

引用格式:

匡政成, 郭利双, 李玉军, 肖才升, 李飞, 杨光彬, 匡逢春, 陈浩东. 陆地棉品种对镉累积与转运的差异研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 18–25.

KUANG Z C, GUO L S, LI Y J, XIAO C S, LI F, YANG G B, KUANG F C, CHEN H D. Study on difference of accumulation and translocation of cadmium in upland cotton varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 18–25.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



陆地棉品种对镉累积与转运的差异研究

匡政成¹, 郭利双¹, 李玉军¹, 肖才升¹, 李飞¹, 杨光彬¹, 匡逢春², 陈浩东^{1*}

(1.湖南省棉花科学研究所, 湖南 常德 415101; 2.湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 以10个苗期Cd累积量相对较低的棉花品种为材料, 通过田间试验, 分析研究不同陆地棉品种对重金属Cd累积、转运的差异。结果显示: 湘X1251、湘FZ001、湘FZ031、湘杂棉23号、湘Z4等5个属于Cd高累积类群, 占供试品种总数的50%; 不同棉花品种地上部Cd累积量与地上部生物量呈极显著正相关, 与皮棉产量呈显著正相关; 将地上部生物量(X_1)与地上部Cd累积量(Y_2)进行拟合分析, 其回归方程为 $Y_2=2\ 700.008+1.087X_1$, $R^2=0.618$; 棉花不同部位对重金属Cd的吸收、富集能力有较大差异, 其中纤维对Cd的富集能力最差, 叶片对Cd的富集能力最强; 湘X1251棉籽Cd的富集系数大于1, 说明湘X1251棉籽对Cd的富集能力较强, 其余9个棉花品种棉籽Cd的富集系数小于1, 说明大部分棉花品种棉籽对Cd的富集能力较弱; 湘杂棉23号、湘FZ001和湘FZ031等3个棉花品种皮棉产量均大于1 000 kg/hm², 棉籽Cd的富集系数均小于0.7, 且地上部Cd累积量都超过10 000 mg/hm², 可见, 湘杂棉23号、湘FZ001和湘FZ031等3个品种适宜种植于Cd污染耕地。

关键词: 棉花; 镉累积; 富集系数; 转运系数

中图分类号: S562.04

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2025)01–0018–08

Study on difference of accumulation and translocation of cadmium in upland cotton varieties

KUANG Zhengcheng¹, GUO Lishuang¹, LI Yujun¹, XIAO Caisheng¹, LI Fei¹,
YANG Guangbin¹, KUANG Fengchun², CHEN Haodong^{1*}

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

Abstract: To study cadmium(Cd) accumulation and transport in upland cotton, a hydroponics experiment screened ten cotton low-Cd-accumulation varieties at the seedling stage. Result showed that five high-Cd accumulators were identified: Xiang X1251, Xiang FZ001, Xiang FZ031, Xiangzhamian 23, and Xiang Z4, representing 50% of the tested varieties. Cd accumulation in aboveground parts exhibited a strong positive correlation with aboveground biomass and a positive correlation with lint yield. Regression analysis revealed a positive relationship between aboveground biomass (X_1) and Cd accumulation(Y_2): $Y_2=2\ 700.008+1.087X_1$, $R^2=0.618$. Cd enrichment varied significantly among plant parts with fibers showing the weakest and leaves showing the strongest enrichment. Xiang X1251 seeds had the Cd enrichment coefficient exceeded 1, indicating strong Cd enrichment capability, while the other nine varieties had coefficients below 1, suggesting that most cotton varieties had weaker Cd enrichment. Three varieties, Xiangzhamian 23, Xiang FZ001, and Xiang FZ031, had lint yields all exceeded 1 000 kg/hm², cottonseed Cd enrichment coefficients below 0.7, and aboveground Cd accumulation exceeding 10 000 mg/hm², making them suitable for Cd-contaminated farmland.

收稿日期: 2024–03–26

修回日期: 2025–01–15

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFE0101200); 棉花生物育种与综合利用全国重点实验室开放课题(CB2023A10)

作者简介: 匡政成(1988—), 男, 湖南祁东人, 硕士, 主要从事作物遗传育种研究, 18873692752@163.com; *通信作者, 陈浩东, 博士, 研究员, 主要从事作物遗传育种研究, chdmks@163.com

Keywords: cotton; cadmium accumulation; enrichment coefficient; transport coefficient

土壤是人类赖以生存的重要物质基础,也是保障农产品质量安全、人居环境安全的重要前提^[1-2]。然而长期工矿业“三废”(废气、废水和废渣)的不科学排放以及农药和化肥等的不合理使用造成国内土壤重金属累积严重,重金属污染问题日益突出^[3-4],2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,中国 19.4%的耕地土壤受到污染,其中重金属镉(Cd)点位超标率高达 7.0%,居无机污染物首位^[5]。Cd 污染耕地不仅会影响动植物生长发育,还会通过食物链威胁人体健康^[6-7]。治理 Cd 污染耕地,降低土壤中 Cd 含量是当前农业生产过程中亟需解决的重要问题。

