.27±1.25)CDE
临奥 1 号	(18.64±0.02)ABC	4.94±0.11	(14.00±0.35)C	(40.57±0.68)A	85.16±0.40	(34.00±2.23)BCDE
平均值	15.66	4.92	16.42	35.88	85.69	33.28

同列数据不同大写字母示差异极显著( $P<0.01$ )。

由表 3 可知, 供试品种小区平均产量为 9.68~14.44 kg, 平均为 12.33 kg, 变异系数为 3.84%~14.17%, 部分品种间的差异极显著。敦玉 518、豫丰玉 88、潞玉 13、渝 1505、祥玉 10 号、福科 07、吉湘玉 533、大天 1 号、新中玉 801 等 9

个品种的产量高于平均值且变异系数偏低, 说明这 9 个品种重复之间产量差异较小。豫丰玉 88 的产量最高, 为 10 032.79 kg/hm<sup>2</sup>; 其次是福科 07(9768.77 kg/hm<sup>2</sup>); 庆农 13 的产量最低, 为 6725.58 kg/hm<sup>2</sup>。

表 3 供试玉米品种的产量

Table 3 The yields of *Zea mays* cultivars

品种	小区平均产量/kg	折合产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	小区产量的变异系数/%	位次
先达 901	(11.41±1.15)CDEF	7927.57	10.05	14
齐单 6 号	(12.31±0.62)ABCDE	8552.89	5.03	10
敦玉 518	(13.96±0.60)AB	9699.29	4.33	3
庆农 13	(9.68±0.72)F	6725.58	7.46	18
豫丰玉 88	(14.44±0.98)A	10 032.79	6.81	1
潞玉 13	(13.22±0.74)ABC	9185.15	5.61	7
渝 1505	(12.61±0.74)ABCD	8761.32	5.83	9
先玉 1388	(11.41±0.96)CDEF	7927.57	8.37	13
祥玉 88	(10.88±1.54)DEF	7559.33	14.17	15
祥玉 10 号	(13.32±0.57)ABC	9254.63	4.27	6
福科 07	(14.06±0.54)AB	9768.77	3.84	2
吉湘玉 533	(12.74±0.85)ABCD	8851.65	6.70	8
吉湘玉 210	(10.75±1.18)DEF	7469.01	10.93	16
大丰 28	(11.55±0.85)CDEF	8024.84	7.40	12
厚积 2158	(10.30±1.21)EF	7156.35	11.79	17
大天 1 号	(13.35±0.69)ABC	9275.47	5.15	5
新中玉 801	(13.89±0.85)AB	9650.66	6.18	4
临奥 1 号	(12.07±0.68)BCDE	8386.14	5.66	11
平均值	12.33	8567.17	7.20	

同列数据不同大写字母示差异极显著( $P<0.01$ )。

### 3.3 玉米品种产量及其农艺性状的相关性分析

由表 4 可知, 供试品种的产量与株高、穗位高、倒伏率、行粒数呈负相关, 与穗行数和百粒质量呈极显著正相关, 与穗粗和出籽率呈显著正相关。说明在一定程度上, 提高穗行数、百粒质量、穗粗、出籽率, 玉米产量也会显著提高。株高与穗位高呈

极显著正相关, 与穗粗呈极显著负相关, 与穗行数呈显著负相关, 说明株高增加, 穗位高也会极显著增加, 穗粗会极显著下降, 穗行数也会显著降低; 穗粗与穗行数呈极显著正相关, 与穗位高呈显著负相关, 说明穗粗增加, 穗行数会显著增加, 穗位高也会显著降低。

表 4 供试品种的产量与农艺性状的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between agronomic traits and yield of *Zea mays* cultivars

性状	相关系数								
	株高	穗位高	倒伏率	穗长	穗粗	穗行数	行粒数	出籽率	百粒质量
穗位高	0.791**								
倒伏率	0.158	0.038							
穗长	-0.058	-0.363	0.465						
穗粗	-0.594**	-0.498*	0.350	0.260					
穗行数	-0.571*	-0.344	0.155	0.156	0.596**				
行粒数	0.058	-0.255	0.275	0.442	-0.037	-0.366			
出籽率	-0.416	-0.302	-0.248	-0.206	0.456	0.454	-0.178		
百粒质量	-0.255	-0.241	0.081	0.340	0.400	0.203	-0.280	0.202	
产量	-0.354	-0.195	-0.046	0.284	0.559*	0.622**	-0.289	0.556*	0.651**