筛选和利用对 Cd 累积量高的农作物是实现 Cd 污染耕地大范围修复治理的重要途径^[8]。棉花是中国重要的农作物之一,生物量大,对 Cd 耐受性较好,吸收、转运和聚集 Cd 的能力较强,且主产品棉纤维不会进入食物链,是 Cd 污染耕地最理想的修复作物之一^[9-13]。研究表明,棉花品种对 Cd 累积差异显著^[11]。郭利双等^[14-15]通过室内水培试验,从 59 个棉花品种中筛选出苗期 Cd 累积量相对较高的棉花品系 FZ-6,大田试验结果表明,FZ-6 吐絮期的干物质质量、Cd 累积量、籽棉产量均低于苗期 Cd 累积量相对较低的棉花品系 FZ-9 的。因此,有必要开展棉花对 Cd 积累与转运的差异研究,重新筛选 Cd 高累积棉花品种,通过无公害处理地上部(茎秆、叶片、棉籽和纤维)秸秆来提高 Cd 污染耕地治理效果。本试验以苗期 Cd 累积量相对较低的 10 个棉花品种为材料,并在湖南省株洲市某 Cd 污染耕地进行大田试验,研究 Cd 胁迫对不同棉花品种产量的影响以及棉花不同部位(根、茎秆、叶片、棉籽和纤维)Cd 的分布和不同棉花品种对 Cd 累积及转运的种间差异,以期筛选出 Cd 高累积棉花品种,为湖南乃至全国 Cd 污染耕地治理提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 棉花品种

2016 年通过室内水培试验(Cd 质量浓度为 2

mg/L)从 100 个湖南地方种质资源中筛选出 10 个苗期 Cd 累积量相对较低的棉花品种(表 1)。其中,杂交棉品种 1 个,湘杂棉 23 号;常规棉品种 9 个,湘 C160、湘 FZ001、湘 FZ031、湘 T38、湘 X57、湘 X121、湘 Z3、湘 Z4、湘 X1251,均由湖南省棉花科学研究所提供。

表 1 供试棉花品种苗期 Cd 的累积量

Table 1 Accumulation of Cd of cotton cultivars at seedling stage			
品种	单株生物量/mg	Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)	单株 Cd 累积量/mg
湘杂棉 23 号	0.40	103.49	4.162×10 ⁻²
湘 C160	0.47	99.64	4.727×10 ⁻²
湘 FZ001	0.41	35.64	1.469×10 ⁻²
湘 FZ031	0.40	68.83	2.776×10 ⁻²
湘 T38	0.54	91.89	4.992×10 ⁻²
湘 X57	0.45	77.04	3.449×10 ⁻²
湘 X121	0.47	80.22	3.770×10 ⁻²
湘 Z3	0.59	73.01	4.300×10 ⁻²
湘 Z4	0.43	81.47	3.520×10 ⁻²
湘 X1251	0.45	99.18	4.430×10 ⁻²
10 个品种的平均值	0.46	81.04	3.760×10 ⁻²
100 个湖南地方种质资源的平均值	0.53	105.08	5.561×10 ⁻²

1.1.2 供试土壤

选择株洲市某农田进行试验,土壤基本理化性质为 pH 4.92,有机质含量 36.0 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾、全 Cd 含量分别为 100、26.4、136、1.3 mg/kg,根据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》,试验地土壤中 Cd 含量高于农用地土壤污染风险筛选值(0.30 mg/kg),低于农用地土壤污染风险管制值(2.00 mg/kg)。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,10 个棉花品种分为 10 个处理,每个处理设 3 次重复,共计 30 个小区,小区面积为 20 m²(4 m×5 m)。2016 年 5 月播种,株距 27 cm,行距 50 cm,种植密度 7.5 万株/hm²。参照常规方法进行栽培管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植物样品采集与干物质测定

10 月 20 日,每个处理选取 3 株生长一致的棉

株,按部位分为根、茎秆、叶片、棉籽和纤维。105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重,记录生物量。将根、茎秆、叶片、棉籽和纤维分别粉碎,过筛(孔径0.15 mm),备用。

1.3.2 棉花产量测定

10月20日分小区一次性收花计产。

1.3.3 Cd含量的测定

每个处理根、茎秆、叶片、棉籽和纤维各称取2.0 g,送至广电计量检测(湖南)有限公司检测Cd含量,并计算Cd富集系数、转运系数^[11]和累积量^[16]。

1.4 统计分析

采用Excel 2010进行数据整理;采用SPSS 22.0进行方差分析、回归分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同棉花品种产量和干物质质量

由表2可知,供试品种皮棉产量为707.04~1549.63 kg/hm²,平均值1023.69 kg/hm²,品种间差异显著,其中皮棉产量最高的是湘FZ031,最低的是湘C160。供试品种地上部生物量为4473.43~10445.90 kg/hm²,平均值6682.47 kg/hm²,部分品种间差异显著,其中地上部生物量最高的是湘FZ031,最低的是湘Z3。就茎秆、叶片、棉籽和纤维各部位生物量而言,部分棉花品种间也存在显著性差异,其中,茎秆生物量最高的是湘FZ001,最低的是湘C160;叶片生物量最高的是湘FZ001,最低的是湘Z3;棉籽生物量最高的是湘FZ031,最低的是湘Z3;纤维生物量最高的是湘FZ031,最低的是湘Z3。

表2 不同棉花品种的生物量

品种	茎秆的生物量	叶片的生物量	棉籽的生物量	纤维的生物量	地上部生物量	皮棉产量
湘杂棉23号	(2 680.24±1 027.58)abc	(1 340.26±516.02)abc	(2 434.43±1 073.24)ab	(1 710.50±754.08)ab	(8 165.42±2 746.12)bc	(1 365.07±378.49)ab
湘C160	(1 352.23±260.09)c	(1 023.52±161.32)bc	(1 474.43±920.42)b	(1 168.07±722.75)b	(5 018.25±1 806.76)c	(707.04±258.60)c
湘FZ001	(3 345.86±893.19)a	(2 140.53±627.10)a	(2 078.18±635.46)b	(1 661.23±576.17)ab	(9 225.79±2 407.01)ab	(1 130.48±229.30)abc
湘FZ031	(2 819.34±1 097.10)ab	(1 683.18±642.32)ab	(3 453.01±447.42)a	(2 490.38±475.82)a	(10 445.90±2 250.91)a	(1 549.63±132.64)a
湘T38	(2 165.90±1 008.85)abc	(1 120.67±694.59)bc	(1 585.86±908.93)b	(1 061.80±595.05)b	(5 934.24±2 673.16)bc	(925.14±478.33)bc
湘X57	(1 381.46±342.32)bc	(798.59±153.98)bc	(1 669.73±455.13)b	(1 211.39±278.39)b	(5 061.18±725.11)c	(894.07±135.98)bc
湘X121	(2 048.76±800.06)abc	(989.27±133.60)bc	(1 604.88±714.61)b	(1 076.93±485.59)b	(5 719.84±2 049.98)bc	(978.47±424.05)bc
湘Z3	(1 450.01±176.39)bc	(700.08±264.34)c	(1 349.90±333.33)b	(973.44±234.38)b	(4 473.43±594.54)c	(783.75±80.10)c
湘Z4	(2 489.29±337.42)abc	(1 464.09±350.05)abc	(1 629.82±601.21)b	(1 054.06±374.98)b	(6 637.26±1 657.00)bc	(911.29±263.46)bc
湘X1251	(1 907.64±706.56)bc	(1 385.60±650.01)abc	(1 684.78±536.58)b	(1 165.34±348.87)b	(6 143.35±2 184.96)bc	(992.01±213.35)bc
平均值	2 164.07±895.67	1 264.58±573.96	1 896.50±841.34	1 357.31±623.35	6 682.47±2 542.68	1 023.69±345.98

同列数据不同小写字母表示品种间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 不同棉花品种重金属Cd含量

由表3可知,供试品种根Cd含量为0.52~1.31 mg/kg,平均值0.85 mg/kg,部分品种间差异显著,其中湘Z3的根Cd含量最高,湘X121的最低;供试品种茎秆Cd含量为1.01~2.11 mg/kg,平均值为1.49 mg/kg,部分品种间差异极显著,其中湘Z4的茎秆Cd含量最高,湘X121的最低;供试品种叶片Cd含量为2.26~5.72 mg/kg,平均值3.67 mg/kg,部分品种间差异极显著,其中湘X1251的叶片Cd含量最高,湘C160的最低;供试品种棉籽Cd含量为0.87~1.32 mg/kg,平均值1.10 mg/kg,部分品种间差异极显著,其中湘X1251棉籽Cd含量最高,

湘FZ031的最低;供试品种纤维Cd含量为0.15~0.28 mg/kg,平均值0.18 mg/kg,其中湘C160的最高,湘FZ031的最低。对10个棉花品种根、茎秆、叶片、棉籽、纤维的Cd含量比较发现,Cd含量最高的部位是叶片,最低的部位是纤维。其中湘X1251、湘C160、湘X57、湘杂棉23号和湘Z4等5个棉花品种叶片、茎秆、棉籽、根、纤维中的重金属Cd含量均依次降低;湘X121、湘T38等2个棉花品种叶片、棉籽、茎秆、根、纤维中的重金属Cd含量依次降低;湘FZ031、湘FZ001和湘Z3等3个棉花品种的叶片、茎秆、根、棉籽、纤维中的重金属Cd含量依次降低。