“\*”示显著相关; “\*\*”示极显著相关。

回归模型的拟合优度  $R^2$  为 0.675, 调整后  $R^2$  为 0.631。由表 5 可知, 产量( $Y$ )、穗行数( $X_1$ )、百粒

质量( $X_2$ )之间的回归方程  $Y = -3562.9 + 368.033X_1 + 182.920X_2$ 。穗行数、百粒质量对产量均为正作用。

表 5 供试品种产量与农艺性状的回归模型参数

Table 5 Regression model parameter between yield and agronomic traits of *Zea mays* cultivars

变量	非标准化系数		标准化系数	T 值	显著性系数
	回归系数	标准误差			
常量	-3562.900	2184.525		-1.631	0.124
穗行数	368.033	108.317	0.511	3.398	0.004
百粒质量	182.920	50.248	0.548	3.640	0.002

### 3.4 供试玉米茎叶和籽粒中的 Cd 含量差异

由表 6 可知, 18 个供试品种茎叶 Cd 含量为 0.43~4.14 mg/kg, 平均为 1.56 mg/kg, 部分品种间

差异显著。根据《饲料卫生标准》(GB 13078—2017), Cd 的限量为 1.00 mg/kg, 齐单 6 号、敦玉 518、庆农 13、潞玉 13、先玉 1388、祥玉 88、祥玉 10 号、

表 6 供试品种茎叶和籽粒中 Cd 含量

Table 6 Cd concentrations in stem leaf and grain of *Zea mays* cultivars

品种	Cd 含量		品种	Cd 含量	
	茎叶	籽粒		茎叶	籽粒
先达 901	(0.53±0.20)c	(0.13±0.10)B	祥玉 10 号	(2.10±0.47)bc	(0.14±0.11)B
齐单 6 号	(1.01±0.80)bc	(0.07±0.02)B	福科 07	(1.76±1.15)bc	(0.09±0.04)B
敦玉 518	(1.17±0.70)bc	(0.08±0.01)B	吉湘玉 533	(1.61±0.69)bc	(0.06±0.01)B
庆农 13	(1.41±0.43)bc	(0.11±0.03)B	吉湘玉 210	(1.22±0.85)bc	(0.09±0.01)B
豫丰玉 88	(0.93±0.53)bc	(0.05±0.01)B	大丰 28	(1.13±0.48)bc	(0.07±0.00)B
潞玉 13	(1.98±0.15)bc	(0.07±0.02)B	厚积 2158	(1.85±1.36)bc	(0.09±0.01)B
渝 1505	(0.43±0.20)c	(0.06±0.01)B	大天 1 号	(1.42±0.50)bc	(0.05±0.01)B
先玉 1388	(1.75±0.48)bc	(0.08±0.01)B	新中玉 801	(4.14±2.83)a	(0.45±0.04)A
祥玉 88	(2.53±0.85)b	(0.16±0.07)B	临奥 1 号	(1.09±1.15)bc	(0.06±0.00)B

18 个品种同一项数据后的不同小、大写字母分别示差异显著( $P < 0.05$ )和差异极显著( $P < 0.01$ )。

福科 07、吉湘玉 533、吉湘玉 210、大丰 28、厚积 2158、大天 1 号、新中玉 801、临奥 1 号等 15 个玉米品种的茎叶 Cd 含量均超标,不宜作为饲料原料。供试品种籽粒 Cd 含量为 0.05~0.45 mg/kg,平均为 0.11 mg/kg,新中玉 801 极显著高于其他品种。根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中 Cd 的限量(0.10 mg/kg),先达 901、庆农 13、祥玉 88、祥玉 10 号、新中玉 801 等 5 个玉米品种的籽粒 Cd 含量超标,不宜食用。

### 3.5 供试玉米品种 Cd 的富集系数与转运系数差异

由表 7 可知,18 个供试品种茎叶 Cd 的富集系数为 0.28~2.72,平均为 1.03,其中,新中玉 801 茎叶 Cd 的富集系数最高,显著高于其他品种,渝 1505 的最低;供试品种籽粒 Cd 的富集系数为 0.03~0.30,平均为 0.07,其中,新中玉 801 籽粒 Cd 的富集系数最高,显著高于其他品种,豫丰玉 88 的最低;供试品种籽粒 Cd 的转运系数为 0.03~0.28,平均为 0.09,其中,先达 901 籽粒 Cd 的转运系数最高,显著高于其他品种,潞玉 13 的最低。