表 3 不同棉花品种 Cd 含量

品种	Cd 含量					mg/kg
	根	茎秆	叶片	棉籽	纤维	
湘杂棉 23 号	(0.62±0.23)c	(1.25±0.27)AB	(3.82±0.55)ABC	(0.90±0.05)AB		0.18±0.07
湘 C160	(0.66±0.05)bc	(1.29±0.17)AB	(2.26±0.45)C	(1.26±0.21)AB		0.28±0.07
湘 FZ001	(1.22±0.24)ab	(1.38±0.33)AB	(3.28±0.86)ABC	(0.90±0.20)AB		0.17±0.06
湘 FZ031	(1.11±0.10)abc	(1.44±0.21)AB	(3.41±0.66)ABC	(0.87±0.25)B		0.15±0.05
湘 T38	(0.67±0.42)bc	(1.09±0.51)B	(2.98±0.05)BC	(1.17±0.22)AB		0.18±0.05
湘 X57	(1.01±0.39)abc	(1.63±0.18)AB	(3.62±0.50)ABC	(1.29±0.10)AB		0.16±0.04
湘 X121	(0.52±0.25)c	(1.01±0.20)B	(5.19±1.72)AB	(1.29±0.25)AB		0.18±0.05
湘 Z3	(1.31±0.56)a	(2.09±0.66)A	(3.09±0.42)BC	(1.07±0.12)AB		0.17±0.04
湘 Z4	(0.74±0.27)bc	(2.11±0.22)A	(3.31±1.68)ABC	(0.92±0.03)AB		0.18±0.09
湘 X1251	(0.59±0.17)c	(1.65±0.12)AB	(5.72±1.01)A	(1.32±0.04)A		0.18±0.08
平均值	0.85±0.38	1.49±0.46	3.67±1.27	1.10±0.23		0.18±0.06

同列数据不同小写字母、大写字母分别表示品种间的差异在 0.05、0.01 水平有统计学意义。

2.3 不同棉花品种重金属Cd富集系数和转运系数

由表 4 可知, 湘 X1251、湘 C160、湘 X57、湘杂棉 23 号和湘 Z4 这 5 个棉花品种的叶片、茎秆、棉籽、根、纤维对 Cd 的富集能力均依次减弱; 湘 X121、湘 T38 等 2 个棉花品种的叶片、棉籽、茎秆、根、纤维对 Cd 的富集能力均依次降低; 湘 FZ031、湘 FZ001 和湘 Z3 等 3 个棉花品种的叶片、茎秆、根、棉籽、纤维对 Cd 的富集能力依次降低。同时, 供试品种根 Cd 的富集系数为 0.40~1.01, 平均值为 0.65, 部分品种间的差异显著, 其中, 湘 Z3 的根 Cd 的富集系数大于 1, 说明湘 Z3 的根对土壤 Cd 的吸收能力较强; 供试品种茎秆 Cd 的富集系数为 0.78~1.62, 平均值 1.15, 部分品种间差异极显著, 其中湘 X1251、湘 X57、湘 FZ031、湘 Z4、湘 FZ001、

湘 Z3 等 6 个棉花品种茎秆 Cd 的富集系数均大于 1, 说明这 6 个棉花品种茎秆对土壤 Cd 的吸收能力较强; 供试品种叶片 Cd 的富集系数为 1.74~4.40, 平均值 2.82, 部分品种间差异极显著, 其中 10 个棉花品种叶片 Cd 的富集系数均大于 1, 说明棉花叶片对土壤 Cd 的吸收能力较强; 供试品种棉籽 Cd 的富集系数为 0.67~1.02, 平均值 0.84, 部分品种间差异极显著, 其中湘 X1251 的棉籽 Cd 的富集系数大于 1, 说明湘 X1251 的棉籽对土壤 Cd 的吸收能力较强, 湘杂棉 23 号、湘 FZ001 和湘 FZ031 等 3 个棉花品种的棉籽 Cd 的富集系数均小于 0.7; 供试品种纤维 Cd 的富集系数为 0.12~0.22, 平均值 0.14, 说明棉花纤维对土壤 Cd 的吸收能力较弱。

表 4 不同棉花品种 Cd 富集系数

品种	富集系数				
	根	茎秆	叶片	棉籽	纤维
湘杂棉 23 号	(0.48±0.17)c	(0.96±0.21)AB	(2.93±0.43)ABC	(0.69±0.04)AB	0.14±0.05
湘 C160	(0.50±0.03)bc	(0.99±0.13)AB	(1.74±0.35)C	(0.97±0.16)AB	0.22±0.06
湘 FZ001	(0.94±0.19)ab	(1.06±0.26)AB	(2.53±0.66)ABC	(0.69±0.16)AB	0.13±0.05
湘 FZ031	(0.85±0.07)abc	(1.11±0.16)AB	(2.62±0.50)ABC	(0.67±0.19)B	0.12±0.04
湘 T38	(0.51±0.32)bc	(0.84±0.39)B	(2.29±0.03)BC	(0.90±0.17)AB	0.14±0.04
湘 X57	(0.78±0.30)abc	(1.26±0.14)AB	(2.79±0.39)ABC	(0.99±0.08)AB	0.13±0.03
湘 X121	(0.40±0.19)c	(0.78±0.15)B	(3.99±1.32)AB	(0.99±0.19)AB	0.14±0.04
湘 Z3	(1.01±0.43)a	(1.61±0.51)A	(2.38±0.32)BC	(0.82±0.10)AB	0.13±0.06
湘 Z4	(0.57±0.21)bc	(1.62±0.17)A	(2.55±1.29)ABC	(0.71±0.02)AB	0.14±0.07
湘 X1251	(0.46±0.13)c	(1.27±0.09)AB	(4.40±0.78)A	(1.02±0.03)A	0.14±0.06
平均值	0.65±0.29	1.15±0.35	2.82±0.98	0.84±0.18	0.14±0.05

同列数据不同小写字母、大写字母分别表示品种间的差异在 0.05、0.01 水平有统计学意义。

由表 5 可知, 供试品种茎秆 Cd 的转运系数为 1.16~3.31, 平均值 2.03, 10 个棉花品种茎秆 Cd 的转运系数均大于 1, 说明棉花地下部向茎秆转运 Cd 的能力较强; 供试品种叶片 Cd 的转运系数为 2.67~10.40, 平均值 5.47, 说明棉花地下部向叶片转运 Cd 的能力也较强; 供试品种棉籽 Cd 的转运系数为 0.74~2.67, 平均值 1.63, 部分品种间差异显著,

其中湘 X1251、湘 X121、湘 C160、湘 X57、湘杂棉 23 号、湘 T38、湘 Z4 等 7 个棉花品种棉籽 Cd 的转运系数均大于 1, 说明这 7 个棉花品种地下部向棉籽转运 Cd 的能力较强; 供试品种纤维 Cd 的转运系数为 0.14~0.43, 平均值 0.26, 说明棉花地下部向纤维转运 Cd 的能力较弱。

表 5 不同棉花品种 Cd 转运系数

Table 5 Cd translocation coefficient of different cultivars of cotton

品种	Cd 转运系数			
	茎秆	叶片	棉籽	纤维
湘杂棉 23 号	2.14±0.58	(6.83±2.75)ABC	(1.57±0.49)abc	(0.29±0.07)ab
湘 C160	1.98±0.36	(3.44±0.57)C	(1.92±0.26)abc	(0.43±0.11)a
湘 FZ001	1.16±0.39	(2.67±0.30)C	(0.74±0.17)c	(0.14±0.02)b
湘 FZ031	1.30±0.08	(3.07±0.37)C	(0.78±0.17)c	(0.14±0.03)b
湘 T38	1.79±0.60	(6.05±4.06)ABC	(2.52±1.94)a	(0.33±0.14)ab
湘 X57	1.78±0.66	(3.89±1.34)BC	(1.37±0.38)abc	(0.17±0.02)b
湘 X121	2.29±1.15	(10.40±1.99)A	(2.67±0.65)a	(0.41±0.23)a
湘 Z3	1.64±0.19	(2.69±1.24)C	(0.92±0.42)bc	(0.15±0.07)b
湘 Z4	3.31±1.87	(5.78±5.31)ABC	(1.39±0.62)abc	(0.26±0.11)ab
湘 X1251	2.97±0.98	(9.92±1.59)AB	(2.36±0.72)ab	(0.33±0.14)ab
平均值	2.03±0.97	5.47±3.47	1.63±0.94	0.26±0.14

同列数据不同小写字母、大写字母分别表示品种间的差异在 0.05、0.01 水平有统计学意义。

2.4 不同棉花品种重金属Cd累积量

由表 6 可知, 供试棉花品种地上部 Cd 累积量为 6 203.41~13 314.03 mg/hm², 平均值为 9 963.19 mg/hm², 部分品种间差异显著, 其中 Cd 累积量最高的是湘 FZ001, 最低的是湘 C160, 湘杂棉 23 号、湘 FZ001、湘 FZ031、湘 Z4、湘 X1251 等 5 个棉花

品种地上部 Cd 累积量都超过 10 000 mg/hm²。就茎秆、叶片、棉籽和纤维各部位 Cd 累积量而言, 不同棉花品种间也存在差异。其中茎秆的 Cd 累积量为 1 740.45~5 199.01 mg/hm², 湘 Z4 的最高, 湘 C160 的最低; 叶片的 Cd 累积量为 2 100.28~7 535.71 mg/hm²,

表 6 不同棉花品种 Cd 累积量

Table 6 Cd accumulation of different cultivars of cotton

mg/hm²

品种	Cd 累积量				
	茎秆	叶片	棉籽	纤维	地上部
湘杂棉 23 号	(3 292.89±1 301.93)abc	(5 146.24±2 142.63)abc	2 162.09±853.68	273.19±41.14	(10 874.42±3 457.01)abc
湘 C160	(1 740.45±421.08)c	(2 359.15±855.45)bc	1 773.12±965.56	330.69±197.13	(6 203.41±1 369.15)c
湘 FZ001	(4 576.80±1 628.91)ab	(6 673.81±673.35)a	1 779.98±104.48	283.43±114.25	(13 314.03±2 114.34)a
湘 FZ031	(3 907.67±1 027.20)abc	(5 576.65±1 637.37)ab	2 935.90±438.83	368.15±44.69	(12 788.37±1 306.28)ab
湘 T38	(2 702.15±1 897.77)bc	(3 325.92±2 041.70)bc	1 902.85±1 238.95	202.32±156.56	(8 133.24±4 560.58)abc
湘 X57	(2 218.18±355.09)c	(2 843.68±181.48)bc	2 134.12±507.59	190.05±8.39	(7 386.03±594.13)bc
湘 X121	(2 033.23±745.65)c	(5 200.47±2 233.03)abc	2 083.42±1041.59	194.37±119.20	(9 511.50±3 498.27)abc
湘 Z3	(3 084.11±1 302.87)abc	(2 100.28±566.20)c	1 459.81±520.43	168.49±49.14	(6 812.69±1 593.66)c
湘 Z4	(5 199.01±413.66)a	(4 553.48±1 659.53)abc	1 503.70±589.89	203.58±155.17	(11 459.77±2 135.74)abc
湘 X1251	(3 169.73±1 232.01)abc	(7 535.71±2 931.29)a	2 222.44±686.29	220.55±115.25	(13 148.42±4 719.13)a
平均值	3 192.42±1 436.67	4 531.54±2 274.44	1 995.74±755.11	243.48±115.87	9 963.19±3 550.48