表 7 供试品种 Cd 的富集系数与转运系数

Table 7 The bioconcentration factors and translocation factors of Cd in *Zea mays* cultivars

品种	茎叶 Cd 富集系数	籽粒 Cd 富集系数	籽粒 Cd 转运系数	品种	茎叶 Cd 富集系数	籽粒 Cd 富集系数	籽粒 Cd 转运系数
先达 901	(0.35±0.13)c	(0.09±0.06)B	(0.28±0.19)a	祥玉 10 号	(1.38±0.31)bc	(0.10±0.07)B	(0.08±0.08)b
齐单 6 号	(0.67±0.52)bc	(0.05±0.02)B	(0.11±0.10)b	福科 07	(1.16±0.76)bc	(0.06±0.02)B	(0.06±0.02)b
敦玉 518	(0.77±0.46)bc	(0.05±0.00)B	(0.09±0.07)b	吉湘玉 533	(1.06±0.46)bc	(0.04±0.01)B	(0.05±0.03)b
庆农 13	(0.93±0.29)bc	(0.07±0.02)B	(0.09±0.05)b	吉湘玉 210	(0.80±0.56)bc	(0.06±0.01)B	(0.10±0.06)b
豫丰玉 88	(0.61±0.35)bc	(0.03±0.00)B	(0.08±0.08)b	大丰 28	(0.74±0.31)bc	(0.05±0.00)B	(0.07±0.02)b
潞玉 13	(1.30±0.10)bc	(0.04±0.01)B	(0.03±0.01)b	厚积 2158	(1.21±0.89)bc	(0.06±0.01)B	(0.07±0.04)b
渝 1505	(0.28±0.13)c	(0.04±0.00)B	(0.16±0.07)b	大天 1 号	(0.93±0.33)bc	(0.03±0.01)B	(0.04±0.02)b
先玉 1388	(1.15±0.31)bc	(0.05±0.01)B	(0.05±0.01)b	新中玉 801	(2.72±1.86)a	(0.30±0.02)A	(0.14±0.06)b
祥玉 88	(1.67±0.56)b	(0.10±0.05)B	(0.06±0.03)b	临奥 1 号	(0.72±0.10)bc	(0.04±0.00)B	(0.06±0.01)b

18 个品种同一项数据后的不同小、大写字母分别示差异显著( $P<0.05$ )和差异极显著( $P<0.01$ )。

对供试品种籽粒 Cd 的富集系数进行聚类分析,结果见图 1。18 个玉米品种可分为 3 类:第 1 类包括福科 07、厚积 2158、吉湘玉 210、庆农 13、豫

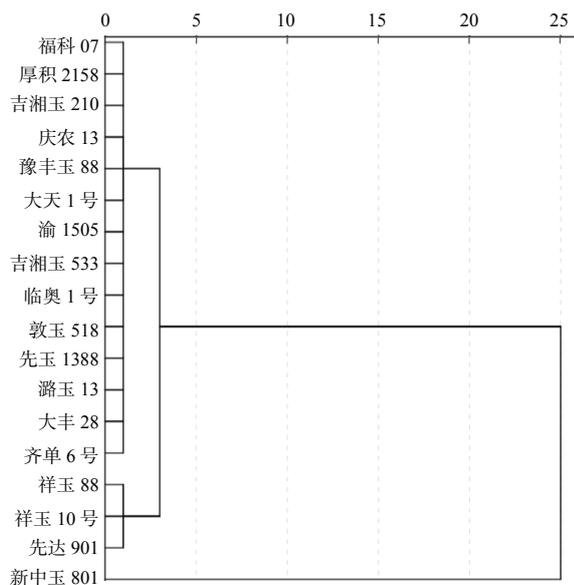


图 1 供试品种籽粒 Cd 富集系数聚类分析结果

Fig.1 The hierarchical clustering analysis diagram of Cd bioconcentration factors of *Zea mays* cultivars