同列数据不同小写字母表示品种间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

湘 X1251 的最高, 湘 Z3 的最低; 棉籽的 Cd 累积量为 1 459.81~2 935.90 mg/hm², 湘 FZ031 的最高, 湘 Z3 的最低; 纤维的 Cd 累积量为 168.49~368.15 mg/hm², 湘 FZ031 的最高, 湘 Z3 的最低。

对供试品种地上部 Cd 累积量进行聚类分析, 结果见图 1。10 个棉花品种可分为 3 类: 第 I 类湘 X1251、湘 FZ001、湘 FZ031、湘杂棉 23 号、湘 Z4,

为 Cd 高累积类群, 地上部 Cd 累积量均大于 10 000 mg/hm²; 第 II 类包括湘 X121、湘 T38 等 2 个品种, 为 Cd 中等累积类群, 地上部 Cd 累积量在 8 000~10 000 mg/hm²; 第 III 类包括湘 X57、湘 Z3、湘 C160 等 3 个品种, 为 Cd 低累积类群, 地上部 Cd 累积量均少于 8 000 mg/hm²。

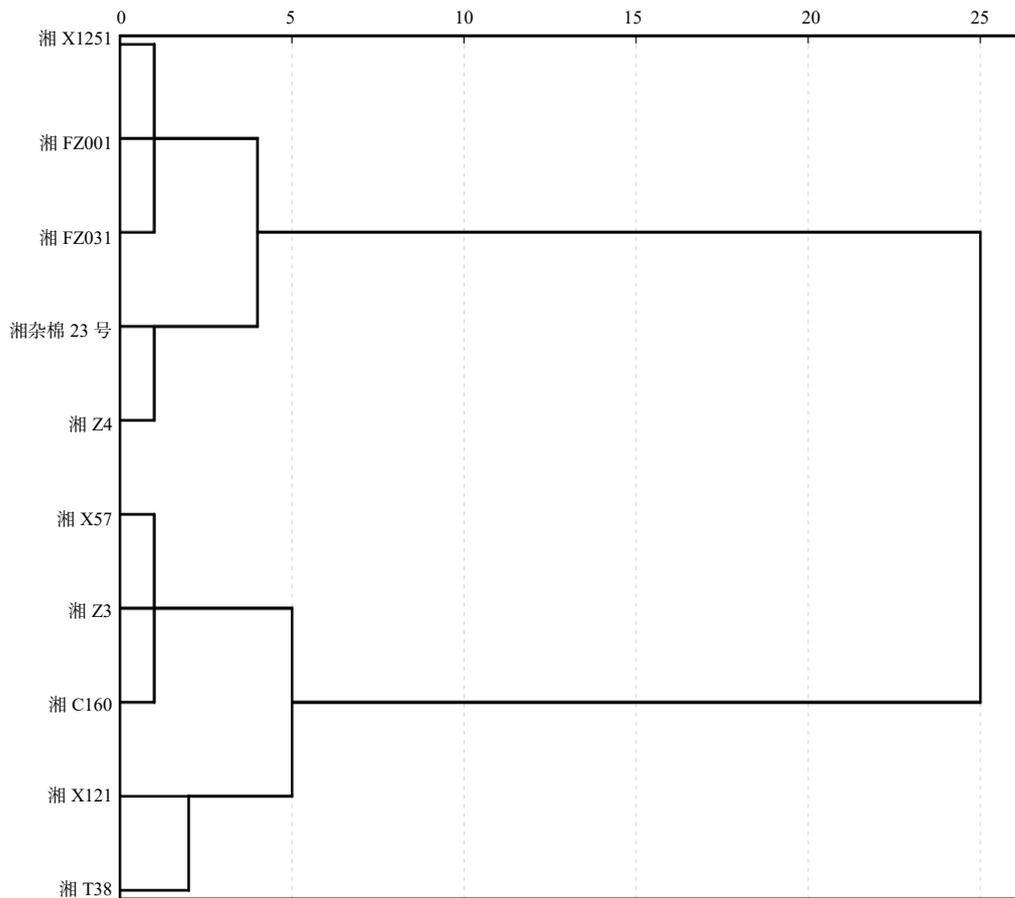


图 1 供试品种地上部 Cd 累积量的聚类分析结果

Fig.1 The hierarchical clustering analysis result of Cd accumulation of tested cotton cultivars

2.5 棉花地上部Cd累积量与产量、生物量、富集系数的相关性分析

由表 7 可知, 供试品种的皮肤产量与地上部生物量呈极显著正相关, 与地上部 Cd 累积量呈显著正相关, 与棉籽 Cd 富集系数呈显著负相关, 与根 Cd 富集系数、叶片 Cd 富集系数呈正相关, 与茎秆 Cd 富集系数、纤维 Cd 富集系数呈负相关, 说明在一定程度上, 皮棉产量提高, 棉花地上部生物量或

地上部 Cd 累积量提高, 棉籽 Cd 富集系数降低。地上部 Cd 累积量与地上部生物量呈极显著正相关, 与皮棉产量呈显著正相关, 与根 Cd 富集系数、茎秆 Cd 富集系数、叶片 Cd 富集系数呈正相关, 与棉籽 Cd 富集系数、纤维 Cd 富集系数呈负相关, 说明在一定程度上, 棉花地上部生物量或产量提高, 地上部 Cd 累积量会显著提高。

表 7 棉花地上部 Cd 累积量与产量、生物量、富集系数的相关系数

Table 7 Correlation analysis between aboveground Cd accumulation in cotton and yield, biomass and enrichment coefficient

指标	相关系数						
	皮棉产量	地上部生物量	根 Cd 富集系数	茎秆 Cd 富集系数	叶片 Cd 富集系数	棉籽 Cd 富集系数	纤维 Cd 富集系数
地上部生物量	0.907**						
根 Cd 富集系数	0.117	0.236					
茎秆 Cd 富集系数	-0.261	-0.208	0.468				
叶片 Cd 富集系数	0.180	-0.005	-0.410	-0.113			
棉籽 Cd 富集系数	-0.634*	-0.754*	-0.439	-0.219	0.374		
纤维 Cd 富集系数	-0.532	-0.394	-0.363	-0.171	-0.375	0.355	
地上部 Cd 累积量	0.688*	0.786**	0.017	0.015	0.469	-0.492	-0.462

“*”“**”“***”分别示 0.05、0.01 水平显著相关。

为进一步得到棉花地上部生物量与皮棉产量、地上部 Cd 累积量之间的关系,分别构建了以地上部生物量为自变量,棉花皮棉产量、地上部 Cd 累积量为因变量的线性回归模型。结果表明,皮棉产量(Y_1)、地上部生物量(X_1)之间的回归方程为 $Y_1=226.166+0.119X_1$, $R^2=0.822$,说明地上部生物量对皮棉产量为正作用;地上部 Cd 累积量(Y_2)、地上部生物量(X_1)之间的回归方程为 $Y_2=2\ 700.008+1.087X_1$, $R^2=0.618$,说明地上部生物量对地上部 Cd 累积量为正作用。

3 结论与讨论

本研究前期利用水培试验从 100 个湖南地方种质资源中筛选出湘杂棉 23 号、湘 C160、湘 FZ001、湘 FZ031、湘 T38、湘 X57、湘 X121、湘 Z3、湘 Z4、湘 X1251 等 10 个苗期 Cd 累积量相对较低的棉花品种,并对 10 个供试品种地上部 Cd 累积量进行聚类分析,湘 X1251、湘 FZ001、湘 FZ031、湘杂棉 23 号、湘 Z4 等 5 个供试品种属于 Cd 高累积类群,占总数的 50%,表明经初筛后大部分棉花品种从土壤中吸取 Cd 的能力较强。另外,本研究发现,不同棉花品种地上部 Cd 累积量与地上部生物量呈极显著正相关,与皮棉产量呈极显著正相关。将地上部生物量(X_1)与地上部 Cd 累积量(Y_2)进行拟合,其回归方程为 $Y_2=2\ 700.008+1.087X_1$, $R^2=0.618$,说明地上部生物量对地上部 Cd 累积量为正作用,这与 WÓJCIK 等^[17]的研究结果一致。

棉花不同部位对重金属 Cd 的吸收、富集能力有较大差异。李玲等^[11]研究表明,棉花叶柄、铃壳、茎秆、叶片、根、棉籽壳、种仁、纤维 Cd 的富集

系数依次降低。刘连涛等^[18]研究认为,棉花幼苗叶片、根、茎秆吸收 Cd 的能力依次降低。郭利双等^[15]研究发现棉花叶片、棉籽、茎秆、铃壳、根、棉纤维的 Cd 含量依次降低。本研究发现纤维对 Cd 的富集能力最低,叶片对 Cd 的富集能力最强,这与前人的研究基本相符。10 个供试品种叶片 Cd 的转运系数为 2.67~10.40,说明 Cd 更容易由地下部向叶片转移,这可能与棉花蒸腾作用有关。同时本研究成果表明,不同基因型棉花品种根、茎秆、棉籽对 Cd 的富集能力有所不同。通过比较富集系数发现,湘 X1251、湘 C160、湘 X57、湘杂棉 23 号和湘 Z4 等 5 个棉花品种茎秆、棉籽、根对 Cd 的富集能力依次减弱;湘 X121、湘 T38 等 2 个棉花品种棉籽、茎秆、根对 Cd 的富集能力依次降低;湘 FZ031、湘 FZ001 和湘 Z3 等 3 个棉花品种茎秆、根、棉籽对 Cd 的富集能力依次降低。这与前人的研究结果有差异^[11,15,18],可能是品种、气候及 Cd 处理浓度等因素不同引起的。10 个供试品种茎秆 Cd 的富集系数均大于根,说明棉花茎秆对 Cd 的富集能力强于根部,这与李玲等^[11]的研究结果相同。湘 X1251 棉籽 Cd 的富集系数大于 1,说明湘 X1251 棉籽对 Cd 的富集能力较强,其余 9 个棉花品种棉籽 Cd 的富集系数小于 1,说明这 9 个棉花品种棉籽对 Cd 的富集能力较弱。在 Cd 污染耕地种植湘 X1251 收获的棉籽 Cd 累积量不容易超标,生产的棉籽油、棉籽饼粕安全性更好^[19]。