丰玉 88、大天 1 号、渝 1505、吉湘玉 533、临奥 1 号、敦玉 518、先玉 1388、潞玉 13、大丰 28、齐单 6 号等 14 个品种,为低积累 Cd 类群;第 2 类包括祥玉 88、祥玉 10 号、先达 901 等 3 个品种,为中等积累 Cd 类群;第 3 类包括新中玉 801,为高积累 Cd 类群。

## 4 结论与讨论

植物对重金属的吸收、富集和转移能力主要通过富集系数(BCF)和转运系数(TF)来反映,富集系数越大,表明植物对重金属的吸收能力越强;转运系数越大,表明重金属在器官之间的转移能力越强<sup>[4]</sup>。本研究中,18 个玉米品种茎叶 Cd 的富集系数为 0.28~2.72,籽粒 Cd 的富集系数为 0.03~0.30,表明玉米不同器官对重金属 Cd 的富集系数有较大差异,玉米籽粒对 Cd 的富集效应较低,这与前人<sup>[15]</sup>的研究结论一致;供试品种籽粒 Cd 的转运系数为 0.03~0.28,表明玉米茎叶向籽粒转移 Cd 的能力偏弱,茎叶阻止了 Cd 向籽粒的转移,这与前人<sup>[9]</sup>的

研究结论相符。

对供试玉米籽粒 Cd 的富集系数进行聚类分析, 14 个玉米品种属于低积累 Cd 类群, 占总数的 77.78%, 说明大部分玉米品种属于低积累 Cd 类群。但对比 18 个玉米品种籽粒中 Cd 含量发现, 低积累 Cd 类群品种庆农 13 籽粒中 Cd 含量为 0.11 mg/kg, 超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中 Cd 的限量, 说明生产上要获得 Cd 含量符合要求的玉米产品, 不仅要考虑品种对 Cd 的积累情况, 还需分析玉米籽粒 Cd 的富集系数。本研究中, 敦玉 518、豫丰玉 88、潞玉 13、祥玉 10 号、福科 07、大天 1 号、新中玉 801 等 7 个品种在长株潭地区种植能获得较高产量, 综合田间倒伏和籽粒 Cd 积累表现, 筛选出豫丰玉 88、福科 07、大天 1 号等 3 个适宜长株潭地区种植的低积累 Cd 玉米品种, 其中, 豫丰玉 88 茎叶 Cd 含量符合《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)要求, 还可作为饲料原料用于生产。同时, 本研究将穗行数( $X_1$ )、百粒质量( $X_2$ )与产量( $Y$ )进行拟合, 其回归方程为  $Y = -3562.9 + 368.033X_1 + 182.920X_2$ , 与前人的研究结果有差异, 这可能是品种、气候环境及土壤 Cd 含量等因素不同引起的。下一步要通过多年、多点试验, 从穗行数偏多、百粒质量偏重的品种中筛选出更好、更优的适宜长株潭地区种植的低积累 Cd 玉米品种。

#### 参考文献:

- [1] 刘海涛, 陈一兵, 田静, 等. 成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 184-191.
- [2] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [3] 彭炜东. 农田土壤镉污染现状与修复技术[J]. 云南化工, 2019, 46(3): 88-89.
- [4] LIU W T, ZHOU Q X, AN J, et al. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/2/3): 737-743.
- [5] 张同科, 贺晟阳, 易镇邪, 等. 洞庭湖区耐密植宜机收夏玉米品种的筛选[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 649-656.
- [6] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 16-23.
- [7] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属积累与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 367-371.
- [8] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1671-1676.
- [9] 赵丽芳, 黄鹏武, 宗玉统, 等. 适宜浙南地区种植的重金属低积累玉米品种筛选[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(8): 1370-1372.
- [10] 息朝庄, 戴塔根, 黄丹艳. 湖南长沙市土壤重金属污染调查与评价[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 136-141.
- [11] 张敏, 王美娥, 陈卫平, 等. 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1425-1430.
- [12] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对 Cd、Pb、As 积累与转运的差异研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1867-1875.
- [13] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(6): 774-779.
- [14] 张春华, 毛亮, 周培, 等. 超积累植物与非超积累植物吸收累积重金属的差异性研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(6): 592-600.
- [15] 陈燕, 刘晚苟, 郑小林, 等. 玉米植株对重金属的富集与分布[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 93-95.

责任编辑: 毛友纯  
英文编辑: 柳 正