本研究发现,湘杂棉 23 号、湘 FZ001 和湘 FZ031 等 3 个棉花品种皮棉产量均大于 1 000 kg/hm²,棉籽 Cd 的富集系数均小于 0.7,且地上部 Cd 累积量都超过 10 000 mg/hm²,说明湘杂棉 23 号、湘 FZ001

和湘 FZ031 等 3 个棉花品种为 Cd 高累积棉花品种,且种植效益较高。2019 年,谢心^[20]发现 Cd 污染耕地种植湘 FZ001 后,土壤 Cd 含量下降了 17.1%;2022 年,湘 FZ001 等高累积棉花品种被推荐在湖南省 Cd 污染替代区种植^[21]。

参考文献:

- [1] 罗清泉, 许安标, 张桃林. 中华人民共和国土壤污染防治法释义[M]. 北京: 中国民主法制出版社, 2018: 33–34.
- [2] 黄鑫浩, 许洪扬, 缪武, 等. 基于主成分分析和隶属函数法筛选低镉高产辣椒品种[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 44–53.
- [3] 李勇进, 匡政成, 陈浩东, 等. 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.
- [4] 席凯鹏, 席吉龙, 杨苏龙, 等. 长期秸秆配施鸡粪对棉田土壤重金属累积的影响及生态风险评估[J]. 棉花学报, 2022, 34(1): 48–59.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. (2014–04–17)[2024–12–30]. https://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm.
- [6] 张茹, 赵宝平, 王永宁, 等. 不同镉浓度对 3 个燕麦品种光合特性及镉富集转运系数的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2089–2099.
- [7] HUSSAIN S, KHAN A M, RENGEL Z. Zinc-biofortified wheat accumulates more cadmium in grains than standard wheat when grown on cadmium-contaminated soil regardless of soil and foliar zinc application[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 402–408.
- [8] 郭松明, 余海波, 袁龙义. 近 20 年我国重金属超积累植物种质资源筛选研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 96–108.
- [9] 梅磊, 李玲, DAUD M K, 等. 棉花对重金属胁迫的应答反应与抗性机理研究进展[J]. 棉花学报, 2018, 30(1): 102–110.
- [10] CHEN Z, ZHAO Y, FAN L, et al. Cadmium(Cd) localization in tissues of cotton(*Gossypium Hirsutum* L.), and its phytoremediation potential for Cd-contaminated soils[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 95(6): 784–789.
- [11] 李玲, 陈进红, 何秋伶, 等. 3 个陆地棉种质(系)重金属镉的积累、转运和富集特性分析[J]. 棉花学报, 2012, 24(6): 535–540.
- [12] CHEN H D, LI Y J, MA X F, et al. Analysis of potential strategies for cadmium stress tolerance revealed by transcriptome analysis of upland cotton[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 86.
- [13] 张宁, 许豆豆, 刘玉杰, 等. 夏播短季栽培对棉花成铃时空分布特征及产量构成的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(1): 15–22.
- [14] 郭利双, 陈浩东, 贺云新, 等. 镉高积累棉花品种水培筛选结果初报[J]. 中国棉花, 2015, 42(10): 14–16.
- [15] 郭利双, 何叔军, 李景龙. 镉污染区棉花替代种植技术研究[J]. 中国棉花, 2016, 43(11): 4–8.
- [16] 王丽, 邵代兴, 柴冠群, 等. 间作富集植物对辣椒 Cd 吸收累积的影响[J]. 北方园艺, 2022(11): 16–22.
- [17] WÓJCIK M, TUKIENDORF A. Cadmium uptake, localization and detoxification in *Zea mays*[J]. *Biologia Plantarum*, 2005, 49(2): 237–245.
- [18] 刘连涛, 陈静, 孙红春, 等. 镉胁迫对棉花幼苗生长效应及不同器官镉积累的影响[J]. 棉花学报, 2014, 26(5): 466–470.
- [19] 徐双娇, 方丹, 田新权, 等. 湖南省棉籽中重金属污染调查及评价[J]. 棉花学报, 2019, 31(1): 72–78.
- [20] 谢心. 锰处理下棉花幼苗对镉胁迫的生理响应及镉累积的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- [21] 湖南省农业农村厅. 棉花十技: 重金属污染耕地棉花种植关键技术[R/OL]. (2022–11–14)[2024–12–30]. https://agri.hunan.gov.cn/agri/ztlz/c102414/c102418/202212/t20221201_29143034.html.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正